

Comparación de estructuras de pavimento para el municipio de Busbanzá, Boyacá



Sebastián Martínez García

Octubre 2019.



Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia

Facultad de ingeniería

Ingeniería civil

Tunja

**Comparación de estructuras de pavimento para el municipio de Busbanzá,
Boyacá**

Sebastián Martínez García

Práctica con proyección empresarial

Director: Mag. Ing. Andrés Leonardo Silva Balaguera

Codirector: Ing. Albeiro Higuera Guarín

Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia

Facultad de ingeniería

Ingeniería civil

Tunja

2019

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Director: Mag. Ing. Andrés Leonardo Silva Balaguera

Firma del Codirector: Ing. Albeiro Higuera Guarín

“Si nos gusta lo que hacemos y lo realizamos dando nuestro mejor esfuerzo, entonces, realmente, estamos disfrutando de la vida, ciertamente, somos felices”

Copyright © 2019 por Sebastián Martínez García. Todos los derechos reservados.

Dedicatoria

Le dedicó este trabajo a mi familia, a mis padres Alejandro y Alicia, a mi hermana Gabriela, a mis amigos, a mis compañeros, en general, a todo aquel que aportó en mi crecimiento profesional, laboral, intelectual y personal en estos últimos 5 años de vida, asimismo, a todo aquel que lea, le interese este grandioso trabajo.

Agradecimientos

Palabras de agradecimientos abundan dentro de mí, primero, quiero agradecer a Dios y a la vida por darme la oportunidad de estudiar Ingeniería Civil, de conocer esta grandiosa universidad, de disfrutar estos 5 años de vida. También, quiero agradecer a mi Familia, ellos son la parte más importante en este proceso, gracias por el soporte brindado, por estar conmigo en momentos de duda y debilidad, por sus palabras de apoyo en todo momento. Quiero agradecer a la gloriosa Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, asimismo, a mis docentes, a mis compañeros del semillero SIGIV, que tanto me ayudaron en este trabajo, a mis amigos, que me apoyaron de la mejor manera, a todos ellos solo me queda por decir: Gracias.

Resumen

El siguiente proyecto estableció el diseño de pavimento para una vía terciaria en Busbanzá, Boyacá, mediante dos diseños estructurales de pavimento: el primero, diseño de pavimento flexible, planteado por la metodología AASHTO 1993 y el segundo, diseño de pavimento permeable, creado a través de la metodología propuesta por “The SuDS Manual”. Así mismo, se realizó un diseño alternativo para el mejoramiento del material de afirmado actual que posee la vía con una mezcla de arena asfalto estabilizada (asfaltita natural). Además, se compararon las estructuras de pavimento obtenidas por medio de un análisis de viabilidad del proyecto.

La información inicial para el diseño fue suministrada por la gobernación de Boyacá, sin embargo, el valor de % de CBR (*California Bearing Ratio*) de la subrasante fue verificado gracias a dos ensayos realizados: un ensayo en campo y un ensayo en laboratorio. El ensayo en campo, se hizo a través del Penetrometro dinámico de cono cada 100 m siguiendo la norma invias INV E-172-13. El ensayo en laboratorio, se hizo mediante el ensayo de CBR de laboratorio según la norma invias INV E-148-13.

Palabras Clave

Vías de comunicación, Vías terciarias, Pavimento Flexible, Pavimento Poroso.

Abstract

The next project searched to establish the pavement's skeleton in a tertiary road in Busbanzá, Boyacá, by means of two skeleton design: the first one, is a flexible pavement set out by AASHTO 1993 methodology and the second one, is a pervious pavement set out by The SuDS Manual. Likewise, the project established improve road with nature asphalt, also, the different skeleton pavement was comparing by feasibility analysis.

In the beginning, Boyacá's Government gave the initial information for the pavement's skeleton design, however, the CBR value (*California Bearing Ratio*) was checking by the author in two ways. The first way was a research in the place of research, the second way was a laboratory research. In the place of research was doing across the Dynamic Cone Penetrometer each 100 meter according to law INV E-172-13. The next one, laboratory research, was doing across the CBR in laboratory depending on the law INV E-148-13.

Keywords

Communication roads, Tertiary roads, Flexible pavements, Pervious pavements.

Tabla de contenido

Resumen.....	7
Abstract.....	8
Ficha técnica práctica con proyección empresarial	16
Glosario técnico.....	17
1. Capítulo 1. Introducción e información general	20
1.1. Planteamiento del problema de estudio	21
1.2. Objetivos.....	22
1.2.1. Objetivo General.....	22
1.2.2. Objetivo Específico.....	22
1.3. Alcance y limitaciones	23
1.4. Justificación y pertinencia.....	24
2. Capítulo 2. Diseño metodológico.....	25
2.1. Definición de epistemológica.....	25
2.2. Estrategias metodológicas.....	25
2.2.1. Variables de diseño número 1 (Método AASHTO 1993).....	25
2.2.2. Variables de diseño número 2 (The SuDS Manual).....	26
2.3. Procesos metodológicos.....	27
2.4. Presentación de etapas	29
3. Capítulo 3. Bases teóricas.....	31
3.1. Marco teórico	31
3.1.1. Antecedentes históricos.....	31
3.1.2. Pavimento.....	33
3.1.3. Pavimento Flexible.....	35
3.1.4. Pavimento permeable.....	37
3.2. Estado del arte.....	41
3.2.1. Antecedentes.....	41
4. Capítulo 4. Estudios de la zona	50
4.1. Estudios existentes	50
4.1.1. Estudio Topográfico	50
4.1.2. Diseño Geométrico de la Vía.....	52
4.1.3. Estudio de Suelos de la zona.....	60
4.1.4. Estudio Hidrológico de la zona.....	62

4.2.	Estudios realizados.....	64
4.2.1.	Inventario Vial.....	64
4.2.2.	Estudio de Tránsito.....	67
4.2.3.	Ensayo Penetrómetro Dinámico de Cono.....	68
4.2.4.	Ensayo de CBR en Laboratorio.....	75
4.2.5.	Comparación entre el PDC y el CBR de laboratorio.....	85
5.	Capítulo 5. Procedimiento de diseño estructuras de pavimento.....	86
5.1.	Procedimiento de diseño método ASHTOO 93.....	86
5.2.	Procedimiento de diseño método The SuDS Manual.....	90
5.2.1.	Diseño estructural del pavimento poroso.....	90
5.2.2.	Diseño hidráulico del pavimento poroso.....	92
5.3.	Procedimiento para el mejoramiento con arena asfalto estabilizada.....	98
6.	Capítulo 6. Resultados obtenidos.....	100
6.1.	Metodología de diseño AASHTO 1993.....	100
6.1.1.	Materiales de Construcción.....	102
6.2.	Método de diseño “The SuDS Manual”.....	102
6.2.1.	Materiales de Construcción.....	103
6.3.	Espesores de capas obtenidos por el mejoramiento con arena asfalto estabilizada.....	104
6.3.1.	Materiales de construcción.....	105
7.	Capítulo 7. Análisis de viabilidad de diseños.....	107
7.1.	Evaluación de costos.....	107
7.1.1.	Diseño AASHTO 1993.....	107
7.1.2.	Diseño The SuDS Manual.....	108
7.1.3.	Mejoramiento con Arena Asfalto Estabilizada.....	109
7.2.	Evaluación de deformación de cada estructura.....	110
7.2.1.	Evaluación de deformación por el Software WinDepav.....	110
7.2.2.	Evaluación de deformación por el Modelo de WinJulea.....	119
7.3.	Análisis del autor y recomendación de diseño para la zona.....	123
	Conclusiones.....	124
	Recomendaciones.....	125
	Referencias bibliográficas.....	126
	Anexos.....	132
	Vita.....	133

Lista de tablas

Tabla 1: Variables independientes AASHTO 1993.....	25
Tabla 2: Variables Dependientes AASHTO 1993.....	26
Tabla 3: Variables Independientes The SuDS Manual.....	26
Tabla 4: Variables Dependientes The SuDS Manual.....	26
Tabla 5: Espesores mínimos sugeridos AASHTO 1993.....	37
Tabla 6: Parámetros del Diseño Geométricos.....	52
Tabla 7: Clasificación de la vía según el terreno.....	54
Tabla 8: Valores de la velocidad de diseño para un tramo homogéneo.....	54
Tabla 9: Valores de máxima pendiente de acuerdo con la clasificación vial.....	56
Tabla 10: %CBR para la Abscisa K0+500 T1.....	71
Tabla 11: %CBR para la Abscisa K0+500 T2.....	71
Tabla 12: Resumen de %CBR Diseño Tramo 1: Pueblo Viejo.....	73
Tabla 13: Análisis estadístico de %CBR Diseño Tramo 1: Pueblo Viejo.....	73
Tabla 14: Resumen de %CBR Diseño Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.....	74
Tabla 15: Análisis estadístico salón Comunal Cusagota.....	74
Tabla 16: Resumen de %CBR Diseño Tramo especial.....	75
Tabla 17: Análisis estadístico de %CBR Diseño Tramo especial.....	75
Tabla 18: Resumen CBR Tramo 1: Pueblo viejo.....	82
Tabla 19: Resumen CBR Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.....	83
Tabla 20: Resumen CBR material en afirmado.....	84
Tabla 21: Comparación de valores obtenidos de % CBR.....	85
Tabla 22: Coeficientes estructurales del diseño (a).....	88
Tabla 23: Coeficientes de drenaje (mi).....	90
Tabla 24: Tabla 2.1. Niveles de Tránsito.....	99
Tabla 25: Tabla 4.4. Categorías de la Sub Rasante.....	99
Tabla 26: Valores mínimos exigidos por la norma INVIAS 442P.....	104
Tabla 27: Espesores mínimos de la capa de rodadura.....	104
Tabla 28: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 1: Pueblo viejo.....	107
Tabla 29: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota....	107
Tabla 30: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 3: Tramo especial.....	108

Tabla 31:Evaluación de costos de los materiales del Tramo 1: Pueblo viejo.	108
Tabla 32:Evaluación de costos de los materiales del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota....	108
Tabla 33:Evaluación de costos de los materiales del Tramo 3: Tramo especial.	109
Tabla 34:Evaluación de costos de los materiales del Tramo 1: Pueblo viejo.	109
Tabla 35:Evaluación de costos de los materiales del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota....	109
Tabla 36:Evaluación de costos de los materiales del Tramo 3: Tramo especial.	110
Tabla 37:Resultados obtenidos del modelo de evaluación AASHTO 1993.	120
Tabla 38:Resultados obtenidos del modelo de evaluación AASHTO 1993.	120
Tabla 39:Resultados obtenidos del modelo de evaluación The SuDS Manual.	122
Tabla 40:Resultados obtenidos del modelo de evaluación The SuDS Manual.	122

Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de flujo del diseño metodológico.....	30
Figura 2:Estructura típica de un pavimento. (Becerra Salas, 2012).	33
Figura 3:Estructura típica de un Pavimento Flexible. (Dietz, 2017).	36
Figura 4:Estructura típica de un pavimento flexible: zonas de riego y espesores recomendados.	36
Figura 5:Estructura típica de un pavimento permeable.(Motos, n.d.).	38
Figura 6:Mezcla asfáltica drenante.(Flexible Pavements of Ohio, n.d.).....	38
Figura 7:Sistema de infiltración total en la estructura de pavimento permeable-Tipo A.(Kellagher et al., 2015).	39
Figura 8:Sistemas de infiltración parcial en la estructura de pavimento permeable-Tipo B.(Kellagher et al., 2015).....	40
Figura 9:Localización del Tramo 1: Pueblo Viejo.(Inc, 2019).....	51
Figura 10:Localización del Tramo 2: Salón comunal de Cusagota.(Inc, 2019)	51
Figura 11:T1.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+000 - K0+440.(Autodesk Inc., 2019b)	58
Figura 12:T1.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+441 - K1+ 009.98. (Autodesk Inc., 2019b)..	58
Figura 13:T2.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+000 - K0+500.(Autodesk Inc., 2019b).....	59
Figura 14:T2.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+500 - K1+014.35(Autodesk Inc., 2019b).....	59
Figura 15:Localización de los sondeos, estudio de suelos.(Autodesk Inc., 2019a).....	60
Figura 16:Perfil estratigráfico sondeo 1.....	60
Figura 17:Perfil estratigráfico sondeo 2.....	60
Figura 18:Perfil estratigráfico sondeo 3.....	61
Figura 19:Perfil estratigráfico sondeo 4.....	61
Figura 20:Perfil estratigráfico sondeo 5.....	61
Figura 21:Perfil estratigráfico sondeo 6.....	61
Figura 22:Perfil estratigráfico sondeo 7.....	61
Figura 23:Perfil estratigráfico sondeo 8.....	61
Figura 24:Dimensiones de cunetas para la zona de estudio.....	64
Figura 25: Ruta Inventario vial.	65
Figura 26:Tipo y Estado de superficie Abs K0+000.	66
Figura 27:Tipo y Estado de superficie Abs K0+600.	66
Figura 28:Tipo y Estado de superficie Abs K2+400.	66

Figura 29:Tipo y Estado de superficie Abs K4+950.	66
Figura 30:Alcantarilla en K1+950 -1.....	67
Figura 31:Alcantarilla en K1+950 -2.....	67
Figura 32:Cunetas en Tierra Abscisa K0+500.....	67
Figura 33:Cunetas en Tierra Abscisa K1+400.....	67
Figura 34: Penetrómetro dinámico de Cono.	68
Figura 35:Penetrmetro Dinámico de Cono.	68
Figura 36:Curva de evolución de la penetración Abs K0+500 T1.	70
Figura 37:Curva de evolución de la penetración Abs K0+500 T2.	70
Figura 38:Apiques viales.	76
Figura 39:Apiques viales.	76
Figura 40: Capa de afirmado tramo 1: Pueblo viejo.....	76
Figura 41:Capa de afirmado tramo 2. Salón comunal Cusagota.	76
Figura 42:Procedimiento de tamizado del Material, Tamiz 3/4".	77
Figura 43:Separación del material por tramos, Peso 5 kg.	77
Figura 44:Procedo de mezcla del material con la humedad requerida.	78
Figura 45:Proceso de compactación: 5 capas, 56 golpes por capa.	78
Figura 46:Curva de Compactación tramo 1: Pueblo viejo.....	78
Figura 47:Curva de Compactación tramo 2: Salón comunal Cusagota.	79
Figura 48:Curva de Compactación material en afirmado.	79
Figura 49:Procedimiento de tamizado del material: Tamiz 3/4".	80
Figura 50: Separación del material, peso 5 Kg.....	80
Figura 51:Proceso de engrase de los moldes.	80
Figura 52:Procedo de mezcla del material con la humedad requerida.	80
Figura 53:Proceso de compactación: 5 capas.	80
Figura 54:Sobrecarga sobre la muestra.....	80
Figura 55:Proceso de sumergido de las muestras.	81
Figura 56:Montaje de falla del molde.....	81
Figura 57:Curva penetración Vs Esfuerzo Corregida Tramo 1:Pueblo viejo.....	81
Figura 58:Curva de CBR Tramo 1: Pueblo viejo.....	82
Figura 59:Curva penetración Vs Esfuerzo Corregida Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.	82
Figura 60:Curva de CBR Tramo 2: Salón comunal de Cusagota.....	83

Figura 61:Curva penetración Vs Esfuerzo Corregida Material en afirmado.	83
Figura 62:Curva de CBR material en afirmado.	84
Figura 63:Sección perpendicular al eje de la vía.(Smith, 2001).	91
Figura 64:Sálida de flujo y capacidad de almacenaje TIPO C. (Interpave, 2010). <i>Pag 27.</i>	96
Figura 65:Separación tubos para salida del flujo (Kellagher et al., 2015).	96
Figura 66:Estructuras de control de flujo para superficies inclinadas.(Kellagher et al., 2015)..	97
Figura 67:Diseño final obtenido por la metodología AASHTO 1993.	102
Figura 68:Diseño final obtenido por el Método "The SuDS Manual"	103
Figura 69:Mejoramiento con Arena asfalto estabilizado.	106
Figura 70:Mejoramiento con Arena asfalto estabilizado.	106
Figura 71:Modelo de evaluación AASHTO 1993. (Marela, 2018).	112
Figura 72:Resultados obtenidos del modelo de evaluación AASHTO 1993. (Marela, 2018)...	112
Figura 73:Gráfico resultante para SIGMA Z.(Marela, 2018).	114
Figura 74:Gráfico resultante para SIGMA T.(Marela, 2018).	114
Figura 75:Gráfico resultante para EPZILON Z.(Marela, 2018).	115
Figura 76:Gráfico resultante para EPZILON T.(Marela, 2018).	115
Figura 77:Modelo de evaluación The SuDS Manual. (Marela, 2018).	116
Figura 78:Resultados obtenidos del modelo de evaluación The SuDS Manual. (Marela, 2018).	117
Figura 79:Gráfico resultante para SIGMA Z.(Marela, 2018).	118
Figura 80:Gráfico resultante para SIGMA T.(Marela, 2018).	118
Figura 81:Gráfico resultante para EPZILON Z.(Marela, 2018).	119
Figura 82:Gráfico resultante para EPZILON T.(Marela, 2018).	119
Figura 83:Modelo de evaluación AASHTO 1993.(ERDC, 2002).	120
Figura 84:Modelo de evaluación The SuDS Manual.(ERDC, 2002).	121

Ficha técnica práctica con proyección empresarial

Práctica con Proyección Empresarial			
Ítem	Descripción		
País	Colombia-Departamento de Boyacá		
Institución	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia		
Estudiante	SEBASTIÁN MARTÍNEZ GARCÍA		
Identificación	CC. 1'049.646.672	Teléfono	3112425798
Nacionalidad	Colombiano	Ciudad	Tunja
EMAIL	Sebastianmartinezgarcia766@gmail.com		
Programa del Estudiante	Ingeniería Civil		
Corporación/Empresa	Gobernación de Boyacá		
Periodo de la Práctica	16 Semanas		
Tema de Interés de la Práctica	Infraestructura Vial		
Tutor	Mag. Ing. Andrés Leonardo Silva Balaguera		
EMAIL	andres.silva@uptc.edu.co		
Institución	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia		
Tutor	Ing. Albeiro Higuera Guarín		
EMAIL	algest2004@yahoo.es		
Institución	Gobernación de Boyacá		
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO			
<p>El proyecto, se localiza en el departamento de Boyacá, municipio de BUSBANZÁ. El municipio de Busbanzá está situado en el centro del país, sobre la cordillera oriental de los Andes. A 25 km del Municipio de Sogamoso, el municipio de Bunsbanzá cuenta con un área de 22.5 km², así mismo, la altitud de la cabecera municipal (metros sobre el nivel del mar) es de 2472 m.s.n.m. con una temperatura media: 15.2°C°. Para el desarrollo del proyecto, se seleccionaron dos tramos, los cuales, están ubicados en el sector comprendido entre los sectores de pueblo viejo y salón comunal de Cusagota, comprende una longitud de 2 kilómetros y busca:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Proponer una alternativa del diseño estructural para pavimentos flexibles, mediante, el uso del método de la AASHTO 1993. • Proponer una alternativa del diseño estructural para pavimentos permeables, mediante, el método THE SUDS MANUAL. • Analizar la viabilidad comparando el diseño estructural por el método de la AASHTO 1993 y el método SUDS Manual. 			

Glosario técnico

Agregados Pétreos: son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos.

Alcantarilla: tipo de obra de cruce o de drenaje transversal, que tienen por objeto dar paso rápido al agua que, por no poder desviarse en otra forma, tenga que cruzar de un lado a otro del camino.

Base: es un material granular grueso, el cuál dentro de la estructura de pavimentos, se encuentra entre el asfalto o el concreto y la sub-base granular.

CGA: Sub base granular sin materiales finos.

Concreto: es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade áridos (agregado), agua y aditivos específicos.

Cunetas: zanja a los lados de un camino o vía de circulación para recoger el agua de la lluvia.

Deslizamientos: es un tipo de corrimiento o movimiento en masa de tierra, provocado por la inestabilidad de un talud.

Escorrentía: agua de lluvia que circula libremente sobre la superficie de un terreno.

Evapotranspiración: cantidad de agua del suelo que vuelve a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y de la transpiración de las plantas.

Fatiga de materiales: se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas.

HBCGA: se refiere al límite hidráulico del agregado grueso.

Infiltración: penetración del agua en el suelo.

Llenante mineral: partículas sólidas de procedencia mineral, menores de 75 μm , que se incorporan en una mezcla de agregados para completar su granulometría y mejorar su comportamiento.

Material Bituminoso: son sustancias de color negro, sólidas o viscosas, dúctiles, que se ablandan por el calor y comprenden aquellos cuyo origen son los crudos petrolíferos como también los obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso.

Material de Afirmando: es una mezcla de tres tamaos o tipos de **material:** piedra, arena y finos o arcilla.

Mezcla Asfáltica: consiste en un agregado de asfalto y materiales minerales (mezcla de varios tamaños de áridos y finos) que se mezclan juntos, se extienden en capas y se compactan.

Mezcla Asfáltica Natural: es un material compuesto esencialmente de arenas finas y conglomerado que están impregnadas de asfalto, cuyo proceso se ha realizado en el interior de los depósitos naturales.

Módulo de elasticidad: es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

Pavimento: conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados.

Pavimento Flexible: se denomina Pavimento flexible a aquel cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él.

Pavimento Permeable: son pavimentos, continuos o modulares, que dejan pasar el agua a través de su estructura.

Perfil Estratigráfico: se realizan a partir de datos de perforaciones o de cortes naturales, con los cuales, se puede reconstruir la estratigrafía del subsuelo.

Permeabilidad: es la capacidad que tiene un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

Resistencia a compresión: esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.

Resistencia a tensión: esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de alargamiento.

Sub-base: es un material granular grueso compuesto por triturados, arena y material grueso.

Usos y aplicaciones: se emplea como capa en la instalación de pavimentos asfálticos y de concreto.

Sub-rasante: se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento.

SUDS: Sistemas de Drenaje Sostenible.

Tramo Homogéneo: longitud del trazado de la carretera al que por las características topográficas se le asigna una determinada Velocidad de Diseño (VTR).

Capítulo 1.

Introducción e información general

Colombia es un país en vía de desarrollo con índices de crecimiento muy alto en sectores como la construcción y la industria, sin embargo, el país se ha visto afectado por la falta de vías de comunicación y el retraso en las mismas existentes. Para impulsar el crecimiento económico del país, el Gobierno Nacional ha implementado diferentes estrategias que promueven el crecimiento del país; una de ellas, es el mejoramiento de la infraestructura vial sobre todo el territorio nacional.

En Boyacá, el gobierno departamental se ha encargado de mejorar las vías de comunicación terciarias, ya que, de esta manera se puede mejorar la calidad de vida de los habitantes del departamento y se mejoran los medios de comunicación entre veredas del departamento de Boyacá.

A 25 km del Municipio de Sogamoso y con una altitud media de 2472 m.s.n.m. se encuentra ubicado el municipio de Busbanzá. Este es un municipio que tiene jurisdicción en un área de 22.5 km² y presenta una temperatura media de 15.2 C°.

En Busbanzá, las vías de comunicación terciarias en su mayoría se encuentran en material de afirmado, por lo cual, el gobierno departamental se ha interesado en el mejoramiento y actualización de las vías terciarias de Busbanzá. Sin embargo, para mejorar las estructuras viales es necesario realizar y seleccionar el diseño óptimo de la estructura de pavimento de la superficie.

La estructura de pavimento, es un conjunto de capas compuestas por un material seleccionado que reciben de forma directa las cargas de tránsito y las transmiten de forma disipada a los estratos inferiores. Existen diferentes tipos de pavimento, entre ellos, el pavimento flexible y el pavimento permeable.

El pavimento flexible, es una estructura de pavimento que logra flexionarse de acuerdo a las cargas de tránsito. En Colombia, es el tipo de estructura más utilizado en las vías de comunicación terrestre.

Por otro lado, el pavimento permeable, es una tecnología nueva, amigable con el medio ambiente y que busca suplir las necesidades de tránsito de las vías del país mitigando algunos de los daños ambientales causados en la operación de la vía.

El siguiente proyecto busca diseñar y comparar los dos tipos de estructuras del pavimento y determinar la estructura de pavimento más óptima para la vía terciaria ubicada en Busbanzá, Boyacá. Asimismo, plantear un mejoramiento vial con Arena Asfalto Estabilizada (Asfaltita Natural) sugerido por la Gobernación de Boyacá.

1.1. Planteamiento del problema de estudio

Las vías de comunicación terrestres siempre han sido determinantes en el desarrollo y progreso de una comunidad, facilitan el transporte, mejoran, en general, la calidad de vida del sector en donde se encuentre. En los últimos años, el municipio de Busbanzá, Boyacá se ha interesado en el mejoramiento, mantenimiento y estabilización de sus vías. En la zona rural del municipio, en la vía que conduce a la vereda Cusagota, sectores de Pueblo Viejo y Salón Comunal, actualmente existe un corredor vial (con una longitud de 2.0 kilómetros aproximadamente) que presenta problemas de seguridad vial, ya que, el ancho de la calzada no

cumple con los parámetros mínimos establecidos en el manual geométrico de diseño de vías del año 2008 (el ancho de calzada de este tramo se encuentra en el rango de: 2 a 5 m), así mismo, la capa de rodadura se encuentra en afirmado, por consiguiente, es necesario hacer el mantenimiento de la vía sea de manera frecuente, en consecuencia, los costos de manteniendo de la misma se ven incrementados.

No obstante, el municipio ha venido realizando estudios en el tramo enunciado, a manera de ejemplo, se cuenta con el diseño geométrico de la vía, en donde, se estableció un ancho de calzada de 6 m y un estudio de suelos de la zona, entre otros. Sin embargo, los problemas de materiales en la capa de rodadura en la vía no han sido resueltos; el municipio no cuenta con un estudio en donde se establezca un diseño de la estructura de pavimento determinante para dar solución al problema. Por lo cual, el siguiente estudio busca establecer:

¿Cuál es el diseño de pavimento más óptimo, que solucione el problema del material de la capa de rodadura sobre los tramos de vía ubicados en el sector comprendido entre los sectores de pueblo viejo y salón comunal de Cusagota?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Analizar el diseño estructural de pavimento en dos sectores específicos de la vía comprendida entre pueblo viejo y el salón comunal de Cusagota del Municipio de Busbanzá-Boyacá.

1.2.2. Objetivo Específico.

- ✓ Proponer una alternativa del diseño estructural para pavimentos flexibles, mediante, el uso del método de la AASHTO 1993.
- ✓ Proponer una alternativa del diseño estructural para pavimentos permeables (Hormigón Poroso), mediante, el método The SuDS Manual.
- ✓ Analizar la viabilidad comparando el diseño estructural por el método de la AASHTO 1993 y el Método The SuDS Manual.

1.3. Alcance y limitaciones

En este estudio se realizará un diseño de pavimento flexible y un diseño de pavimento permeable cumpliendo con los requerimientos estructurales y drenantes propios de la estructura. El estudio se realizará en dos tramos de vía que conducen a la vereda Cusagota desde el municipio de Busbanzá, Boyacá, en los sectores de Pueblo Viejo y el Salón Comunal.

El proyecto utilizará datos recolectados por la Gobernación de Boyacá, además, de la recopilación de otras fuentes y se llevará acabo utilizando dos metodologías de diseño:

- La AASHTO 1993, está basada en el número vehículos que transcurren la vía y en el módulo resiliente de la subrasante (Higuera Sandoval, 2010).
- El método The SuDS Manual, en donde, las infiltraciones de la zona es el parámetro básico de estudio (Kellagher et al., 2015).

Mediante este trabajo, se brindará un diseño de pavimento no convencional, seguro y amigable con el medio ambiente, a través del método The SuDS Manual, con el fin de, aprovechar el recurso “agua” precipitado en la zona y mostrar los beneficios de utilizar nuevas tecnologías. También, se brindará una alternativa de diseño convencional, a través del método de

la AASHTO 1993, para determinar la mejor alternativa de construcción mediante un análisis comparativo entre ellas.

1.4. Justificación y pertinencia

Con el siguiente proyecto, se busca proponer una solución al problema de material de rodadura identificado anteriormente, además, se busca fortificar la seguridad al transitar el corredor vial, a través de dos diferentes metodologías de diseño, y así mismo, proponer un diseño de pavimento no convencional y poco estudiado en Colombia (Diseño de pavimento permeable).

La metodología AASHTO 1993 usada en pavimento flexible, se expone como solución tradicional y confiable usada en el diseño de muchas vías de Colombia(Alvarez & De, 2008). Por otro lado, el pavimento permeable es una solución no convencional que facilita la remoción y conducción del agua sobre la vía(Kellagher et al., 2015), además, enriquece acuíferos, los niveles de deflexión son más tardías con respecto a los pavimentos convencionales, incrementa la seguridad de la vía, entre otros beneficios.

En Colombia, el pavimento permeable es un tipo de pavimento del cual se conoce muy poco, por lo tanto, no se ha implementado en territorio nacional. El método The SuDS Manual, es un método publicado en Reino Unido y avalado por “*Department for environment and Food & Rural Affairs*” y “*Environment Agency*” de ese mismo país, por ende, se considera un método confiable con el cual se hará el diseño posteriormente.

Capítulo 2.

Diseño metodológico

2.1. Definición de epistemológica

En el presente proyecto, se aplicará una *metodología mixta*, puesto que, en este proyecto se presentan valores e indicadores que se centran en los aspectos susceptibles de cuantificación, así mismo, también se hará la recogida de información basada en la observación de comportamientos naturales y respuestas abiertas para la posterior interpretación de significados.

2.2. Estrategias metodológicas

Se analizarán dos diseños estructurales de pavimento en la vía comprendida entre pueblo viejo y el salón comunal de Cusagota del municipio de Busbanzá-Boyacá.

2.2.1. Variables de diseño número 1 (Método AASHTO 1993).

Se realizará por el método AASHTO 1993 para el diseño de pavimentos flexible.

Tabla 1: Variables independientes AASHTO 1993.

Variable	Indicador / Sub Indicador	Unidad de Medida	Valoración	
				Millones
Variable Independiente Variables de Diseño	Tránsito de la vía	Ejes equivalentes de 80 kN.	NT1	$N_{80} \leq 0.5$
			NT2	$0.5 < N_{80} \leq 5.0$
			NT3	$N_{80} > 5.0$
	Modúlo Resiliente	lb/in ²	-	
Clima		-	Variable subjetica que depende del análisis del observador.	

Fuente: Dibujada por el Autor en: EXCEL 2019.

Tabla 2: Variables Dependientes AASHTO 1993.

Variable	Indicador / Sub Indicador	Unidad de Medida	Valoración	
			MÁXIMO	MÍNIMO
Variable Dependiente	SUB-BASE	cm	20	10
Variables Estructurales (Espesor de capa)	BASE	cm	20	10
	CAPA DE RODADURA	cm	11	3

Fuente: Dibujada por el Autor en: EXCEL 2019.

NOTA: Los valores de espesor Máximo y Mínimos para Sub-base y Base fueron obtenidos de las Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras del INVIAS(Instituto Nacional de Vías & Transporte, 2012). En el caso de la capa de rodadura, los valores de espesores los indica específicamente el método de diseño utilizado(Bester, Kruger, & Hinks, 2004).

2.2.2. Variables de diseño número 2 (The SuDS Manual).

Se realizará por el método propuesto por el Manual SuDS para el diseño de pavimento permeable.

Tabla 3: Variables Independientes The SuDS Manual.

Variable	Indicador / Sub Indicador	Unidad de Medida
Variable Independiente Variables de Diseño	CBR	%
	Tasa de infiltración del suelo	mm/h

Fuente: Dibujada por el Autor en: EXCEL 2019.

Tabla 4: Variables Dependientes The SuDS Manual.

Variable	Indicador / Sub Indicador	Unidad de Medida	Valoración	
			MÁXIMO	MÍNIMO
Variable Dependiente	SUB-BASE	cm	20	10
Variables Estructurales (Espesor de capa)	BASE	cm	20	10
	CAPA DE RODADURA	cm	-	-

Fuente: Dibujada por el Autor en: EXCEL 2019.

NOTA: Los valores de espesor Máximo y Mínimos para Sub-base y Base fueron obtenidos de las Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras del INVIAS(Instituto Nacional de Vías & Transporte, 2012). En el caso de la capa de rodadura, los valores de espesores los indica específicamente el método de diseño utilizado.

2.3. Procesos metodológicos

En el diseño de pavimentos flexibles, el método de diseño AASHTO 93, está basado primordialmente en encontrar el “tránsito equivalente (N)” (es el número acumulado de ejes equivalentes en toneladas durante un periodo de diseño) en la vía, con el fin de que el pavimento flexible soporte el nivel de carga solicitado y se realiza de la siguiente forma(Bester et al., 2004):

- I. Se calcula el “N” con el método conocido como W18Kips. Se verifica que los valores de módulos sean iguales o mayores con respecto a los valores críticos en condiciones de temperatura y humedad crítica de la zona.
- II. Se extrae el valor de módulo resiliente de diseño de la subrasante de los estudios de suelos, si solo se cuenta con ensayos de CBR se pueden utilizar expresiones empíricas para encontrar el módulo correspondiente.
- III. Se determina a través de los ábacos brindados por el método los espesores de cada capa.

Por otro lado, The SuDS Manual es un método fundamentado en la infiltración del suelo y en elegir un “tipo” de sistema de infiltración (TIPO A- TIPO B- TIPO C). Sin embargo, una de las mayores incertidumbres para el diseño la encontramos en el coeficiente de infiltración del suelo. Esto debido a que este coeficiente cambia con el tiempo, no obstante, los valores del coeficiente de infiltración que se utilizarán serán los determinados en el estudio hidrológico de la zona facilitado por la Gobernación de Boyacá. Aun así, se debe introducir un factor de seguridad

en el procedimiento de diseño para reducir el valor del coeficiente de infiltración. El método The SuDS Manual, está fundamentado en la precipitación de lluvia de la zona medida en milímetros (Kellagher et al., 2015). La metodología de diseño es la siguiente:

a) Proceso de inicio:

i. Determinar los valores iniciales del terreno:

- Infiltración del suelo
- Volumen permitido de descarga de agua desde la superficie del sitio.
- Rata de descarga de agua en la superficie
- Infiltración cerca de Construcciones

b) Tipo de sistema:

i. Determinar las condiciones del sitio y seleccionar el tipo de sistema A, B o C.

c) Diseño Estructural:

- i. Determinar el valor de % CBR en la sub rasante.
- ii. Seleccionar categoría de carga de la tabla 20.5 The SuDS Manual.
- iii. Seleccionar la capa de espesor de pavimento de las tablas 20.7 o 20.10 The SuDS Manual.
- iv. Determinar el espesor total de la capa estructural del pavimento.
- v. Determinar el espesor de la base y sub-base permeable.

d) Diseño Hidráulico:

- i. Determinar la porosidad de las capas permeables
- ii. Determinar el volumen de almacenamiento hidráulico
- iii. Determinar la profundidad de la sub-base permeable requerida por el volumen de almacenamiento hidráulico tomando en cuenta la permeabilidad de la sub-base

- iv. Comparar el diseño hidráulico con el espesor estructural impermeable
- v. Hacer chequeos correspondientes.

Para el desarrollo de ambas metodologías se cuenta con la información que posee la Gobernación de Boyacá de estudios realizados en la zona. Por su parte, el análisis comparativo entre diseños se realizará de acuerdo a:

Periodo de diseño: es el tiempo que transcurre desde la iniciación del servicio, hasta que, por falta de capacidad o desuso, sobrepasan las condiciones establecidas en el proyecto.

Normalmente, el período de diseño se mide en años.

- **Análisis de Costos:** Se obtendrán las cantidades de obra. La gobernación de Boyacá, tiene una base de datos en donde se encuentran los precios unitarios de los materiales de construcción. Para el desarrollo de este trabajo, se tendrán en cuenta, el último informe de precios unitarios disponible hasta la fecha.
- **Funcionalidad:** Tendiendo en cuenta que, uno de los diseños es un pavimento drenante, se verificará la funcionalidad del mismo sobre la zona de estudio, con base en la precipitación anual, el análisis de costos, el sistema de drenaje de agua, el índice de infiltración del suelo.
- **Estudio de Esfuerzo-Deformación:** Para hacer un análisis comparativo entre las estructuras, se analizarán, los esfuerzos que soportaría la subrasante para cada diseño. Para la obtención de estos parámetros se utilizará la ayuda de dos Software de diseño: Winjulea y Depav.

2.4. Presentación de etapas

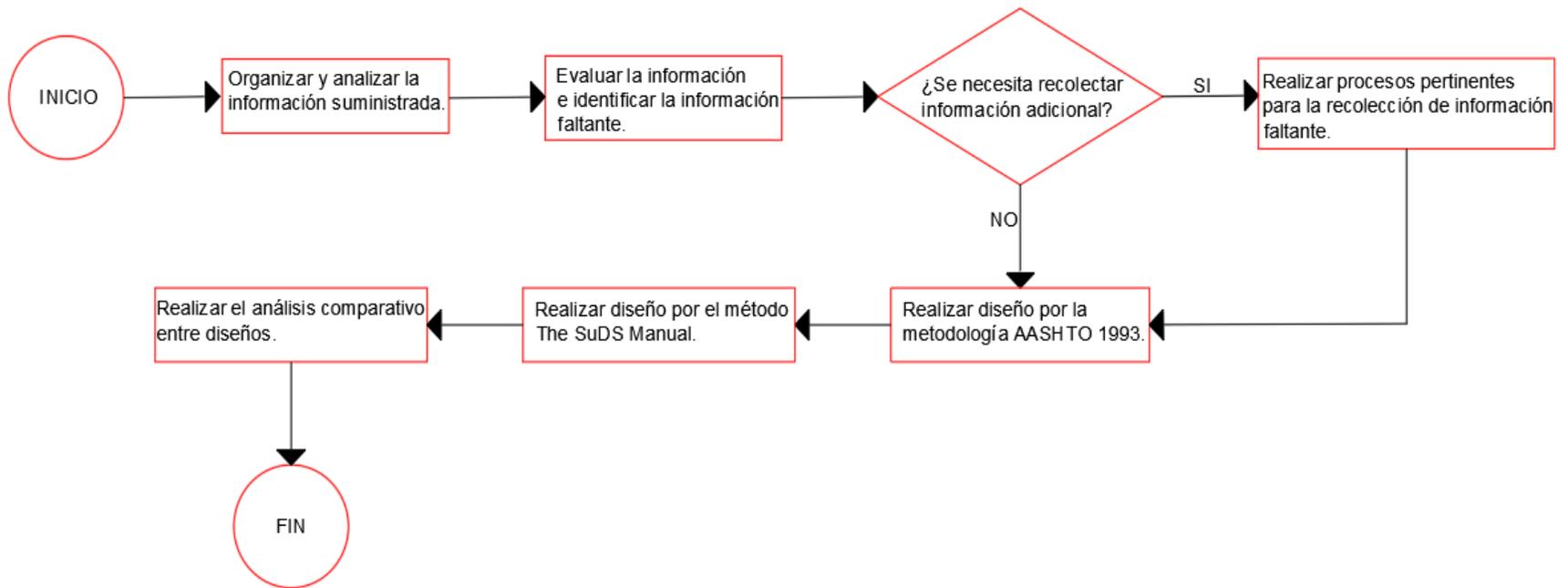


Figura 1: Diagrama de flujo del diseño metodológico.

Capítulo 3.

Bases teóricas

3.1. Marco teórico

3.1.1. Antecedentes históricos.

Las vías de comunicación han sido usadas por las civilizaciones desde tiempos inmemoriales. Se cree que el primer material usado para la pavimentación de caminos fue la Piedra asentada sobre capas de arcilla en los años 2300 A.C por el imperio Hitita Asiático. Sin embargo, las excavaciones arqueológicas han mostrado que hacía los años 3800 A.C en la Antigua Mesopotamia utilizaban asfalto natural para diferentes obras ingenieriles(Labrador Rama, 2006).

Los caminos y las vías de comunicación tomaron un importante auge con la llegada del Imperio Romano, era tan grande la composición de las famosas vías romanas cuya dureza no ha cedido enteramente a una duración de quince siglos. Las vías del imperio Romano estaban afirmadas o explanadas porque así lograban que todas sus comunidades estuvieran fácilmente comunicadas. Primero abrían una caja llamada “*gremium*”, en donde, colocaban una capa de rocas llamada “*statumen*” que algunas veces las unían con mortero. Luego, agregaban una capa de hormigón compuesto por una mezcla de ladrillos y rocas machacadas denominada “*rudetaria*”, a continuación, una capa de arena, cal y tierra arcillosa, la cual, ellos llamaban “*nucleus*” y finalmente, agregaban una capa de roca irregular denominada “*pavimentum*” que asentaban con mortero (Martin Tejeda, 2014).

Luego de la caída del imperio romano, la iglesia se interesó en mantener los caminos y la comunicación entre los pueblos, luego, en España, Carlos III comienza a mejorar la red viaria de su nación, mientras que en Inglaterra la Ley de pavimentación de Westminster, estableció un nuevo cuerpo funcional responsable de las mejoras de las calles, llamado “Comisionado de pavimentación”.(Labrador Rama, 2006)

En Colombia, muchos de los tramos de carretera de hoy en día se originaron y se trazaron sobre los antiguos caminos Indígenas(Hoyos, 2011).Y no fue sino hasta el siglo XIX que se registró el primer pavimento construido en las calles del centro de Bogotá y en el parque de la Plaza Bolívar entre 1890 y 1893, “pero la poca técnica empleada en la obtención del asfalto, la falta de fundación del pavimento, el uso de cascajo en lugar de arena, entre otras circunstancias, provocaron inconformidad con la obra”(Cipriano, 2014).Sin embargo, está no fue el primer acercamiento a los caminos que tenemos hoy en día, ya que, en el año de 1864 se creó la primera ley considerada como el primer paso a la estructuración de un plan vial integral llamada la ley del 28 de mayo de 1864 complementada con la ley 52 de 1872(Baquero, 2014).

No fue hasta 1905, con la invención del Ministerio de Obras Públicas y Transporte por parte del Gobierno de Rafael Reyes, que se comienzan a dar los verdaderos cambios para las vías Nacionales(Alvear Sanín, 2018). Y así, entre 1916 y 1930 se expidieron 104 leyes modificatorias sobre carreteras y se construyeron 9.300 km de vías sin un plan sólido y sin apego a las técnicas de construcción. Luego, en 1950 por sugerencia del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento –BIRF- se crea el Comité de Desarrollo que en conjunto con la Misión Currie recomiendan un plan vial orientado a construir 5.261 km de vías en tres años(Pedro et al., 1951).

En la década de 1960, se acomete el Plan de Pavimentación de 1.700 km, pero por falta de mantenimiento de las vías hechas entre 1950 y 1965 el sistema vial entra en crisis. Sin embargo, “nuevamente en 1977 con fondos del BIRF por US\$ 90 millones se rehabilitan 978 km de carreteras con el programa Séptimo Proyecto de Carreteras”(Cipriano, 2014).

En el año 1997, “Colombia poseía aproximadamente 5700 kilómetros en carreteras troncales, 4100 kilómetros de carreteras transversales, para un total de 11 287 kilómetros pavimentados y 5076 sin pavimentar”(Baquero, 2014). Y a partir del año 2000, se afianzan las concesiones viales en el país, y los pavimentos de concreto se imponen como la solución para los sistemas de transporte masivo. En estos años, el gobierno nacional establece un programa de pavimentación corredores viales para la competitividad en el que se contrata la construcción de 1.100 km de pavimentos de concreto en toda la red vial nacional(Cipriano, 2014).

3.1.2. Pavimento.

Un pavimento es la unión de una serie de capas superpuestas, las cuales, se diseñan y se construyen con materiales compactados. Los pavimentos, se apoyan sobre la subrasante de una vía debidamente explanada y tratada. Un pavimento debe resistir adecuadamente los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito(Montejo Fonseca, 2002). La estructura del pavimento se puede observar en la figura 2.

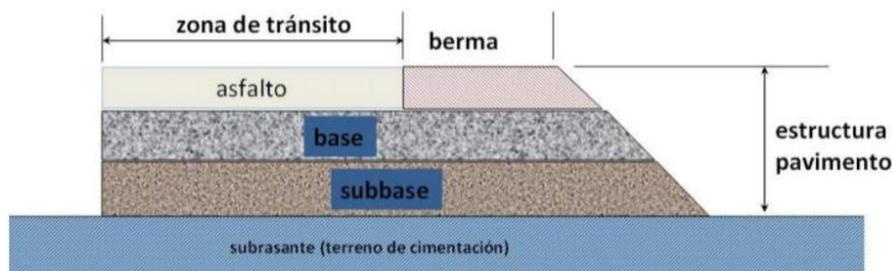


Figura 2: Estructura típica de un pavimento. (Becerra Salas, 2012).

1) La subrasante:

Es el mismo suelo del terraplén, que esta escarificado y compactado una cierta profundidad dependiendo de su naturaleza o de las especificaciones del proyecto(SIMÓN, 2004).

2) La subbase:

Esta constituida por un material de capacidad de soporte superior a la del suelo compactado y se utiliza para permitir la reducción del espesor de la capa base. Se apoya sobre la subrasante y los requisitos de calidad de los materiales que la conforman no son tan rigurosos, la razón de esto es que los esfuerzos verticales que se transmiten a través de las capas de pavimentos son mayores en la superficie y va disminuyendo a medida que se profundizan(Minaya G & Ordoñez, 2006; SIMÓN, 2004).

3) La base:

La función de esta capa es transmitir los esfuerzos provenientes del tráfico, a la subbase y subrasante. Los requisitos de calidad de agregados de base son muy rigurosos. Esta capa, está conformada por la grava anchada, compactada al 100% de la máxima densidad seca del ensayo proctor modificado. Además, reduce las deformaciones de tracción que las cargas por eje ejercen a la capa asfáltica(Minaya G & Ordoñez, 2006; SIMÓN, 2004).

4) La capa de Rodadura (Asfalto):

Se encarga de proporcionar una superficie uniforme y estable al tránsito, además, debe resistir los efectos abrasivos provenientes del tránsito y del medio ambiente. La capa de rodadura, debe tener resistencia a la tensión complementada a la capacidad estructural del pavimento(Minaya G & Ordoñez, 2006; Montejo Fonseca, 2002).

3.1.3. Pavimento Flexible.

Los pavimentos flexibles son una serie de capas construidas básicamente de materiales granulares y materiales asfálticos que descansan sobre una capa de suelo compactado llamada “*Subrasante*” (Giordani & Leone, 2010).

El pavimento flexible, está conformado generalmente por tres capas sometidas a esfuerzos y deformaciones producidas por la carga del tránsito. La capa de rodadura, se encarga de soportar los esfuerzos máximos y está conformada por materiales bituminosos. Según Montejo, esta capa debe suministrar una superficie uniforme, estable y resistente a los efectos abrasivos del tránsito.

La Base, según Montejo, debe proporcionar un elemento resistente que transmita a la subbase y a la subrasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. Entre la base y la capa de rodadura es necesario hacer un riego de impregnación (Figura 4), con el objeto de mejorar las propiedades de adherencia entre capas, igualmente, se recomienda hacer un riego de sello sobre la capa de rodadura para garantizar la impermeabilidad de la misma. La subbase, por su parte, es una capa de transición que impide la penetración de los materiales que constituyen la base con los de la subrasante, además, actúa como filtro de la base imposibilitando que los finos de la subrasante lleguen a la base y dañen la calidad de la base. La subbase, también, posee funciones económicas, ya que, los materiales utilizados en la subbase son de menor calidad en comparación con los materiales de la capa asfáltica.

Algunos autores recomiendan valores mínimos y máximos en el espesor de cada capa (Figura 4), sin embargo, en Colombia, las Especificaciones Técnicas para la Construcción de Carreteras nos normatizan los espesores de capa a nivel Nacional.

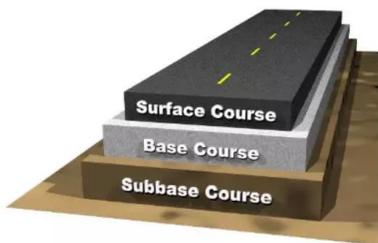


Figura 3: Estructura típica de un Pavimento Flexible. (Dietz, 2017).



Figura 4: Estructura típica de un pavimento flexible: zonas de riego y espesores recomendados.

(Giordani & Leone, 2010).

3.1.3.1. Método AASTHO 1993.

La metodología de diseño de pavimentos AASHTO, con sus diferentes versiones, se basa en los resultados experimentales obtenidos en el AASHTO Road Test, en Ottawa, cuyo proyecto data de 1951 y que inició la construcción de tramos de prueba en 1956.

En la metodología AASHTO 93, fue formulada para diseño de estructuras de pavimento flexible. La metodología, presenta un modelo o ecuación, con el cual, se obtiene el parámetro llamado “*número estructural*” (SN), cuyo valor, es un indicativo del espesor total requerido del pavimento y se encuentra en función del tránsito sobre la vía (García Morales, 2015).

El método AASHTO 93, arroja que un pavimento recién construido inicia a proporcionar un servicio de alto nivel, a medida que pasa el tiempo, y con él las repeticiones de carga de tránsito, el nivel de servicio baja. El método asigna un nivel de servicio final que se debe lograr al finalizar el periodo de diseño. Mediante un proceso iterativo se van asumiendo espesores de capa hasta que la ecuación propuesta por AASHTO 93 llegue al equilibrio.

El espesor de concreto calculado en conclusión debe aguantar el paso de un número determinado de cargas sin que ocasione un deterioro del nivel de servicio (UNICON & Lima,

2012), y sugieren algunos espesores mínimos para la base granular y para la capa asfáltica, los cuales, se pueden apreciar en la tabla 5.

Tabla 5: Espesores mínimos sugeridos AASHTO 1993.

Espesores mínimos sugeridos		
Número de ESAL'S	Capas Asfálticas	Base Granular
	Unidades	
	cm	cm
Menos de 50,000	3.0	10
50,000-150,000	5.0	10
150,000-500,000	6.5	10
500,000-2,000,000	7.5	15
2,000,000-7,000,000	9.0	15
Más de 7,000,000	10.0	15

Fuente: Ábacos y Nanogramas para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos (Murillo, n.d.).

3.1.4. Pavimento permeable.

Pavimento permeable, es una serie de capas de diferentes materiales de construcción que contiene grandes huecos interconectados (Figura 5). Estos huecos se crean mediante la omisión agregado fino sobre la estructura. El pavimento permeable tiene numerosas características y capacidades, tales como: la permeabilidad al agua, absorción acústica, la purificación del agua, SO₂ y NO₂ de adsorción, control de humedad, e incluso las funciones relacionadas con la conservación del medio ambiente. El pavimento permeable se puede fabricar en varias formas y puede soportar cargas de tránsito, además, es altamente durable. Debido sus ventajas y a su amplia gama de aplicaciones, pavimento permeable ha atraído recientemente la atención a constructores y académicos por ser un material de construcción ecológico, y, que a su vez, está en armonía con el medio ambiente (Jang, Ahn, Souri, & Lee, 2015).

Los beneficios son variados, promoviendo el tema medioambiental y de manejo de aguas lluvias; concretamente los conductores gozarán de una superficie con mayor agarre para

transitar, se aumenta la visibilidad al tener menos chapoteo (Splash) y agua salpicando los parabrisas, al igual que se percibe un menor ruido.

Según The SuDS Manual (Kellagher et al., 2015), el pavimento permeable se puede usar en zonas peatonales, estacionamientos privados, parqueaderos, zonas de bajos volúmenes de tráfico y en puertos, igualmente, permite que el agua lluvia sobre la capa de rodadura se infiltre dentro de las capas estructuras que conforman el mismo sin dañarlas.

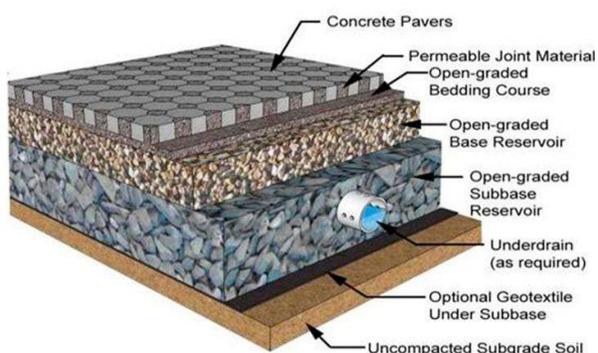


Figura 5: Estructura típica de un pavimento permeable. (Motos, n.d.).



Figura 6: Mezcla asfáltica drenante. (Flexible Pavements of Ohio, n.d.).

3.1.4.1. *Sistemas de manejo del agua.*

La tecnología de pavimento permeable define tres diferentes formas (Tipo A, Tipo B, Tipo C) de manejar el agua drenada en la superficie:

1) TIPO A

Este tipo de manejo, se define, gracias al valor de permeabilidad del suelo de sub rasante. Cuando el suelo de sub rasante presenta valores de permeabilidad capaces de infiltrar en su totalidad el contenido de precipitación en un tiempo menor de 12 horas, se define una estructura,

la cual, toda el agua de lluvia se infiltra a través de la sub rasante y no existe la necesidad de construir estructuras de drenaje para evacuar el agua filtrada (Pérez Carrillo, 2015). Figura 7.

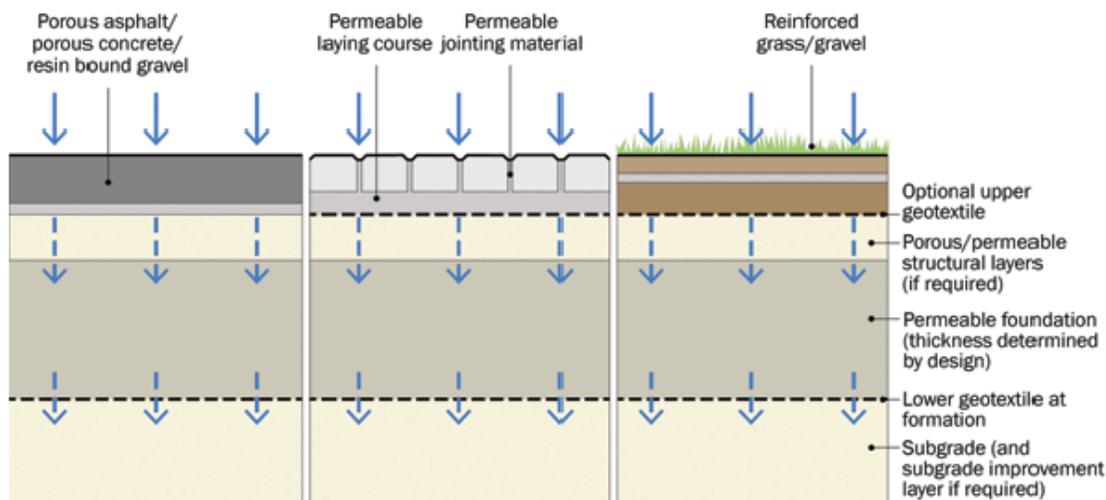


Figura 7: Sistema de infiltración total en la estructura de pavimento permeable-Tipo A. (Kellagher et al., 2015).

2) TIPO B

Este tipo de manejo, es usado cuando la tasa de precipitación excede el coeficiente de infiltración de la sub rasante. En este caso, es necesario hacer una estructura de drenaje que sea capaz de recoger los excesos del caudal, asimismo, es necesario utilizar un geotextil permeable encima de la sub rasante, con el fin, de separar el agua que se infiltrará por la sub rasante y el agua que será evacuada por la estructura de drenaje. Figura 8.

3) TIPO C

Este tipo de manejo del agua, impide la infiltración del agua al subsuelo, es recomendado cuando las cargas de contaminantes sobre la escorrentía son muy altas, también, es usado cuando el suelo de fundación (sub rasante) presenta valores muy bajos de permeabilidad, en zonas en donde el agua puede ser recogida y usada, cuando el sub suelo es

sensible y necesita protección, y, cuando el nivel freático de la zona está a una profundidad menor de 1 m. Figura 9.

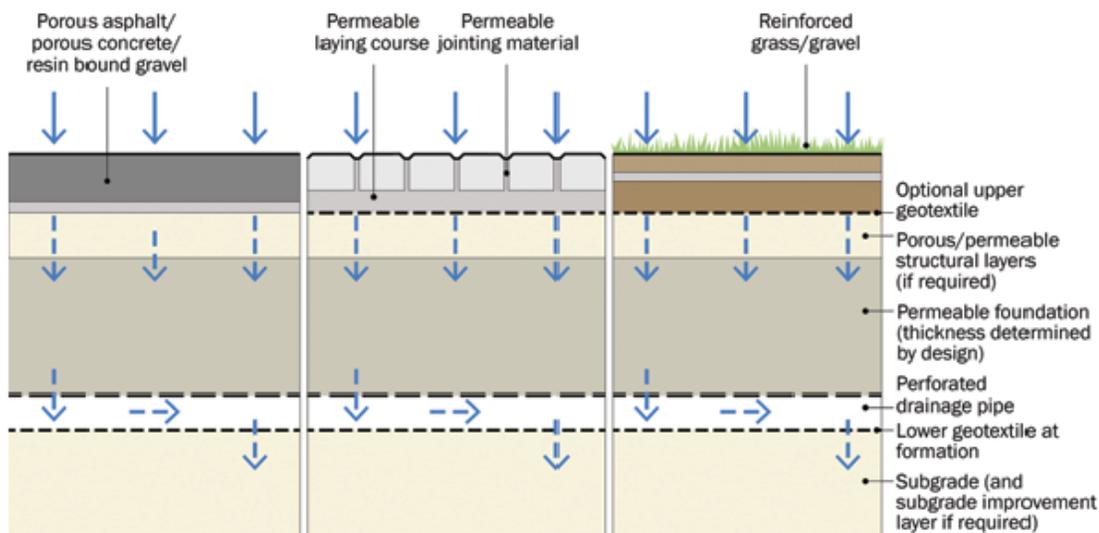


Figura 8: Sistemas de infiltración parcial en la estructura de pavimento permeable-Tipo B. (Kellagher et al., 2015).

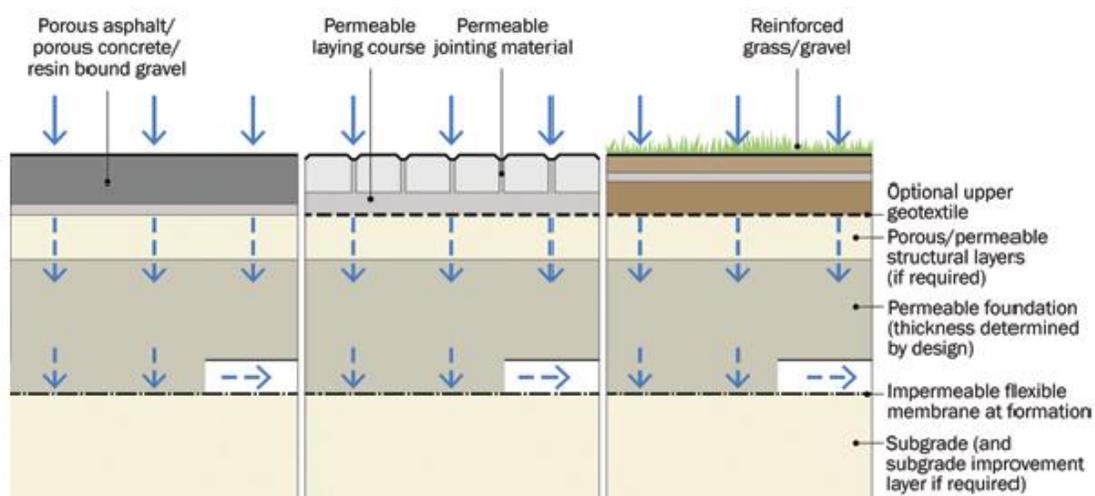


Figura 9: Sistema de infiltración nula en la estructura de pavimento permeable-Tipo C. (Kellagher et al., 2015).

3.1.4.2. Método "The SuDS Manual (C753)".

The SuDS Manual-V6 (C753), publicado en el 2016, es considerado como uno de las áreas más fuertes de trabajo de CIRIA, The SuDS Manual, se ha encargado de subir, investigar y

conocer las últimas técnicas adaptables para sistemas de drenaje sostenible. The SuDS Manual presenta una guía para el diseño y construcción, incorporando las normas técnicas gubernamentales inglesas y va más allá de implementar los beneficios múltiples de esta nueva tecnología(CIRIA, 2015).

Para diseñar, por el método The SuDS Manual, es necesario evaluar y seleccionar la tecnología apropiada dependiendo de los materiales existentes en la zona, y, de las soluciones que se esperar proporcionar en la zona de estudio, para hacer esta selección, el capítulo 20.3.

3.2. Estado del arte

El hormigón asfáltico poroso o también llamado Pavimento Permeable presenta diferentes beneficios en términos de durabilidad de superficie, soporte de neumático, eficiencia de frenado y disminución de ruido. Las características necesarias del asfalto se obtienen en función de la categoría de tráfico y el coeficiente de fricción deseado. Existen diferentes tipos de hormigón asfáltico, pero en este capítulo nos enfocamos en el hormigón asfáltico poroso ya que presenta muchas ventajas tales como(Juyar & Pérez, 1998):

- Mayor resistencia a deslizamientos en tiempos lluviosos.
- Mayor resistencia a deslizamientos a muy altas velocidades.
- Reducción del agua dispersa por el paso de vehículos.

En este capítulo realizaremos un profundo estudio bibliográfico y actualizaremos el estado desconocimiento del hormigón asfáltico poroso, con el fin de tener unas bases y conceptos claros.

3.2.1. Antecedentes.

Los autores Bhutta, Tsurura, Mirza estudiantes de ingeniería civil de la universidad tecnológica de Malasia, proponen un artículo llamado “La evaluación de alto rendimiento de las propiedades del hormigón poroso” (Evaluation of high-performance porous concrete properties), en el cual, evalúan las propiedades de alto rendimiento del concreto permeable en donde buscaban examinar la aplicabilidad del concreto permeable en vez del asfalto convencional usando: a) Cemento Portland ordinario de tres diferentes tamaños de agregados: gruesos triturados N° 5 (13-20 mm); No. 6 (5-13 mm) y N° 7 (2,5-5 mm). b) Agentes reductores de agua comercialmente disponible (densidad: $1,06 \text{ g / cm}^3$), y c) un agente espesante (cohesivo) (polvo de polímero a base de celulosa soluble en agua, densidad: $2,40 \text{ g / cm}^3$).

Según los autores, con el agente reductor de agua se creó un aglutinante con bajo contenido de cemento y agua, con el fin de lograr una mezcla más “práctica” en construcción, mientras, el agente espesante ayudó a mejorar la viscosidad del cemento. Para hacer el estudio, los autores comenzaron preparando mezclas en una probeta para concreto (“camisa” de laboratorio), después de garantizar y conservar las condiciones ambientales del laboratorio, procedieron a hacer tres tipos de muestras, cada una con propiedades específicas, en donde, el hormigón poroso exhibió una buena manejabilidad y la cohesión para llenar los espacios de casi cualquier tamaño y forma y sin segregación o sangrado.

Los ensayos de laboratorio fueron los siguientes: ensayo de permeabilidad, relación total de vacíos ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$), resistencia a la compresión ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) de acuerdo con JIS A 1108, resistencia a la flexión ($10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$) de acuerdo con JIS a 1106, coeficiente de permeabilidad ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) y la tasa de desarrollo de la fuerza. La tasa de desarrollo de la resistencia se ensayó a período de 1, 3, 7, 14 y 28 días de curado. Con los cuales, los autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- La combinación de agentes reductores de agua y el agente de cohesión en el cemento portland produce un concreto aceptable con buenas propiedades de trabajabilidad y resistencia.
- La adición de un agente de cohesión a la mezcla de concreto poroso disminuye la relación de vacíos y la permeabilidad, sin embargo, aumenta significativamente las resistencias a la compresión y flexión.
- Independientemente de los tipos de hormigón poroso y tamaño de los agregados, los resultados mostraron una relación casi lineal entre la resistencia a la compresión y la relación de vacíos total, así como, entre el coeficiente de permeabilidad y relación de vacíos para todos los ensayos que estaban entre el rango de 15 a 30% de su relación de vacíos.
- La porosidad o relación de vacíos total se ven afectadas por la adición de agentes reductores de agua y agente espesante, sin embargo, existe mejora en la resistencia debido a la porosidad reducida, a la fuerte unión entre la pasta de cemento y a el producto por el uso de agentes reductores de agua y agente espesante(Bhutta, Tsuruta, & Mirza, 2012).

Por su parte, los autores Liu *et al.* decidieron hacer un estudio sobre el Pavimento permeable, con el fin de evaluar el efecto de inducción de lana de acero para la curación del material. Su artículo fue llamado: “Evaluación del efecto de curación inducción de hormigón asfáltico poroso a través del ensayo de fatiga de flexión de cuatro puntos”. (Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four-point bending fatigue test).

Los autores para su estudio decidieron usar unas vigas de 50 mm x 50 mm x 400 mm. Estas vigas se prepararon con los mismos materiales que se utilizan en una sección de prueba en la

autopista A58 holandesa especialmente preparada para investigar el enfoque de la curación de inducción. Esta mezcla constaba de asfalto poroso estándar PA 0/16 y lana de acero 1,27% (contenido en masa de la mezcla total). La lana de acero tenía una longitud de 10 mm y diámetros que van de 8,89 micras a 12,79 micras. Era difícil de dispersar la lana de acero en la mezcla. La adición de más de lana de acero de 1,27% a la mezcla causó problema de mezcla.

El procedimiento utilizado por los autores fueron los siguientes:

- ❖ Cuatro ensayos de fatiga de flexión de punto.
- ❖ Pruebas de calentamiento por inducción.
- ❖ Prueba de fatiga extensión de la vida.
- ❖ Medición de recuperación de rigidez a la flexión.
- ❖ Múltiples tiempos de inducción prueba de calentamiento.

La lana de acero mostro un efecto curativo a una temperatura descubierta en el estudio de 85° C, con la cual, se obtiene un mejor efecto de cicatrización. En el proceso se obtuvo una recuperación en la rigidez en el material y la fatiga, también, la durabilidad del material se alargó. Igualmente, se encontró que la durabilidad del hormigón asfáltico poroso se puede extender de manera significativa mediante la aplicación de calentamiento por inducción múltiple. Basándose en estos resultados, se concluyó que el efecto de auto curación de hormigón asfáltico poroso se puede incrementar por inducción el calentamiento del material. Además, la durabilidad del hormigón de asfalto poroso también será mejorada con la curación de inducción (Liu, Schlangen, Van De Ven, Van Bochove, & Van Montfort, 2012).

Uno de los países que más ha hecho esfuerzos para implementar el pavimento permeable es Holanda. En Holanda, el uso del hormigón asfáltico poroso se ha ampliado debido al beneficio

de su uso, además, es eficaz en la reducción del ruido del tráfico, sin embargo, la vida útil del hormigón asfáltico es limitada porque es muy vulnerable a deshilachado. Por esta razón, los autores del artículo llamado: “El mantenimiento preventivo de hormigón asfáltico poroso mediante la tecnología de tratamiento de superficies” (Preventive maintenance of porous asphalt concrete using surface treatment technology) han decidido hacer un estudio acerca del mantenimiento del hormigón asfáltico poroso para poder alargar la vida útil del material.

Para su estudio los autores utilizaron diferentes muestras, algunas aplicando un tratamiento superficial, luego, las evaluaron en el ensayo de rotación de abrasión de la superficie.

Además, utilizaron algunos modelos de elementos finitos de dos dimensiones (2D), estos modelos permiten la simulación de la estructura real del hormigón de asfalto poroso añadiendo algún tratamiento superficial. La simulación fue creada basándose en la imagen de una tomografía computarizada de alta resolución, con la cual, se observó la distribución del material de tratamiento de superficie en el hormigón asfáltico poroso, gracias a que se alcanzaron imágenes de 0,04 mm x 0,04 mm.

Finalmente, los autores llegaron a que la diferencia entre la relación de vacíos de la muestra sin tratar y la relación de vacíos de la muestra tratada no es estadísticamente significativo, ya que, el tratamiento de la superficie no cambia las propiedades volumétricas del hormigón asfáltico poroso de manera significativa. Así mismo, los resultados de la prueba de abrasión superficial rotatorios para las muestras de hormigón de asfalto poroso tratados indican una pérdida de granos más bajos que los de referencia porosa muestras de hormigón asfáltico, ese decir, que el tratamiento superficial mejora la resistencia desmoronamiento del hormigón de asfalto poroso.

En el modelo simulado, los resultados mostraron que el tratamiento de la superficie reduce las tensiones y energías disipadas lo cual indica que el tratamiento de superficie mejora la resistencia a los daños por fatiga (Zhang, van de Ven, Molenaar, & Wu, 2016).

En Indonesia, Hariyadi y Tamai académicos de la universidad Mataram de Indonesia, hicieron un estudio acerca del hormigón poroso con el fin de aumentar la porosidad del mismo y lo plasmaron en un artículo llamado: “Mejora del rendimiento de hormigón poroso mediante la utilización de la piedra pómez agregada” (Enhancing the Performance of Porous Concrete by Utilizing the Pumice Aggregate).

Para la investigación, los autores decidieron hacer un hormigón asfáltico poroso utilizando como base la piedra pómez volcánica por dos razones: la primera, la relación de vacíos presentes en la piedra pómez; la segunda, al utilizarla como material de construcción presenta muchas ventajas ambientales para el planeta.

En primera instancia, los autores establecieron que debían evaluar el efecto de variar la proporción de piedra pómez volcánica como un reemplazo del agregado grueso (VP / A) y variar la proporción de cemento (A / C) comparados con muestras hechas de agregados tradicionales en este tipo de mezclas.

El principal resultado del uso de piedra pómez volcánica se vio reflejado en el aumento de la porosidad, sin embargo, el módulo de elasticidad disminuye. No obstante, los ensayos mostraron una posibilidad de usar la piedra pómez volcánica en estructuras de absorción de energía de impacto (Hariyadi & Tamai, 2015). Esta investigación es un estudio preliminar que se espera sea desarrollado para futuras investigaciones relacionadas con la prueba dinámica e impacto.

Por su parte, Sata *et al.* Académicos de Tailandia decidieron mezclar componentes reciclados con el hormigón poroso para buscar darle mejores propiedades y ayudar con el medio ambiente.

Las propiedades de los hormigones permeables que contienen dos tipos de áridos reciclados a saber, lo estudiaron agregando concreto reciclado bloque y reciclado de árido. Los autores, se incorporaron en hormigones permeables mediante la sustitución de agregados naturales en los niveles de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% en peso, se determinaron resistencia a compresión, la densidad, relación de vacíos, la permeabilidad al agua, la conductividad térmica y la abrasión de la superficie de resistencia del concreto permeable que contiene los agregados.

Los autores decidieron utilizar un cemento portland tipo uno reciclado, agregado supe plastificante, caliza natural y dos tipos de áridos reciclados: hormigón en bloque y hormigón.

Para la construcción de la mezcla utilizaron las siguientes proporciones:

- ❖ Constante agua cemento del 0.24
- ❖ Proporción total de cementó 0.22
- ❖ Supe plastificante de 0.75
- ❖ El control concreto permeable (NA100) consistió de 316 kg de cemento Portland Tipo I, 76 kg de agua, 2,4 kg de SP y 1435 kg de NA por 1 m³ de hormigón.

La pasta de cemento se mezcló en un mezclador de tipo pan de 5 min. Los agregados gruesos se añadieron a la mezcla y se mezcló durante otros 3 min. Después de mezclar, se emitieron tres tamaños de probetas de hormigón. El espécimen cilíndrico con un diámetro de 100 mm y una altura de 200 mm se utilizan para las mediciones de resistencia a la compresión, resistencia a la

tracción indirecta, permeabilidad al agua, y sin efecto total. El espécimen mm prisma de $200 \times 400 \times 70$ se utilizó para la prueba de resistencia a la flexión. El espécimen de cubo 150 mm se usó para las mediciones de resistencia a la abrasión superficial y conductividad térmica. La mezcla fresca se colocó en el molde en dos capas. Cada capa se rodó 25 veces con 10 mm de diámetro apisonamiento varilla. Después de varilla, las muestras se colocaron en una mesa vibratoria y una placa de carga 1,5 kg, en la cual, se colocó en la superficie superior de la muestra. A continuación, la vibración de compactación se aplicó durante 10 s utilizando mesa vibratoria, la cual, vibra en la frecuencia de 2.860 por minuto y la amplitud de 0,3-0,6 mm. Todas las muestras se desmoldaron a la edad de 24 h y se almacenaron en un cuarto húmedo hasta la edad de la prueba.

Después de hacer varias pruebas con los ensayos ya mencionados, se concluyó que:

- El uso de concreto reciclado bloque resultó en una mejora significativa de la resistencia a la compresión del concreto permeable. El nivel de reemplazo concreto reciclado bloque del 40% era óptima con resistencia a la compresión de 17,0 MPa a 13,4 MPa en comparación del concreto permeable que contiene caliza natural. La mejora se debe a la buena unión entre el concreto reciclado bloque y la pasta de cemento, y el aumento del contenido de pasta como resultado de la abrasión y aplastamiento de las partículas concreto reciclado bloque durante la mezcla. La resistencia a la abrasión superficial aumenta con hasta concreto reciclado bloque nivel de sustitución de 20%. Más allá de este nivel de reemplazo, la resistencia a la abrasión superficial se redujo significativamente debido a la mayor cantidad de débil árido reciclado.
- El uso de concreto reciclado, también, resultó en mejora de resistencia a la compresión del hormigón permeable, pero en menor medida. El nivel de reemplazo el bloque del 60% era

óptima con resistencia a la compresión de 15,0 MPa. En este caso, la mejora se debe a la buena unión entre el concreto reciclado y la pasta de cemento. La resistencia a la abrasión superficial aumenta con todos los niveles de reemplazo concreto reciclado. El nivel de sustitución óptima de 40% del concreto reciclado resultó en la pérdida de peso más bajo de 5,3 g que fue significativamente menor que 8,2 g de hormigón control. Para fines prácticos, el nivel de reemplazo podría ser levantado como el concreto reciclado 60% todavía tenía pérdida de peso baja de 5,7 g.

- La influencia de áridos reciclados en la fuerza a la tracción indirecta y la resistencia a la flexión del concreto permeable era pequeña. Las resistencias a la flexión y de tracción división de hormigones permeables que contienen concreto reciclado bloque se mantuvieron aproximadamente los mismos que los de caliza natural. Para hormigón, hubo tendencias para estas fortalezas caigan a niveles altos de recambio. El concreto permeable con árido reciclado tuvo una baja conductividad térmica entre 0,78 y 0,99 W / mK,
- Tanto concreto reciclado bloque y concreto reciclado se podrían usar ventajosamente en concreto permeable. Para una buena resistencia a la abrasión superficial y la fuerza, los niveles de reemplazo de concreto reciclado bloque y hormigón deben ser 20% y 40-60%, respectivamente(Zaetang, Sata, Wongsas, & Chindaprasirt, 2016).

Capítulo 4.

Estudios de la zona

4.1. Estudios existentes

4.1.1. Estudio Topográfico.

El estudio topográfico, es el conjunto de operaciones ejecutadas sobre un terreno con los instrumentos adecuados para poder confeccionar una correcta representación gráfica, normalmente, en un plano. La topografía, es el área base de la ingeniería civil, ya que, desde la topografía el ingeniero se encarga de proyectar sus obras (Rodríguez González, 2010).

El proyecto, se localiza en el departamento de Boyacá, municipio de Busbanzá. El municipio de Busbanzá está situado en el centro del país, sobre la cordillera oriental de los Andes. Para el desarrollo del proyecto, se seleccionaron dos tramos, los cuales, están ubicados en el sector comprendido entre los sectores de pueblo viejo y salón comunal de Cusagota, comprende una longitud de 2 kilómetros.



Figura 10: Localización General de los tramos de estudio. (Inc, 2019)

El primer tramo, está encerrado entre los puntos: Punto 1 y Punto 2. El punto 1, está localizado en las coordenadas planas 1133169 Este y 1138171 Norte, la altitud del punto es de 2724 m.s.n.m. Por su parte, el punto 2, está localizado sobre las coordenadas planas 1132902,30204 Este y 1138356,23146 Norte, la altitud del punto es de 2754,76 m.s.n.m.

La longitud del tramo es de: 1009.98 m



Figura 9:Localización del Tramo 1: Pueblo Viejo.(Inc, 2019)

El segundo tramo, está encerrado entre los puntos: Punto 3 y Punto 4. El punto 3 localizado en las coordenadas planas 1132625 Este y 1139585 Norte, la altitud del punto es de 2830 m.s.n.m. El punto 4, está localizado sobre las coordenadas planas 1132814,47899 Este y 1139440,79826 Norte a una altitud de 2803,64 m.s.n.m.

La longitud del tramo es de: 1014.35 m



Figura 10:Localización del Tramo 2: Salón comunal de Cusagota.(Inc, 2019)

4.1.2. Diseño Geométrico de la Vía.

En el proyecto de infraestructura vial, el diseño geométrico de la vía es la parte más importante, ya que, a través de él se condicionan los parámetros geométricos tridimensionales, en función, de la seguridad de la vía, de la comodidad del usuario, además, la vía debe ser estética, económica y compatible con el medio ambiente (Cárdenas Grisales, 2013). En el proyecto de mejoramiento vial en Busbanzá, Boyacá, se realizó el diseño geométrico de acuerdo a la topografía existente, se tuvo en cuenta, los valores recomendados por el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del INVIAS (Vías, 2008). Los valores de diseño, para esta vía están resumidos en la tabla 6.

Tabla 6: Parámetros del Diseño Geométricos.

PARÁMETRO DE DISEÑO	VALOR ASUMIDO
Clasificación según su categoría	Secundaria de una calzada
Clasificación según tipo de terreno	Montañoso
Velocidad de diseño promedio.	30 km/h
Radio mínimo	21 m.
Peralte máximo	8%
Ancho de zona	De 12 m.
Ancho mínimo de calzada en tangente	6.0 m.
Ancho mínimo de carril en tangente	3.0 m.
Ancho de vía con cunetas	7.4 m
Pendiente transversal o bombeo	-2%
Pendiente longitudinal máxima	12%
Longitud mínima tangente vertical	60 m.
Valor de $K_{\text{mín.}}$ curvas verticales convexas	2
Valor de $K_{\text{mín.}}$ curvas verticales cóncavas	6

Fuente: Obtenida del informe del Diseño Geométrico; datos suministrados por la Gobernación de Boyacá.

En el informe del diseño geométrico, mencionan que existen tramos que no cumplen con los valores mínimos establecidos por el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del INVIAS. En el informe se argumenta que: el diseño, “*se proyectó en función de la vía existente; considerando que no se dispone de franjas de terreno adicionales para proponer rectificaciones o ampliaciones que permitan unas mejores condiciones de operación*”. Asimismo, se hace la aclaración, el proyecto no contempla la posibilidad de compra de terrenos aledaños, por lo cual, en algunos tramos no cumplen con los valores mínimos establecidos.

Teniendo en cuenta la complicación con el diseño, se procederá a hacer una evaluación comparativa, con los valores de diseño y los valores mínimos exigidos, con el fin de identificar los tramos que no cumplen los parámetros mínimos establecidos y así, tener especial cuidado y rigor en el estudio de señalización vial y posteriormente, su implantación.

4.1.2.1. *Diseño en Planta.*

4.1.2.1.1. *Clasificación de la vía.*

- Según su funcionalidad

Según el Manual de Diseño Geométrico de carreteras del INVIAS, las vías terciarias, son vías que unen cabeceras municipales con sus veredas, y en caso de pavimentación, debe cumplir con los valores establecidos para vías secundarias.

En el informe del diseño geométrico del proyecto, se encuentra una incoherencia con la clasificación de la vía; en la página 13 del informe, clasifican la vía como terciaria, sin embargo, en el cuadro resumen de la página 23 del informe, clasifican la vía como secundaria, por consiguiente, el estudio presenta una clara incoherencia en la clasificación funcional de la vía.

- Según el tipo de terreno

La clasificación de la vía según el tipo de vía se da de acuerdo a los valores de la pendiente longitudinal. (Tabla 7).

Tabla 7: Clasificación de la vía según el terreno.

Tipo de Terreno	Pendiente Longitudinal Máxima (%)
Plano	<3
Ondulado	3 a 6
Montañoso	6 a 8
Escarpado	> 8

Fuente: Dibujado en Excel 2019; datos suministrados del Manual de Diseño Geométrico de carreteras.

El informe del diseño geométrico del proyecto, la clasificación de la vía es montañoso y escarpado, es decir, que presenta valores de su pendiente longitudinal mayores e iguales al 8%. (Tabla 8).

Tabla 8: Valores de la velocidad de diseño para un tramo homogéneo.

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Primaria de una calzada	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Secundaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Terciaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										

Fuente: Obtenida del Manual de Diseño Geométrico de carreteras p38.

4.1.2.1.2. *Velocidad de diseño de la vía.*

La definición de la velocidad de diseño de un tramo homogéneo, está definida, de acuerdo a la clasificación de la vía. La tabla 2.1 del manual de diseño geométrico de carreteras del INVIAS, nos definen la velocidad de diseño. Para realizar el diseño geométrico de vía, la velocidad de diseño seleccionada es de 30 Km/h, este valor, se puede verificar en la página 14 del informe del diseño geométrico de la vía.

La primera consideración, existe una incoherencia presentada en la clasificación según la categoría de la vía, si se tiene proyectado pavimentar la vía, el manual de diseño geométrico del INVIAS es claro en especificar que se deberá diseñar con los valores para una vía secundaria (página 29), por tal razón, la velocidad de diseño deberá ser para una categoría de vía secundaria, la cual, corresponde a 40 Km/h y el diseño existente no sería válido. Sin embargo, se pone a consideración de la gobernación la necesidad de hacer un estudio geométrico de diseño diferente al existente. En dado caso, que se decida solo un mejoramiento de la vía terciaria, el estudio existente sería válido para la zona. También cabe mencionar, que anteriormente se mencionaron algunos inconvenientes tenidos en el diseño geométrico de vía en consideración de los terrenos aledaños de la vía. Considerando estos aspectos, se continuará con la evaluación del diseño geométrico de la zona existente.

Por otro lado, el diseño geométrico de la vía, no afecta el diseño estructural de las capas de pavimento, ya que, el diseño estructural del pavimento es definido puramente por los valores de resistencia del suelo, así como, del estudio de tránsito de la zona. Por consiguiente, se considera que no hay un riesgo en la continuación del presente proyecto.

4.1.2.1.3. *Radio Mínimo y peralte.*

Para calcular, el valor de radio mínimo, el diseño geométrico de la vía existente tomo en consideración el capítulo 3 del manual de diseño geométrico de carreteras del INVIAS y determino que el peralte máximo es del 8% y que el radio mínimo de curvatura es de 41 m.

4.1.2.2. *Diseño perfil longitudinal.*

De acuerdo a la velocidad de 30 Km/h, la pendiente máxima para una vía secundario no está definida, sin embargo, la pendiente máxima para una vía terciaria es del 12%, en el diseño geométrico existente, este valor de la pendiente máxima lo toman de 12%.

Tabla 9: Valores de máxima pendiente de acuerdo con la clasificación vial.

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	VELOCIDAD ESPECÍFICA DE LA TANGENTE VERTICAL V_{TV} (km/h)											
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Primaria de dos calzadas	-	-	-	-	-	6	6	6	5	5	4	4
Primaria de una calzada	-	-	-	-	8	7	6	6	5	5	5	-
Secundaria	-	-	10	9	8	7	6	6	6	-	-	-
Terciaria	14	12	10	10	10	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Obtenida del Manual de Diseño Geométrico de carreteras p152.

Por su parte, el valor de pendiente mínima es asumido del 0.3% de acuerdo, a lo especificado en el numeral 4.1.1 del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del INVIAS.

4.1.2.3. *Consistencia en el Diseño.*

Una vez verificado los parámetros iniciales del diseño, nos remontamos al capítulo 8 del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del INVIAS, con el fin de verificar la consistencia en el diseño.

La aplicación de los criterios, deben dar como resultado, un diseño, que cumpla con los criterios establecidos en la página 213 del Manual.

4.1.2.3.1. *Distancia de visibilidad.*

Según el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, en la tabla 8.1, la distancia mínima de visibilidad para una velocidad de diseño de 30 Km/h, debe ser de 150 m. Para hacer la evaluación de visibilidad del tramo se utilizó, el software CivilCad 2019(Autodesk Inc., 2019a).

Se evaluó la visibilidad del tramo cada 150 m, a una altura de ojo de 1.35 m, la “X” muestra el punto de estudio; la zona en verde, muestra que presenta una visibilidad total desde el punto de estudio, la zona en amarillo, una visibilidad media, y la zona en rojo, muestra una visibilidad nula desde el punto de estudio. **A) Tramo 1 (Pueblo Viejo) [T1]. B)Tramo 2 (Salón Comunal Cusagota) [T2].**

En las figuras [13-16], se observa que: existen muchas zonas en color rojo, es decir, que, por el primer criterio (visibilidad), el diseño existente, no cumple con los criterios de consistencia en el diseño, por consiguiente, no se evaluarán los siguientes criterios. Asimismo, se recomienda, realizar un diseño geométrico que cumpla con lo establecido en el Manual de diseño geométrico de la vía.

El alcance de este proyecto, establece diseñar y comparar los espesores de capa de capa del diseño estructural, por lo cual, el rediseño geométrico de la vía no está al alcance del presente proyecto, por consiguiente, se hace la debida recomendación y se continuará con el diseño de la capa asfáltica. No obstante, si no hace la debida reevaluación del diseño, se recomienda colocar convenida señalización vertical y horizontal preventiva considerando que: en la zona, existen puntos críticos que no cumplen con lo establecido en el Manual. Esta señalización está reglamentada en: Manual De Señalización Vial Dispositivos Uniformes Para La Regulación De Tránsito En Calles, Carreteras Y Ciclorrutas De Colombia (Ministerio de Transporte, 2015).

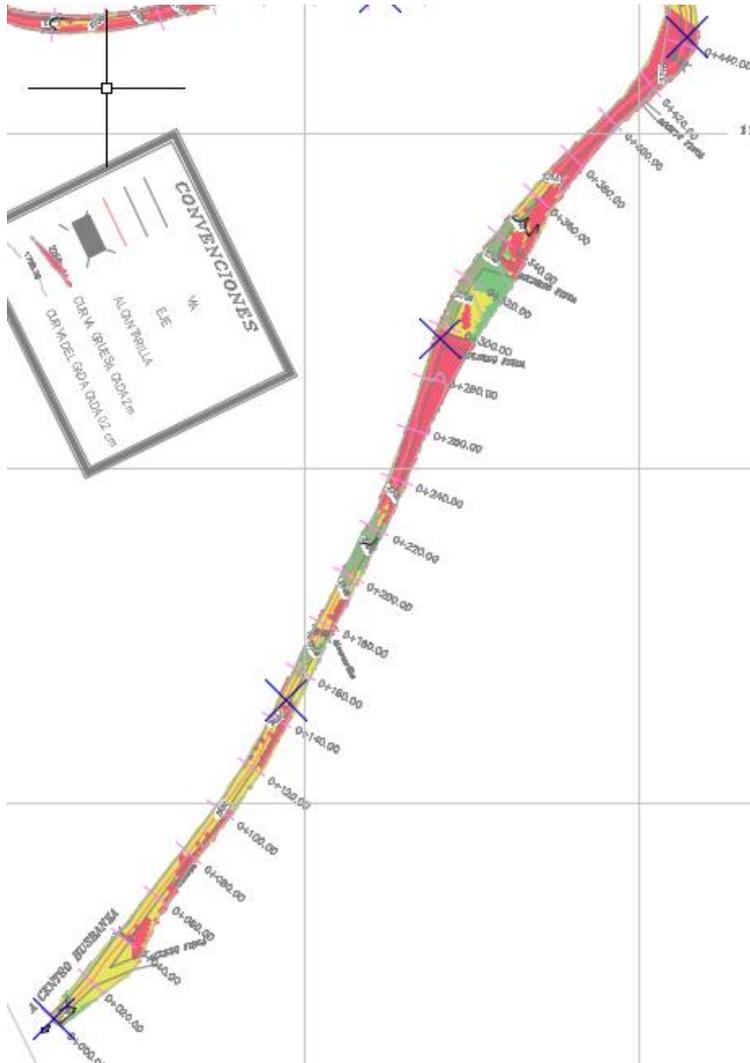


Figura 11:T1.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+000 - K0+440.(Autodesk Inc., 2019b)



Figura 12:T1.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+441 - K1+ 009.98. (Autodesk Inc., 2019b)

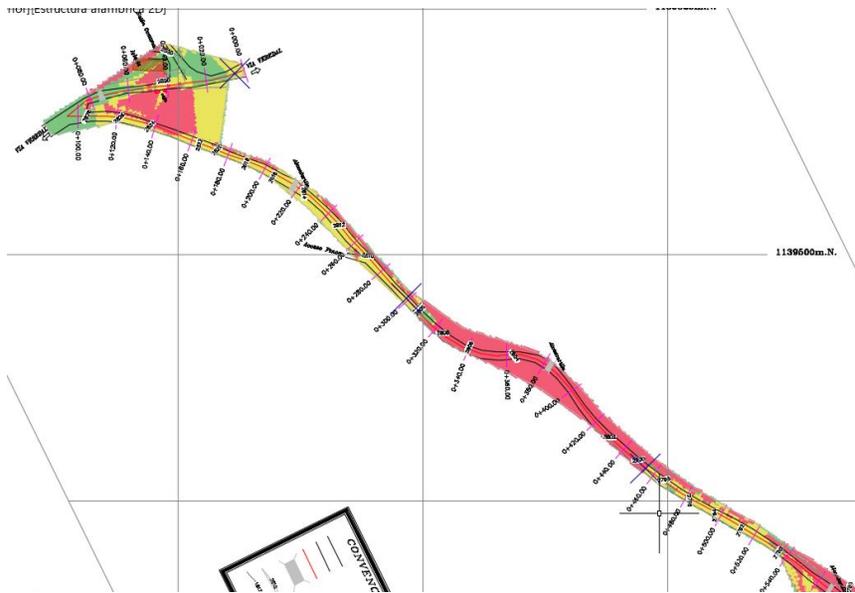


Figura 13:T2.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+000 - K0+500.(Autodesk Inc., 2019b).

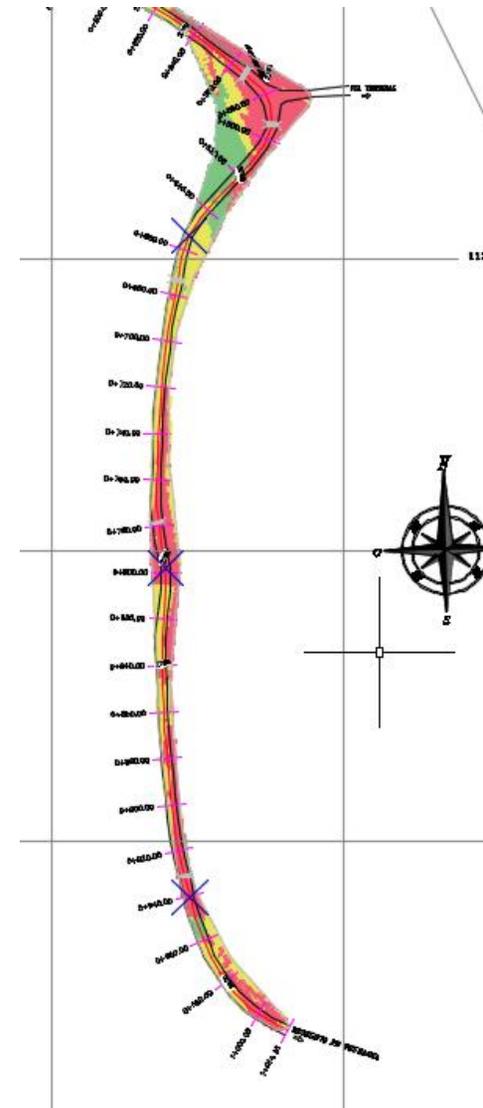


Figura 14:T2.Evaluación de Visibilidad: Abs K0+500 - K1+014.35(Autodesk Inc., 2019b).

4.1.3. Estudio de Suelos de la zona.

En la zona, se realizaron 8 sondeos, localizados de la siguiente manera:



Figura 15: Localización de los sondeos, estudio de suelos. (Autodesk Inc., 2019a)

El estudio de suelos encontró los siguientes perfiles estratigráficos:

- Tramo 1 (Pueblo Viejo)

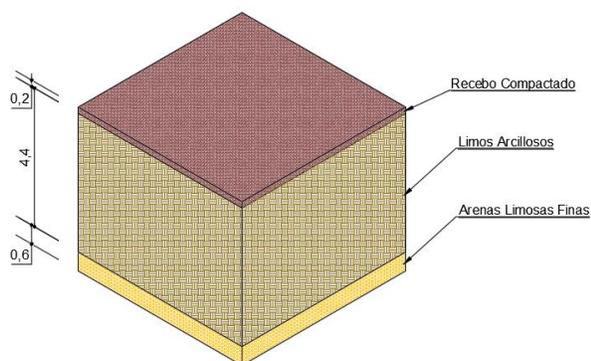


Figura 16: Perfil estratigráfico sondeo 1.

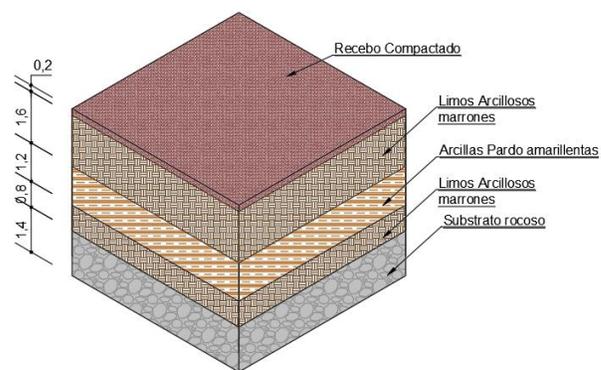


Figura 17: Perfil estratigráfico sondeo 2.

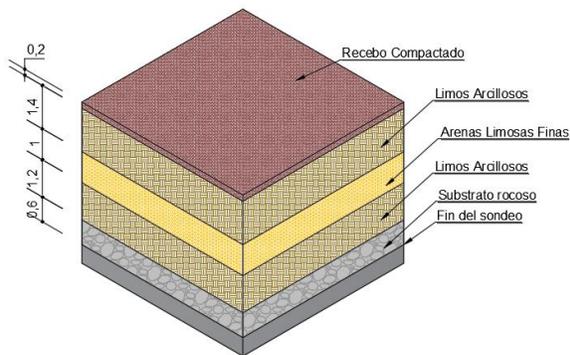


Figura 18: Perfil estratigráfico sondeo 3.

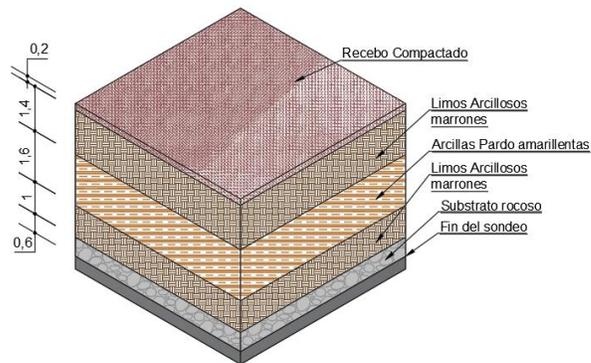


Figura 19: Perfil estratigráfico sondeo 4.

- Tramo 2 (Salón comunal Cusagota)

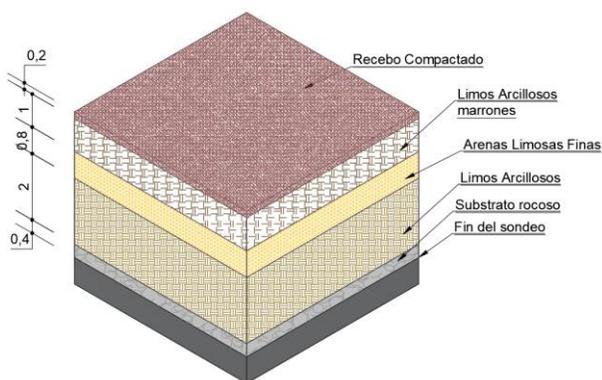


Figura 20: Perfil estratigráfico sondeo 5.

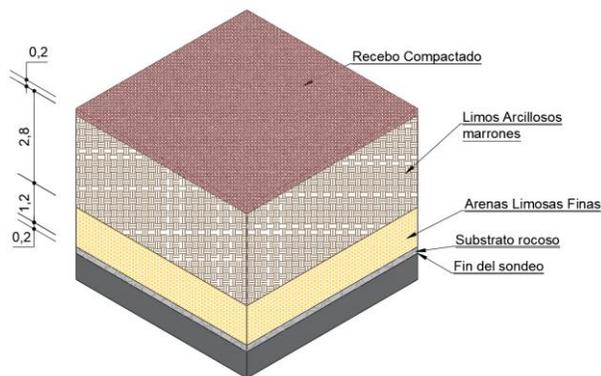


Figura 21: Perfil estratigráfico sondeo 6.

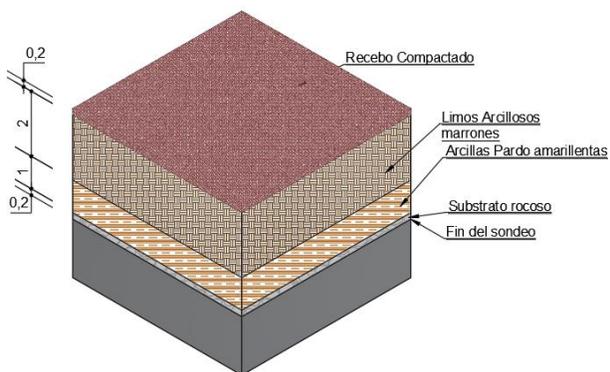


Figura 22: Perfil estratigráfico sondeo 7.

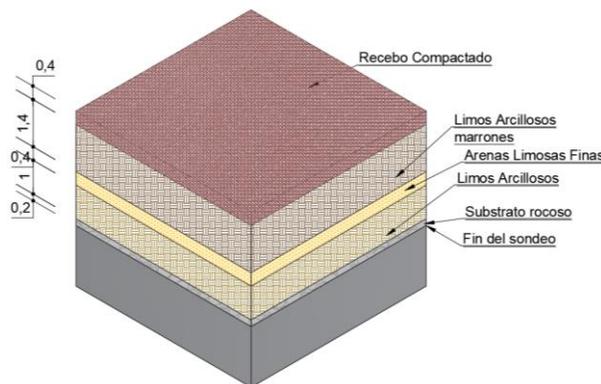


Figura 23: Perfil estratigráfico sondeo 8.

Asimismo, el estudio de suelos calculo un valor de CBR para la subrasante del 28%. Teniendo en cuenta que el material predominante en la zona es de la calidad de Limos y Arcillas, el autor considera que el valor de CBR es muy alto, por ende, se procederá a verificar el valor de CBR con ensayos posteriores.

4.1.4. Estudio Hidrológico de la zona.

El estudio hidrológico en la zona busco identificar y cuantificar las condiciones hidrológicas, climáticas e hidráulicas de la zona, mediante, la obtención de caudales a partir de la información hidroclimatológica disponible. Con el fin de diseñar las estructuras de drenaje necesarias en la vía.

La precipitación media anual, es uno de los factores más importantes para el diseño de estructuras de drenaje de la zona, asimismo, para el diseño del pavimento permeable. Para hallar el valor necesario, se utilizó el método de la “media aritmética” con el cual, se llegó a la conclusión de que el promedio anual de lluvias de la zona es de 860 mm.

El estudio hidrológico de la zona encontró que: la temperatura promedio de la zona es de 14.7 °C. Mientras que, la humedad relativa es del 74.3%.

Otro factor muy importante en el estudio hidráulico de la zona es la Evapotranspiración, la cual, según el estudio, en Busbanzá, la evapotranspiración media anual es de 716.1 mm/Año.

Por su parte, el estudio halló el valor de la escorrentía para la cuenca hidrológica calculada, el valor encontrado fue de 0.01049mm/año.

4.1.4.1. Infiltración.

Para el diseño de pavimentos permeables, el valor de infiltración del suelo es uno de los valores más importantes para el diseño. La infiltración es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Además es una medida que nos dice la capacidad del suelo de absorber la precipitación.

Según el estudio hidrológico de la zona, la infiltración para la zona de estudio es igual a 332.10 mm/año, que corresponde a un 34 % con un volumen de agua infiltrado del 4522177.37 m³/año.

4.1.4.2. *Diseño de Obras de Drenaje.*

En el diseño hidráulico de la estructura, se manejaron velocidades de 0.6-5.0 m/s. Mientras que los caudales de diseño se obtuvieron según el método racional y el método Soil Conservation Service teniendo en cuenta los periodos de diseño sugeridos por el Manual para el drenaje de carreteras.

4.1.4.3. *Obras menores propuestas para el drenaje.*

4.1.4.3.1. *Alcantarillas.*

El estudio hidrológico de la zona propone construir un canal de encoche de 2.5 m, asimismo, propone construir alcantarillas circulares de diámetro de 36". De la misma manera, propone un mejoramiento en las alcantarillas, las cuales podemos detallar en el estudio Hidrológico de la zona.

4.1.4.3.2. *Cunetas.*

Para la zona de estudio, el estudio hidrológico propone las siguientes dimensiones de cunetas:

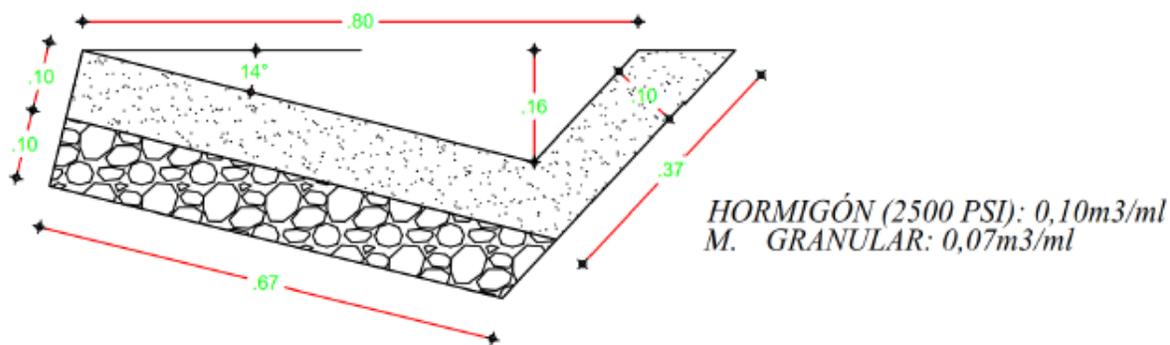


Figura 24: Dimensiones de cunetas para la zona de estudio.

La cuneta adoptada, está diseñada para una intensidad de precipitación de 152.07 mm/h y una pendiente de vía que oscila entre 3 y 7 %, con la cual, se permite una longitud óptima para realizar la descarga en alcantarillas.

4.2. Estudios realizados

4.2.1. Inventario Vial.

Para la zona de estudio, se hizo realizar el inventario de la vía. Para la realización del mismo, se tomó como punto de referencia, el punto K0+000 del tramo 1 (Pueblo Viejo), se continuo según la zona de estudio y se finalizó en la Abscisa K4+950. En el inventario vial realizado, no se recolectaron datos de señalización, ya que, el tramo no cuenta con señalización. Por tal razón, la recolección de información se hizo sobre las obras de infraestructura viales.

Nota: El anexo 1, se encuentran el formato de toma de datos procesado en Excel, además, se encuentra la totalidad del registro fotográfico de la zona.



Figura 25: Ruta Inventario vial.

4.2.1.1. Zonas Críticas

- Ancho de calzada

En la zona de estudio, el ancho de calzada es muy variado, en la Abscisa K3+800 se encontró el ancho de calzada más crítico con un valor de 3.9 m, el cual, es un valor crítico en términos de accidentalidad de la vía, no obstante, el promedio en el tramo de estudio es de 4.7 m. En la abscisa K0+900, se encontró el valor más alto de ancho de calzada de 7 m.

- Tipo de terreno

El tramo de estudio presenta variaciones del tramo de estudio, en algunas zonas, el tipo de terreno es escarpado como en otras que es plano, por lo cual, se evidencia la heterogeneidad del terreno en el tramo de estudio.

- Tipo y estado de superficie.

La totalidad del tramo de estudio se encuentra en afirmado. En general, el estado de la superficie es buena, sin embargo, en la abscisa K2+900 se recomienda aplicar un mejoramiento de la capa de rodadura, ya que, en este punto, el estado de la superficie es mala.



Figura 26: Tipo y Estado de superficie Abs K0+000.



Figura 27: Tipo y Estado de superficie Abs K0+600.



Figura 28: Tipo y Estado de superficie Abs K2+400.



Figura 29: Tipo y Estado de superficie Abs K4+950.

- Alcantarillas

En el tramo de estudio, se localizaron 32 alcantarillas, las cuales, en su mayoría se encuentran en un estado bueno o regular. El diámetro de las alcantarillas varía entre 16'' y 32''. Para las alcantarillas en mal estado, se recomienda realizar un tratamiento especial a las alcantarillas en mal estado localizadas en las abscisas: K1+950, K3+500, K3+800, K3+900 y K4+950. Es importante resaltar, que, en el tramo del proyecto, la única alcantarilla en mal estado es la que se encuentra en la abscisa K1+950. Sin embargo, es necesario realizar una limpieza a todas las alcantarillas de la zona.



Figura 30:Alcantarilla en K1+950 -1.



Figura 31:Alcantarilla en K1+950 -2.

- Cunetas

En la totalidad del tramo de estudio, la superficie de las cunetas se encuentra en tierra y en pésimo estado, de hecho, la mayoría del tramo de estudio no presenta cunetas, por lo cual, se recomienda prestar la debida atención en el mejoramiento del tramo vial.



Figura 32:Cunetas en Tierra Abscisa K0+500.



Figura 33:Cunetas en Tierra Abscisa K1+400.

4.2.2. Estudio de Tránsito.

El estudio de tránsito de la zona fue realizado por la Gobernación de Boyacá. Este estudio se realizó sobre dos puntos del tramo final a estudiar, el primer punto se situó en la Abscisa K0+500 del Tramo 1: Pueblo Viejo, y el segundo punto se situó sobre la Abscisa K0+500 del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota.

Nota: Los resultados de campo se encuentran en el Anexo 2.

Dado que el volumen de tránsito es bajo sobre la vía de estudio según la información suministrada por la gobernación de Boyacá, el nivel de tránsito de la vía es NT1 y se debe diseñar según lo establecido en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS (Ministerio de Transporte & INVIAS, 2007).

En donde:

- El número de ejes equivalentes en el carril de diseño es de: 256.590.
- Periodo de diseño: 5 años.
- Tasa de crecimiento del tránsito: 2.5%.
- Nivel de confiabilidad: 75%.
- Nivel de Tránsito: NT1.

4.2.3. Ensayo Penetrómetro Dinámico de Cono.

Con el fin de verificar la información suministrada por la Gobernación de Boyacá, se procedió a realizar el ensayo de Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) en Campo.



Figura 34: Penetrómetro dinámico de Cono.



Figura 35: Penetrómetro Dinámico de Cono.

Para este ensayo, se obtuvo el apoyo del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, con la facilidad del equipo de campo. Además, el ensayo se realizó teniendo en cuenta la norma INV-E-172-13 (Vías & Transporte, 2007).

Para el análisis de resultados, se procedió a realizar la curva de evolución de la compactación (Penetración vs Número de Golpes) para obtener el índice de penetración por golpes(DN), con el cual, a través de correlaciones se obtiene el valor de %CBR. Las correlaciones usadas fueron las correspondientes a suelos finos, ya que, en el estudio de suelos se determinaron los perfiles estratigráficos de la zona.

- 1) Correlación de la UPTC para suelos finos.

$$\%CBR=30.52*DN^{(-0.62)}.$$

- 2) Correlación Colombian Beatman para suelos finos.

$$\%CBR=37.9*DN^{(-0.69)}.$$

- 3) Correlación Cuerpo de ingenieros de USA para suelos finos.

$$\%CBR=58.8*DN^{(-2)}.$$

Para cada tramo, se realizó ensayos de campo cada 100 m, asimismo, se obtuvo la curva de evolución de la penetración que se define como: penetración acumulada vs número de golpes. Con esta curva, se procedió a hallar los trayectos en la curva con pendientes similares analizando las variaciones de pendiente en la curva de evolución y luego, a trazar líneas de tendencia representativa de cada trayecto. Inmediatamente, se procedió a hallar la pendiente de la línea de tendencia, que, a su vez, representa el porcentaje del Índice de penetración por golpe (DN) de la zona representada.

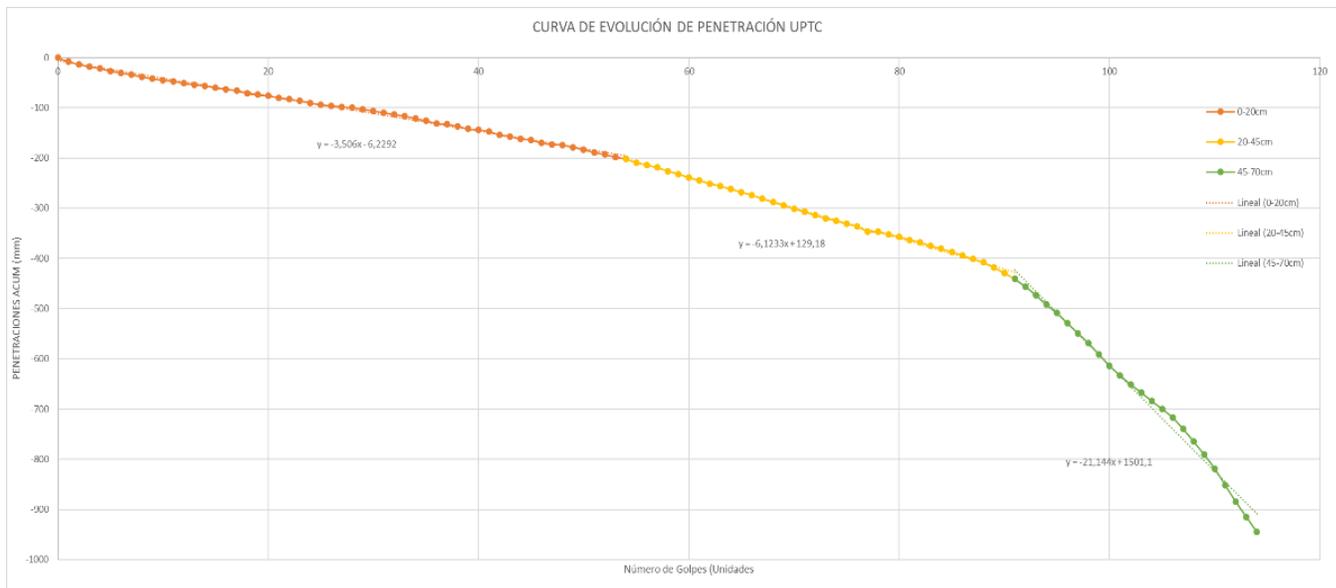


Figura 36: Curva de evolución de la penetración Abs K0+500 T1.

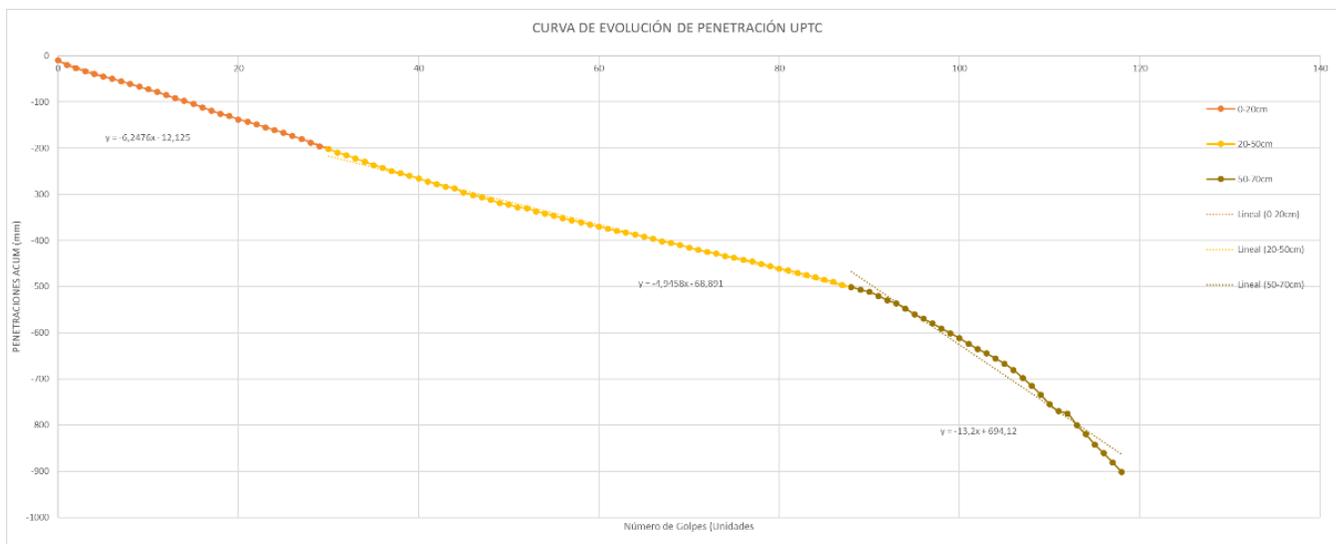


Figura 37: Curva de evolución de la penetración Abs K0+500 T2.

Después de realizar la curva de evolución de la penetración, se procedió a hallar el valor de %CBR para cada zona teniendo en cuenta la correlación mencionada anteriormente para suelos finos y el índice de penetración para cada zona.

Tabla 10:%CBR para la Abscisa K0+500 T1.

RESULTADOS					
Penetración (cm)	DN(%)	CBR			
		CBR % (G)UPTC	CBR Colombia Bateman	CBR Cuerpo De Ingenieros USA	Promedio
0-20	3,51	14,011806	15,9359258	4,77268853	11,5734735
20-45	6,12	9,92655716	10,8587724	1,56990901	7,45174617
45-100	21,144	4,60223188	4,61593916	0,1315234	3,11656481

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 11:%CBR para la Abscisa K0+500 T2.

RESULTADOS					
Penetración (cm)	DN(%)	CBR			
		CBR % (G)UPTC	CBR Colombia Bateman	CBR Cuerpo De Ingenieros USA	Promedio
0-20	6,3	9,74974795	10,6437394	1,48148148	7,29165626
20-50	4,9	11,3936522	12,6591316	2,44897959	8,83392114
50-100	13,2	6,16351833	6,38915166	0,33746556	4,29671185

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Para encontrar el valor de %CBR para cada tramo, se procedió a realizar un promedio entre los valores obtenidos en cada correlación. Cabe recordar que el estudio de suelo suministrado de la zona de estudio resalta que Este procedimiento se realizó para los resultados obtenidos en campo de los ensayos realizados cada 100 m en cada Tramo, en total fueron 24 ensayos realizados. Seguidamente de encontrar la curva de evolución de la penetración para cada abscisa se determinó que, en general, los tramos de diseño exhiben tres zonas representativas: a) 0-20 cm de espesor, está zona es una capa de recebo rojizo compactado usada como una capa de mejoramiento de suelo de subrasante en la zona de estudio; b) 20-50 cm de espesor, está zona representativa se caracteriza por ser la capa de transición entre la capa de recebo compactado y el suelo existente en la zona, se determinó que está capa pudo estar sometida a un proceso de compactación por las cargas de tránsito, además, del proceso de compactación de la capa a); y la capa c), 50-100 cm de espesor, está capa se cree que es el suelo de fundación de la zona.

Después de establecer las zonas o capas principales, se continuo con la determinación del %CBR de diseño. Para determinar el valor, se procedió a hallar el promedio de %CBR de la totalidad del tramo para cada zona. Para establecer el valor de %CBR, se analizó la capa de recebo compactada y se determinó que está capa funciona como un mejoramiento de la

subrasante, por lo cual, los valores %de CBR obtenidos allí, obligatoriamente tienen que ser tenidos en cuenta para la obtención final del %CBR de diseño para cada tramo.

Posteriormente de hallar un valor aproximado de %CBR para cada tramo utilizando el método del promedio, se realizó un análisis estadístico con un Nivel de Confianza de los datos del 80%, en seguida, se recalculo el valor de %CBR diseño para cada tramo. Por criterio del autor, se redujo el valor de %CBR diseño en un 10%.

- %CBR diseño Tramo 1: Pueblo Viejo.

Para el tramo 1, la abscisa K0+000 está representada en la Figura 11 como el Punto 1.

%CBR de diseño Tramo 1: 8%.

- CBR diseño Tramo Especial.

En el tramo 2, se realizó un ensayo a 50 m del Punto 4 representado en la figura 14, es decir, al frente del salón comunal de Cusagota, ya que, en la zona de aproximadamente 100 m no tiene el mejoramiento con recebo rojizo sobre la subrasante.

%CBR de diseño Tramo especial: 6%.

- CBR diseño Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.

La abscisa K0+000, del tramo2, se tomó a 100 m del Punto 4 representado en la figura 14, comprendido sobre el eje de la vía en la curva continua al punto de referencia.

%CBR de diseño Tramo 2: 8%.

Nota: El anexo 3, se encuentran el formato de toma de datos procesado y resultados obtenidos en Excel, además, se encuentra la totalidad del registro fotográfico de la zona.

Tabla 12: Resumen de %CBR Diseño Tramo 1:Pueblo Viejo.

Zona (cm)	Absica	K0+000	K0+100	K0+200	K0+300	K0+400	K0+500	K0+600	K0+700	K0+800	K0+900	K1+000	Promedio
1 (0-20)		11,07	8,31	24,39	13,25	8,44	11,57	11,38	9,80	17,17	13,25	10,60	12,66
2 (20-50)		7,21	10,60	11,07	6,29	5,25	7,45	7,88	10,83	10,83	9,62	6,89	8,54
3 (50-100)		4,76	6,74	7,29	13,25	5,18	3,12	6,78	6,89	10,18	5,81	3,04	6,64
CBR DE DISEÑO												9,28	
CBR DE DISEÑO F.S= 0,9												8,35	

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 13:Análisis estadístico de %CBR Diseño Tramo1:Pueblo Viejo.

Zona (cm)	Desviación Estandar	Nivel de Confianza del 80%	Intervalo menor	Intervalo mayor	CBR DISEÑO
1 (0-20)	4,61721485	1,280	6,75	18,57	11,48
2 (20-50)	2,10569477	1,280	5,84	11,23	8,87
3 (50-100)	2,9732568	1,280	2,83	10,45	5,98
CBR DE DISEÑO					8,78
Factor de S					0,9
Factor de S					7,8994413

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 14: Resumen de %CBR Diseño Tramo2: Salón Comunal Cusagota.

Zona (cm)	Absica	K0+000	K0+100	K0+200	K0+300	K0+400	K0+500	K0+600	K0+700	K0+800	K0+900	K1+000	Promedio
1 (0-20)		18,44	12,52	10,39	7,97	12,87	7,29	8,83	12,52	9,98	9,80	9,13	10,89
2 (20-50)		8,19	8,08	12,20	6,47	12,52	8,83	13,25	6,01	12,20	8,83	15,06	10,15
3 (50-100)		6,01	4,41	10,39	5,86	8,08	4,30	5,29	8,56	12,20	4,21	8,08	7,03
CBR DE DISEÑO												9,36	
CBR DE DISEÑO F.S= 0,9												8,42	

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 15: Análisis estadístico salón Comunal Cusagota.

Zona (cm)	Desviación Estandar	Nivel de Confianza del 80%	Intervalo menor	Intervalo mayor	CBR DISEÑO
1 (0-20)	3,1195443	1,280	6,89	14,88	10,13
2 (20-50)	2,99851612	1,280	6,31	13,99	9,66
3 (50-100)	2,64994495	1,280	3,64	10,43	7,03
CBR DE DISEÑO					8,94
Factor de S					0,9
					8,05

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 16: Resumen de %CBR Diseño Tramo especial.

Penetración (cm)	DN(%)	CBR % (G)UPTC	CBR Colombia Bateman	CBR Cuerpo De Ingenieros USA	Promedio
0-25	5,5	10,6061963	11,6893121	1,943801653	8,07977003
25-70	6,6	9,47255835	10,3075131	1,349862259	7,04331123
70-100	8,4	8,15701708	8,72743258	0,833333333	5,90592767
CBR DE DISEÑO					7,00966964
CBR DE DISEÑO F.S=0,9					6,30870268

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 17: Análisis estadístico de %CBR Diseño Tramo especial.

Zona (cm)	Desviación Estandar	Nivel de Confianza del 80%	Intervalo menor	Intervalo mayor	CBR DISEÑO
1 (0-20)	5,34142919	1,280	1,24	14,92	8,08
2 (20-50)	4,94831368	1,280	0,71	13,38	7,04
3 (50-100)	4,40224413	1,280	0,27	11,54	5,91
CBR DE DISEÑO					7,01
Factor de S					0,9
					6,30870268

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

4.2.4. Ensayo de CBR en Laboratorio.

En campo, se recolecto material del tramo 1, tramo 2 y del material en afirmado existente en la zona, sin embargo, del tramo especial no se recolecto material, ya que, la selección de puntos se debe hacer de manera aleatoria. El objetivo de este ensayo fue hacer una verificación de los datos obtenidos en el ensayo en campo. Para eso, se seleccionó la Abscisa K0+500 de cada tramo.

4.2.4.1. Apiques.

Para la obtención de las muestras, se tomaron muestras de suelo en dos puntos diferentes:

- el punto 1, está ubicado sobre la abscisa K0+500 del tramo 1,
- el punto, está ubicado sobre la abscisa K0+500 del tramo 2.



Figura 38: Apiques viales.



Figura 39: Apiques viales.



Figura 40: Capa de afirmado tramo 1: Pueblo viejo.



Figura 41: Capa de afirmado tramo 2. Salón comunal Cusagota.

El material extraído, se tomó en el rango de 20 a 50 cm de profundidad, asimismo, se comprobó el espesor de la capa de afirmado de 20 cm.

4.2.4.2. *Humedad Natural.*

Para este ensayo, se obtuvo el apoyo del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, con la facilidad del equipo de laboratorio. Además, el ensayo se realizó teniendo en cuenta la norma INV-E-122-13 (Vías & Transporte, 2007).

Luego de realizar los apiques, se procedió a obtener la humedad natural del suelo:

- Para el tramo 1: pueblo viejo, la humedad natural obtenida en laboratorio es de 5.54%.
- Para el tramo 2: Salón comunal de Cusagota, la humedad natural obtenida en laboratorio es de 4.24%.
- Para el material en afirmado, la humedad natural obtenida en laboratorio es de 2.44%.

Las memorias de cálculo, se encuentran adjuntan en el Anexo 4-Ensayo CBR de laboratorio, en el Excel 1. Humedad Natural.

4.2.4.3. Ensayo de proctor modificado.

Para este ensayo, se obtuvo el apoyo del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, con la facilidad del equipo de laboratorio. Además, el ensayo se realizó teniendo en cuenta la norma INV-E-142-13 (Vías & Transporte, 2007).

Se realizó procedimiento de acuerdo al procedimiento sugerido por la norma mencionada anteriormente.

Luego, se procedió a hallar la humedad optima de compactación del suelo, por lo cual, se realizó el ensayo de compactación modificado.



Figura 42:Procedimiento de tamizado del Material, Tamiz 3/4".



Figura 43:Separación del material por tramos, Peso 5 kg.



Figura 44:Procedo de mezcla del material con la humedad requerida.



Figura 45:Proceso de compactación: 5 capas, 56 golpes por capa.

Así pues, después de realizar y tomar los valores correspondientes al ensayo de compactación modificado en el laboratorio, se continuó realizando el trabajo de oficina, para hallar el valor de humedad óptima de laboratorio para cada muestra de suelo a través de la curva de compactación.

- Humedad óptima de Laboratorio Tramo 1: Pueblo viejo.

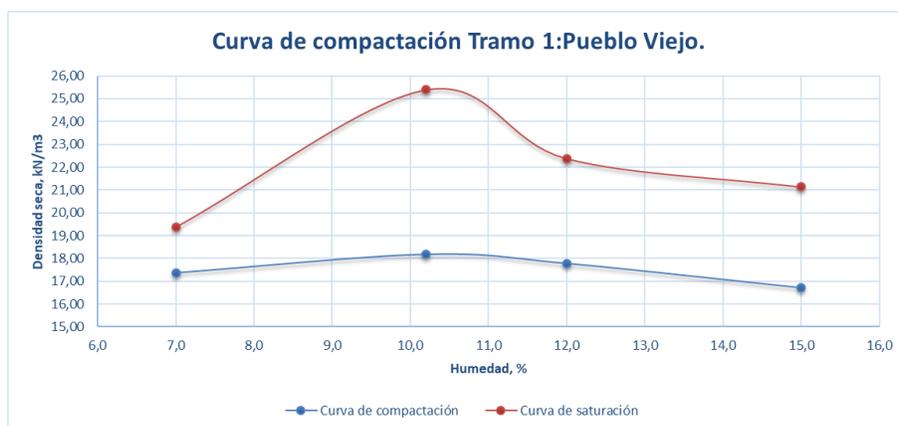


Figura 46:Curva de Compactación tramo 1: Pueblo viejo.

Humedad óptima de laboratorio: 10.25%.

- Humedad óptima de Laboratorio Tramo 2: Salón comunal Cusagota.



Figura 47: Curva de Compactación tramo 2: Salón comunal Cusagota.

Humedad óptima de laboratorio: 8.4%.

- Humedad óptima de Laboratorio Material en afirmado.

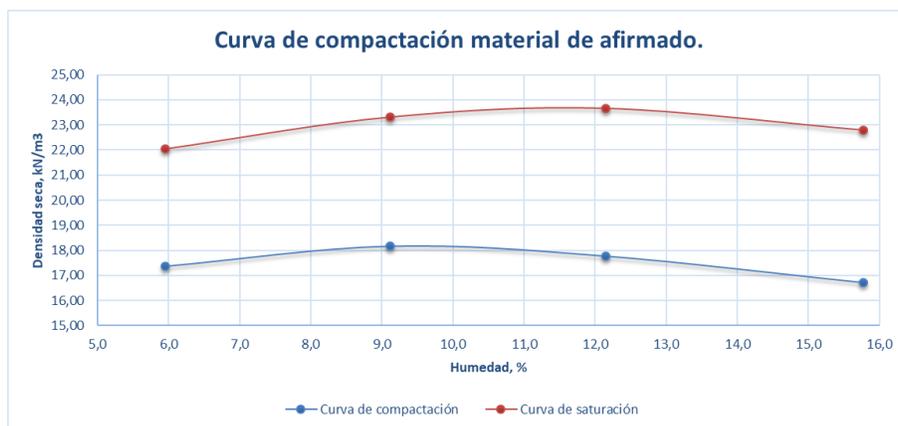


Figura 48: Curva de Compactación material en afirmado.

Humedad óptima de laboratorio: 5.25%.

4.2.4.4. *Ensayo de CBR en laboratorio.*

Para este ensayo, se obtuvo el apoyo del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, con la facilidad del equipo de laboratorio. Además, el ensayo se realizó teniendo en cuenta la norma INV-E-148-13 (Vías & Transporte, 2007).

Se realizó procedimiento de acuerdo al procedimiento sugerido por la norma mencionada anteriormente .



Figura 49:Procedimiento de tamizado del material: Tamiz 3/4".



Figura 50: Separación del material, peso 5 Kg.



Figura 51:Proceso de engrase de los moldes.



Figura 52:Procedo de mezcla del material con la humedad requerida.



Figura 53:Proceso de compactación: 5 capas.



Figura 54:Sobrecarga sobre la muestra.



Figura 55: Proceso de sumergido de las muestras.



Figura 56: Montaje de falla del molde.

Así pues, después de realizar y tomar los valores correspondientes al ensayo en el laboratorio, se continuó realizando el trabajo de oficina, con el fin de hallar las curvas correspondientes exigidas por la norma INV-E-148-13 (Vías & Transporte, 2007).

Nota: El anexo 4, se encuentran el formato de toma de datos procesado y resultados obtenidos en Excel, además, se encuentra la totalidad del registro fotográfico de la zona.

- Tramo 1: Pueblo viejo.

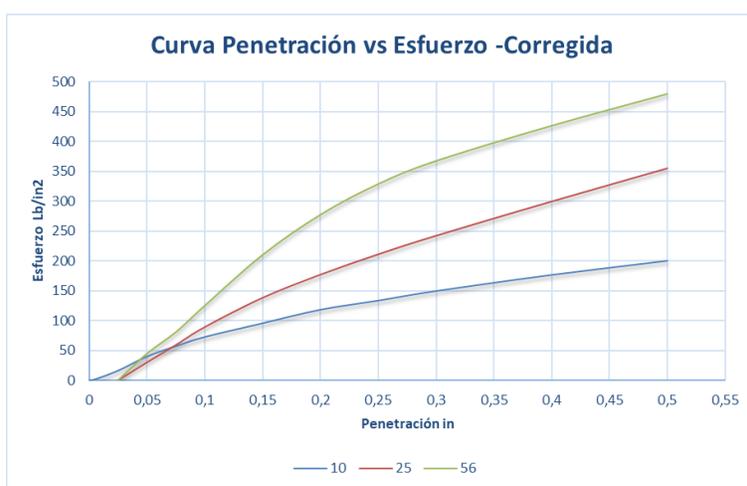


Figura 57: Curva penetración Vs Esfuerzo Corregida Tramo 1: Pueblo viejo.

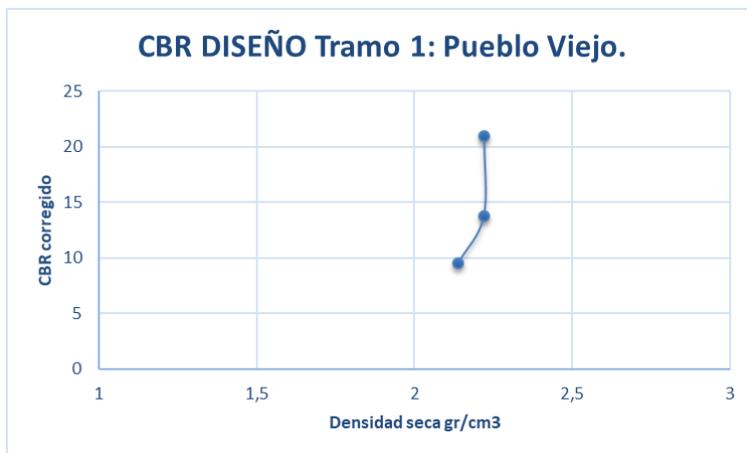


Figura 58: Curva de CBR Tramo 1: Pueblo viejo.

Tabla 18: Resumen CBR Tramo 1: Pueblo viejo.

Parámetro	Número de Golpes		
	10	25	56
CBR MÁX	10	14	21
Densidad seca	2,13835211	2,21988972	2,22125382

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

- Tramo 2: Salón comunal de Cusagota.

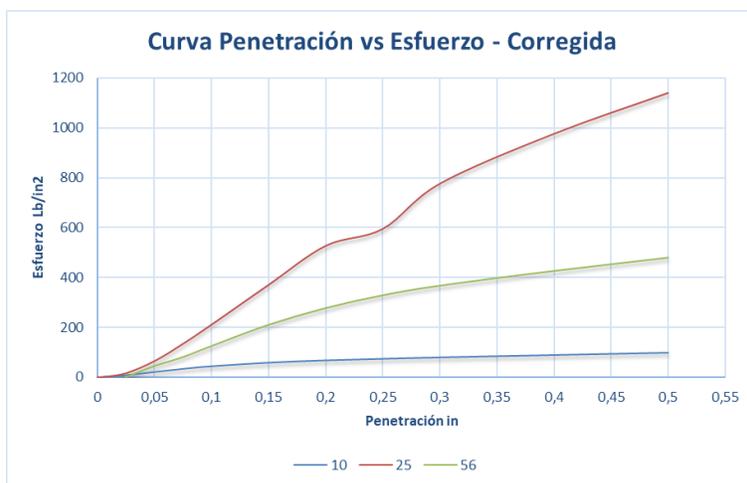


Figura 59: Curva penetración Vs Esfuerzo Corregida Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.

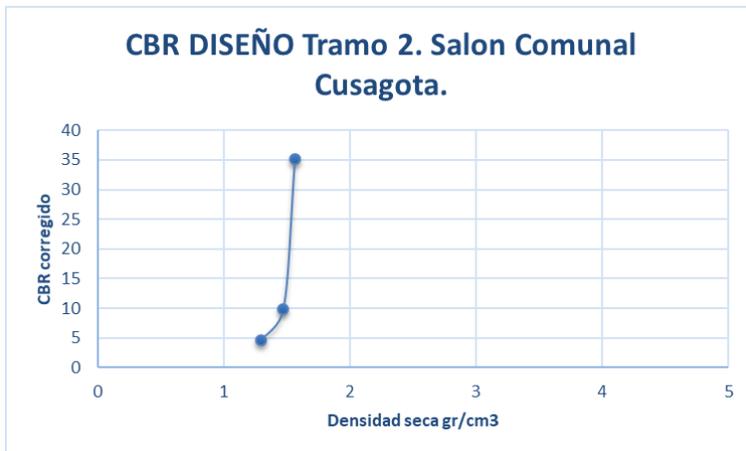


Figura 60:Curva de CBR Tramo 2: Salón comunal de Cusagota.

Tabla 19:Resumen CBR Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.

Parámetro	Número de Golpes		
	10	25	56
CBR MÁX	5	10	35
Densidad seca	1,29271911	1,47346747	1,56631856

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

- Material en afirmado.

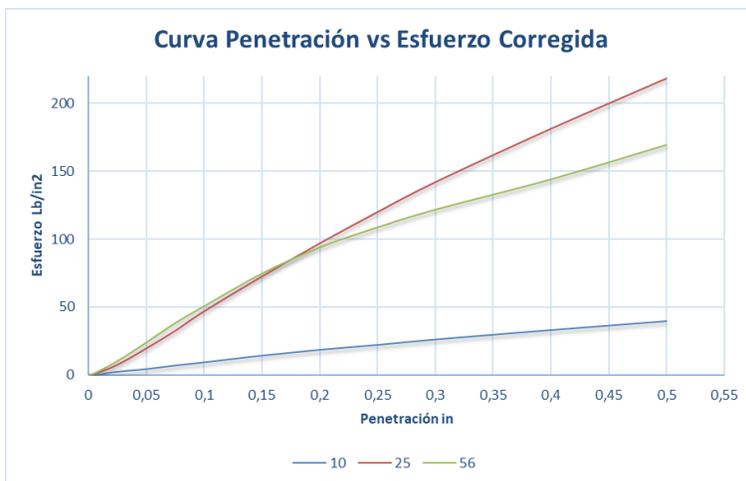


Figura 61:Curva penetración Vs Esfuerzo Corregida Material en afirmado.

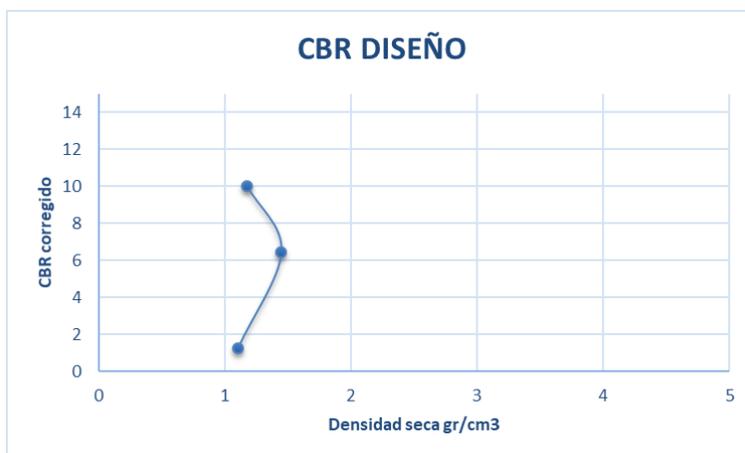


Figura 62: Curva de CBR material en afirmado.

Tabla 20: Resumen CBR material en afirmado.

Parámetro	Número de Golpes		
	10	25	56
CBR MÁX	1	6	6
Densidad seca	1,10607333	1,45002062	1,17880988

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

- %CBR diseño Tramo 1: Pueblo Viejo.

Para el tramo 1, la abscisa K0+500 está representada en la Figura 58.

%CBR compactación crítica de diseño Tramo 1: 10%.

- CBR diseño Tramo 2: Salón Comunal Cusagota.

La abscisa K0+500, del tramo2, se tomó a 100 m del Punto 4 representado en la figura 60, comprendido sobre el eje de la vía en la curva continua al punto de referencia.

%CBR compactación crítica de diseño Tramo 2: 5%.

4.2.5. Comparación entre el PDC y el CBR de laboratorio.

A través del ensayo de CBR en laboratorio, se pudo comprobar que los datos conseguidos en campo (ensayo del Penetrómetro dinámico de cono) son válidos, ya que, los resultados obtenidos en laboratorio para la abscisa K0+500 de cada tramo, es similar a los resultados obtenidos en campo para la misma abscisa, por lo cual, se determina y se asume que el ensayo en campo fue realizado de forma correcta. Así pues, para el diseño de las estructuras de pavimento se tendrán en cuenta los valores de CBR obtenidos en campo. Sin embargo, los resultados de laboratorio obtenidos para el material en afirmado son un poco bajos, ya que, al ser un material de mejoramiento, tratado en cantera, los resultados alcanzados no son acorde a lo esperado, por consiguiente, se sugiere no tener los valores resultantes para el material en afirmado y repetir en ensayo en laboratorio de CBR para este material y hacer el ensayo para materiales granulares.

Tabla 21: Comparación de valores obtenidos de % CBR.

COMPARACIÓN DE VALORES		
% DE CBR Abscisa K0+500		
Ensayo	Tramo 1: Pueblo Viejo	Tramo 2: Salón Comunal Cusagota
Campo	7,38	6,8
Laboratorio	10	5

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Capítulo 5.

Procedimiento de diseño estructuras de pavimento

5.1. Procedimiento de diseño método ASHTOO 93

1) Calculo de N=W18

La gobernación de Boyacá determino que el valor de diseño de N es de 256.590 para todo el tramo de estudio.

2) Establecer el Modulo resiliente de la subrasante

Para determinar el módulo resiliente de la subrasante, se establece según la fórmula propuesta por la Guía AASHTO 2002(Herrera-Montealegre, 2014).

$$Mr(psi) = 2555x CBR^{0.65} \quad (1)$$

Para obtener el CBR de diseño, se tuvo en cuenta el valor obtenido por el modelo propuesto en el ensayo del Penetrometro Dinámico de Cono y verificado en el Ensayo de CBR de laboratorio, de ahí que, el ensayo de Penetrometro nos muestra los valores del estado actual de la vía “*in situ*”.

- Tramo 1: Pueblo Viejo.

%CBR de diseño Tramo 1: 8%.

Módulo resiliente de la Subrasante= 9871.9 psi

- Tramo 2: Salón comunal Cusagota.

%CBR de diseño Tramo 2: 8%.

Módulo resiliente de la Subrasante= 9871.9 psi

- Tramo 3: Tramo especial.

%CBR de diseño Tramo especial: 6%.

Módulo resiliente de la Subrasante= 8188.2 psi

- 3) Establecer el Modulo resiliente de la Subbase

Según la Norma Invias Especificaciones generales para carreteras 2013, el valor de CBR mínimo es del 30 % por lo cual,

Módulo resiliente de la Subbase= 23308.8 psi

- 4) Establecer el Módulo resiliente de la Base

Según la Norma Invias Especificaciones generales para carreteras 2013, el valor de CBR mínimo es del 80 % por lo cual,

Módulo resiliente de la base= 44096.03 psi

- 5) Establecer el Modulo de elasticidad del concreto asfaltico.

Según la documentación suministrada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,

Módulo de elasticidad cemento asfáltico= 350.000 psi

- 6) Establecer el nivel de confianza (R) igual que el error estándar So.

El nivel de confianza R se determinó de acuerdo a el valor sugerido por el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Alvarez & De, 2008).

El valor de So tomado es de 0.44, sugerido también por el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Alvarez & De, 2008).

- 7) Determinar los coeficientes estructurales de cada capa.

Se tomaron los valores sugeridos en el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Alvarez & De, 2008) representados en la tabla 21.

Tabla 22: Coeficientes estructurales del diseño (a).

Tipo de capa		Clasificación climática por temperatura	a_i
Descripción de la Capa	Nomenclatura		
Mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2	MDC-2	Frío	0.44
		Templado	0.41
		Cálido	0.37
Mezcla asfáltica densa en frío tipo 2	MDF-2	Frío	0.40
		Templado	0.37
		Cálido	0.34
Suelo estabilizado con emulsión asfáltica	BEE-3	Todas las categorías	0.14
Suelo estabilizado con cemento Portland	BEC	Todas las categorías	0.14
Base granular	BG	Todas las categorías	0.14
Subbase granular	SBG	Todas las categorías	0.12
Afirmado que cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-1	Todas las categorías	0.08
Afirmado que no cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-2	Todas las categorías	0.06

Fuente: Obtenida de: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Alvarez & De, 2008), p 82.

- Valor de a_1 (Cemento asfáltico)

Para una mezcla en caliente tipo 2, $a_1=0.44$.

- Valor de a_2 (Base granular)

Para una Base granular, $a_2=0.14$.

- Valor de a_3 (Sub-Base granular)

Para una Sub-Base granular, $a_2=0.12$.

8) Calcular el cambio en el índice de prestación de servicio.

Según el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, el valor establecido es de 2.2.

9) Cálculo de los números estructurales de las estructuras.

Para el cálculo de los números estructurales, se hizo de acuerdo a la ecuación (2).

$$\text{Log}(N) = Z_r \times S_o + 9.36 \times \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \left[\frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta IPS}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1.094}{(SN+1)^{5.19}}\right)} \right] + 2.32 \times \text{Log}(Mr) - 8.07 \quad (2)$$

En donde, los valores referentes al tránsito, se tomaron del estudio de tránsito y de las recomendaciones del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Alvarez & De, 2008). Asimismo, se tiene en cuenta la siguiente nomenclatura:

SN1, es el número estructural de la capa asfáltica.

SN2, es el número estructural de la Base granular.

SN3, es el número estructural de la Sub-Base granular.

- Tramo 1: Pueblo Viejo.

SN1=1.2792

SN2=1.6724

SN3= 2.3086

- Tramo 2: Salón comunal Cusagota.

SN1=1.2792

SN2=1.6724

SN3= 2.3086

- Tramo 3: Tramo especial.

$$SN1=1.2792$$

$$SN2=1.6772$$

$$SN3= 2.4658$$

10) Determinar el valor del coeficiente de drenaje (m_i) de acuerdo a la capacidad del drenaje.

Para hallar los coeficientes de drenaje, se tiene en cuenta la capacidad y tiempo de drenaje, que, para este caso, y según el estudio hidrológico es Bueno. Además, se hallaron de acuerdo a la tabla 22. Según el estudio hidrológico de la zona, la clasificación climática de la zona es Húmedo, por lo cual, el valor de m_i es de 0.95.

Tabla 23: Coeficientes de drenaje (m_i).

Clasificación climática por humedad	m_i
Árido	1.15
Semi-árido	1.05
Sub-húmedo	1.00
Húmedo	0.95
Muy húmedo	0.85

Fuente: Obtenida de: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Alvarez & De, 2008), p 82.

5.2. Procedimiento de diseño método The SuDS Manual

5.2.1. Diseño estructural del pavimento poroso.

1) Selección y construcción del pavimento poroso

Para seleccionar el tipo de pavimento poroso, se acude a la figura 20.17, asimismo, se acude al apoyo en la tabla 20.1 de “The SuDS Manual-V.6”. Para este caso, se decidió que por las condiciones de la subrasante y el CBR de diseño el tipo de pavimento poroso a usar será el TIPO C, es decir, sin infiltración a la subrasante.

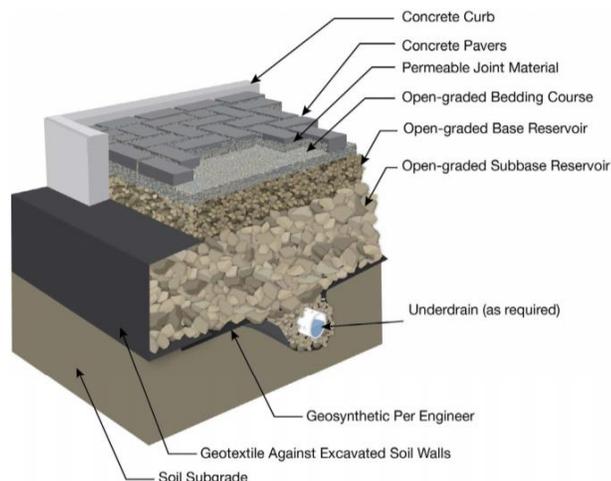


Figura 63:Sección perpendicular al eje de la vía.(Smith, 2001).

2) Determinación del CBR

Para el diseño del pavimento poroso, se usará el mismo valor de CBR de diseño obtenido en el ensayo del Penetrometro Dinámico de Cono.

3) Seleccionar categoría de tráfico de la tabla 20.5 de “The SuDS Manual-V.6”.

De acuerdo a la información recopilada, la categoría de tráfico para nuestro diseño es 6. Para elegir la categoría de tránsito, se evalúa de acuerdo al valor de Tránsito (N) que en nomenclatura inglesa es msa.

4) Seleccionar espesor de la capa de rodadura

Para zonas aledañas del proyecto, se han realizado estudios enfocados en el estudio de los pavimentos porosos (Acero Vargas, Yeison Eduardo;Hernandez Cepeda, 2015), para lo cual, se tendrán en cuenta algunos de los valores determinados en estos trabajos. El valor de módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica según Acero (2015) varía entre 1GPa y 8 GPa (valores

encontrados con materiales cerca al proyecto de estudio), teniendo en cuenta estos valores, se procedió a realizar el diseño del espesor de la capa de rodadura.

De acuerdo a la tabla 20.8 “The SuDS Manual-V.6”., el espesor de la capa de rodadura para cemento poroso teniendo en cuenta la opción 2 de diseño es de 8 cm. Aprox. 4”, asimismo, la tabla 20.6, nos da el módulo de rigidez de la estructura de 3.2 GPa.

5) Determinar el espesor total de la estructura

De acuerdo a la tabla 20.8 “The SuDS Manual-V.6”., el espesor total de la estructura es de 15”.

6) Determinar el espesor de la base y sub base permeable

De acuerdo a la tabla 20.8 “The SuDS Manual-V.6”, los espesores de acuerdo a la capa de la estructura son los siguientes:

- Base granular

El espesor de la capa Base granular es de 12.5 cm, aproximadamente 5”.

- Sub-Base granular

El espesor de la capa Sub-Base granular es de 15 cm, aproximadamente 6”, sin embargo, para esta capa el espesor será de 10” por recomendación del ingeniero Jaime Pedroza, docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

5.2.2. Diseño hidráulico del pavimento poroso.

1) Determinar el valor de infiltración del pavimento poroso.

El valor de infiltración de la zona se halló en el estudio de hidrológico, dando como resultado, que en la zona el valor de infiltración es de 332.10 mm/año, que corresponde a un 34% de la precipitación media anual. Sin embargo, este es el valor de infiltración de la zona, por lo cual, no presenta una relación con el valor de infiltración de diseño del pavimento, por consiguiente, el valor de infiltración de la superficie de pavimento es diferente. Por su parte, el método de diseño The SuDS Manual, nos recomienda tomar un valor mínimo de infiltración de la superficie porosa de 2500 mm/h que equivale a 2.5 m/h.

Para el diseño, y teniendo en cuenta las recomendaciones propuestas por el método The SuDS Manual, el valor de infiltración de diseño será 2500 mm/h.

2) Determinar la capacidad de almacenamiento del pavimento poroso.

La capacidad de almacenamiento del pavimento poroso, está determinado por el espesor de la capa de Sub-Base Granular, sin embargo, como para el presente proyecto el tipo de infiltración a la sub rasante es nula, es decir, es tipo C, el método The SuDS Manual nos sugiere que para calcular la capacidad de almacenamiento de la Sub-Base Granular, es necesario seguir las indicaciones de “*Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements*” (Interpave, 2010). En la página 27 de la guía mencionada nos dice que:

$$\text{Volumen almacenado} = \text{volumen de lluvia} - \text{volumen de salida} \quad (3)$$

Según el proyecto, el periodo de diseño es de 5 años, por lo cual, para calcular el volumen de lluvia se tomará la precipitación máxima con periodo de retorno de 5 años del estudio hidrológico de la zona. Al mismo tiempo, *Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements* (Interpave, 2010) indica que la duración óptima de diseño es de 60 minutos, es decir, precipitaciones con duración de 60 minutos.

Según la figura 7: Curvas IDF. Cuenca quebrada Busbanzá. La intensidad de lluvia con duración de 60 minutos y un periodo de retorno de 5 años es de 30 mm/h. Con este valor podemos dirigirnos al siguiente numeral y calcular el espesor de la Sub-Base granular.

- 3) Determinar la profundidad de la sub base permeable para el volumen de agua requerido teniendo en cuenta la porosidad de la sub base

Continuando con lo indicado en *Guide to the design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements* (Interpave, 2010), para calcular el espesor de la capa de Sub-Base Granular, la tabla 5 de la página 30, indica el espesor de Sub-Base Granular recomendado para el diseño hidráulico. Para el proyecto, el espesor de la Sub-Base Granular es de 18 cm.

- 4) Espesor final de la Sub-Base granular

El espesor de Sub-Base Granular de diseño será el mayor entre el obtenido por el diseño estructural y el diseño hidráulico. El espesor de la capa Sub-Base Granular será de 10''. De la misma manera, como para el diseño, se eligió un diseño TIPO C, es necesario calcular la separación de tubos con los cuales, se harán el correcto desalojo del agua recogida por la estructura de pavimento. Figura 66. Figura 67.

Para calcular la distancia de separación entre tubos, se usa la ecuación (4).

$$q = k\left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (4)$$

En donde,

q= máxima intensidad de lluvia (m/s). En el proyecto, el valor de infiltración mínimo es mayor a la máxima intensidad de lluvia, por lo cual, el valor es de 2500 mm/h.

k = coeficiente de permeabilidad de la base granular y sub-base granular (m/s). Según The SuDS Manual, el valor mínimo es de 6×10^{-2} m/s.

h = máxima espesor de almacenamiento (Base Granular y Sub-Base Granular) (m). Para el proyecto, el espesor es de 0.379 m.

$2b$ = distancia entre tubos (m).

La distancia entre tubo perforado calculada es de 7 m, es decir, en la abscisa K0+000 es necesario poner el primer tubo perforado, el segundo tubo perforado irá en la abscisa k0+007 de manera perpendicular al eje de la vía.

Para el cálculo del diámetro de tubo, se hace de acuerdo a un diseño hidráulico propuesto en el capítulo 24 de The SuDS Manual, y depende del sistema de intersección y salida de aguas definido por el diseñador, además, el material del tubo perforado, sin embargo, en ningún caso, el diámetro del tubo debe ser menor a 6".

Así mismo, para el diseño es necesario calcular el flujo de agua horizontal, el cual, se hará de acuerdo a la ecuación de Darcy (6).

$$Q = A * k * i \quad (6)$$

En donde,

Q = Flujo de agua Horizontal (m³/s) transportado por la sub-base granular hasta el tubo perforado de intersección de agua. Ver Figura 65.

A =Área de la sección perpendicular al eje de la vía del drenaje. Para el proyecto, la separación entre tubos perforados es de 7 m y el espesor de la capa de almacenamiento de agua es de 0.379m. Por lo cual, el área es 2.653 m²

k = coeficiente de permeabilidad de la base granular y sub-base granular (m/s). Según The SuDS Manual, el valor mínimo es de 6×10^{-2} m/s.

i = Gradiente hidráulico. (El gradiente hidráulico es la cabeza de agua que conduce el flujo pendiente normal de la capa Sub Base Granular). Para el proyecto, la pendiente normal mínima para la capa de sub base granular es de 1%.

El flujo de agua horizontal calculado es de 0.16 m³/s.

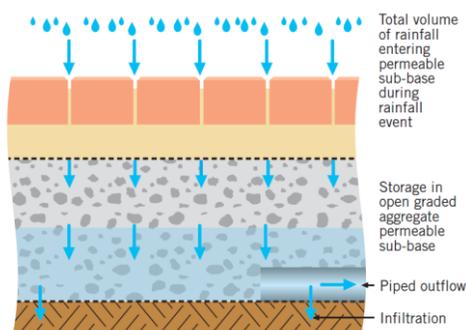


Figura 64: Salida de flujo y capacidad de almacenaje TIPO C. (Interpave, 2010). Pag 27.

Para calcular el volumen de agua almacenado, se usa la fórmula (7).

$$V = W \times L \times D \quad (7)$$

En donde,

V = Volumen de agua almacenada linealmente.

W = Ancho del Pavimento, para el proyecto, el ancho de calzada es de 6 m.

L = Longitud del Pavimento, para el proyecto, se dividirá en tramos de 7 m, gracias a que 7 m es la separación entre tubos perforados.

D =Profundidad de la capa de almacenaje, para el proyecto, la profundidad de almacenaje de agua es de 0.379 m.

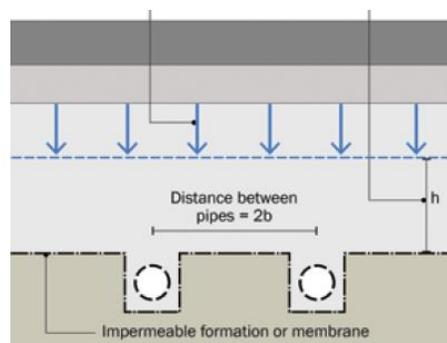


Figura 65: Separación tubos para salida del flujo (Kellagher et al., 2015).

El volumen de agua almacenado por tramo de 7 m es de 15.918 m³.

- 5) Determinar el espesor de la Sub-Base Granular en zonas de pendientes longitudinales mayores a 3%

Para zonas de pendiente mayores al 3%, The SuDS Manual recomienda aumentar el espesor de la Sub-Base y construir unas estructuras especiales llamadas *presas* (*check dam en inglés*), las cuales, se encargarán de regular y transportar el caudal de agua recogido.

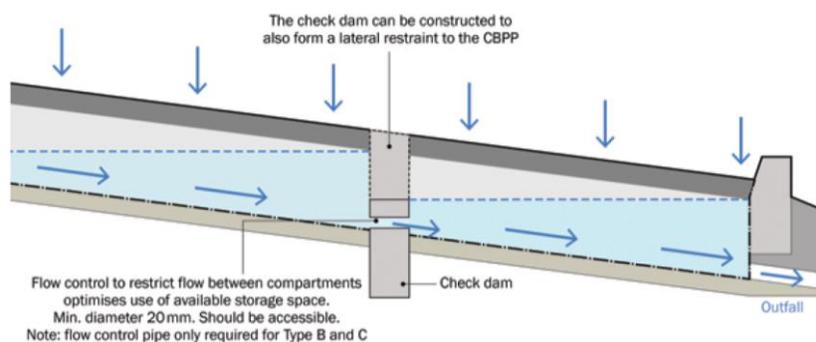


Figura 66: Estructuras de control de flujo para superficies inclinadas. (Kellagher et al., 2015).

Sin embargo, para el proyecto, la capa de base granular también se tiene en cuenta en el cálculo del almacenamiento de agua, por lo cual, el espesor de la capa de sub base granular no se modificará. Por otro lado, el sistema de chequeo de presas se coloca a la misma separación de los tubos, es decir, cada 7 m. No se debe olvidar que el Método The SuDS Manual, nos restringe en el orificio de la presa, según, el Método The SuDS Manual, el diámetro mínimo de orificios es de 20 mm.

Para calcular el volumen de agua almacenado, se usa la fórmula (8).

$$V = 0.5 \times I \times T \times B \quad (8)$$

En donde,

V= Volumen de agua almacenada.

B= Ancho de la capa de almacenamiento de agua. Para el proyecto, 6 m.

I= Longitud de la Sub-Base Granular, en donde, el agua podrá ser almacenada, dada por: $I =$

$T/\tan\beta$

T= Espesor de la capa de almacenamiento medida verticalmente, para el proyecto el espesor de esta capa es de 0.379 m.

β = Angulo de inclinación de la superficie, según el estudio topográfico, la pendiente máxima de la zona es 20%, $\beta = 11^\circ$.

El volumen de agua almacenado para el punto más crítico es 2.21 m.

Nota: El diseño se puede utilizar en los dos tramos de estudio.

5.3. Procedimiento para el mejoramiento con arena asfalto estabilizada

Además de lo estipulado, se quiere evaluar la posibilidad de realizar un mejoramiento de la zona de estudio con Arena asfalto estabilizada, para el diseño del mejoramiento, se realizará conforme al Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Ministerio de Transporte & INVIAS, 2007).

Se procede a determinar la clase de tránsito mediante conteos previos realizados en la vía. De acuerdo al estudio de tránsito suministrado por la Gobernación de Boyacá, se procede a determinar el nivel de tránsito para la zona de estudio.

Para los dos tramos, se determinó que el nivel de tránsito es T2 acorde a la tabla 2.1 del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Ministerio de Transporte & INVIAS, 2007).

Tabla 24: Tabla 2.1. Niveles de Tránsito.

Nivel de tránsito	Número de ejes equivalentes de 80 kN durante el período de diseño en el carril de diseño
T1	< 150.000
T2	150.000 - 500.000

Fuente: Tomado de: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito [39].

En seguida, se procede a determinar la categoría de la sub rasante, este procedimiento se realiza conforme a la tabla 4.4 del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Ministerio de Transporte & INVIAS, 2007). Para los tramos de estudio, se llega a la conclusión de acuerdo al CBR de diseño determinado anteriormente que la sub rasante se clasifica en S3, Buena.

Tabla 25: Tabla 4.4. Categorías de la Sub Rasante.

CATEGORÍA	CBR (%)	COMPORTAMIENTO COMO SUBRASANTE
S1	$CBR \leq 3$	Malo
S2	$3 < CBR \leq 5$	Regular
S3	$5 < CBR \leq 10$	Bueno
S4	$CBR > 10$	Muy Bueno

Fuente: Tomado de: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito [39].

Luego, nos dirigimos a la figura 5.1 y la figura 5.2 del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Ministerio de Transporte & INVIAS, 2007) (ya que los tramos 1 y 2 de estudio presentan un afirmado existente utilizable).

Según lo escrito anterior, se determina que la estructura definitiva del pavimento.

Capítulo 6.

Resultados obtenidos

6.1. Metodología de diseño AASHTO 1993

Luego de calcular los números estructurales, se procede a determinar los espesores de cada capa conforme a las fórmulas (8), (9) y (10).

$$DN1 = \frac{SN1}{a1} \quad (8)$$

$$DN2 = \frac{(SN2-SN1)}{(a2*mi)} \quad (9)$$

$$DN2 = \frac{(SN3-SN2)}{(a3*mi)} \quad (10)$$

Tramo 1: Pueblo viejo.

DN1=2.90''

Sin embargo, la metodología AASHTO 1993 nos recomienda usar unos valores mínimos de espesor de capa, para capa de rodadura es de 2.5'', por consiguiente, se realizó la respectiva verificación y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 3''.

DN2=2.95''

No obstante, la metodología AASHTO 1993 nos recomienda usar unos valores mínimos de espesor de capa, para capa de base granular es de 4'', por consiguiente, se realizó la respectiva verificación y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 4''.

DN3=5.58''

En cambio, para la capa de Sub Base Granular el espesor será de 10'' por recomendación del ingeniero Jaime Pedroza, docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- **Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota.**

DN1=2.90''

De la misma manera que en el caso anterior, se realizó la respectiva verificación de los valores mínimos recomendados y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 3''

DN2=2.95''

De la misma manera que en el caso anterior, se realizó la respectiva verificación de los valores mínimos recomendados y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 4''

DN3=5.58''

De la misma manera que en el caso anterior, se realizó la respectiva verificación de los valores mínimos recomendados y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 10''

- **Tramo especial.**

DN1=2.90''

De igual forma que en el caso anterior, se realizó la respectiva verificación de los valores mínimos recomendados por la metodología y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 3''

DN2=2.95''

De igual forma que en el caso anterior, se realizó la respectiva verificación de los valores mínimos recomendados por la metodología y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 4''

DN3=6.95''

De la misma manera que en el caso anterior, se realizó la respectiva verificación de los valores mínimos recomendados y se seleccionó espesor de capa de rodadura de: 10’’

Ya que los espesores seleccionados para los tramos de diseño son los mismos, se presenta un diseño general y definitivo para la zona de estudio, el cual , está representado en la figura 69.

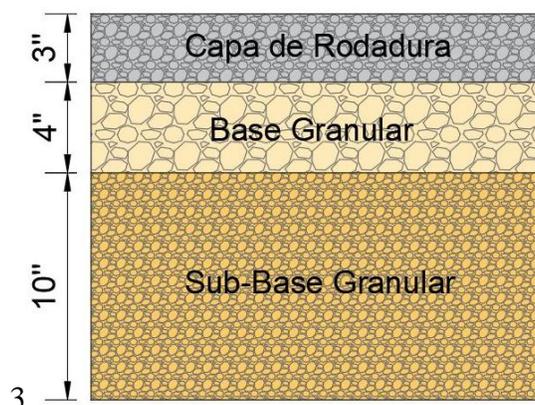


Figura 67:Diseño final obtenido por la metodología AASHTO 1993.

6.1.1. Materiales de Construcción.

Para la construcción del diseño por la metodología AASHTO 1993, los materiales de construcción deben cumplir con las especificaciones descritas en las tablas 320-2,320-3,330-2,330-3 y 450-3 de las *Especificaciones generales de construcción de Carreteras*(Instituto Nacional de Vías & Transporte, 2012) .

6.2. Método de diseño “The SuDS Manual”.

Para el diseño del pavimento permeable, se determinó que los tres tramos, están evaluados en el mismo estudio de tránsito, por lo cual, la clasificación del tránsito en los tres tramos es la misma lo que permite entregar una sola solución para los tres tramos. El método de diseño The SuDS Manual, en su metodología nos entrega unos parámetros que se deben entregar en la solución final del sistema:

Tipo de Sistema: Tipo C, sin infiltración.

Espesor total de la estructura: 19''.

Tipo de capa de rodadura y espesor: Cemento asfáltico, espesor 4''.

Tipo de Base Granular y espesor: HBCGA, espesor 5''.

Tipo de Sub Base Granular y espesor: CGA, espesor 10''.

Capa de cubierta (Capping): Espesor incluido en la Sub Base Granular.

Geotextil impermeable: Si.

Distancia entre tubos perforados: 7 m.

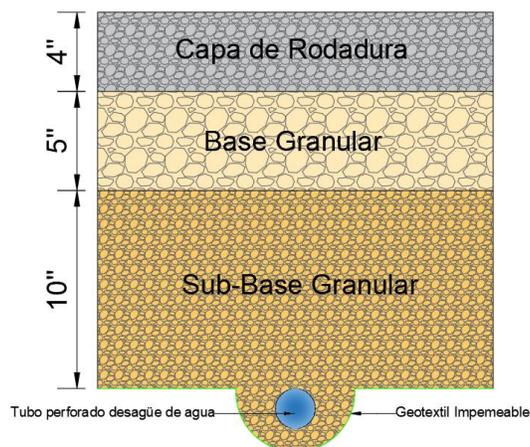


Figura 68: Diseño final obtenido por el Método "The SuDS Manual".

6.2.1. Materiales de Construcción.

Para la construcción del diseño por el método de diseño The SuDS Manual, los materiales de construcción deben cumplir con las especificaciones descritas en el mismo manual en la sección 20.11, además, deben cumplir debe cumplir con el artículo 453-13 de las

Especificaciones generales de construcción de Carreteras(Instituto Nacional de Vías & Transporte, 2012) y estar de acuerdo a la norma ASTM C 1701M-09.

6.3. Espesores de capas obtenidos por el mejoramiento con arena asfalto estabilizada

Para el mejoramiento de la vía con arena asfalto estabilizada la norma INVIAS 442P (Instituto Nacional de Vías - Colombia, 2017), en la tabla 442P-4 nos restringe unos valores mínimos de espesor de capas. En la tabla 25, se encuentran ilustrados los valores mínimos exigidos por la norma.

Tabla 26: Valores mínimos exigidos por la norma INVIAS 442P.

TIPO DE CAPA	ESPESOR COMPACTO (mm)	TIPO DE MEZCLA
Rodadura	50-75 40-50	MAN-25 MAN-19
Intermedia	≥ 50	MAN-25
Base	≥75	MAN-38

Fuente: Tomado de: Norma INVIAS 442P, pág. 5 (Instituto Nacional de Vías - Colombia, 2017).

Continuando con el estudio, el Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito (Ministerio de Transporte & INVIAS, 2007) nos exige algunos valores mínimos de espesor para la capa de rodadura ilustrados en la tabla 26.

Tabla 27: Espesores mínimos de la capa de rodadura.

Categoría de tráfico	Rango de ejes de 80 kN en el carril de diseño	h_{\min} (mm)
T1	< 150.000	50
T2	150.000 - 500.000	75

Fuente: Tomado de: Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito, pág.75 [39].

- Mejoramiento del Tramo 1: Pueblo viejo y Tramo 2: Salón comunal de Cusagota.

Luego de realizar el procedimiento mencionado en el capítulo anterior, se decidió que el diseño era el mismo para el tramo 1 y tramo 2, por lo cual, se presenta un solo modelo de mejoramiento mencionado.Figura 69.

- Mejoramiento del Tramo especial.

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el tramo especial, es el tramo ubicado en frente de la iglesia del salón comunal de Cusagota, este tramo, con aproximadamente 300 m de longitud, no posee capa de afirmado rojizo, por consiguiente, se decide que la sub base granular sea un poco más espesa que en los tramos 1 y 2.Figura 70.

6.3.1. Materiales de construcción.

Los materiales de construcción deben cumplir con las especificaciones descritas en las tablas 320-2,320-3,330-2,330-3 y 450-3 de las *Especificaciones generales de construcción de Carreteras*(Instituto Nacional de Vías & Transporte, 2012), además, deben cumplir con lo estipulado en norma INVIAS 442P (Instituto Nacional de Vías - Colombia, 2017).

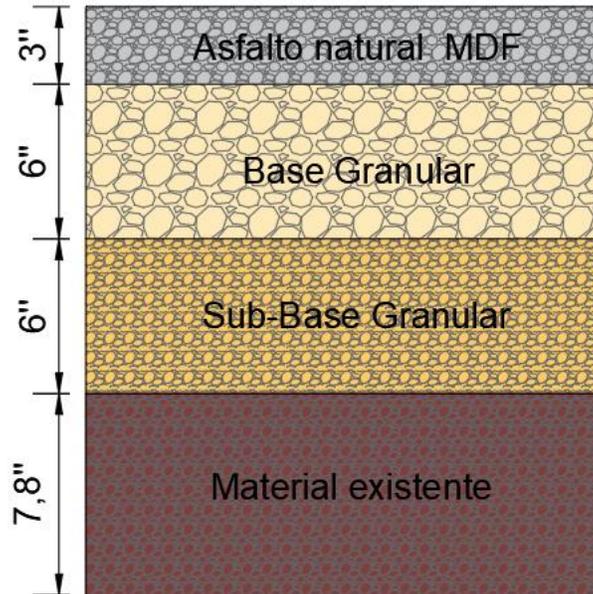


Figura 69:Mejoramiento con Arena asfalto estabilizado.

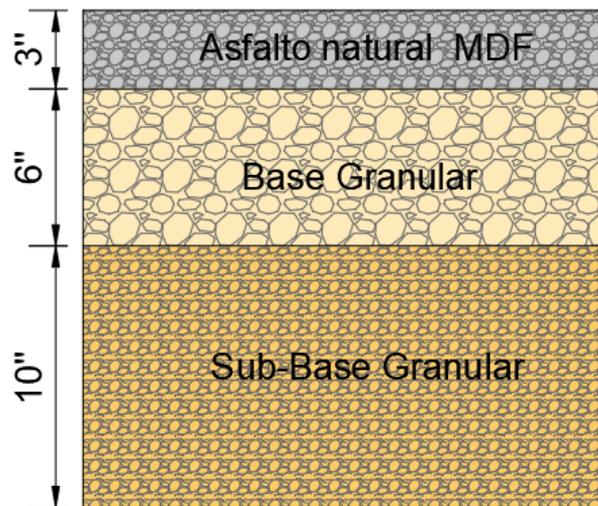


Figura 70:Mejoramiento con Arena asfalto estabilizado.

Capítulo 7.

Análisis de viabilidad de diseños

7.1. Evaluación de costos

Para hacer el análisis de costos, se hará de acuerdo a un único factor representativo, la cantidad de materiales de obra.

7.1.1. Diseño AASHTO 1993

Para la evaluación de costos del diseño obtenido por la metodología AASHTO 1993, se tienen en cuenta la lista de precios del año 2017 (ya que es la lista de precios más reciente a la fecha de evaluación) de la gobernación de Boyacá.

Tabla 28: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 1: Pueblo viejo.

TRAMO 1 : PUEBLO VIEJO								
Material	Precios Gobernación		Cubicación					Valor Total
	Precio Unitario (m ³)	Ítem	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	\$ 576.001	3.06.03	1009,98	3	0,0762	6	461,762856	\$ 265.975.867
Base Granular	\$ 93.773	3.04.06	1009,98	4	0,1016	6	615,683808	\$ 57.734.518
Sub-Base Granular	\$ 84.574	3.04.07	1009,98	10	0,254	6	1539,20952	\$ 130.177.106
							Precio Total	\$ 453.887.490

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 29: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota.

TRAMO 2 : SALON COMUNAL DE CUSAGOTA								
Material	Precios Gobernación		Cubicación					Valor Total
	Precio Unitario (m ³)	Ítem	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	\$ 576.001	3.06.03	1014,35	3	0,0762	6	463,76082	\$ 267.126.696
Base Granular	\$ 93.773	3.04.06	1014,35	4	0,1016	6	618,34776	\$ 57.984.324
Sub-Base Granular	\$ 84.574	3.04.07	1014,35	10	0,254	6	1545,8694	\$ 130.740.359
							Precio Total	\$ 455.851.379

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 30: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 3: Tramo especial.

TRAMO 3 : TRAMO ESPECIAL								
Material	Precios Gobernación		Cubicación					Valor Total
	Precio Unitario (m ³)	Ítem	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	\$ 576.001	3.06.03	300	3	0,0762	6	137,16	\$ 79.004.297
Base Granular	\$ 93.773	3.04.06	300	4	0,1016	6	182,88	\$ 17.149.206
Sub-Base Granular	\$ 84.574	3.04.07	300	10	0,254	6	457,2	\$ 38.667.233
							Precio Total	\$ 134.820.736

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

El valor total de los materiales si la gobernación de Boyacá decide utilizar este diseño será de: \$ 1.044.559.606

7.1.2. Diseño The SuDS Manual.

Precios según los precios de la gobernación de Boyacá, además, se consultaron precios de la brindados por la Universidad UNAM de México(Saucedo Vidal, 2010).

Tabla 31: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 1: Pueblo viejo.

Precio del Dólar		TRAMO 1 : PUEBLO VIEJO							
	\$ 3.371	Precio en Dolares		Precio en Pesos		Cubicación			Valor Total
Material	Precio Unitario (m ³)	Precio Unitario (m ³)	Ítem Gobernación	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	177,67	\$ 598.926	-	1009,98	3	0,0762	6	461,762856	\$ 276.561.582
Base Granular	-	\$ 93.773	3.04.06	1009,98	4	0,1016	6	615,683808	\$ 57.734.518
Sub-Base Granular	-	\$ 84.574	3.04.07	1009,98	10	0,254	6	1539,20952	\$ 130.177.106
	Precio unitario (ml)	Precio unitario (ml)		Longitud (m)	Longitud de Tubo (m)	Unidades	Unidades final	Longitud Total (ml)	
Tubo perforado PVC 4"	-	\$ 84.574	1.06.40	1009,98	7	144,282857	145	1015	\$ 85.842.610
	Precio Unitario (m ²)	Precio Unitario (m ²)					Ancho (m)	Área total (m ²)	
Geomalla	8,5	\$ 28.654	-	1009,98	-	-	6	6059,88	\$ 173.636.772
							Precio Total	\$ 723.952.587	

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 32: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota.

Precio del Dólar		TRAMO 2 : SALON COMUNAL DE CUSAGOTA							
	\$ 3.371	Precio en Dolares		Precio en Pesos		Cubicación			Valor Total
Material	Precio Unitario (m ³)	Precio Unitario (m ³)	Ítem Gobernación	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	177,67	\$ 598.926	-	1014,35	3	0,0762	6	463,76082	\$ 277.758.213
Base Granular	-	\$ 93.773	3.04.06	1014,35	4	0,1016	6	618,34776	\$ 57.984.324
Sub-Base Granular	-	\$ 84.574	3.04.07	1014,35	10	0,254	6	1545,8694	\$ 130.740.359
	Precio unitario (ml)	Precio unitario (ml)		Longitud (m)	Longitud de Tubo (m)	Unidades	Unidades final	Longitud Total (ml)	
Tubo perforado PVC 4"	-	\$ 84.574	1.06.40	1014,35	7	144,907143	145	1015	\$ 85.842.610
	Precio Unitario (m ²)	Precio Unitario (m ²)					Ancho (m)	Área total (m ²)	
Geomalla	8,5	\$ 28.654	-	1014,35	-	-	6	6086,1	\$ 174.388.066
							Precio Total	\$ 726.713.573	

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 33: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 3: Tramo especial.

Precio del Dólar		\$ 3.371							
TRAMO 3 : TRAMO ESPECIAL									
Material	Precio en Dolares		Precio en Pesos		Cubicación				Valor Total
	Precio Unitario (m ³)	Precio Unitario (m ³)	Itém Gobernación	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	177,67	\$ 598.926	-	300	3	0,0762	6	137,16	\$ 82.148.631
Base Granular	-	\$ 93.773	3.04.06	300	4	0,1016	6	182,88	\$ 17.149.206
Sub-Base Granular	-	\$ 84.574	3.04.07	300	10	0,254	6	457,2	\$ 38.667.233
	Precio unitario (ml)	Precio unitario (ml)		Longitud (m)	Longitud de Tubo (m)	Unidades	Unidades final	Longitud Total (ml)	
Tubo perforado PVC 4"	-	\$ 84.574	1.06.40	300	7	42,8571429	145	1015	\$ 85.842.610
	Precio Unitario (m ²)	Precio Unitario (m ²)					Ancho (m)	Área total (m ²)	
Geomalla	8,5	\$ 28.654	-	300	-	-	6	1800	\$ 51.576.300
								Precio Total	\$ 275.383.980

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

El valor total de los materiales si la gobernación de Boyacá decide utilizar este diseño será de: \$ 1.726.050.140

7.1.3. Mejoramiento con Arena Asfalto Estabilizada.

Para la evaluación de costos del diseño obtenido usando un método alternativo de mejoramiento con Arena Asfalto Estabilizada, se tienen en cuenta la lista de precios del año 2017 (ya que es la lista de precios más reciente a la fecha de evaluación) de la gobernación de Boyacá.

Tabla 34: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 1: Pueblo viejo.

TRAMO 1 : PUEBLO VIEJO									
Material	Precios Gobernación		Cubicación					Valor Total	
	Precio Unitario (m ³)	Itém	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)		
Capa de rodadura	\$ 268.619	3.06.13	1009,98	3	0,0762	6	461,762856	\$ 124.038.277	
Base Granular	\$ 93.773	3.04.06	1009,98	4	0,1016	6	615,683808	\$ 57.734.518	
Sub-Base Granular	\$ 84.574	3.04.07	1009,98	6	0,1524	6	923,525712	\$ 78.106.264	
								Precio Total	\$ 259.879.058

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 35: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 2: Salón Comunal de Cusagota.

TRAMO 2 : SALÓN COMUNAL DE CUSAGOTA									
Material	Precios Gobernación		Cubicación					Valor Total	
	Precio Unitario (m ³)	Itém	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)		
Capa de rodadura	\$ 268.619	3.06.13	1014,35	3	0,0762	6	463,76082	\$ 124.574.968	
Base Granular	\$ 93.773	3.04.06	1014,35	4	0,1016	6	618,34776	\$ 57.984.324	
Sub-Base Granular	\$ 84.574	3.04.07	1014,35	6	0,1524	6	927,52164	\$ 78.444.215	
								Precio Total	\$ 261.003.507

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

Tabla 36: Evaluación de costos de los materiales del Tramo 3: Tramo especial.

TRAMO 1 : PUEBLO VIEJO								
Material	Precios Gobernación		Cubicación					Valor Total
	Precio Unitario (m ³)	Ítem	Longitud (m)	Espesor(in)	Espesor(m)	Ancho (m)	Volumen Total (m ³)	
Capa de rodadura	\$ 268.619	3.06.13	300	3	0,0762	6	137,16	\$ 36.843.782
Base Granular	\$ 93.773	3.04.06	300	4	0,1016	6	182,88	\$ 17.149.206
Sub-Base Granular	\$ 84.574	3.04.07	300	10	0,254	6	457,2	\$ 38.667.233
							Precio Total	\$ 92.660.221

Fuente: Dibujada por el autor en: Excel 2019.

El valor total de los materiales si la gobernación de Boyacá decide utilizar este diseño será de: \$ 613.542.786.

7.2. Evaluación de deformación de cada estructura

Para la evaluación de deformaciones del diseño, se utilizará el software WinDepav, y WinJulea. Para hallar la deformación, primero, se seleccionan el número de capas en la estructura, luego, se agregan los valores propios del diseño.

7.2.1. Evaluación de deformación por el Software WinDepav.

Para la evaluación de esfuerzos en el programa mencionado, se tuvo en cuenta el modelo de cargas hallado por la Universidad del Cauca, el modelo se llama MOPT UNICAUCA.

7.2.1.1. Diseño AASHTO 1993.

Para el modelo de esfuerzo deformación, se tuvieron en cuenta los valores recomendados en la literatura, además, las formulas sugeridas por el programa para hallar los valores de relación de Poisson de las capas estructurales y algunos otros valores necesarios.

De la misma forma, se evaluó solo el tramo especial por ser el más crítico.

- Capa asfáltica

Para hallar las propiedades de la capa asfáltica, se tuvo en cuenta la fórmula de Vásquez Torres (2004) para una mezcla densa en caliente MC19.Asfalto 85-100.

Según Sabogal, para este tipo de mezcla, el valor del módulo de rigidez típico en este tipo de estructuras es de 350.000 PSI.

- Base Granular

Para hallar las propiedades de la Base Granular, se tuvo en cuenta la fórmula de Baber Base granular. Para usar esta fórmula el espesor de la capa debe estar entre 10 cm y 25 cm. Además, se tuvieron en cuenta los valores de diseño enunciados en el numeral 5.1.

- Sub base Granular

Para hallar las propiedades de la Sub Base Granular, se tuvo en cuenta la fórmula de Shell. Para el uso de esta fórmula el espesor de la capa debe estar entre 15 cm y 80 cm. Además, se tuvieron en cuenta los valores de diseño enunciados en el numeral 5.1.

- Sub rasante

Para hallar las propiedades de la Sub rasante, se tuvo en cuenta la fórmula de Shell. Para el uso de esta fórmula el CBR debe ser menor o igual al 10%. Además, se tuvieron en cuenta los valores de diseño enunciados en el numeral 5.1.

- Deformación

Para hallar el valor de K1, se realizó a través de la fórmula de Nottingham. Es e precisar, que solo se calcularon valores de deformación en la primera capa, ya que, la capa de rodadura es la única que en teoría sufre deformación.

- Modelo en la subrasante

En modelo obtenido, se va a evaluar en la capa de sub rasante, es decir, se calcularon los valores obtenidos de daños en la profundidad igual al inicio de la sub rasante.

Figura 71: Modelo de evaluación AASHTO 1993. (Marela, 2018).

7.2.1.1.1. Resultados de Modelo.

Luego de realizar la evaluación del modelo, se procede a obtener los resultados.

Figura 72: Resultados obtenidos del modelo de evaluación AASHTO 1993. (Marela, 2018).

Según la figura 72, los valores resultados obtenidos son los siguientes:

- Deflexión en la subrasante

En una estructura de pavimento, la deformación de compresión en la subrasante en la debe ser menor que la deformación admisible por compresión. Según (Higuera Sandoval, 2016) la deformación admisible sobre la subrasante de acuerdo con la Universidad de Nottingham está dada por:

$$\varepsilon_{Adm} = 2.16 \times 10^{-2} * N^{-.028} \quad (11)$$

En donde N, es el valor de ejes equivalentes de diseño durante el periodo de diseño.

- Deflexión admisible = 6.60×10^{-4}
- Deflexión en la Sub rasante = 6.22×10^{-4}

De acuerdo a lo encontrado, por deflexión en la sub rasante, el modelo cumple el criterio de deformación en la sub rasante.

- Deformación admisible por tracción

En una estructura de pavimento, la deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica debe ser menor que la deformación radial de tracción admisible. Según (Higuera Sandoval, 2016) la deformación admisible por tracción sobre la base de la capa asfáltica de acuerdo con la Universidad de Nottingham está dada por:

$$\varepsilon_{rAdm} = 3.48 \times 10^{-3} * N^{-.0204} \quad (12)$$

En donde N, es el valor de ejes equivalentes de diseño durante el periodo de diseño.

- Deflexión admisible = 2.74×10^{-4}
- Deflexión en la Sub rasante = 1.55×10^{-8}

De acuerdo a lo encontrado, por deflexión en la sub rasante, el modelo cumple el criterio de deformación admisible por tracción.

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante

En una estructura de pavimento, el esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante debe ser menor el esfuerzo vertical de compresión admisible sobre la subrasante. Según (Higuera Sandoval, 2016) el esfuerzo vertical de compresión admisible sobre la subrasante de acuerdo al criterio de la CRR de Bélgica está dada por:

$$\sigma_{zAdm} = \frac{0.9607 \times CBR^{1.2}}{N^{0.229}} \quad (13)$$

En donde N, es el valor de ejes equivalentes de diseño durante el periodo de diseño.

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la sub rasante = 0.47605
- Esfuerzo vertical de compresión sobre la sub rasante = 0.128

De acuerdo a lo encontrado, por chequeo de esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante, el modelo cumple el criterio.

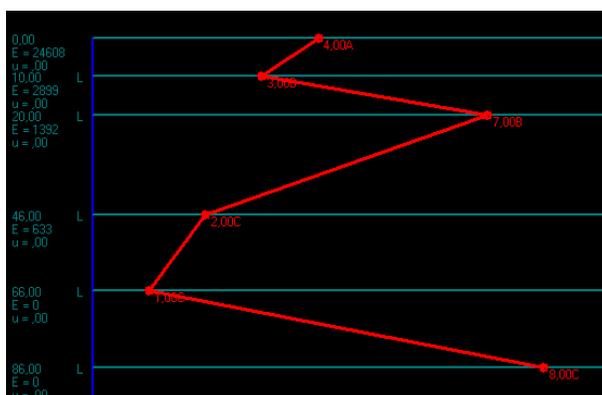


Figura 73:Gráfico resultante para SIGMA Z.(Marela, 2018).

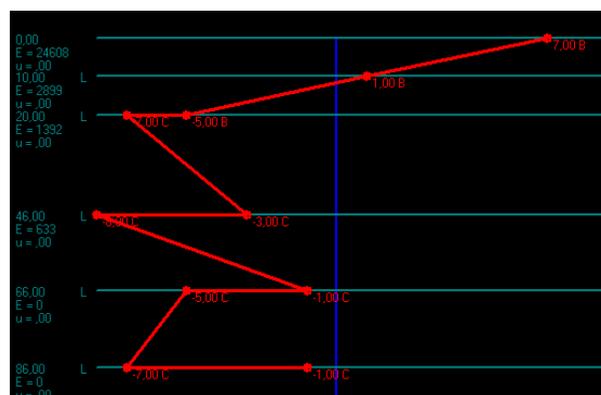


Figura 74:Gráfico resultante para SIGMA T.(Marela, 2018).

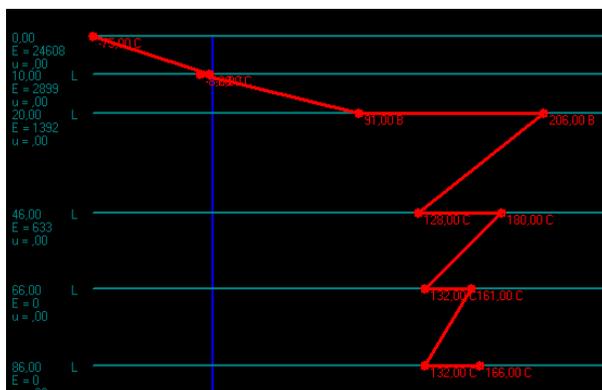


Figura 75: Gráfico resultante para EPZILON Z. (Marela, 2018).

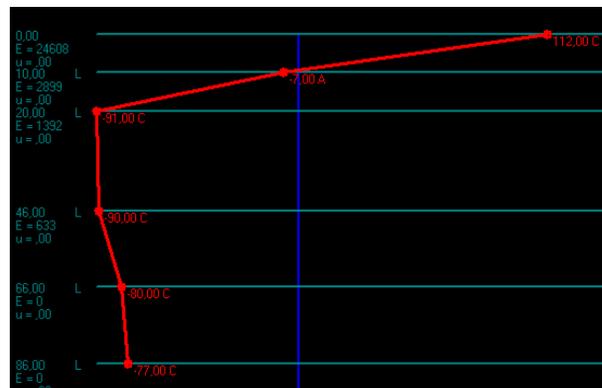


Figura 76: Gráfico resultante para EPZILON T. (Marela, 2018).

7.2.1.2. Diseño por *The SuDS Manual*.

Para hacer el análisis de deformación de los materiales utilizados en este tipo de pavimento, se procedió a usar los valores recomendados por la tabla 20.6 del Manual *The SuDS Manual* para las capas granulares. Para la capa asfáltica, se usan los valores recomendados de diseño, estos valores de diseño se encuentran encerrados en la tabla 20.6 Manual *The SuDS Manual*. El módulo de elasticidad expuesto en la tabla es de 3.2 GPA.

Luego de obtener los valores, se procedió a realizar el mismo procedimiento anterior.

De acuerdo a los dos modelos obtenidos por el programa WinDepav, no existe gran diferencia entre los resultados obtenidos, es decir, que en la evaluación de deformación en la subrasante para los diseños (Propuesto por Método AASHTO 1993 y *The SuDS Manual*) nos indican que las dos estructuras se comportan de manera similar, es decir, que no existe diferencia estructural en usar algún tipo de pavimento, sin embargo, se hará la evaluación en otro software.

Capa	Módulo de elasticidad (kg/cm ²)	Rel. de Poisson	Espesor (cm)	Liga	Daño por tensión			Daño por compresión			
					K1	K2	NESE	K3	K4	NESE	
1	22498.22	0.4	10.16	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	8.8903e-13	4.90196	256590	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	1631.55	0.25	15.24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	1407.21	0.35	25.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	633	0.45		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 77: Modelo de evaluación The SuDS Manual. (Marela, 2018).

Según la figura 78, los valores resultados obtenidos son los siguientes:

- Deflexión en la subrasante

En una estructura de pavimento, la deformación de compresión en la subrasante en la debe ser menor que la deformación admisible por compresión. Según (Higuera Sandoval, 2016) la deformación admisible sobre la subrasante de acuerdo con la Universidad de Nottingham está dada por:

$$\varepsilon_{Adm} = 2.16 \times 10^{-2} * N^{-.028} \quad (11)$$

En donde N, es el valor de ejes equivalentes de diseño durante el periodo de diseño.

- Deflexión admisible = 6.60×10^{-4}
- Deflexión en la sub rasante = 6.22×10^{-4}

De acuerdo a lo encontrado, por deflexión en la sub rasante, el modelo cumple el criterio de deformación en la sub rasante.

WinDepav - Resultados

Archivo

Descripción del proyecto

Eje de carga

Radio de las ruedas (cm)

Distancia entre los centros de las ruedas (cm)

Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²)

Posición del valor máximo para una carga

A Bajo una rueda simple

B Bajo una de las ruedas de la carga

C Al centro de la carga

Número de capas

Estructura, respuestas estructurales y comportamiento

No.	E (kg/cm²)	v	Z (cm)	st (kg/cm²)	sz (kg/cm²)	et (10 ⁻⁶)	Tensión: NF / FDF	ez (10 ⁻⁶)	Compresión: NR / FDR
1	22498.22	0.35	0.00	7,11e+00 B	4,93e+00 A	112,00 C		-75,30 C	
	Ligada		10,00	1,62e+00 B	3,20e+00 B	-7,64 A	1,652e+013 1,55e-08	-2,76 C	
2	1631.55	0.35	10,00	1,57e+00 B	3,20e+00 B	-7,64 A		-8,54 C	
	Ligada		20,00	-5,05e+00 B	7,57e-01 B	-91,30 C		91,60 B	
3	1407.21	0.35	20,00	-7,13e-02 C	7,57e-01 B	-91,30 C		206,00 B	
	Ligada		46,00	-3,72e-01 C	2,39e-01 C	-90,40 C		128,00 C	
4	633	0.35	46,00	-8,79e-02 C	2,39e-01 C	-90,40 C		180,00 C	4,123e+008 6,22e-04
	Ligada		66,00	-1,27e-01 C	1,28e-01 C	-80,40 C		132,00 C	
5		0.35	66,00	-5,50e-02 C	1,28e-01 C	-80,40 C		161,00 C	
	Ligada		86,00	-7,51e-02 C	8,39e-02 C	-77,30 C		132,00 C	
6		0.45	86,00	-1,68e-03 C	8,39e-02 C	-77,30 C		166,00 C	

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

Radio de curvatura (m)

Radio x Deflexión (m x mm/100)

Figura 78: Resultados obtenidos del modelo de evaluación The SuDS Manual. (Marela, 2018).

- Deformación admisible por tracción

En una estructura de pavimento, la deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica debe ser menor que la deformación radial de tracción admisible. Según (Higuera Sandoval, 2016) la deformación admisible por tracción sobre la base de la capa asfáltica de acuerdo con la Universidad de Nottingham está dada por:

$$\varepsilon_{rAdm} = 3.48 \times 10^{-3} * N^{-.0204} \quad (12)$$

En donde N, es el valor de ejes equivalentes de diseño durante el periodo de diseño.

- Deflexión admisible = 2.74×10^{-4}
- Deflexión en la Sub rasante = 1.55×10^{-8}

De acuerdo a lo encontrado, por deflexión en la sub rasante, el modelo cumple el criterio de deformación admisible por tracción.

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante

En una estructura de pavimento, el esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante debe ser menor el esfuerzo vertical de compresión admisible sobre la subrasante. Según (Higuera Sandoval, 2016) el esfuerzo vertical de compresión admisible sobre la subrasante de acuerdo al criterio de la CRR de Bélgica está dada por:

$$\sigma_{zAdm} = \frac{0.9607 \times CBR^{1.2}}{N^{0.229}} \quad (13)$$

En donde N, es el valor de ejes equivalentes de diseño durante el periodo de diseño.

- Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante = 0.47605
- Esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante = 0.128

De acuerdo a lo encontrado, por chequeo de esfuerzo vertical de compresión sobre la subrasante, el modelo cumple el criterio.



Figura 79: Gráfico resultante para SIGMA Z. (Marela, 2018).

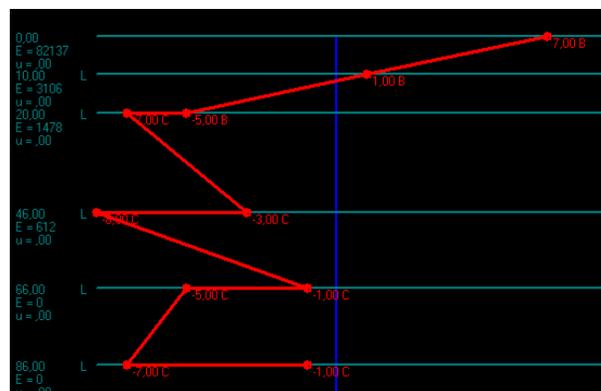


Figura 80: Gráfico resultante para SIGMA T. (Marela, 2018).

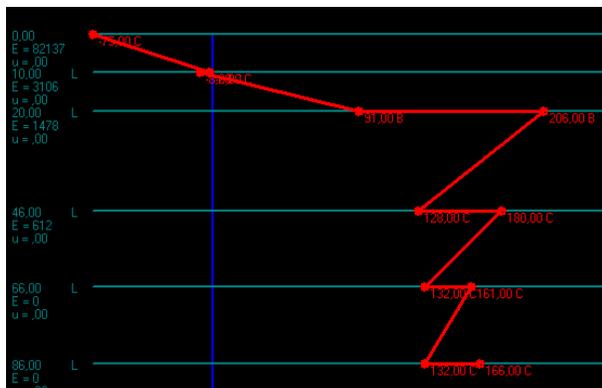


Figura 81:Gráfico resultante para EPZILON Z.(Marela, 2018).

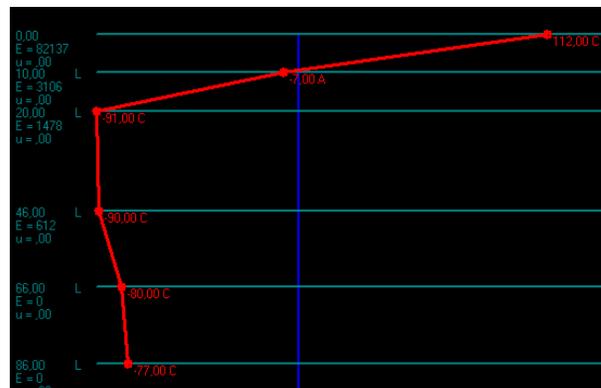


Figura 82:Gráfico resultante para EPZILON T.(Marela, 2018).

7.2.2. Evaluación de deformación por el Modelo de WinJulea.

El program WinJulea presentá una interfás de trabajo diferente al programa WinDepav, en la interfás de WinJulea, el diseñador debe tener calculado todos los valores iniciales, tales como: Espesores de Diseño de la estructura, Modulo de elasticidad, relación de Poisson, modelo de carga, puntos de evaluación en coordenadas X y Y, además, las profundidades de evaluación. Para el análisis de viabilidad se tomaran en cuenta tres profundidades, la primera, en la superficie del diseño, la segunda, sobre la base y la tercera, sobre la sub rasante granular.

7.2.2.1. Diseño AASHTO 1993.

El modelado del diseño obtenido por el método AASHTO 1993, se encuentra representado en la figura 83. En cuanto a los resultados obtenidos, las tablas 36 y 37, muestran los resultados obtenidos del modelo propuesto, allí se puede ver el resultado de esfuerzos y desplazamientos de la estructura en los puntos evaluados.

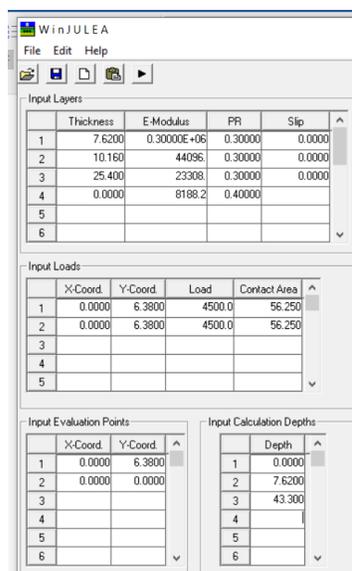


Figura 83: Modelo de evaluación AASHTO 1993.(ERDC, 2002).

En las tablas 36 y 37, se puede observar que el máximo desplazamiento en Z, es decir, la máxima deflexión de la estructura es de 0.77×10^{-2} cm ubicada en el punto 6 ubicado a 43.3 cm de la superficie.

Tabla 37: Resultados obtenidos del modelo de evaluación AASHTO 1993.

Results at Calculations Points			
	Point 1	Point 2	Point 3
Stress_X	106.53	-1.5666	-0.47713E-01
Stress_Y	95.274	0.86530E-01	-0.30132E-01
Stress_Z	80.000	14.503	0.92409
ShearStress_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_YZ	0.0000	2.3525	0.91173E-01
ShearStress_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Strain_X	0.17984E-03	-0.13479E-03	-0.49498E-04
Strain_Y	0.13105E-03	-0.86051E-04	-0.46492E-04
Strain_Z	0.64858E-04	0.33898E-03	0.11666E-03
ShearStrain_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_YZ	0.0000	0.13871E-03	0.31177E-04
ShearStrain_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_X	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_Y	-0.53154E-03	0.38214E-03	0.30225E-03
Displ_Z	0.13650E-01	0.12660E-01	0.76783E-02
PrincStress_1	106.53	14.878	0.93273
PrincStress_2	95.274	-0.28763	-0.38765E-01
PrincStress_3	80.000	-1.5666	-0.47713E-01
PrincStrain_1	0.17984E-03	0.35001E-03	0.11814E-03
PrincStrain_2	0.13105E-03	-0.97082E-04	-0.47968E-04
PrincStrain_3	0.64858E-04	-0.13479E-03	-0.49498E-04
MaxShear	13.267	8.2221	0.49022
OctNormStress	93.936	4.3411	0.28208

Fuente: Tomada de: Software WinJULEA(ERDC, 2002).

Tabla 38: Resultados obtenidos del modelo de evaluación AASHTO 1993.

Results at Calculations Points			
	Point 4	Point 5	Point 6
Stress_X	56.054	-1.5860	-0.49904E-01
Stress_Y	15.629	1.9208	-0.39725E-01
Stress_Z	0.0000	12.862	0.94950
ShearStress_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Strain_X	0.17122E-03	-0.13654E-03	-0.50538E-04
Strain_Y	-0.39580E-05	-0.33155E-04	-0.48797E-04
Strain_Z	-0.71682E-04	0.28940E-03	0.12034E-03
ShearStrain_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_X	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_Y	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_Z	0.13054E-01	0.12964E-01	0.77523E-02
PrincStress_1	56.054	12.862	0.94950
PrincStress_2	15.629	1.9208	-0.39725E-01
PrincStress_3	0.0000	-1.5860	-0.49904E-01
PrincStrain_1	0.17122E-03	0.28940E-03	0.12034E-03
PrincStrain_2	-0.39580E-05	-0.33155E-04	-0.48797E-04
PrincStrain_3	-0.71682E-04	-0.13654E-03	-0.50538E-04
MaxShear	28.027	7.2240	0.49970
OctNormStress	23.894	4.3989	0.28662

Fuente: Tomada de: Software WinJULEA(ERDC, 2002).

7.2.2.2. *Diseño por The SuDS Manual.*

El modelado del diseño obtenido por el método The SuDS Manual, se encuentra representado en la figura 84.

De las tablas 38 y 39, se puede observar que el máximo desplazamiento en Z, es decir, que la máxima deflexión de la estructura es de 0.67×10^{-2} cm ubicada de la misma forma en el punto 6, sin embargo, esta deflexión se calculó a 51 cm de la superficie, y esto gracias a que las capas estructurales de este diseño son más espesas que las obtenidas en el diseño por la metodología propuesta por la AASHTO 1993. El punto 6, en los diseños se refiere al punto en el eje de la vía, ubicado sobre el suelo de fundación.

WinJULEA
File Edit Help

Input Layers

	Thickness	E-Modulus	PR	Slip
1	10.160	0.32000E+06	0.40000	0.0000
2	15.240	23206.	0.25000	0.0000
3	25.400	20015.	0.35000	0.0000
4	0.0000	8188.2	0.45000	
5				
6				

Input Loads

	X-Coord.	Y-Coord.	Load	Contact Area
1	0.0000	6.3800	4500.0	56.250
2	0.0000	-6.3800	4500.0	56.250
3				
4				
5				

Input Evaluation Points

	X-Coord.	Y-Coord.
1	0.0000	6.3800
2	0.0000	0.0000
3		
4		
5		
6		

Input Calculation Depths

	Depth
1	0.0000
2	10.160
3	51.000
4	
5	
6	

Evaluation points are those points as viewed from the top looking down

Figura 84: Modelo de evaluación The SuDS Manual. (ERDC, 2002).

Según los resultados obtenidos por los modelos analizados por el Software WinJulea, la estructuras obtenidas presentan comportamientos similares, no obstante, el diseño del pavimento poroso presenta mejores resultados de comportamiento reflejados en los valores obtenidos de deformación en la estructura, esto se debe a que los espesores de capas del pavimento permeable son superiores a los espesores de capas del pavimento flexible, por consiguiente, si a comportamiento estructural se refiere, el pavimento permeable deberá soportar mejor las cargas de tránsito de la zona de estudio, sin embargo, la Gobernación de Boyacá es la encargada de decidir qué tipo de pavimento se aplicará en la zona de estudio.

Tabla 39: Resultados obtenidos del modelo de evaluación The SuDS Manual.

Results at Calculations Points			
	Point 1	Point 2	Point 3
X-Coord.	0.0000	0.0000	0.0000
Y-Coord.	6.3800	6.3800	6.3800
Z-Coord.	0.0000	10.160	51.000
Stress_X	111.94	-0.93480	0.20129E-01
Stress_Y	105.34	-0.22532	0.29301E-01
Stress_Z	80.000	6.9496	0.70866
ShearStress_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_YZ	0.0000	1.1838	0.56212E-01
ShearStress_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Strain_X	0.11813E-03	-0.11272E-03	-0.38098E-04
Strain_Y	0.89275E-04	-0.74508E-04	-0.36474E-04
Strain_Z	-0.21605E-04	0.31197E-03	0.83830E-04
ShearStrain_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_YZ	0.0000	0.12754E-03	0.19909E-04
ShearStrain_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_X	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_Y	-0.43707E-03	0.44296E-03	0.23601E-03
Displ_Z	0.12679E-01	0.11698E-01	0.67709E-02
PrincStress_1	111.94	7.1399	0.71328
PrincStress_2	105.34	-0.41561	0.24681E-01
PrincStress_3	80.000	-0.93480	0.20129E-01
PrincStrain_1	0.11813E-03	0.32222E-03	0.84649E-04
PrincStrain_2	0.89274E-04	-0.84757E-04	-0.37292E-04

Fuente: Tomada de: Software WinJULEA(ERDC, 2002).

Tabla 40: Resultados obtenidos del modelo de evaluación The SuDS Manual.

Results at Calculations Points			
	Point 4	Point 5	Point 6
X-Coord.	0.0000	0.0000	0.0000
Y-Coord.	0.0000	0.0000	0.0000
Z-Coord.	0.0000	10.160	51.000
Stress_X	47.634	-0.99324	0.19767E-01
Stress_Y	26.546	0.63076E-01	0.24835E-01
Stress_Z	0.0000	7.0484	0.72281
ShearStress_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStress_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Strain_X	0.11567E-03	-0.11941E-03	-0.38674E-04
Strain_Y	0.23414E-04	-0.62514E-04	-0.37777E-04
Strain_Z	-0.92726E-04	0.31375E-03	0.85824E-04
ShearStrain_XZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_YZ	0.0000	0.0000	0.0000
ShearStrain_XY	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_X	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_Y	0.0000	0.0000	0.0000
Displ_Z	0.12141E-01	0.12012E-01	0.68203E-02
PrincStress_1	47.634	7.0484	0.72281
PrincStress_2	26.546	0.63076E-01	0.24835E-01
PrincStress_3	0.35527E-14	-0.99324	0.19767E-01
PrincStrain_1	0.11567E-03	0.31375E-03	0.85824E-04
PrincStrain_2	0.23414E-04	-0.62514E-04	-0.37777E-04

Fuente: Tomada de: Software WinJULEA(ERDC, 2002).

7.3. Análisis del autor y recomendación de diseño para la zona

Desde el punto de vista del autor, el diseño más recomendado es el diseño de pavimento permeable. El pavimento permeable es una nueva tecnología amigable con el medio ambiente que pertenece a los nuevos sistemas de drenajes sostenibles. A nivel mundial, los sistemas de drenaje sostenible son una tendencia en la cual están siendo encaminados todos los sistemas de drenajes de agua. Países como Rusia e Inglaterra son pioneros en su investigación, asimismo, son pioneros en el estudio de los pavimentos permeables. En Colombia, el pavimento permeable, es una tecnología completamente nueva, la cual, se debe investigar mucho más, se debe investigar en su forma de aplicación, en su forma de construcción, además, se debe investigar en los problemas que puede llegar a tener la estructura a través de su vida útil en suelos Colombianos.

La zona de estudio se presenta como una oportunidad para conocer el comportamiento de esta nueva tecnología en suelos colombianos, específicamente sobre limos presentes en la zona de estudio. Otro de los beneficios del pavimento permeable es que puede ayudar a la recolección de aguas lluvias de la zona, al ser una zona rural, los habitantes podrían aprovechar el agua recolectada para riegos, para el ganado, para los baños o para algunos quehaceres diarios.

Desde el punto de vista técnico, los resultados del análisis estructural del diseño, son muy similares a los obtenidos con el pavimento flexible (tradicionalmente usado en Colombia), por lo cual, la estructura no deberá tener mayores problemas en el período de diseño, sin embargo, es muy importante usar las granulometrías exigidas en el presente proyecto, ya que, con el uso de granulometrías incorrectas en las capas estructurales del pavimento podría causar una falla inmensa en el la recolección y el drenaje de agua de la estructura, que podría causar el colapso de la estructura.

Conclusiones

- La metodología AASHTO 1993, es una de las metodologías más usadas en Colombia actualmente y se ve reflejado en la cantidad de información existente acerca del diseño estructural a través de esta metodología.
- En el proyecto evaluado en Busbanzá, Boyacá, el diseño estructural por la metodología AASHTO 1993 dio como resultado espesores menores a los mínimos sugeridos por la metodología, a su vez, sugeridos por la bibliografía, por consiguiente, el diseño final considero los valores de espesor mínimos sugeridos.
- La estructura diseñada por la metodología AASHTO 1993 puede soportar cargas de tránsito mayores a las de diseño.
- El pavimento permeable es una nueva tecnología amigable con el ambiente, sin embargo, en Colombia, es necesario indagar más acerca de este tema, ya que, los proyectos realizados en Colombia con este tipo de pavimento son casi nulos.
- Los espesores de capa obtenidos por la metodología The SuDS Manual, son similares a los obtenidos por la metodología de la AASHTO 1993, por lo cual, la Gobernación de Boyacá, tendrá que evaluar si se quiere implementar esta nueva tecnología que dependerá del valor adicional del geotextil impermeable y del sistema de drenado.
- El mejoramiento de la superficie con Arena asfalto estabilizada, puede ser una solución transitoria y económica en la construcción de caminos, sin embargo, se deben realizar muchos más estudios para determinar la propiedad de los materiales usados en esta técnica.

- La selección de la alternativa dependerá del presupuesto de la Gobernación de Boyacá, ya que, las estructuras de pavimento presentan comportamientos estructurales similares, sin embargo, es necesario verificar a través de ensayos de laboratorio el comportamiento de los materiales usados en el mejoramiento con Arena Asfalto Estabilizado.

Recomendaciones

- Se recomienda cambiar el diseño geométrico de la vía, ya que, el suministrado por la Gobernación de Boyacá no cumple con los parámetros mínimos de diseño consecuentemente se pueden presentar problemas de visibilidad, problemas de seguridad y problemas en la construcción de la vía.
- Cuando se hace un ensayo en campo a través del Penetrometro Dinámico de cono, se recomienda mantener el equipo TOTALMENTE PERPENDICULAR a la superficie para el éxito del ensayo.
- Si el valor de CBR de diseño se determina a través de correlaciones de los datos obtenidos por el ensayo del Penetrometro Dinámico de cono, se recomienda poner mucha atención en el tipo de suelo de la zona y la fórmula de la correlación, ya que, existen correlaciones que se utilizan UNICAMENTE para suelos finos y otras que se usan UNICAMENTE para suelos granulares.
- Durante el ensayo de CBR en laboratorio bajo condición de 4 días de inmersión no es posible controlar el grado de saturación del suelo. El espécimen es sacado del agua y dejado escurrir

por 15 minutos antes de ser ensayado. Este escurrimiento incrementa la succión en el suelo de forma descontrolada, lo que da lugar a resultados sesgados.

- Para el ensayo de CBR en laboratorio, se recomienda traer un 50% de más de lo sugerido por la norma, con el fin de no tener problemas o escases de material en el laboratorio. De igual forma, se recomienda pesar el material y dividir el material en secciones de 5400 gr.
- Para el ensayo de CBR en laboratorio, se recomienda dejar el material dentro de una bolsa plástica hasta el día del ensayo y en la sombra hasta el día del ensayo, con el fin de mantener la humedad natural del suelo.
- En la construcción del proyecto, se recomienda cumplir con las propiedades de los materiales establecidos en este trabajo.
- Se recomienda continuar con el estudio de pavimento permeables en Colombia, ya que, es una nueva tecnología que se ha convertido en tendencia en países como Inglaterra, además, de ser una tecnología resistente durable y amigable con el medio ambiente.
- Se recomienda estudiar a profundidad la arena asfalto estabilizada, ya que, puede ser una solución económica y efectiva para vías de bajos volúmenes de tránsito y fácil de usar, ya que, en pesca se hace la extracción del material.

Referencias bibliográficas

Acero Vargas, Yeison Eduardo;Hernandez Cepeda, Y. B. (2015). *Caracterización de Mezclas Asfálticas Drenantes*. Univesridad pedagógica y Tecnológica de Colombia.

- Alvarez, A., & De, P. (2008). *Manual De Diseño De Pavimentos De Concreto Para Vias Con Bajos, Medios Y Altos Volúmenes De Tránsito* (I. C. de P. de Cemento, Ed.). Medellín: Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
- Alvear Sanín, J. (2018). Historia del Ministerio de Transporte. Retrieved May 19, 2019, from <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/7014/el-ministerio/>
- Autodesk Inc. (2019a). *CivilCad*. San Rafael, California: Autodesk.
- Autodesk Inc. (2019b). *CivilCad 3D 2019*. California.
- Baquero, I. O. (2014). Breve reseña histórica de las vías en Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 10(17), 183–187. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.16925/in.v10i17.880> Breve
- Becerra Salas, M. (2012). Tópicos de Pavimentos de Concreto Diseño, Construcción y Supervisión. Retrieved May 25, 2019, from https://issuu.com/flujolibreperu/docs/libro_pavimentos_al_cap_2
- Bester, J. J., Kruger, D., & Hinks, A. Aastho Guide for Desing of Pavement Structures. , Sustainable Waste Management and Recycling: Construction Demolition Waste:Proceedings of the international conference organised by the concrete and masonry research group § (2004).
- Bhutta, M. A. R., Tsuruta, K., & Mirza, J. (2012). Evaluation of high-performance porous concrete properties. *Construction and Building Materials*, 31, 67–73. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2011.12.024>
- Cárdenas Grisales, J. (2013). *Diseño geométrico de carreteras* (Segunda Ed; E. Ediciones, Ed.). Bogotá D.C, Colombia.

- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. In Martha Edna Suárez R. (Ed.), *Potencia*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGRAW HILL INTERAMERICANA S.A.
- Cipriano. (2014). Historia del concreto en Colombia | ARGOS 360. Retrieved May 19, 2019, from <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/historia-de-pavimentos-de-concreto-en-colombia>
- CIRIA. (2015). The SuDS Manual C753. Retrieved May 28, 2019, from CIRIA website: www.ciria.org
- Dietz, D. M. (2017). What purpose does each layer of flexible pavement serve. Retrieved May 25, 2019, from Quora website: <https://www.quora.com/What-purpose-does-each-layer-of-flexible-pavement-serve>
- ERDC. (2002). *WinJULEA*. Mississippi.
- Flexible Pavements of Ohio. (n.d.). Porous Asphalt Pavement Design, Construction and Maintenance. Retrieved May 27, 2019, from [http://www.flexiblepavements.org/sites/www.flexiblepavements.org/files/events/conferences/Porous Asphalt Pavements.pdf](http://www.flexiblepavements.org/sites/www.flexiblepavements.org/files/events/conferences/Porous%20Asphalt%20Pavements.pdf)
- Garcia Morales, A. R. (2015). *Diseño De Pavimento Asfáltico Por El Metodo Aashto-93 Empleado El Software Disaashto-93*. Universidad Militar Nueva Granada.
- Giordani, C., & Leone, D. (2010). Pavimento. *Universidad Tecnológica Nacional*, Vol. 1, pp. 1–6. Rosario, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- Hariyadi, & Tamai, H. (2015). Enhancing the performance of porous concrete by utilizing the

pumice aggregate. *Procedia Engineering*, 125, 732–738.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.116>

Herrera-montealegre, M. (2014). *DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE DISEÑO DE PAVIMENTOS MEDIANTE CRITERIOS ASSHTO 1993 Y 2002*. Universidad de Piura.

Higuera Sandoval, C. H. (2010). *Nociones Sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras- Volumen II* (Primera; I. y P. de la U. P. y T. de Colombia, Ed.). Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Higuera Sandoval, C. H. (2016). *Mecánica de Pavimentos Principios básicos* (3rd ed.; R. N. Cárdenas Soler, Ed.). Tunja, Colombia: EDITORIAL UPTC.

Hoyos, J. J. (2011). Carreteras De Colombia Directo. Retrieved May 19, 2019, from El Colombiano website: https://www.elcolombiano.com/historico/las_carreteras_de_colombia-JFEC_130779

Inc, G. (2019). *Google Earth Pro*. California.

Instituto Nacional de Vías - Colombia. *Mezcla asfáltica natural*. , Pub. L. No. 442P, 1 (2017).

Instituto Nacional de Vías, & Transporte, R. de C. Especificaciones generales de construcción de Carreteras. , Pub. L. No. Consorcio Normas 2012, 1 Ministerio de Transporte 900 (2012).

Interpave. (2010). *permeable pavements; Guide to the design. construction and maintenance of concrete block permeable pavements* (Vol. 6, p. 81). Vol. 6, p. 81.

Jang, J. G., Ahn, Y. B., Sourì, H., & Lee, H. K. (2015). A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: Heavy metal leaching characteristics and

compressive strength. *Construction and Building Materials*, 79, 173–181.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.058>

Juyar, G., & Pérez, G. (1998). *Comparación de Mezclas Asfálticas Drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar*. 6, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rcin.1524>

Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., Shaffer, P., Wallingford, H. R., ... Environment Agency. (2015). The SUDS manual. In *Ciria*, <https://doi.org/London C697>

Labrador Rama, F. (2006). Historia de los Pavimentos Urbanos. *Revista COLEGIO DE INGENIEROS TÉCNICOS DE OBRAS PÚBLICAS*, 371, 38–49.

Liu, Q., Schlangen, E., Van De Ven, M., Van Bochove, G., & Van Montfort, J. (2012).

Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. *Construction and Building Materials*, 29, 403–409.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.058>

Marela, L. R. V. (2018). *WinDepav V2.6*. Calí.

Martin Tejada, J. (2014). EL SISTEMA DE LAS COMUNICACIONES EN EL IMPERIO ROMANO. Retrieved May 19, 2019, from Historia de la Iglesia website:

<https://temasdehistoriadelaiglesia.wordpress.com/2014/08/20/el-sistema-de-las-comunicaciones-en-el-imperio-romano/>

Minaya G, S., & Ordoñez, H. A. (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos* (Segunda Ed; I. de la C. y Gerencia, Ed.). Lima: Gerencia, Instituto de la Construcción y.

Ministerio de Transporte. Manual De Señalización Vial Dispositivos Uniformes Para La

Regulación De Tránsito En Calles, Carretras Y Ciclorrutas De Colombia. , 44 Journal of

Physics A: Mathematical and Theoretical § (2015).

Ministerio de Transporte, & INVIAS. (2007). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito*. Colombia.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingeniería De Pavimentos* (Segunda Ed; Stella Valbuena de Fierro, Ed.). Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia.

Motos, P. (n.d.). El interesante “Asfalto Poroso o Drenante” que trae la nueva generación de carreteras. Retrieved May 27, 2019, from Publi motos website:

<https://www.publimotos.com/index.php/noticia/actualidad/1241-las-grandes-utilidades-del-asfalto-poroso-o-drenante-que-trae-la-nueva-generacion-de-calles>

Murillo, C. A. (n.d.). *Ábacos y Nanogramas para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos*. Bogotá D.C, Colombia.

Pedro, L., Os, N., Toro, E., Cadena, A. G., Corral, M., Obregón, R., & Ortega, P. (1951). *EL COMITE DE DESARROLLO ECONOMICO*. pp. 16–18.

Pérez Carrillo, J. A. (2015). Desarrollo de una herramienta de apoyo para el diseño de pavimentos poroso (Universidad de Los Andes). <https://doi.org/10.15446/dfj.n15.50535>

Rodríguez González, J. L. (2010). *Apuntes de clase de topografía*. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Saucedo Vidal, A. (2010). *CONCRETO HIDRAULICO PERMEABLE, UNA ALTERNATIVA PARA LA RECARGA DE LOS MANTOS ACUIFEROS DEL VALLE DE MEXICO*.

SIMÓN, U. M. D. S. (2004). *PAVIMENTOS* (Primera, p. 644). Primera, p. 644. San Simón, Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.

Smith, D. R. (2001). Permeable interlocking concrete pavement driveway with concrete curbs.

Retrieved August 27, 2019, from America: ICPI website:

<https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif15006.pdf>

UNICON, & Lima, C. (2012). Metodología de diseño AASHTO 93. Retrieved May 25, 2019,

from Duruvia website: <http://www.duravia.com.pe/blog/metodologia-de-diseno-aashto-93/>

Vías, I. N. de. *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras.* , (2008).

Vías, I. N. de, & Transporte, R. de C. *Normas de ensayo de materiales para carreteras.* , (2007).

Zaetang, Y., Sata, V., Wongsu, A., & Chindaprasirt, P. (2016). Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, *111*, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.060>

Zhang, Y., van de Ven, M., Molenaar, A., & Wu, S. (2016). Preventive maintenance of porous asphalt concrete using surface treatment technology. *Materials and Design*, *99*, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.082>

Anexos

- **ANEXO 1-INVENTARIO VIAL**
- **ANEXO 2-ESTUDIO DE TRÁNSITO**
- **ANEXO 3-ENSAYO PENETROMETRO DINÁMICO DE CONO**
- **ANEXO 4-ENSAYO CBR EN LABORATORIO**

Vita



Me llamo Sebastián Martínez García, nací en Tunja, Boyacá, el día 17 de julio de 1996. Los primeros años de vida me dediqué a estudiar en el Colegio los Ángeles de Tunja, luego, en décimo grado decidí cambiar de colegio, decidí estudiar en el Gimnasio Campestre de Tunja en donde culminé mis estudios de Bachiller. Luego, decidí continuar con mis estudios universitarios y entre a Ingeniería Civil en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, institución a la cual, sigo vinculado.

En mis tiempos libres he expandido mis conocimientos en diferentes idiomas, actualmente hablo español, inglés y un poco de alemán, asimismo, me encanta leer, tocar piano, viajar, practicar deportes extremos y manejar.

Me considero un soñador y espero seguir expandiendo mis conocimientos en diferentes campos de la ingeniería.