

Pavimento centro poblado y al Monumento Histórico de Puente Boyacá*

Nancy Johana Bohorquez**

Nidia Yamile Camacho Torres***

Recibido: 10 de abril de 2012 Aprobado: 13 de junio de 2012

L'esprit Ingénieux Tunja - Colombia V 3 pp. 72 - 90 enero - diciembre 2012

Resumen

Este proyecto se emplazó en el municipio de Ventaquemada, en el centro poblado de Puente de Boyacá. Este sector se caracteriza por ser una zona de importancia histórica y cultural en el contexto nacional y regional. Se decidió elaborar un proyecto que mejorará las condiciones físicas, estéticas y ambientales del sector. Actualmente el sector poblado posee calles en tierra en regulares condiciones. La vía que conduce hacia el monumento histórico de Puente de Boyacá se encuentra con una capa de afirmado en regulares condiciones de transitabilidad.

Dadas las condiciones mencionadas anteriormente se proyectó el diseño de una estructura de pavimento para el centro poblado de Puente de Boyacá y una estructura de pavimento para la vía que conduce hacia el centro histórico. Para este fin se realizaron los estudios previos en la zona de proyecto, se elaboraron estudios de suelos, sondeos y toma de muestras inalteradas y levantamiento topográfico. Se procedió a determinar las áreas disponibles para zona de andenes, parqueo de vehículos y las áreas exclusivas para intervenir las calles existentes y a realizar los diseños de las estructuras de pavimento, con sus respectivas capas, espesores y dimensiones. Para este fin, se decidió realizar la construcción de una estructura de pavimento articulado para los andenes y los sitios de parqueo del centro poblado y una estructura de pavimento flexible para la vía. De esta forma, se da la posibilidad de utilizar dos tipos de pavimentos, que por sus colores, forma y características se enmarcan perfectamente en el lugar.

PALABRAS CLAVE: Adoquín, Pavimento flexible, Puente de Boyacá, Estudios y Diseños.

Abstract

For the present structural design a conscientious study was This project is located in the municipality of Ventaquemada in the town of Puente de Boyacá. This sector is characterized by a zone of historical and cultural importance in the national and regional levels, decided to develop a project that will improve the physical, aesthetic and environmental sector. Village sector currently owns land in streets in fair condition. The path leading to the landmark Puente de Boyacá is a regular layer in said traffic conditions.

Given these conditions was shown the design of a pavement structure for the town of Puente de Boyacá and a pavement structure to the road leading to the historic center. To this end, previous studies conducted in the project area were developed soil studies, surveys and sampling and surveying unchanged. We proceeded to determine the areas available for platform area, parking of vehicles and the exclusive areas to intercept existing streets and carry out the designs of pavement structures, with their layers, thicknesses and dimensions. To this end, we decided to build an articulated pavement structure for the platforms and parking sites from the town and a flexible pavement structure to the track. Thus, there is the possibility of using two types of flooring, which by its color, shape and features are framed perfectly in place.

KEY WORDS: Cobblestone, Paving flexible, Puente de Boyacá, Studies and Design.

* Artículo de investigación, como producto final del proyecto de investigación del mismo nombre.

** Ing. en Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja Especialista en Geotecnia vial y Pavimentos. nbohorquez@ustatunja.edu.co

*** Ing. en Transporte y Vías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Tunja Especialista en Geotecnia vial y Pavimentos. plazasvargas@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Este es un artículo de investigación científica y tecnológica, presenta de manera detallada los resultados del proyecto de investigación denominado pavimento del centro poblado y al monumento histórico de Puente Boyacá.

El centro poblado Puente de Boyacá, se caracteriza por ser una zona que por su cercanía con el monumento histórico de la batalla del Puente de Boyacá requiere de una especial atención. Analizando su crecimiento urbano, se puede establecer que a través de los años, el aumento poblacional ha incidido en la progresiva aparición de instituciones entre las que se cuentan, colegio, escuelas, iglesia y casa parroquial, cooperativas de productos agropecuarios, entre otros, los cuales han sido erguidos por la integración y colaboración de la comunidad que conforma esta zona del municipio de Ventaquemada en el departamento de Boyacá.

Es importante anotar que las atracciones que se han implementado por parte del gobierno departamental en época decembrina con los alumbrados navideños, así como a las festividades patronales que se realizan el resto del año, han incidido en el aumento del tráfico vehicular y peatonal en el sector.

Por lo anterior, y teniendo como base las pésimas condiciones de la estructura vial existente, el objetivo principal de este proyecto se enmarcó en elaborar los estudios y los diseños necesarios para la construcción de la estructura de pavimento en el centro poblado y en la vía que lo conduce al centro histórico.

La estructura utilizada para la realización de este artículo contempla el desarrollo de cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

II. METODOLOGÍA

Se presenta la metodología que permitió desarrollar el trabajo, se mencionan aspectos como las técnicas y procedimientos a seguir para llevar a cabo dicha investigación.

A. Metodología utilizada:

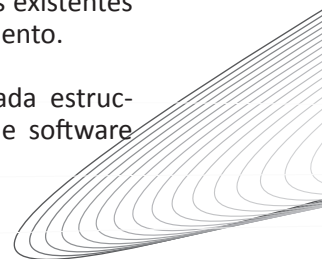
Las actividades desarrolladas fueron la: recopilación de información secundaria; apiques y toma de muestras para definir perfiles es-

tratigráficos y características del material de subrasante; levantamiento topográfico de la zona del proyecto; diseño del modelo estructural con capa de rodadura en concreto asfáltico para la vía; diseño del modelo estructural en pavimento articulado para paso peatonales y zona de parqueo del centro poblado, elaboración del informe final, planos y memorias de cálculo y la redacción del artículo final.

Para recopilar la información secundaria inicialmente se recurrió a indagar a los habitantes del sector sobre las características del lugar y en seguida se realizó recorrido de reconocimiento en el que se identificaron los sectores a intervenir, las obras de drenaje, los pozos de inspección las redes eléctricas, la estructura de pavimento existente tanto en la vía como en el centro poblado, entre otros.

Para la ejecución de los estudios de suelos, se hicieron apiques que requirieron herramientas tales como el barreno, el Tubo Shelby, el cono dinámico para determinar resistencias y caracterización de la subrasante. Así mismo, para el levantamiento topográfico se requirieron herramientas como teodolito, nivel, jalón, cinta, entre otras que permitieron la localización de las edificaciones existentes y de la nueva estructura de pavimento.

Finalmente, en el diseño de cada estructura se optó por la utilización de software



y otras herramientas como el programa de diseño Depav para pavimentos flexibles y la metodología para el diseño de pavimentos articulados. Así mismo, se requirió para la ejecución de este diseño y para la redacción del artículo final de la utilización de computadores portátiles, impresoras, cámaras fotográficas, fotocopadoras y papel, entre otras herramientas.

III. DESARROLLO DEL TRABAJO

Tránsito de diseño.

El tránsito es uno de los parámetros de diseño fundamentales y aunque se pueden permitir ciertas imprecisiones en la determinación de esta variable, siempre será necesario conocerla para poder determinar los espesores de las capas que constituyen el pavimento.

1. Determinación de la composición del tránsito.

Teniendo en cuenta las características sociales, económicas y de desarrollo en la zona de ejecución del proyecto y especialmente, la particularidad del uso de la vía a diseñar en la zona urbana del centro poblado, fue necesario realizar un aforo vehicular. Este arrojó los resultados de la tabla I.

Se estableció que el tránsito promedio diario semanal es de 261 vehículos. Para determinar un diseño que contemple el aumento de los vehículos por la construcción de la nueva

estructura vial es necesario definir el tránsito atraído y generado.

2. Factor daño por tipo de vehículo.

El manual presenta una discriminación del Factor Daño (FD) producido por cada tipo de vehículo. La tabla II presenta la información necesaria.

1) Factor Direccional.

El Invías en el manual de diseño para este tipo de carreteras establece que el factor direccional (Fd) se estipula con base al ancho de carril, como se denota en la tabla III. El ancho de vía determinado para el diseño es de 7,0m, por lo tanto el factor direccional es 0,50.

TABLA II.
FACTOR DAÑO POR TIPO DE VEHÍCULO

Tipo de vehículo	Factor daño
Bus	1,0
C2 – P	1,01
C2 – G	2,72
C3 – C4	3,72
C5	4,88
>C5	5,23

Fuente: Invías Manual de diseño de pavimentos asfálticos paravías con bajos volúmenes de tránsito.

TABLA I.

RESULTADOS CONTEO UNIDAD DE DISEÑO 1

Condición	No. días	TPD	Distribución por tipo de camión							
			A	B	C	C2P	C2G	C3-C4	C5	C6
Típico	5	287	134	51	102	37	58	5	2	0
Atípico	2	195	101	38	56	22	28	1	7	0
Promedio ponderado		261	125	47	89	33	49	4	3	0
			47,8%	18,1%	34,1%	12,5%	19,0%	1,5%	1,3%	0,0%
Composición Camiones						36,8%	55,6%	4,3%	3,9%	0,0%

Fuente: Autores del proyecto, Mayo de 2011.

TABLA III
FACTOR DIRECCIONAL POR ANCHO DE VÍA

Ancho de calzada	Tránsito de diseño	Fd
Menos de 5m	Total en los dos sentidos	1,0
≥ 5m y < 6m	¾ del total de los dos sentidos	0,75
≥ 6m	½ del total de los dos sentidos	0,50

Fuente. Invías Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

2) *Tránsito acumulado de ejes equivalentes de 80 Kn en el carril de diseño durante el período de diseño.*

Con la información de cada parámetro analizado, se realizó el cálculo del tránsito para el diseño, así:

a) *Número de ejes equivalentes en el carril de diseño (tránsito normal) en el año base.*

$$N_{80Kn \text{ Carril de diseño (normal), año base}}$$

$$N = 365 * TPD * \%VC * Fcg * Fd * Fca * Fp$$

$$N = 1'548445,6 = 1,55 * 10^6$$

b) *El Tránsito en ejes de 8,2 toneladas que circularan en el carril de diseño, durante el período de diseño con un nivel de confianza del 85% es:*

$$N_{dis} = 10^{0,05 * Z_r * N}$$

$$N_{dis} = 10^{0,05 * 1,037 * 1'548445,6} = 1'744800,0$$

$N_{dis} = 1,75 * 10^6$ Ejes equivalentes en el carril de diseño durante el período de diseño.

3) *Categorización del tránsito.*

Según la designación dada por el Invías, mostrada en la tabla IV, el tránsito que se espera para esta unidad de diseño corresponde a un T2

TABLA IV
CATEGORIZACIÓN DEL TRÁNSITO

Designación	Rangos tránsito acumulado por carril de diseño
T1	0,5 - 1,0 * 10 ⁶
T2	1,0 - 2,0 * 10 ⁶
T3	2,0 - 4,0 * 10 ⁶
T4	4,0 - 6,0 * 10 ⁶
T5	6,0 - 10,0 * 10 ⁶
T6	10,0 - 15,0 * 10 ⁶
T7	15,0 - 20,0 * 10 ⁶
T8	20,0 - 30,0 * 10 ⁶
T9	30,0 - 40,0 * 10 ⁶

Fuente. Invías Manual de diseño de pavimentos asfálticos

B. Evaluación de las condiciones climáticas ambientales:

Con base en las temperaturas y precipitaciones, el país se ha dividido en seis regiones climáticas, con el fin de que la variable clima se involucre en forma apropiada en el diseño de estructuras de pavimento.

En el lugar donde se localiza el proyecto, se tienen alta influencia de corrientes de vientos, las cuales influyen significativamente en el clima local. El centro poblado de Puente de Boyacá se encuentra enmarcado dentro de la región fría seca y fría semihúmeda, con temperaturas inferiores a 13°C y precipitaciones medias anuales menores a 2000 mm.

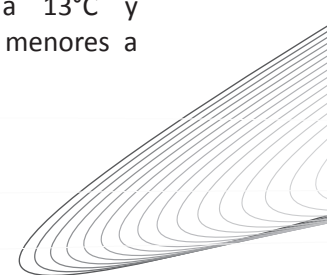


TABLA V.

CATEGORIZACIÓN DE LA REGIÓN POR CONDICIÓN CLIMÁTICA

Nº	REGIÓN	TEMPERATURA TMAP (°C)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
R1	Fría seca y fría semihúmeda	< 13	< 2000
R2	Templado Seco y Templado Semihúmedo	13 - 20	< 2000
R3	Cálido Seco y Cálido Semihúmedo	20 - 30	< 2000
R4	Templado Húmedo	13 - 20	2000 – 4000
R5	Cálido Húmedo	20 - 30	2000 – 4000
R6	Cálido muy Húmedo	20 - 30	> 4000

Fuente. Invías Manual de diseño de pavimentos asfálticos.

C. Estudio geotécnico:

1) Diseño de la Exploración.

La base para conocer la planimetría y condiciones físicas del lugar fueron producto del estudio topográfico que permitió establecer la longitud total del proyecto. Se determinaron 3 tramos de análisis, el primero enmarca la vía antigua que conduce desde el restaurante ubicado en el Centro Histórico hasta la conexión con el centro poblado con una longitud de 900m, el segundo incluye las calles internas que conforman el centro poblado el cual tiene una longitud aproximada de 350metros y el tercer tramo analizado corresponde a la vía que conduce al Monumento Pedro Pascasio Martínez y el colegio Panamericano, vía que va desde la conexión con la avenida principal Tunja- Bogotá y que tiene una longitud de 450 metros lineales.

Se realizó un recorrido a la zona del proyecto identificando las condiciones físicas del lugar, con lo cual se estableció, que por las características similares del terreno y la importancia del proyecto, se harían cinco (5) apiques ubicados como se muestra en la tabla VI.

Se estableció realizar exploración por sistema de apique a cielo abierto con barrenado manual y a una profundidad de 1,50m. Las muestras a tomar en cada apique fueron:

- ✓ Una (1) muestra inalterada en molde CBR del techo de la subrasante.
- ✓ Una (1) muestra del material de afirmado existente.
- ✓ Una (1) o dos (2) muestras inalteradas en tubo Shelby del resto del perfil de suelo explorado hasta 1,50m de profundidad.

TABLA VI.

UBICACIÓN DE PUNTOS PARA TOMA DE MUESTRAS

Localización	Apique	Apique 2	Apique 3	Apique 4	Apique 5
Tramo 1	K0 + 750	K0 + 500	K0 + 250		
Centro poblado				K0 + 020	
Tramo 2					K0 +250

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

La figura 1 permite identificar en sobre una foto extraída de Google art la localización de la zona del proyecto y la ubicación aproximada de los apiques.

FIGURA 1.

LOCALIZACIÓN ZONA DEL PROYECTO Y PUNTOS PARA TOMA DE MUESTRAS



Fuente. Fotografía aérea sin escala tomada de Google earth.

2) Exploración del sub-suelo:

La metodología realizada para llevar a cabo la exploración en cada uno de los cinco apiques fue la siguiente:

- ✓ Excavación manual y muestreo del material afirmado existente.
- ✓ Ensayo de Penetrómetro dinámico de Cono (PDC): Para tener información alterna que permita determinar por correlación el valor de CBR, se realizó en cada apique la prueba del penetrómetro Dinámico de Cono.
- ✓ Muestra inalterada para determinar CBR de la subrasante. Se tomaron las pruebas en el molde sin alterar las condiciones de la muestra para cada apique y así determinar el CBR en laboratorio.

FOTOGRAFÍA 1.

TOMA DE MUESTRAS MATERIAL DE AFIRMADO



Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

- ✓ Muestras inalteradas en tubo Shelby del resto del perfil del suelo, explorando hasta los 1.50 metros de profundidad.

3) Pruebas de laboratorio.

La ejecución de los ensayos de laboratorio y campo tuvieron como finalidad determinar capacidad de soporte, la resistencia al corte, las propiedades índice y los parámetros necesarios para establecer los requerimientos mínimos para el desarrollo del proyecto de pavimentación del tramo en estudio. A las muestras de material de préstamo se le realizaron los ensayos de granulometría, límites de consistencia para su caracterización y clasificación, desgaste en máquina de los ángeles, equivalente de arena y CBR método I.

Las tablas VII y la tabla VIII muestran los resultados de las pruebas de laboratorio obtenidos para los apiques 1 y 4. Los cuales son los más representativos de cada unidad de diseño.

a) Análisis de resultados

Los resultados obtenidos con la ejecución de los estudios arrojan:

- ✓ Perfil estratigráfico promedio: La estratigrafía encontrada es variable en espesor y de características físicas aproximadamente homogéneas aunque difieren un poco en color.
- ✓ Clasificación de los suelos: El análisis de los resultados de laboratorio, especialmente la granulometría definen las características del material encontrado durante la exploración.

TABLA VII
RESULTADOS DE LABORATORIO APIQUE 1

Parámetro	Profundidad (m)				
	0,00 – 0,17	0,17 – 0,24	0,30 – 0,65	0,70 – 0,80	1,20 – 1,50
$\omega_{\text{NATURAL}} (\%)$			11,79	17,42	16,74
LL %		34,50	28,25	35,43	33,74
LP %		21,20	16,63	19,00	16,85
IP%		13,30	11,62	16,43	16,89
IL			-0,42	-0,10	-0,01
$\omega_{\text{EQUILIBRIO}} (\%)$		19,82	16,88	20,25	19,46
$\gamma_w (T/m^3)$			1,92		2,12
$\gamma_d (T/m^3)$			1,72		1,82
Pasa 200		11,83	24,09	60,32	77,98
Clasificación USC	GC	GC	GC	CL	CL
Clasificación Aashto	A 2 4 (0)	A 2 6 (0)	A 2 6 (0)	A 6 (9)	A 6 (12)
$q_u (Kg/cm^2)$					3,34
PDC (Kg/cm ²)					2,00
Humedad Sumergida			15,39		

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

TABLA VIII
RESULTADOS DE LABORATORIO APIQUE 4

Parámetro	Profundidad (m)			
	0,00 – 0,15	0,20 – 0,45	0,60 – 0,90	1,20 – 1,50
$\omega_{\text{NATURAL}} (\%)$		13,74	41,46	19,15
LL %	26,40	37,10	45,13	34,21
LP %	19,90	24,15	32,99	16,65
IP%	6,50	12,95	12,14	17,56
IL		- 0,80	0,70	0,14
$\omega_{\text{EQUILIBRIO}} (\%)$	16,01	21,04	24,81	19,68
$\gamma_w (T/m^3)$		1,63	1,58	2,04
$\gamma_d (T/m^3)$		1,43	1,11	1,71
Pasa 200	11,05	65,45	81,00	71,77
Clasificación USC	GC	CL	ML	CL
Clasificación Aashto	A 2 4 (0)	A 6 (8)	A 75 (10)	A 6 (12)
$q_u (Kg/cm^2)$			2,68	2,08
PDC (Kg/cm ²)			3,50	2,00
Humedad Sumergida		31,07		

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

b) *Características del material granular de préstamo afirmado.*

Analizando el perfil estratigráfico obtenido es posible verificar que existe una pequeña capa de material de mejores condiciones que la capa de subrasante la cual presenta como característicos dos tipos de suelo.

El primer tipo de suelo correspondió a un material (GC/ A-2-4/A-2-4/A-2-76), que es una Grava Sub-angular de color café y amarillo, en matriz arcillosa de color café y amarillo, con índice de plasticidad entre el 6 y el 13% y espesor variable entre 140 y 50 cm. Se halló en los apiques 2 y 3 el material (GP/ A-1), que es una grava angular algo arenosa de color amarillo oxidado y con eventuales betas de color rojizo, presenta sobre-tamaños y se encontró por debajo de 20 a 30 cm. y hasta 50 cm.

El segundo tipo de suelo correspondió a las características del Suelo Natural (Sub-rasante

(CL/A-6/A-4), que para el apique 1 es una arcilla de color amarillo con gris, presenta algunas gravas. También, se encontró una arcilla arenosa de color gris y rojo claro, contaminado de color café y rosado, de capacidad de soporte bueno en el apique 3. De igual forma para los apiques 4 y 5, se identificó un material (ML/MH/A-7-5/A-7-6), que corresponde a un limo de color café y gris oscuro, de capacidad de soporte pobre a regular. Finalmente, se halló en el apique 2 por debajo de los 35 cm. el material (ML/MH/A-7-5(14-27-28/CL/A-7-6(14), que es un limo de color rojizo con oxidado, en estado plástico, de capacidad de soporte muy pobre, LL=60-70.

Luego de realizar un análisis detallado de cada uno de los estratos que se observan a lo largo de la zona del proyecto, y de analizar sus características, las cuales son muy similares. Se tienen dos estratos de material representativo: el primero es el afirmado

existente y el segundo estrato pertenece al material de sub-rasante natural.

El material granular de préstamo existente (afirmado) presenta las siguientes propiedades índices: de gradación gruesa, de plasticidad baja y con porcentaje expansivo bajo.

El suelo natural (sub-rasante) presenta las siguientes propiedades:

- De gradación fina predominantemente, con porcentajes que pasan la malla 200 superiores al 60%.
- De plasticidad media a alta, se registraron valores de límite líquido entre 24 y 42%, valores que no representan susceptibilidad a expansión, fueron clasificados como CL; para los suelos clasificados como MH, se registraron valores superiores al 60%, son suelos de alta compresibilidad.
- Nivel Freático: no se registró agua libre hasta la profundidad investigada.
- Resistencia al corte: las muestras recuperadas en tubo Shelby presentan consistencia variable entre media, firme e incluso muy

firme, con resistencia a la compresión inconfiada entre 1.10 y 3.34 Kg/cm².

4) Capacidad de soporte:

A partir de los ensayos de penetración con cono dinámico (PDC), y de las pruebas de penetración por el método CBR al suelo inalterado, se pudo determinar el CBR para el diseño del pavimento y/o el módulo de reacción de la sub-rasante; en resumen se presentan los siguientes valores:

Para el apique 1, se halló un valor de CBR inalterado de %19,81 y un CBR sumergido de %5,99. En el apique 2, se obtuvo un valor de CBR inalterado de %6,67 y un CBR sumergido de %6,09. Para el apique 3, se halló un valor de CBR inalterado de %13,04 y un CBR sumergido de %9,42. Para el apique 4, se obtuvo un valor de CBR inalterado de %11,69 y un CBR sumergido de %2,42. Finalmente, para el apique 5, se consiguió un valor de CBR inalterado de %14,49 y un CBR sumergido de %9,47.

Para hallar el valor de CBR medido con el Penetrómetro dinámico de cono (PDC) se utilizó una de las correlaciones existentes más usadas en Colombia para suelos granulares que es la ecuación de Báteman donde el valor de DN corresponde a la pendiente de la recta hasta que cambia el estrato.

TABLA IX
CBR MEDIDO CON PENETRÓMETRO DINÁMICO DE CONO (PDC)

Apique No	CBR PDC entre 0 Y 1M	CBR PDC entre 1 Y 2M
1	47	18
2	1	1
3	25	15
4	54	13
5	7	3

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

Teniendo en cuenta los resultados arrojados en los estudios de suelos y la estimación del tránsito de diseño, es posible establecer que por las diferencias que se presentan en cuanto a las condiciones de tránsito, la capacidad de soporte de la subrasante y condiciones físicas de la vía que se localiza dentro de la zona urbana con respecto a las vías de los tramos que enlazan el centro poblado con el monumento histórico y con el Colegio Panamericano es necesario realizar el diseño de la estructura para dos unidades de diseño.

La primera unidad corresponde a las vías que hacen parte del casco urbano y la segunda unidad de diseño reúne los tramos que enlazan el centro poblado con el monumento histórico y con el Colegio Panamericano respectivamente.

a) *Clasificación del suelo de acuerdo al CBR*

El Inviás ha determinado una clasificación que discrimina el uso que se le puede dar a un suelo con respecto al valor del CBR, obtenido así:

TABLA X
CLASIFICACIÓN DE USO DEL SUELO

CBR%	Clasificación general	Usos
0 - 3	Muy pobre	Subrasante
3 - 7	Pobre a Regular	Subrasante
7 - 20	Regular	Subbase
20 - 50	Bueno	Subbase y Base
>50	Excelente	Base

Fuente. Inviás Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito

b) *Categorización de la subrasante*

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de laboratorio y la tabla de

clasificación por CBR, es posible definir 2 unidades de diseño:

- La unidad de diseño 1

Para establecer el CBR de esta unidad de diseño, nos basamos en el criterio del instituto del asfalto que recomienda tomar un valor de CBR tal, que el 60, el 75 ó el 87,5% de los valores individuales sea mayor o igual que él, para determinar el valor del percentil es necesario tener en cuenta la tabla que lo relaciona con el número de ejes de 8.2 ton. así:

TABLA XI
PERCENTILES PARA DETERMINACIÓN DE CBR DE DISEÑO

Número de ejes equivalentes de 8.2 ton. en el carril de diseño	Percentil a seleccionar para determinar el CBR de diseño
$\leq 10^4$	60,0
$10^4 - 10^6$	75,0
$\geq 10^6$	87,5

Fuente. Inviás Manual de diseño de pavimentos asfálticos

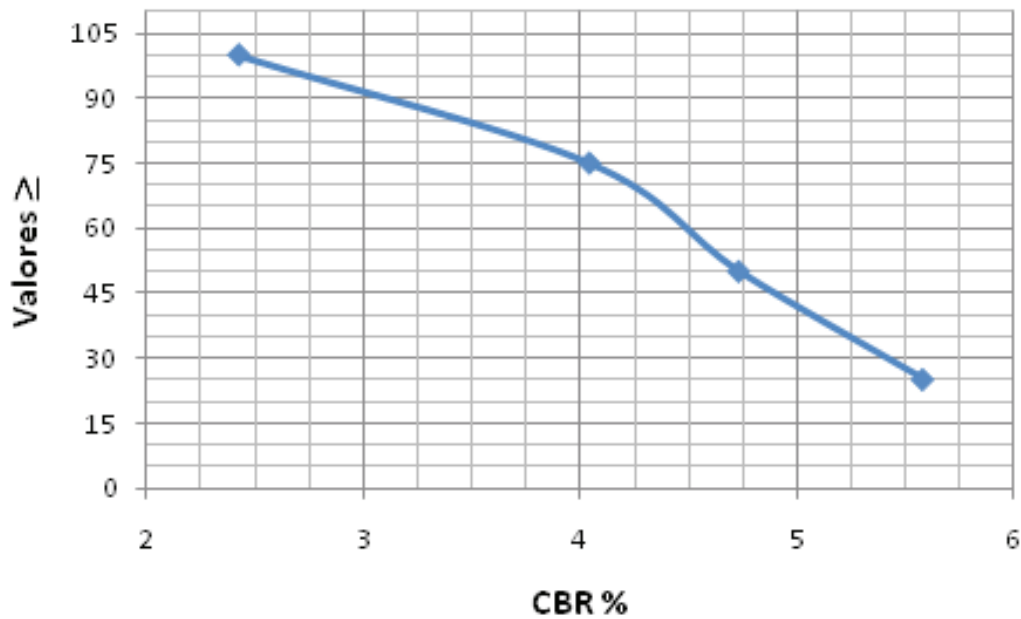
Para la unidad de diseño analizada se tienen en cuenta los valores de CBR del apique No. 4, obtenidos por análisis de laboratorio y correlaciones, se ordenan de menor a mayor y se establece el número y el porcentaje de valores iguales o mayores que cada uno, como se muestra en la tabla XII.

TABLA XII
ESTIMACIÓN CBR DE DISEÑO

CBR %	valores \geq	% valores \geq
2,72	4	100
4,04	3	75
4,73	2	50
5,58	1	25
16,77	Sumatoria	
4,2	CBR promedio	

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

FIGURA 2.
SELECCIÓN CBR – CRITERIO INSTITUTO DEL ASFALTO



Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

Luego se grafican los valores de CBR contra el percentil 75%, que corresponde al rango de tránsito de diseño y se determina el valor de CBR, que da como resultado un valor de 4,0%, como se muestra en la ilustración. Promediando los valores de CBR obtenidos tanto por el método del instituto del asfalto y la media, se define que el CBR para esta unidad de diseño es de 4,1%.

suelo con respecto al valor del CBR, obtenido como se observa en la tabla XIV.

Para establecer el CBR de esta unidad de diseño, se tuvo presente el criterio del instituto del asfalto, en esta ocasión se toma el valor de CBR tal que el 75 de los valores individuales sea mayor o igual que él.

TABLA XIII
CBR UNIDAD DE DISEÑO 1

Método	CBR diseño
Instituto del Asfalto	4,0
Media	4,2
Promedio	4,1

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

- Unidad de diseño 2.

Clasificación del suelo de acuerdo al CBR: El Invías ha determinado una clasificación que discrimina el uso que se le puede dar a un

TABLA XIV
USO DE LA SUB RASANTE DE ACUERDO AL CBR

CBR%	Clasificación general	Usos
0 - 3	Muy pobre	Subrasante
3 - 7	Pobre a Regular	Subrasante
7 - 20	Regular	Subbase
20 - 50	Bueno	Subbase y Base
>50	Excelente	Base

Fuente. Invías. Manual de diseño de pavimentos asfálticos.

Para la unidad de diseño analizada se tuvieron en cuenta los valores de CBR de los apiques 1, 2 3 y 5, obtenidos por análisis de laboratorio y correlaciones, se ordenan de menor a mayor y se establece el número y el porcentaje de valores iguales o mayores que cada uno, como se muestra en la tabla XV.

de tránsito de diseño y se determinó el valor de CBR, que da como resultado un valor de 3,6%, como se muestra en la figura 3.

Promediando los valores de CBR obtenidos tanto por el método del instituto del asfalto y la media, se define que el CBR para esta unidad de diseño es de 4,3%.

Luego se graficaron los valores de CBR contra el percentil 75%, que corresponde al rango

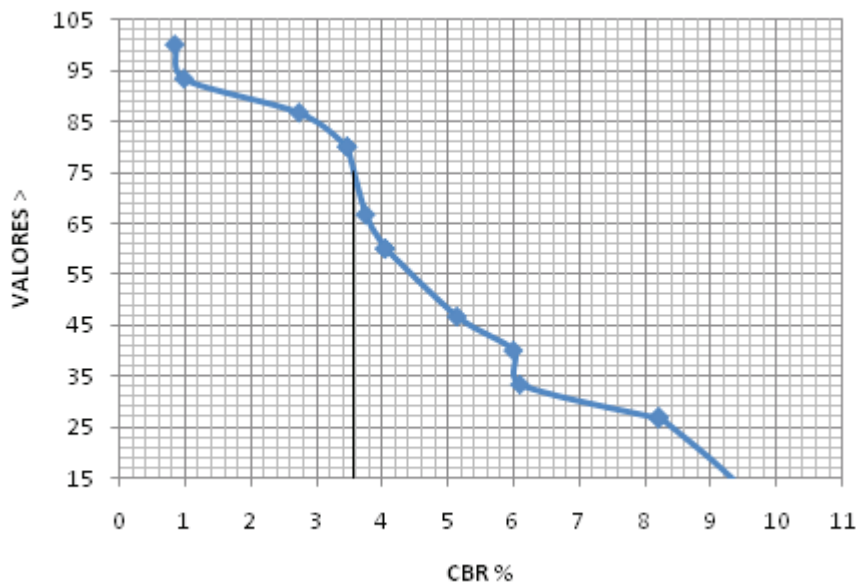
TABLA XV
ESTIMACIÓN CBR DE DISEÑO

No.	No. Apique	CBR %	valores ≥	% valores ≥
1	2	0,84	15	100
2	2	0,98	14	93
3	5	2,73	13	87
4	2	3,46	12	80
5	3	3,46		80
6	5	3,74	10	67
7	1	4,04	9	60
8	5	4,04		60
9	1	5,13	7	47
10	1	5,99	6	40
11	2	6,09	5	33
12	3	8,20	4	27
13	3	8,20		27
14	3	9,42	2	13
15	5	9,47	1	7
Sumatoria		75,79		
CBR promedio		5,0		

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

FIGURA 3.

SELECCIÓN CBR – CRITERIO INSTITUTO DEL ASFALTO



Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

TABLA XVI
CBR UNIDAD DE DISEÑO 2

Método	CBR diseño
Instituto del Asfalto	3,6
Media	5,0
Promedio	4,3

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Diseño de Pavimento Flexible unidad de diseño 1

1) Parámetros de diseño.

Se establecieron de acuerdo a la metodología de bajos volúmenes de tránsito. En primer lugar se adoptó una confiabilidad del 70% apropiada para una vía de bajos volúmenes de tránsito. Seguidamente, se halló la serviciabilidad al comienzo de la operación de la vía, que para el caso correspondería a (PSI) de 4,2 y el índice de servicio final, que correspondería a 2,0. De igual forma, se tuvo en cuenta el módulo resiliente de la subrasante que corresponde a 410 Kg/cm² y las especificaciones técnicas y los coeficientes estructurales recomendados para la subbase granular, la base granular y el concreto asfáltico y se adopta un valor de coeficiente de drenaje de 1, suponiendo que las condiciones de drenaje son buenas a aceptables.

2) Modelo estructural recomendado.

De acuerdo con las condiciones particulares de este proyecto, se tuvieron en cuenta 2 alternativas de diseño:

a) Alternativa 1

Se planteó una estructura conformada por una carpeta asfáltica de 10 cm., una base granular de 20 cm., y una subbase granular de 35 cm.

b) Alternativa 2

Se planteó una estructura conformada por una carpeta asfáltica de 7.5 cm.,

una base estabilizada con emulsión tipo I de 10 cm., una base estabilizada con emulsión tipo II y una subbase granular de 35 cm. de espesor.

3) Análisis de sensibilidad del modelo.

Este estudio permitió determinar si el modelo estructural recomendado cumple con los criterios de fatiga, ahuellamiento y deformación que se pueden presentar en la estructura. Para tal fin, se establecieron los valores admisibles que debe soportar la estructura. El programa de cálculo Cedap permitió el cálculo de estos valores, los cuales se pueden verificar a continuación:

- Deformaciones- Shell

Deformación de Tracción= 1,971E-0.4 strain

Deformación Vertical= 5,77E-0.4 strain

- Esfuerzo Vertical

Dormon-Kerthoven= 5,345E-0.1Kg/cm²

CRR de Bélgica=1,943E-0.1 Kg/cm²

Teniendo los valores admisibles para cada uno de los parámetros analizados, se ingresaron las características al programa de cálculo Depav, y se determinaron los valores de servicio para la estructura dada. Se ingresó la información de las variables del tránsito y las características de los materiales que conforman la estructura en el programa Depav y se arrojaron los resultados producto del análisis.

Con los resultados obtenidos en el programa Depav y los valores de servicio de la estructura recomendada, se realizó el análisis de sensibilidad para verificar que los valores de los esfuerzos, deformaciones y ahuellamiento de la estructura no superaran los admisibles por las condiciones de tránsito del proyecto.

La tabla XVII muestra la comparación realizada entre los valores admisibles y de servicio, los resultados del porcentaje de reserva demuestran que el modelo cumple.

TABLA XVII
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO

Capa	Parámetro	Modelo	Valores de servicio	Valores admisibles	% Consumo	% Reserva
Carpeta Asfáltica	Deformación Radial	Shell	0,000187	0,000197	94,88	5,12
Subrasante	Deformación Vertical	Shell	0,000352	0,000578	60,92	39,08
Subrasante	Esfuerzo Vertical	Dormon-Kerhover	0,16009	0,53450	29,95	70,05
		CRR Bélgica		0,19430	82,39	17,61
Modelo estructura	Deflexión	Huang	0,5703	0,7917	72,03	27,97

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

Luego de la modelación y la comparación de los resultados obtenidos de los valores de servicio y los admisibles, el modelo estructural definitivo para la unidad de diseño 1, se muestra en la tabla XVIII.

TABLA XVIII
CARACTERÍSTICAS MODELO ESTRUCTURAL DEFINITIVO UNIDAD DE DISEÑO 1

Capa de Rodadura: 10 cm. de concreto asfáltico tipo MDC-2
Base Granular: 20 cm TIPO BG-1 (INV 330) compactado al 100% del ensayo de proctor modificado CBR>80%
Subbase Granular: 30 cm tipo SBG-1; compactado al 95% de la prueba proctor modificado para CBR>25%
Subrasante: Arcilla de plasticidad media a alta; CBR= 4.1

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

B. Diseño de Pavimento Articulado:

- 1) *Capacidad portante de la subrasante.*
El valor de CBR de la subrasante en la zona donde se realizará el proyecto es de

4,3%, con un módulo resiliente de 430Kg/cm².

2) *Tránsito de diseño.*

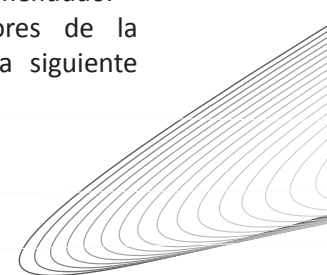
Las variables que se tuvieron en cuenta para determinar el modelo estructural del pavimento adoquinado fueron: el período de diseño que correspondió a 20 años, el tránsito promedio diario TPD de 210 Veh/día. El factor de distribución por sentido y por carril que correspondería para el primero al 50% y para el segundo a 1. Se utilizó también el porcentaje de vehículos pesados que corresponde a la suma de buses y camiones y es de 33% y el factor camión global que es de 1,90. Con todos los parámetros anteriores se procedió a realizar el cálculo del tránsito de diseño (NTD_{80kN}).

$$NTD_{80kN} = TPDo * \%Vc * Fc * Fd * Fca * FA$$

$$NTD_{80kN} = 210 * 0,33 * 1,90 * 0,50 * 1,0 * 1,21 = 79,66 \text{ ejes diarios simples de } 80kN \text{ que se espera circulen por el carril de diseño durante el período de diseño.}$$

3) *Modelo estructural recomendado.*

El cálculo de los espesores de la estructura se definió de la siguiente manera:



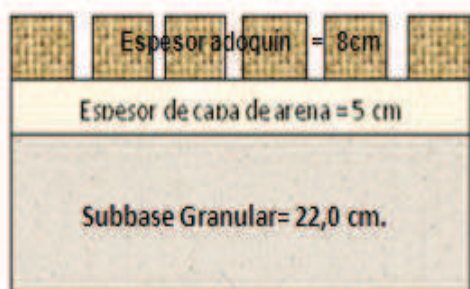
- ✓ Adoquín: se escogen adoquines de 8 cm. de altura
- ✓ Capa de arena: se adopta un espesor de 5 cm. de la capa de arena
- ✓ Cálculo del espesor de la capa de subbase granular: Reemplazando los valores de los parámetros de diseño en la siguiente expresión:

$$E_{Sb} = \left[\left(\frac{233.4 + 100 * \log NTD}{CBR^{0.4}} \right) - 160 \right] * FE$$

$$E_{Sb} = \left[\left(\frac{233.4 + 100 * \log 208,4}{4,10^{0.4}} \right) - 160 \right] * 2,0 = 209,2mm = 21cms$$

Con base a lo anterior, el modelo diseñado para el pavimento articulado de la zona de parqueo de la Unidad de Diseño 1 es el siguiente.

FIGURA 5
MODELO ESTRUCTURAL PAVIMENTO ARTICULADO



Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

A. Diseño de Pavimento Flexible unidad de Diseño 2:

1) Parámetros de diseño.

Se establecieron de acuerdo a la metodología de bajos volúmenes de tránsito. En primer lugar se adoptó una confiabilidad del 70% apropiada para una vía de bajos volúmenes de tránsito. Seguidamente, se halló la serviciabilidad al comienzo de la operación de la vía, que para el caso correspondería a (PSI) de 4,2 y el índice de servicio final, que

correspondería a 2,0. De igual forma, se tuvieron en cuenta el módulo resiliente de la subrasante que corresponde a 430 Kg/cm², las especificaciones técnicas y los coeficientes estructurales recomendados para el mejoramiento de la sub rasante, se sugirió aprovechar un espesor de 20 cm. del afirmado existente, al igual que para la subbase granular, la base granular y el concreto asfáltico y finalmente, se adoptó un valor de coeficiente de drenaje de 1, suponiendo que las condiciones de drenaje son buenas a aceptables.

2) Modelo estructural recomendado.

Determinación de la carta de diseño. Con las condiciones de la unidad de diseño, la carta Invías corresponde a la No. 1 – Región 1(R1) – Fría seca y Fría semihumeda, que definen modelos con el código S1 y T1, y dió como resultado la siguiente alternativa de estructura de pavimentos: carpeta asfáltica de 10 cm., base granular de 20 cm., subbase granular de 25 cm.

3) Análisis de sensibilidad del modelo.

Este estudio permite determinar si el modelo estructural recomendado cumple con los criterios de fatiga, ahuellamiento y deformación que se pueden presentar en la estructura, para tal fin, se establecen los valores admisibles que debe soportar la estructura, el programa de cálculo Cedap permite el cálculo de estos

valores, los cuales se pueden verificar a continuación:

- Deformaciones- Shell

Deformación de Tracción= $2,368E-0.4$ strain
Deformación Vertical= $7,265E-0.4$ strain

- Esfuerzo Vertical

Dormon-Kerthoven= $5,913E-0.1$ Kg/cm²
CRR de Bélgica= $2,538E-0.1$ Kg/cm²

Teniendo los valores admisibles para cada uno de los parámetros analizados, se ingresaron las características al programa de cálculo Depav, y se determinaron los valores de servicio para la estructura dada. Se ingresó la información de las variables del tránsito y las características de los materiales que conforman la estructura en el programa Depav y se arrojaron los resultados producto del análisis.

Con los resultados obtenidos en el programa Depav y los valores de servicio de la estructura recomendada, se realizó el análisis de sensibilidad para verificar que los valores de los esfuerzos, deformaciones y ahuellamiento de la estructura no superaran los admisibles por las condiciones de tránsito del proyecto.

La tabla XIX muestra la comparación realizada entre los valores admisibles y de servicio, los resultados del porcentaje de reserva demuestran que el modelo cumple.

Es importante decir que esta unidad de diseño, al contrario de la unidad 1, posee un material del afirmado que puede ser utilizado como parte del modelo estructural, dicho afirmado posee un ancho variable a lo largo de los tramos 1 y 2 entre 0,20 y 0,50 cms., por tal razón es conveniente incluir un espesor de este material de 20 cms.

TABLA XIX

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO UNIDAD DE DISEÑO 2

Capa	Parámetro	Modelo	Valores de servicio	Valores admisibles	% consumo	% reserva
Carpeta Asfáltica	Deformación Radial	Shell	0,000213	0,000237	89,87	10,13
Subrasante	Deformación vertical	Shell	0,000413	0,000726	56,89	43,11
Subrasante	Esfuerzo Vertical	Dormon-Kerthoven	0,1907	0,591300	32,25	67,75
		CRR Belgica		0,253800	75,14	24,86
Modelo estructura	Deflexión	Huang	0,6424	0,989800	64,90	35,10

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

Es importante decir que esta unidad de diseño, al contrario de la unidad 1, posee un material del afirmado que puede ser utilizado como parte del modelo estructural, dicho afirmado posee un ancho variable a lo largo de los tramos 1 y 2 entre 0,20 y 0,50cms, por tal razón es conveniente incluir un espesor de este material de 20cms.

El resultado de la modelación y de la verificación de sensibilidad del modelo da como resultado la estructura para la unidad de diseño 2.

TABLA XX
CARACTERÍSTICAS MODELO ESTRUCTURAL DEFINITIVO

Capa de Rodadura: 8,0 cm. de concreto asfáltico tipo MDC-2
Base Granular: 15cms TIPO BG-1 (INV 330) compactado al 100% del ensayo de proctor modificado CBR >80%
Subbase Granular: 15 cm. tipo SBG-1; compactado al 95% de la prueba proctor modificado para CBR >25%
Afirmado existente: 20 cms.
Subrasante: Arcilla de plasticidad media a alta; CBR= 4.3

Fuente. Autoras: Johana Bohórquez, Yamile Camacho, Mayo de 2011.

V. CONCLUSIONES

Una vez hecho el análisis de los ensayos de laboratorio ejecutados al material proveniente del sitio del proyecto se definieron las características del material encontrado. Se halló en la vía existente una capa de material granular de préstamo de mejores condiciones que la sub rasante. Este presenta propiedades de gradación gruesa, de plasticidad baja, con porcentaje expansivo bajo y con espesores que varían entre 10 y 50 cm. De igual forma, se identificó el material del Suelo Natural (Sub-rasante) que se encontró por debajo de los 50 cm., material

de gradación fina predominantemente, con porcentajes que pasan la malla 200 superiores al 60%; de plasticidad media a alta.

Una vez observadas las características de tránsito existente en el denominado centro poblado y el tránsito de las vías que conducen hacia el monumento histórico y hacia el colegio Panamericano, se identificó que al centro poblado allegan muchos más visitantes y vehículos. Por lo cual, se hizo necesario realizar conteos vehiculares en cada una de las vías mencionadas. Estos arrojaron los siguientes resultados: para el centro poblado se estableció que el tránsito promedio diario es de 261 vehículos y para los demás tramos de vía se estableció un tránsito promedio diario de 158 vehículos.

Con los valores obtenidos en los aforos vehiculares se procedió a calcular la categorización por rango del tránsito que para el caso del centro poblado corresponde a $1,75 \cdot 10^6$ ejes equivalentes en el carril de diseño durante el período de diseño y obedece a una designación de T2. Para los tramos restantes la categorización del rango del tránsito dio como resultado $0,7 \cdot 10^6$ ejes equivalentes en el carril de diseño durante el período de diseño y obedece a una designación de T1. Es decir, que el tránsito que se espera en las vías es mucho menor al que se espera en el centro poblado. Por esta razón, se establecieron dos unidades de diseño denominadas así: unidad de diseño 1 (centro poblado de Puente de Boyacá) y unidad de diseño 2 (vía que conduce hacia el monumento histórico y vía que conduce hacia el colegio Panamericano).

Teniendo en cuenta las variables de diseño, el tránsito, la capacidad de soporte de la subrasante, las condiciones climáticas del lugar y una vez realizado el análisis de sensibilidad del modelo se proyectó una estructura de pavimento para el centro poblado o unidad de diseño 1, la cual está conformada por capa de rodadura de 10 cm. base granular de 20 cm. y subbase granular

de 30 cm. Así mismo, se diseñó la estructura para la unidad de diseño 2. Dadas las buenas condiciones del material de afirmado existente y los resultados de la modelación de esta unidad de diseño permitieron utilizar este material como una de las capas que conforman el modelo estructural con 20 cm. de espesor, una subbase granular de 15 cm., base granular de 15 cm. y una capa de rodadura de 8 cm.

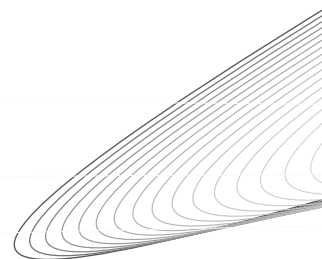
Una vez analizados los datos arrojados por el aforo vehicular realizado en el centro poblado de Puente Boyacá, se determinó que el porcentaje de vehículos pesados que llegan a este sitio corresponde a un 52%. Por lo cual, se estableció en el diseño de la estructura de este sector la utilización de pavimento articulado tipo pesado en las zonas de parqueo, el cual por su facilidad de instalación y mantenimiento se ajustaría perfectamente a las condiciones del lugar. La estructura para las zonas de estacionamiento quedó conformada de la siguiente manera: pavimento articulado en bloques de concreto tipo pesado de 8 cms. de espesor, sobre una capa de arena de 5 cms., la cual se asienta en una capa de material de subbase granular de 22 cms.

Para determinar los valores de servicio para cada una de las estructuras se utilizó el programa Depav, para lo cual se ingresó la información de las variables del tránsito y las características de los materiales que conforman la estructura en el programa. Se llevó a cabo el análisis de sensibilidad para verificar que los valores de los esfuerzos, deformaciones y ahuellamiento de cada estructura no superaran los admisibles por las condiciones de tránsito del proyecto.

Es importante resaltar que en un principio el alcance del proyecto comprendía el diseño del pavimento para el centro poblado y para la vía que conduce al monumento histórico. Sin embargo, con el fin de darle un mayor alcance a este y teniendo en cuenta las actividades de orden religioso y turístico que se desarrollan en el sector, se incluyó el diseño del tramo de vía que conduce al colegio Panamericano contiguo al Monumento a Pedro Pascasio Martínez, el diseño de las zonas de parqueadero, así como los andenes perimetrales.

Para el desarrollo de la estructura de pavimento fue necesario analizar de manera detallada tres factores que inciden en su vida útil. El primero de estos fue las propiedades del suelo de fundación, el segundo fue la composición y proyección del tránsito y el tercero fue la utilización de materiales con las condiciones de certificación necesarias. Esto permitió definir una estructura óptima y económica.

Es importante añadir que la implementación de la estructura propuesta para cada tramo, debe estar precedida por un análisis detallado de las condiciones de drenaje y de servicios públicos, acueductos, alcantarillados de aguas residuales y drenaje de aguas lluvias, los cuales deben optimizarse para suplir al total de la comunidad que lo requiera. Todo lo anterior, antes de la construcción del proyecto, evitando así a futuros gastos adicionales y afectación a la estructura construida. Adicionalmente y teniendo en cuenta las condiciones de servicio de la vía en estudio, se concluye que si se cuenta con un adecuado mantenimiento se garantizaría una estabilidad en la estructura de pavimento mayor a 20 años.



V. REFERENCIAS

Arenas, H.(2001). Teoría de los Pavimentos Parte 1. Popayán: facultad de Ingeniería Civil. Universidad del Cauca.

Benavides, C. (2005). Curso de gestión de pavimentos. Especialización en Infraestructura Vial. Tunja: Escuela de Posgrados en Ingeniería. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Cerda, H. (2005). Elementos de Investigación. Bogotá: Editorial Búho.

Higuera, C. (2010). Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Instituto Nacional de Vías. (2008). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Bogotá: Ministerio de Transporte. Subdirección de apoyo técnico.

Sánchez, F. (1992). Pavimentos Fundamentos teóricos guías para el diseño. Bogotá: Universidad la Gran Colombia.