

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE APLICANDO EL MÉTODO AASHTO 93 PARA LA VÍA EL CRUCERO – PAJARITO – AGUAZUL EN LOS DEPARTAMENTOS DE BOYACÁ Y CASANARE EN EL TRAMO K49+650 – K50+460.



ING. GUSTAVO ADOLFO CELIS VANEGAS

CÓDIGO: 6100325

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

BOGOTÁ D.C.

2019

DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE APLICANDO EL MÉTODO AASHTO 93 PARA LA VÍA EL CRUCERO – PAJARITO – AGUAZUL EN LOS DEPARTAMENTOS DE BOYACÁ Y CASANARE EN EL TRAMO K49+650 – K50+460.



ING. GUSTAVO ADOLFO CELIS VANEGAS

CÓDIGO: 6100325

ING. CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ CAMARGO

Coordinador Especialización en Ingeniería de Pavimentos

ING. OSCAR RAMÍREZ

Director de Proyecto

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

BOGOTÁ D.C.

2019

Tabla de contenido

Introducción.....	8
Planteamiento del Problema.....	9
Pregunta de Problema	10
Justificación.....	11
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos	12
1. Marco Teórico	13
1.1 Tránsito.....	13
1.1.1. Conversión del tránsito a Ejes Equivalentes de 8,2 Ton (ESAL's):.....	14
1.1.2. FEC (Factores Equivalentes de Carga).....	14
1.1.3. Factor Direccional y Factor Carril.....	16
1.1.4. Tránsito Futuro (Crecimiento y atraído).....	17
1.2 Módulo Resiliente (Mr)	19
1.3 Aporte Estructural de las Capas del Pavimento (ai).....	19
1.4 Coeficiente de Drenaje (mi).....	22
1.5 Confiabilidad.....	22
1.6 Desviación Estándar So	23
1.7 Serviciabilidad de la Estructura de Pavimento.....	23
1.8 Número Estructural del Pavimento (SN)	24

1.9 Cálculo de Espesores de Capas	26
3. Metodología.....	27
2.1. Periodo de Diseño.....	27
2.2. Tránsito de Diseño.....	27
2.3 CBR de Diseño.....	27
2.4 Módulo Resiliente de la Subrasante	28
2.5 Módulos Dinámicos y Coeficientes de Aporte Estructural de las Capas del Pavimento	28
2.5.1 Subbase Granular	28
2.5.2 Base Granular	28
2.5.3 Mezcla Densa en Caliente	28
2.6 Coeficiente de Drenaje.....	29
2.7 Nivel de Confiabilidad.....	29
2.8 Desviación Estándar	29
2.9 Nivel de Serviciabilidad.....	29
2.10 Número Estructural del Pavimento.....	29
3. Análisis de Resultados	30
3.1 Tránsito	30
3.2 Números Estructurales de las Capas del Pavimento.....	32
4. Conclusiones.....	35

5. Recomendaciones	36
Bibliografía.....	37

Lista de Tablas

Tabla 1 - Factores de distribución por carril según NCHRP	17
Tabla 2 - Tasa de crecimiento obtenidas en un muestreo de la red vial nacional	18
Tabla 3 - Coeficientes Estructurales (<i>ai</i>).....	19
Tabla 4 - Coeficientes de Drenaje para Base y Subbase Granular (mi).....	22
Tabla 5 - Valores de Confiabilidad.....	23
Tabla 6 - Valores típicos de Desviación Estándar, So.	23
Tabla 7 - Espesores Mínimos de Capas.	26
Tabla 8 - Factor Daño Diferentes Vehículos.....	30
Tabla 9 - Ejes Equivalentes Totales.....	31
Tabla 10 - Parámetros de Diseño	32
Tabla 11 - Espesores de Capas	34

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Clasificación general de vehículos. Recuperado de: <i>Manual para la planeación y diseño para la Administración del Tránsito y Transporte. 2005</i>	13
<i>Figura 2.</i> Factor Camión. Recuperado de: <i>Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes – Instituto Nacional de Vías, 2017</i>	16
<i>Figura 3.</i> Estimación del Coeficiente Estructural a1 de la capa de mezcla asfáltica densa en caliente. Recuperado de: <i>Guide for Design of Pavement Structures, 1993</i>	20
<i>Figura 4.</i> Estimación del Coeficiente Estructural a2 de la capa de base granular. Recuperado de: <i>Guide for Design of Pavement Structures, 1993</i>	21
<i>Figura 5.</i> Estimación del Coeficiente Estructural a2 de la capa de subbase granular. Recuperado de: <i>Guide for Design of Pavement Structures, 1993</i>	22
<i>Figura 6 -</i> Interfaz del Programa Ecuación AASHTO-93. Recuperado de: <i>AASHTO-93</i> ...	25
<i>Figura 7.</i> Cálculo de Espesores de Capas. Recuperado de: <i>Guide for Design of Pavement Structures, 1993</i>	26
<i>Figura 8.</i> Número Estructural Requerido.	32
<i>Figura 9.</i> Número Estructural de la Base Granular.....	33
<i>Figura 10.</i> Número Estructural de la Subbase Granular.	34
<i>Figura 11.</i> Estructura de Pavimento Propuesta.	34

Introducción

En este escrito se desea realizar un diseño de una estructura de pavimento flexible para el tramo en consideración mediante el método AASHTO – 93, cuya finalidad es obtener la dimensión de diferentes espesores de capas que constituyen la estructura.

Para realizar el diseño de una estructura de pavimento, debemos tener en cuenta la resistencia del material de subrasante dado que es el soporte de la estructura, siendo esta la razón que los materiales definidos para las capas de la estructura de pavimento asumirán mayor parte de los esfuerzos generados por las cargas de los vehículos.

Los datos empleados para este fueron suministrados por el Consorcio Saitec-Joyco y el Consorcio Vías Equidad 056, siendo la información estudios de clasificación de suelo, ensayos de laboratorio y volúmenes de tránsito. Esto con el fin de encontrar una solución viable para poder generar un flujo constante a los usuarios de esta vía, garantizando seguridad y comodidad al momento de transitar por la vía.

Planteamiento del Problema

Dada a las diferentes condiciones geológicas y geotécnicas que se presentan en nuestro país, es necesario realizar un estudio detallado para decidir qué solución debe ejecutarse para llevar a cabo nuestro proyecto con éxito. Para ello, es ineludible diseñar una estructura de pavimento que soporte las condiciones naturales y las cargas generadas por los vehículos, teniendo en cuenta que por su zona inestable existen deslizamientos y derrumbes, por ende, los vehículos estarán detenidos generando así una mayor afectación a la estructura.

Además, teniendo este tipo de emergencias, la economía de la región se verá afectada dado que en esta zona transitan vehículos de carga que transportan ganado, arroz e hidrocarburos los cuales son importantes para la economía de esta zona.

De igual manera, es la segunda vía alterna a los llanos la cual debe de estar en unas condiciones óptimas para recibir parte del tránsito que maneja la vía Bogotá – Villavicencio en caso tal de que exista alguna situación no prevista en esta vía.

Por estas razones, es de vital importancia realizar un diseño de una estructura de pavimento flexible con el fin de que esta resista los agentes naturales y exógenos de la zona mejorando la movilidad y economía de la región y así mismo la del país evitando en lo posible que se generen daños como ahuellamiento, piel de cocodrilo, entre otros.

Pregunta de Problema

¿Cómo diseñar una estructura de pavimento para el mejoramiento de la movilidad de la vía entre los municipios de El Crucero – Pajarito – Aguazul (K49+650 – K50+460) en los departamentos de Boyacá y Casanare?

Justificación

Debido al mal estado de la vía, los tiempos de recorrido son mucho mayores aumentando los costos para los usuarios de la vía los cuales afectan la economía de los productos generados en el Departamento del Casanare y de igual manera concibiendo unos sobrecostos en la producción y distribución de los productos.

La evolución económica de ambos Departamentos se basa principalmente en su fuerte beneficio ganadero, agricultor y de hidrocarburos que se presenta en esta zona, pero por la condición de este tramo vial, se ha restringido mayores ingresos para los diferentes sectores económicos dado a las circunstancias actuales de la vía.

Mediante el diseño de esta estructura de pavimento en este tramo específico, mejoraremos principalmente la movilidad entre estos dos Departamentos de gran importancia para el país, permitiendo un flujo de economía entre las regiones y de igual manera se reducirá la recha de desarrollo entre las regiones, llevando más empleo formal, más inversión y facilidades de transporte.

De igual manera, se brindará una mejor calidad de vida a los usuarios de la vía, disminuyendo así, los tiempos de recorridos en este tramo de vía fundamentado en los principios de sostenibilidad y optimización de las inversiones para ofrecer y garantizar a los usuarios de la infraestructura vial unas condiciones de servicio adecuadas.

Objetivo General

Diseñar una estructura de pavimento flexible para el tramo K49+650 – K50+460 de la vía El Crucero-Pajarito-Aguazul.

Objetivos Específicos

1. Recopilar y analizar la información existente para el desarrollo del trabajo
2. Verificar el material de soporte que se presente en el tramo a estudiar.
3. Diseñar una estructura de pavimento flexible mediante el método AASHTO-93 acorde a la complejidad del sector.
4. Recomendar y concluir con base a los resultados obtenidos.

1. Marco Teórico

1.1 Tránsito.

En la Guía de la AASHTO, se usa el procedimiento de convertir un flujo de tráfico mixto a una configuración de ejes equivalentes de 8,2 toneladas, en el cual existen 4 consideraciones clave que influyen en la exactitud de la estimación del tránsito y lo cual significa que influye en el ciclo de vida de la estructura de pavimento:

1. Los valores correctos de carga equivalente utilizados para estimar el daño relativo inducido por la diferencia de cargas y configuraciones de los ejes equivalentes.
2. La exactitud de la información del volumen y el peso del tránsito usado para representar las proyecciones de carga.
3. La predicción de los ejes equivalentes sobre el periodo de diseño.
4. La interacción del tiempo y el tránsito efectuando cambios en el PSI.

En la siguiente imagen se muestra la designación de los vehículos utilizada para la cuantificación del tránsito:

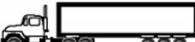
TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA	TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA
AUTOS			C3 Y C4	CAMION C3	
				CAMION C4	
BUSES	BUSETA			TRACTO-CAMION C2-S1	
	BUS			TRACTO-CAMION C2-S2	
	BUS METROPOLITANO			TRACTO-CAMION C3-S1	
C2-P	CAMION DE DOS EJES PEQUENO		C5	TRACTO-CAMION C3-S2	
C2-G	CAMION DE DOS EJES GRANDE		> C5	TRACTO-CAMION C3-S3	

Figura 1. Clasificación general de vehículos. Recuperado de: *Manual para la planeación y diseño para la Administración del Tránsito y Transporte. 2005*

1.1.1. Conversión del tránsito a Ejes Equivalentes de 8,2 Ton (ESAL's):

Cada vehículo visto anteriormente que transita sobre la estructura de pavimento, genera un comportamiento único, produciendo diferentes cargas, esfuerzo y deformaciones en esta. De igual manera, estos comportamientos dependen de los tipos de material que se emplean en cada una de las capas a diseñar y sus espesores, siendo así, una diferente reacción a las cargas en cada capa de la estructura. Según lo anterior, se debe tener en cuenta este tipo de variación en la estructura y definir todo el tránsito a un valor de ejes equivalentes de 8,2 toneladas que nos indica que genera el mismo daño que todos los vehículos que constituye el tránsito. Esta conversión se hace por medio de los factores equivalentes de carga, nombrados FEC (Factor Equivalente de Carga).

1.1.2. FEC (Factores Equivalentes de Carga)

La fórmula que se presenta a continuación, fue desarrollada en las pistas de prueba AASHO a finales de la década de los 50's, donde las estructuras de pavimentos fueron cargadas con una serie de combinaciones de esfuerzos para poder analizar los diferentes comportamientos y daños generados en las pistas.

El Factor Equivalente de Carga se define como la relación entre la pérdida de serviciabilidad de la estructura de pavimento a causa de las cargas de un tipo de eje y la que se genera por los ejes estándar de 8,2 Ton en ese mismo eje.

$$LEF = \frac{\text{No. de Ejes de 8,2 Ton que producen el deterioro del pavimento}}{\text{No. de ejes x Ton que producen el deterioro del pavimento}}$$

De la misma manera, para el diseño, también se tiene en cuenta otros tipos de factores como lo son el factor sentido, el factor carril y el factor camión (factor daño).

El Instituto Nacional de Vías define los valores de factor camión de la siguiente

manera:

Tipo	Detalle del vehículo	
2P		
Configuración del sistema de eje	SRS (2 ruedas)	SRD (4 ruedas)
Rango de Cargas (T)	2.0 a 2.5	3.5 a 6
FEC AASHTO	0.01 a 0.02	0.03 a 0.28
FDV AASHTO	0.04 a 0.30	
FEC Método de la cuarta potencia	0.01 a 0.02	0.03 a 0.29
FDV Método de la cuarta potencia	0.04 a 0.31	

Tipo	Detalle del vehículo	
2G		
Configuración del sistema de eje	SRS (2 ruedas)	SRD (4 ruedas)
Cargas Máximas Legales (T)	6	11
FEC AASHTO	0,68	3,15
FDV AASHTO	3,83	
FEC Método de la cuarta potencia	0,68	3,24
FDV Método de la cuarta potencia	3,92	

Tipo	Detalle del vehículo	
3		
Configuración del sistema de eje	SRS (2 ruedas)	Tándem (8 ruedas)
Cargas Máximas Legales (T)	6	22
FEC AASHTO	0,68	4,34
FDV AASHTO	5,02	
FEC Método de la cuarta potencia	0,68	4,63
FDV Método de la cuarta potencia	5,31	

Tipo	Detalle del vehículo		
3S2			
Configuración del sistema de eje	SRS (2 ruedas)	Tándem (8 ruedas)	Tándem (8 ruedas)
Cargas Máximas Legales (T)	6	21	21
FEC AASHTO	0,68	3,64	3,64
FDV AASHTO	7,96		
FEC Método de la cuarta potencia	0,68	3,84	3,84
FDV Método de la cuarta potencia	8,36		

Tipo	Detalle del vehículo		
3S3			
Configuración del sistema de eje	SRS (2 ruedas)	Tándem (8 ruedas)	Trídem (12 ruedas)
Cargas Máximas Legales (T)	6	22	24
FEC AASHTO	0,68	4,34	1,53
FDV AASHTO	6,55		
FEC Método de la cuarta potencia	0,68	4,63	1,19
FDV Método de la cuarta potencia	6,50		

Figura 2. Factor Camión. Recuperado de: Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes – Instituto Nacional de Vías, 2017.

1.1.3. Factor Direccional y Factor Carril

Según el Instituto Nacional de Vías – INVIAS (2015), “El factor de distribución direccional (Fd), corresponde a la distribución porcentual de los vehículos comerciales en cada sentido de circulación, obtenidos de los resultados de un conteo o por observación

directa en el campo”. Según estudios realizados, se tiene definido que se asume un 50% en cada sentido, no obstante, existen algunos casos en los que puede variar este factor dependiendo de las condiciones particulares de tránsito en la vía.

Para el Factor de Distribución por Carril, el Instituto Nacional de Vías define lo siguiente,

Este parámetro corresponde a la distribución de camiones entre los carriles con el mismo sentido. En carreteras de dos carriles, con un carril por sentido, el valor del factor de distribución direccional es de 1, mientras que, para carreteras de dos sentidos, con múltiples carriles por sentido, los valores del factor de distribución por carril (Fca) adoptados son los recomendados por la guía del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). (INVIAS, Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes, 2015)

Los valores recomendados por la NCHRP son los siguientes:

Tabla 1 - Factores de distribución por carril según NCHRP

Número Total de carriles en cada sentido	Factor de distribución para el carril de diseño (Fca.)
1	1.00
2	0.90
3	0.60
4 o más	0.45

Fuente: Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes – Instituto Nacional de Vías

1.1.4. Tránsito Futuro (Crecimiento y atraído)

A través de los años, el tránsito actual tiende a tener un crecimiento a medida que pasa el tiempo. Para ello, en el diseño de la estructura de pavimento, debemos tener en cuenta

una tasa de crecimiento, la cual es la que nos define aproximadamente el crecimiento que tendrá el tránsito en nuestra zona de estudio. Según el Instituto Nacional de Vías, la tasa de crecimiento puede ser definida por medio de la Tabla 2, donde dependiendo del TPDs nos define un rango de Tasa de Crecimiento. (INVIAS, Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes, 2015)

Tabla 2 - Tasa de crecimiento obtenidas en un muestreo de la red vial nacional

TPDs	Tasa de crecimiento %				Estaciones Analizadas
	Total Vehículos		Vehículo comerciales		
	Rango	Promedio	Rango	Promedio	
<500	2.0 - 4.0 %	3,60%	2.0 - 4.0 %	2,9%	28
500-1000	3.0 - 6.0 %	3,40%	2.0 - 4.0 %	2,6%	49
1000-2500	3.0 - 6.0 %	4,30%	2.0 - 5.0 %	3,3%	134
2500-5000	3.0 - 6.0 %	4,30%	3.0 - 5.0 %	3,4%	144
5000-10000	3.0 - 6.0 %	4,50%	3.0 - 5.0 %	3,8%	146
>10000	3.0 - 6.0 %	4,30%	3.0 - 6.0 %	3,8%	89

Fuente: Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes – Instituto Nacional de Vías

El tránsito atraído está constituido por un flujo vehicular que transitaba por otra vía, pero que por las mejores condiciones que se presentarán en esta, los usuarios preferirán viajar por esta dado que está en mejores condiciones (INVIAS, Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes, 2015). De igual manera, como el tramo a diseñar está dentro de la vía alterna al llano, en el momento en que exista algún evento inesperado en el que la vía Bogotá – Villavicencio se encuentre cerrada, algún porcentaje de los vehículos que transiten por esa vía, viajarán por la vía alterna al llano.

1.2 Módulo Resiliente (Mr)

Para definir un Módulo Resiliente representativo en el tramo a diseñar, se debe realizar un estudio geológico y geotécnico a lo largo de la vía y definir sectores homogéneos con base en el valor del CBR con el fin de realizar diseños óptimos y no sobre-diseñar ni sub-diseñar.

Para esto, se debe realizar una caracterización del suelo dado que este será el soporte de nuestra estructura de pavimento y debemos establecer su capacidad mecánica y la estabilidad volumétrica cuando se presenten cambios de humedad que se presentan en el mismo. Los valores de CBR se deben correlacionar con el método de preferencia, pero para este caso será por medio de la siguiente correlación definida en el Manual del INVIAS:

Ecuación 1 - Correlación del CBR y Mr.

$$Mr(\text{psi}) = 2555 * CBR^{0,64}$$

Fuente: Manual de Diseño de Bajos Volúmenes – Instituto Nacional de Vías INVIAS

1.3 Aporte Estructural de las Capas del Pavimento (a_i)

Las diferentes capas que componen la estructura del pavimento aportan al valor del Número Estructural (SN) por medio de un Coeficiente de Aporte Estructural (a_i). Para cada tipo de capa y de material existe un coeficiente específico. En el manual del INVIAS nos indica unos valores representativos para cada tipo de capa, como se muestra a continuación:

Tabla 3 - Coeficientes Estructurales (a_i).

Coeficientes estructurales (a_i).	Referencia
Mezclas asfálticas densas en caliente	0.44
Bases granulares	0.14
Subbases granulares	0.11

Fuente: Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes – Instituto Nacional de Vías

De igual manera, para las capas de Mezcla Asfáltica, Base Granular y Subbase Granular se puede definir por medio de los ábacos mostrados a continuación, el valor del Coeficiente de Aporte Estructural:

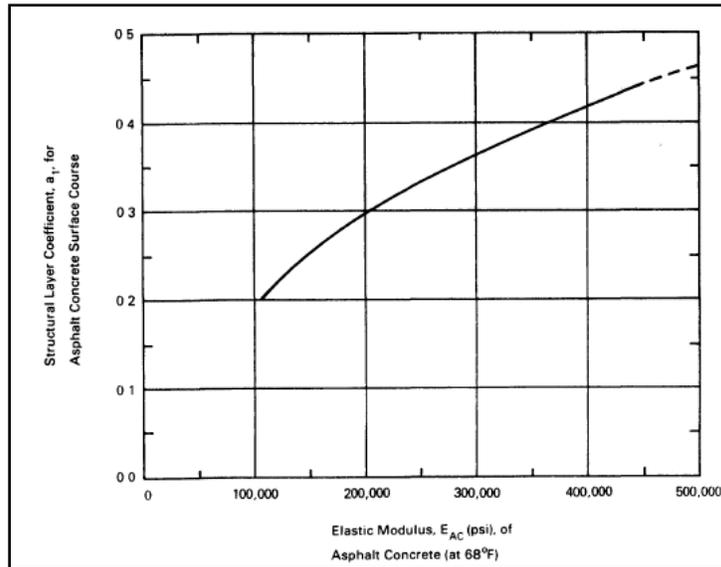


Figura 3. Estimación del Coeficiente Estructural a_1 de la capa de mezcla asfáltica densa en caliente. Recuperado de: *Guide for Design of Pavement Structures, 1993*.

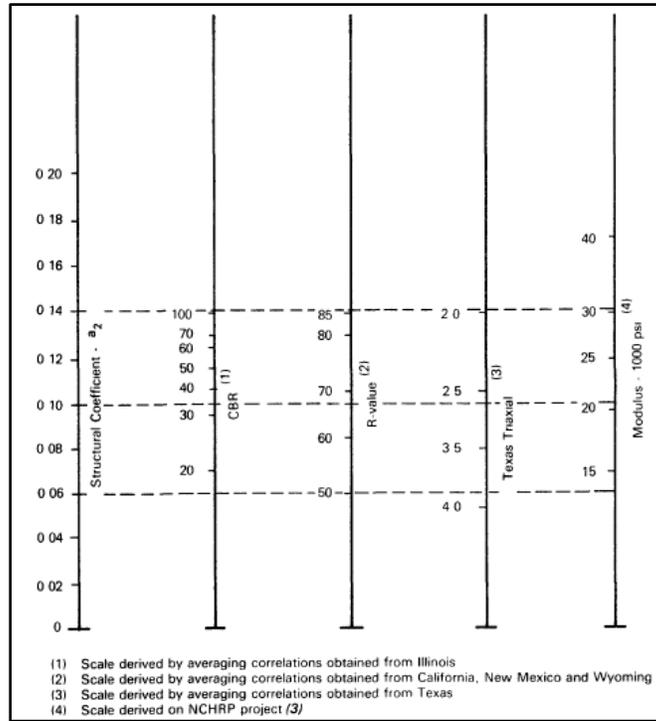


Figura 4. Estimación del Coeficiente Estructural a_2 de la capa de base granular. Recuperado de: *Guide for Design of Pavement Structures, 1993*

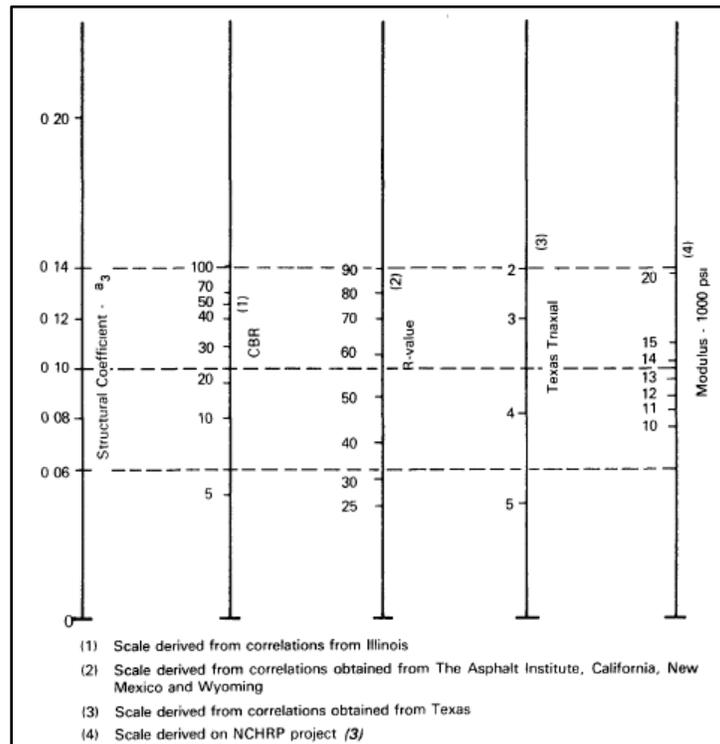


Figura 5. Estimación del Coeficiente Estructural a_2 de la capa de subbase granular.

Recuperado de: *Guide for Design of Pavement Structures, 1993*

1.4 Coeficiente de Drenaje (m_i)

El agua es uno de los factores más importantes dentro del diseño de la estructura del pavimento, dado que es una de los factores más perjudiciales para el mismo. Para ello, debe definir un coeficiente de drenaje de cada una de las capas mediante la siguiente tabla que nos indica la Guía AASHTO-93:

Tabla 4 - Coeficientes de Drenaje para Base y Subbase Granular (m_i).

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo donde la estructura de pavimentos está expuesta a niveles de humedad aproximándose a la saturación			
	Menos del 1%	1-5%	5-25%	Mayor del 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Aceptable	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy Pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: *Guide for Design of Pavement Structures, 1993*

Teniendo en cuenta la tabla anterior, podemos definir los valores del coeficiente de drenaje para cada una de las capas de la estructura del pavimento dependiendo de sus características en cuanto a la calidad del drenaje. Para la capa de mezcla asfáltica, se asume un valor de 1 dado que es una capa que es impermeable y permite una calidad de drenaje buena.

1.5 Confiabilidad

Cada diseño es único y tendrá un nivel de confiabilidad dependiendo de la probabilidad de cómo queremos que sea el comportamiento de la estructura del pavimento con respecto a las

condiciones de tránsito durante el periodo de diseño definido. Para esto, la Guía de AASHTO-93 tiene unos valores relacionados de la siguiente manera:

Tabla 5 - Valores de Confiabilidad.

Categoría del Proyecto	Confiabilidad Estadística (%)	Zr
Media	90%	-1.282
Alta	90%	-1.282
Muy Alta	95%	-1.645

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, 1993

1.6 Desviación Estándar So

La desviación estándar define el valor que incluye la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito de la zona dentro del periodo de diseño y la desviación estándar de la predicción del comportamiento del pavimento.

Tabla 6 - Valores típicos de Desviación Estándar, So.

Proyecto de Pavimento	Desviación Estándar, So
Rango para pavimentos flexibles	0.40 - 0.50
Construcción nueva	0.45
Sobrecapas	0.5

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, 1993

El valor que el Instituto Nacional de Vías en su manual recomienda para el diseño de pavimentos flexibles un valor de So igual a 0,45.

1.7 Serviciabilidad de la Estructura de Pavimento

Según la Guía AASHTO-93, “La serviciabilidad de un pavimento está definida por su habilidad de servir al tipo de tráfico (automóviles y camiones).”(p.100)

Una vez la serviciabilidad inicial y final son establecidas, la siguiente ecuación debe ser usada para definir el cambio en el Índice de Serviciabilidad:

Ecuación 2 Cálculo de Índice de Serviciabilidad.

$$\Delta PSI = P_i - P_f$$

Fuente: Guide for Design of Pavement Structures, 1993

1.8 Número Estructural del Pavimento (SN)

En la Guía del Método AASHTO-93 para el diseño de los pavimentos flexibles, se calcula con base en el Número Estructural (SN), donde este determina la capacidad estructural que requiere un pavimento, teniendo en cuenta las variables mencionadas anteriormente. Para el cálculo del SN requerido se empleó el software Cálculo AASHTO-93, que presenta la siguiente interfaz:

The screenshot shows a software window titled "Ecuación AASHTO 93". It is divided into several sections for data entry:

- Tipo de Pavimento:** Radio buttons for "Pavimento flexible" (selected) and "Pavimento rígido".
- Confiability (R) and Desviación estándar (So):** A dropdown menu for "Reliability (R)" and a text box for "So".
- Serviciabilidad inicial y final:** Text boxes for "PSI inicial" and "PSI final".
- Módulo resiliente de la subrasante:** A text box for "Mr" followed by "psi".
- Información adicional para pavimentos rígidos:** Text boxes for "Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)", "Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)", "Coeficiente de transmisión de carga - (J)", and "Coeficiente de drenaje - (Cd)".
- Tipo de Análisis:** Radio buttons for "Calcular SN" (selected) and "Calcular W18", with a text box for "W18 =".
- Número Estructural:** A text box for "SN =".

At the bottom of the window are two buttons: "Calcular" and "Salir".

Figura 6 - Interfaz del Programa Ecuación AASHTO-93. Recuperado de: AASHTO-93

Donde:

Variables Independientes

W18: Número de aplicaciones de cargas equivalentes de 8,2 Ton acumuladas en el periodo de diseño (n).

Zr: Valor del desviador en una curva de distribución normal, función de la Confiabilidad del diseño (R) en que las cargas de diseño no serán superadas por las cargas reales aplicadas sobre la estructura de pavimentos.

So: Desviación estándar del sistema, el cual está en función de posibles variaciones en las estimaciones de tránsito.

Δ PSI: Pérdida de Serviciabilidad prevista en el diseño.

Mr: Módulo de Resiliencia de la subrasante obtenido a través de ecuaciones de correlación con la capacidad portante (CBR).

Variable Dependiente

SN: Número estructural, o capacidad de la estructura para soportar las cargas bajo las condiciones (variables independientes) de diseño.

Una vez determinado el Número Estructural requerido para la estructura esto nos permitirá calcular el espesor para cada una de las capas a proponer en la estructura. Se procede a realizar el cálculo del SN por cada capa para luego ser sumado cada uno de ellos.

1.9 Cálculo de Espesores de Capas

Una vez calculado el Número Estructural requerido por la estructura, se procede a realizar el cálculo de cada una de las capas de la estructura del pavimento según lo indica la Guía AASHTO-93, así:

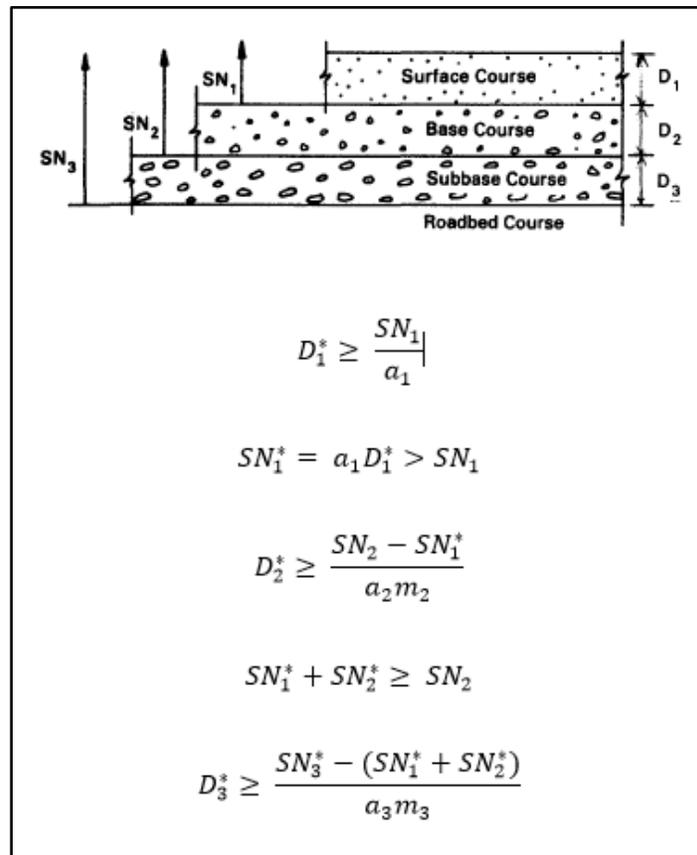


Figura 7. Cálculo de Espesores de Capas. Recuperado de: *Guide for Design of Pavement Structures, 1993*

De igual manera, la Guía de AASHTO-93 recomienda unos espesores mínimos dependiendo del tránsito (Ejes Equivalentes de 8,2 Ton), definidos de la siguiente manera:

Tabla 7 - Espesores Mínimos de Capas.

Espesores Mínimos AASHTO (in)

N8,2 (Millones)	Concreto Asfáltico	Base Granular
< 0.05	1 o TSD	4.0
0.05-0.15	2.0	4.0
0.15-0.50	2.5	4.0
0.50-2.00	3.0	6.0
2.00-7.00	3.5	6.0
>7.00	4.0	6.0

Fuente: Guía AASHTO-93

3. Metodología

2.1. Periodo de Diseño

Dependiendo del periodo de diseño, se define el valor del tránsito estimado que pasará durante el tiempo de vida útil de la estructura de pavimento. Según el Instituto Nacional de Vías, el periodo de diseño recomendado para el diseño de una estructura de pavimento flexible es de 10 años, valor que será escogido para el presente diseño.

2.2. Tránsito de Diseño

El Consorcio Vías Equidad 046 y el Consorcio Saitec-Joyco suministraron los estudios realizados para el corredor vial en estudio y para efectos de definición del Tránsito de Diseño se calculó el número de ejes equivalentes de 8.2 Toneladas para el periodo de diseño teniendo en cuenta los factores de dirección, carril y de igual manera se aplicó el factor camión (daño) a cada tipo de vehículo mencionados anteriormente.

Según la información suministrada de los estudios, se definió un tránsito solicitado de 7.258.829 ejes equivalentes de 8.2 Toneladas para el periodo de tránsito escogido.

2.3 CBR de Diseño

De igual manera este valor ha sido suministrado por el Consorcio Vías Equidad 046 y el Consorcio Saitec-Joyco, donde la exploración geotécnica que se realizó fue dirigida al

conocimiento del material de soporte a lo largo de la sección de tramo elegido para el diseño, a partir de los ensayos de laboratorio tradicionales para realizar la clasificación del material.

Entre estos ensayos se encuentran la granulometría, humedad natural, límites de Atterberg y CBR (Inalterado y sumergido).

Para el CBR de diseño se trabajó con el valor de 8.9% según los estudios suministrados.

2.4 Módulo Resiliente de la Subrasante

Para definir el valor de módulo resiliente de la subrasante se empleó la Ecuación 1, obteniéndose un valor de 10.351 psi.

2.5 Módulos Dinámicos y Coeficientes de Aporte Estructural de las Capas del Pavimento

2.5.1 Subbase Granular

El coeficiente estructural que aporta la subbase granular, se ha determinado mediante el ábaco que relaciona el parámetro de resistencia del coeficiente y el CBR con el módulo dinámico.

2.5.2 Base Granular

El coeficiente estructural que aporta la base granular, se ha determinado mediante el ábaco que relaciona el parámetro de resistencia del coeficiente y el CBR con el módulo dinámico.

2.5.3 Mezcla Densa en Caliente

El coeficiente estructural que aporta la mezcla asfáltica, se ha determinado mediante el ábaco que relaciona el parámetro de resistencia del coeficiente y el CBR con el módulo dinámico.

2.6 Coeficiente de Drenaje

Estos datos fueron tomados de la tabla en donde nos indican los tiempos de drenaje que nos recomienda la AASHTO.

2.7 Nivel de Confiabilidad

Dado que este nivel de confiabilidad representa el grado de certidumbre de que un diseño puede llegar al fin de su vida útil en condiciones óptimas, indicándonos que está directamente conexo con el tráfico del tramo, por este motivo, se determinó este parámetro por medio de la tabla AASHTO para tráfico NT2.

2.8 Desviación Estándar

Dado que este parámetro está ligado con el Nivel de Confiabilidad definido para el diseño, se determinó de acuerdo a la recomendación realizada por la guía AASHTO.

2.9 Nivel de Serviciabilidad

Esta medida se definió de acuerdo a los valores de la clasificación que se realizó en el AASHO Road Test al inicio y final de la vida útil de un pavimento flexible.

2.10 Número Estructural del Pavimento

Mediante la fórmula de diseño definida por la guía AASHTO se precisa el número estructural y en función de este, se determina los espesores de las capas que componen la estructura del pavimento. (AASHTO, 1993)

3. Análisis de Resultados

Diseño de la Estructura del Pavimento – Método AASHTO-93

3.1 Tránsito

Tabla 8 - Factor Daño Diferentes Vehículos.

Vehículos Comerciales	F.D.
Buses	1
Alimentadores	4.5
C2P	1.14
C2G	3.44
C3	3.76
C4	6.73
C5	4.4
>C5	4.72
F.D.D	0.54
F.D.C	1

Fuente: Consorcio Vías Equidad 046

Dónde:

F.D.D. = Factor de Distribución Direccional

F.D.C = Factor de Distribución por Carril

F.D. = Factor Daño

Tabla 9 - Ejes Equivalentes Totales.

AÑO	AUTOS	BUSES	EJES EQUIV.	C2P	EJES EQUIV.	C2G	EJES EQUIV.	C3	EJES EQUIV.	C4	EJES EQUIV.	C5	EJES EQUIV.	>C5	EJES EQUIV.
2018	223,380	40,150	21,681	67,525	41,568	40,880	75,939	25,185	51,136	8,395	30,509	10,950	26,017	85,410	217,693
2019	234,102	42,077	22,722	70,766	43,563	42,842	79,584	26,394	53,591	8,798	31,973	11,476	27,266	89,510	228,142
2020	245,339	44,097	23,812	74,163	45,654	44,899	83,404	27,661	56,163	9,220	33,508	12,026	28,575	93,806	239,093
2021	257,115	46,214	24,955	77,723	47,846	47,054	87,408	28,989	58,859	9,663	35,117	12,604	29,946	98,309	250,570
2022	269,457	48,432	26,153	81,453	50,142	49,312	91,603	30,380	61,684	10,127	36,802	13,209	31,384	103,028	262,597
2023	282,391	50,757	27,409	85,363	52,549	51,679	96,000	31,838	64,645	10,613	38,569	13,843	32,890	107,973	275,202
2024	295,946	53,193	28,724	89,461	55,071	54,160	100,608	33,366	67,748	11,122	40,420	14,507	34,469	113,156	288,411
2025	310,151	55,746	30,103	93,755	57,715	56,760	105,437	34,968	71,000	11,656	42,360	15,203	36,123	118,587	302,255
2026	325,038	58,422	31,548	98,255	60,485	59,484	110,498	36,646	74,408	12,215	44,393	15,933	37,857	124,279	316,763
2027	340,640	61,226	33,062	102,971	63,389	62,339	115,802	38,406	77,979	12,802	46,524	16,698	39,674	130,245	331,968
2028	356,991	64,165	34,649	107,914	66,431	65,332	121,361	40,249	81,722	13,416	48,757	17,500	41,579	136,497	347,902
2029	374,126	67,245	36,312	113,094	69,620	68,468	127,186	42,181	85,645	14,060	51,098	18,340	43,574	143,048	364,602
EJES ACUMULADOS			341,130		654,034		1,194,830		804,578		480,031		409,353		3,425,197
TOTAL EJES EQUIVALENTES DE 8,2 TON				7,309,153											
				TIPO C2G											
TRÁNSITO DE OBRA				TIPO C3	200,000										
				TIPO C4											
				TIPO C5											
TOTAL EJES EQUIVALENTES DE 8,2 TON				7,509,153											

Fuente: Consorcio Vías Equidad 046

3.2 Números Estructurales de las Capas del Pavimento

De acuerdo a lo definido en la información anteriormente explicada, se presenta definen los parámetros a emplear para realizar el diseño del pavimento. Para efectos de este diseño, la estructura del pavimento estará compuesta por una Carpeta Asfáltica, ésta sobre una Base Granular y una Subbase Granular.

Tabla 10 - Parámetros de Diseño

Capa	Confiabilidad	Zr	So	Δ PSI	Tránsito	Mr (psi)	ai	mi
Subrasante						10,351	-	-
Subbase Granular	95%	1.645	0.45	2.0	7,509,153	16,000	0.12	0.85
Base Granular						30,000	0.14	0.90
Carpeta Asfáltica						290,000	0.44	1.00

Fuente: El Autor

Teniendo en cuenta estos valores, procedemos a identificar el valor del Número Estructural requerido para toda la estructura de pavimento, de la siguiente manera:

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software window. It contains several input fields and a calculation button. The 'Tipo de Pavimento' is set to 'Pavimento flexible'. The 'Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)' is set to '95 % Zr=-1.645' and 'So 0.45'. The 'Serviciabilidad inicial y final' are 'PSI inicial 4.2' and 'PSI final 2.2'. The 'Módulo resiliente de la subrasante' is 'Mr 10351 psi'. The 'Información adicional para pavimentos rígidos' section is empty. The 'Tipo de Análisis' is 'Calcular SN', with 'W18 = 7509153'. The 'Número Estructural' is calculated as 'SN = 4.32'. There are 'Calcular' and 'Salir' buttons at the bottom.

Figura 8. Número Estructural Requerido.

El Número Estructural requerido para la estructura de pavimento es de 4.32.

Con base al Número Estructural requerido, procedemos a calcular el espesor de cada una de las capas denotado en el numeral 1.9 de este documento, de la siguiente manera:

- Cálculo SN Base Granular

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. The 'Tipo de Pavimento' is set to 'Pavimento flexible'. The 'Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)' are set to '95 % Zr=-1.645' and '0.45' respectively. The 'Serviciabilidad inicial y final' are 'PSI inicial 4.2' and 'PSI final 2.2'. The 'Módulo resiliente de la subrasante' is 'Mr 30000 psi'. The 'Tipo de Análisis' is 'Calcular SN', resulting in 'W18 = 7509153' and 'Número Estructural SN = 2.97'. Buttons for 'Calcular' and 'Salir' are visible at the bottom.

Figura 9. Número Estructural de la Base Granular

- Cálculo SN Subbase Granular

The screenshot shows the 'Ecuación AASHTO 93' software interface. The 'Tipo de Pavimento' is set to 'Pavimento flexible'. The 'Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)' are set to '95 % Zr=-1.645' and '0.45' respectively. The 'Serviciabilidad inicial y final' are 'PSI inicial 4.2' and 'PSI final 2.2'. The 'Módulo resiliente de la subrasante' is 'Mr 17000 psi'. The 'Tipo de Análisis' is 'Calcular SN', resulting in 'W18 = 7509153' and 'Número Estructural SN = 3.64'. Buttons for 'Calcular' and 'Salir' are visible at the bottom.

Figura 10. Número Estructural de la Subbase Granular.

Una vez definidos los números estructurales de cada capa, definimos los espesores de cada una de ellas.

- Espesores de Capas

Tabla 11 - Espesores de Capas

Capa	Pulgadas	Centímetros
CA (d1)	4,72	12,0
BG (d2)	9,84	25,0
SBG (d3)	12	30,0
Total Estructura		67,0

Fuente: El Autor

Estos valores calculados, son los valores óptimos que permitirán un correcto funcionamiento de la estructura de pavimento, no obstante, los valores hallados se encuentran por encima de los valores mínimos recomendados por el Instituto Nacional de Vías – INVIAS.

La estructura de pavimento propuesta se puede esquematizar de la siguiente manera:



Figura 11. Estructura de Pavimento Propuesta.

4. Conclusiones

- Para obtener un mejor conocimiento del material de subrasante, en la exploración geológica y geotécnica se realizaron apiques de 1,5 m de profundidad cada 250 m para una mejor clasificación de este.
- Se determinó por medio de ensayos de laboratorio, que el valor de CBR de la subrasante en general es bueno y no existió la necesidad de realizar un mejoramiento del suelo soporte dado que lo mínimo para no realizar un mejoramiento es un CBR de 3%.
- Dado que el tramo diseñado fue de una longitud de 810 m, su homogeneidad permitió definir un valor de Módulo Resiliente de 10.351 psi para el diseño de la estructura de pavimento.
- Teniendo en cuenta los aforos realizados para definir el tránsito promedio diario, se estableció que para un periodo de diseño de 10 años, el número de ejes equivalentes de 8,2 Ton acumulados para este tiempo es de 7.509.153 ejes.
- Se plantea una estructura de pavimento flexible que está compuesta por una carpeta asfáltica de 12 centímetros, una base granular de 25 centímetros y una subbase granular de 30 centímetros.

5. Recomendaciones

- Dada a la inestabilidad geológica del sector, se recomienda realizar un mantenimiento rutinario semestralmente, en aras de conservar el tramo en óptimas condiciones y hacer que su vida útil se prolongue hasta el periodo de diseño.
- Durante el proceso constructivo, es de vital importancia realizar verificaciones a cada una de las capas construidas
- Es de vital importancia realizar verificaciones de densidad, humedad y resistencia durante el proceso constructivo de cada una de las capas con el fin de obtener mejores resultados al tener el producto final.
- De igual manera, dada las condiciones climatológicas del sector, es necesario mantener los sistemas de drenaje superficial y subsuperficial en recomendables condiciones con el fin de evitar el rápido deterioro de la estructura de pavimento.

Bibliografía

AASHTO. (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington D.C.

Consortio Saitec - Joyco. (2016). Pajarito.

Consortio Vías Equidad 046. (2016). Pajarito.

INVIAS, I. N. (2013). *CBR de Suelos Compactados en el Laboratorio y Sobre Muetsra Inalterada INV E - 148 - 13*. Bogotá D.C.

INVIAS, I. N. (2015). *Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes*. Bogotá D.C.

Transporte, M. d. (2007). *Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito*. Bogotá D.C.