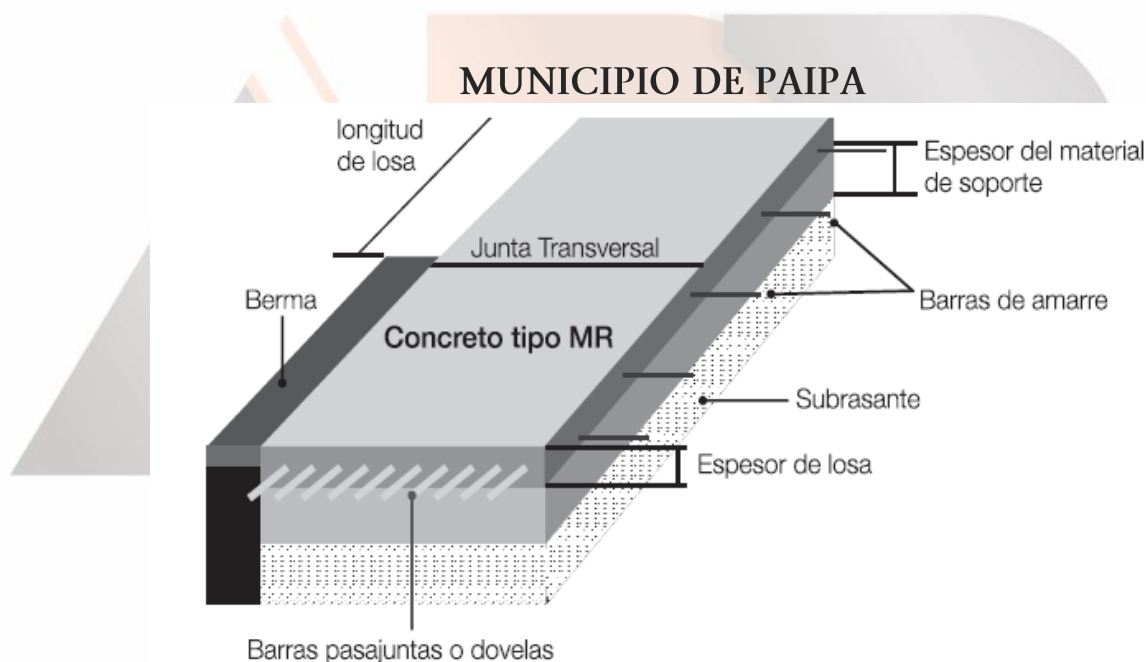


“MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ”

LOCALIZACIÓN: CALLE 26 ENTRE CARRERAS 23 Y 19 – CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE PAIPA – DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO No 195-04



NIT: 900446925-7

SEPTIEMBRE 2025



Contactos:

Tel: (038) 747 4417

Cel: 318 683 5421 / 312411 3265

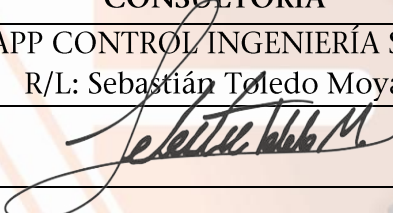
Calle 43 # 8a - 06 Tunja - Boyacá

www.appcontrolingenieria.com

LISTA DE CONTROL DE CAMBIOS

PROYECTO:	MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ
LOCALIZACIÓN:	CALLE 26 ENTRE CARRERAS 23 Y 19- CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE PAIPA – DEPARTAMENTO DE BOYACÁ
No INTERNO:	INF-DIPAV-195-04
ÁREA:	CONSULTORÍA

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

	CONSULTORÍA	INTERVENTOR
CONTRATISTA	APP CONTROL INGENIERÍA SAS R/L: Sebastián Toledo Moya	
FIRMA		
FECHA		

REVISIONES

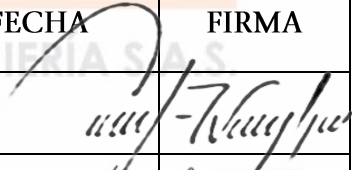
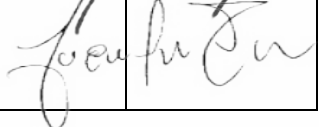
ESTADO	NOMBRE	FECHA	FIRMA
Vo.Bo. Contratista	Ing. Carlos Augusto Vargas Igua M.P. 25202-100599 CND		
Vo.Bo. Supervisión.			

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	9
1 GENERALIDADES	10
1.1 Descripción del proyecto	10
1.2 Ubicación	10
2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO - ALCANCE	13
2.1 Objetivo general	13
2.2 Alcance	13
3 PARÁMETROS DE DISEÑO	15
3.1 Periodo de diseño	15
3.2 Tránsito de diseño	15
3.3 Condiciones atmosféricas	16
3.4 Características de la subrasante	17
2.4.1 Módulo resiliente mejorado	18
3.5 Características de los materiales	18
3.6 Métodos de diseño	18
4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE	20
4.1 Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles	20
3.1.1 Restricciones de tiempo	20
3.1.2 Nivel de confiabilidad, (R)	20
3.1.3 Desviación Normal Estándar, (Zr)	20
3.1.4 Error normal combinado, So	20
3.1.5 Efectos ambientales	20
3.1.6 Criterios de comportamiento	20
3.1.7 Propiedades de los materiales	21
3.1.8 Coeficientes de capas	21

3.1.9	Características estructurales del pavimento	22
4.2	PLANTEAMIENTO DE LA REDUCCIÓN DE ESPESORES GRANULARES MEDIANTE EL REFUERZO DE LA ESTRUCTURA CON GEOMALLA BIAXIAL COEXTRUIDA	26
4.3	Análisis elástico multicapa	30
3.3.1	Cargas aplicadas	30
3.3.2	Criterios de diseños de estructuras de pavimentos flexibles – valores admisibles	30
5	DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO RÍGIDO	33
5.1	Método AASHTO para diseño de pavimentos rígidos	33
4.1.1	Parámetros de diseño	33
5.2	Cálculo de esfuerzos y deflexiones de la losa	39
4.2.1	Formulación para el chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa	40
4.2.2	Chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa	42
5.3	Dimensiones de la losa y elementos de transferencia de carga	43
4.3.1	Dimensiones de la losa	43
5.4	Diseño y construcción de las juntas	45
4.4.1	Tipos de juntas	45
4.4.2	Recomendaciones para el diseño de las juntas	47
4.4.3	Sellado de las juntas	48
4.4.4	Limpieza Previa	48
5.5	Modelo estructural del pavimento rígido	49
6	ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS	51
6.1	Subbase Granular INV E 320 – 22 - Base Granular INV E 330 –22	51
6.2	Capa asfáltica: Mezcla densa en caliente MDC – 19. INV E 450 - 22	55
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	60
8	LIMITACIONES	69
9	ANEXOS	70

Anexo 1. Tablas de proyección del tránsito de diseño	71
Anexo 2. Determinación de SN requeridos pavimentos flexibles	74
Anexo 3. Espesores propuestos estructuras de pavimentos flexibles método AASHTO-93	75
Anexo 4. Modelaciones BISAR 3.0 de la Shell	76
Anexo 5. Revisión mecanicista de estructuras de pavimentos flexibles	78
Anexo 6. Determinación módulo de reacción afectivo de la subrasante Kef	79
Anexo 7. Determinación del espesor de la losa, ecuación AASHTO pavimentos rígido	80
Anexo 8. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Esfuerzos)	81
Anexo 9. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Deflexiones)	82

LISTA DE ESQUEMAS

	Pág.
Esquema 1. Localización general del proyecto.	11
Esquema 2. Localización específica del proyecto	12
Esquema 3 Esquema y abscisas de intervención del proyecto	14
Esquema 4. Determinación del LCR	28
Esquema 5. Efecto del mecanismo de transferencia de carga.	36
Esquema 6. Tipos de juntas	46
Esquema 7. Recomendaciones construcción de juntas.	46
Esquema 8. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido	49
Esquema 9. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido	63
Esquema 10. Modelo estructural del pavimento flexible recomendado	65
Esquema 11. Modelo estructural del pavimento flexible reforzado con geomalla biaxial recomendado	66
Esquema 12. Estructura de pavimento rígido recomendada	66

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Coordenadas y abscisas de intervención del proyecto	14
Tabla 2. Tránsitos de diseño	16
Tabla 3. Resumen de los TPD establecidos para el proyecto	16
Tabla 4. Resumen de las características geomecánicas de los apiques realizados	17
Tabla 5. Valores de CBR del suelo natural o subrasante	17
Tabla 6. Sectorización unidades de diseño	18
Tabla 7. Módulos resilientes de la subrasante del tramo vial	21
Tabla 8. Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de las capas de base y Subbase granular	23
Tabla 9. Coeficientes de aporte estructural (ai), de drenaje (mi), módulos y relación de Poisson tomados	23
Tabla 10. Resumen SN calculados pavimentos flexibles	24
Tabla 11. Resumen alternativas analizadas método AASHTO	25
Tabla 12. Espesores de las capas de la estructura de pavimento convencional	26
Tabla 13. Espesores de las capas de la estructura de pavimento sustituyendo la subbase granular	27
Tabla 14. Comparación reducción de espesores mediante la inclusión de la geomalla biaxial	29
Tabla 15. Características de resistencia de la subrasante para el diseño de pavimento	34
Tabla 16. Valores iniciales y de diseño.	37
Tabla 17. Valores del coeficiente de drenaje, Cd	38
Tabla 18. Resumen SN calculados pavimentos rígidos	39
Tabla 19. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.	39
Tabla 20. Dimensiones máximas de la losa.	43

Tabla 21. Dimensiones de la losa según ancho de la calzada.	44
Tabla 22. Requisitos mínimos para las dovelas en las juntas.	44
Tabla 23. Recomendación para las barras de anclaje	45
Tabla 24. Requisitos de los agregados para subbases granulares INVÍAS 2022.	51
Tabla 25. Requisitos de los agregados para bases granulares INVÍAS 2022.	52
Tabla 26. Franja granulométrica subbase granular.	53
Tabla 27. Franja granulométrica base granular.	53
Tabla 28. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.	55
Tabla 29. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.	56
Tabla 30. Porción y requisitos del llenante mineral.	56
Tabla 31. Franja granulométrica recomendada mezcla densa en caliente.	57
Tabla 32. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.	58
Tabla 33. Características de la subrasante	60
Tabla 34. Características de diseño de la subrasante por unida de diseño	61
Tabla 35. Resumen alternativas analizadas pavimento flexible	62
Tabla 36. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.	63
Tabla 37. Evaluación económica de alternativas.	64

INTRODUCCIÓN

El diseño de estructura de pavimento se realiza para la ejecución del componente asociado al contrato número 195 de 2025 cuyo objeto es MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ, para un tramo de vía correspondiente a la **CALLE 26 ENTRE CARRERAS 23 Y 19** – casco urbano del municipio de Paipa – departamento de Boyacá.

El análisis para el diseño del pavimento, se realiza mediante el MÉTODO AASHTO-93 PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS. Cabe aclarar que la prioridad en la selección de todos los parámetros se hizo pensándose siempre en la forma de garantizar la comodidad, seguridad de los usuarios y en el factor económico en que se incurre al replantear y pavimentar una vía.

Con el fin de verificar la estructura flexible a diseñar, se realiza un análisis elástico multicapa donde se verifica las deformaciones admisibles en cada una de las capas de la estructura, utilizando el programa BISAR 3.0 de la Shell, para comparar los esfuerzos a los que estará sometido la estructura y los que está en capacidad de soportar. Para el pavimento rígido se realiza un análisis del tipo de juntas para el pavimento rígido, para la posterior verificación de los esfuerzos y deflexiones en diferentes posiciones de la losa calculada mediante la mecánica de pavimentos rígidos, asegurando de esta forma que las losas diseñadas están en la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tráfico de vehículos.

La variable geotécnica y de tránsito de diseño, se realizó basado en los estudios específicos desarrollados para la consultoría del proyecto.

El informe presenta detalladamente los resultados de la metodología, memorias de cálculo, conclusiones y recomendaciones que se deben tener en cuenta para el diseño y construcción del pavimento, desde el punto de vista técnico y económico.

1 GENERALIDADES

En este informe se consigna la información de diseño de estructura de pavimento a partir del análisis del componente geotécnico, de tránsito, variables climatológicas, ambientales y económicas para definir una combinación de espesores que apliquen al proyecto.

1.1 Descripción del proyecto

El proyecto consiste en implementar una estructura adecuada de pavimento, mediante la construcción, reforzamiento o reconstrucción de estructuras existentes en el corredor de la vía en estudio, con el fin de que se brinden mejores condiciones de paso de vehículos, garantizando la seguridad, accesibilidad para optimizar la movilidad de los usuarios que a diario transitan por el sector, con costos de operación bajos, siempre y cuando se garanticen actividades de mantenimiento rutinario y preventivo que prolonguen la vida útil de la estructura.

La formulación y estructuración de este proyecto surge como respuesta a la necesidad imperante de mejorar la infraestructura vial en la región. Esta vía, de vital importancia para la conectividad local, ha experimentado un deterioro progresivo que afecta la eficiencia del transporte, la seguridad vial y el desarrollo económico de la zona. La pavimentación de esta carretera no solo busca resolver problemas inmediatos, sino también sentar las bases para un crecimiento sostenible y una movilidad más fluida en la comunidad.

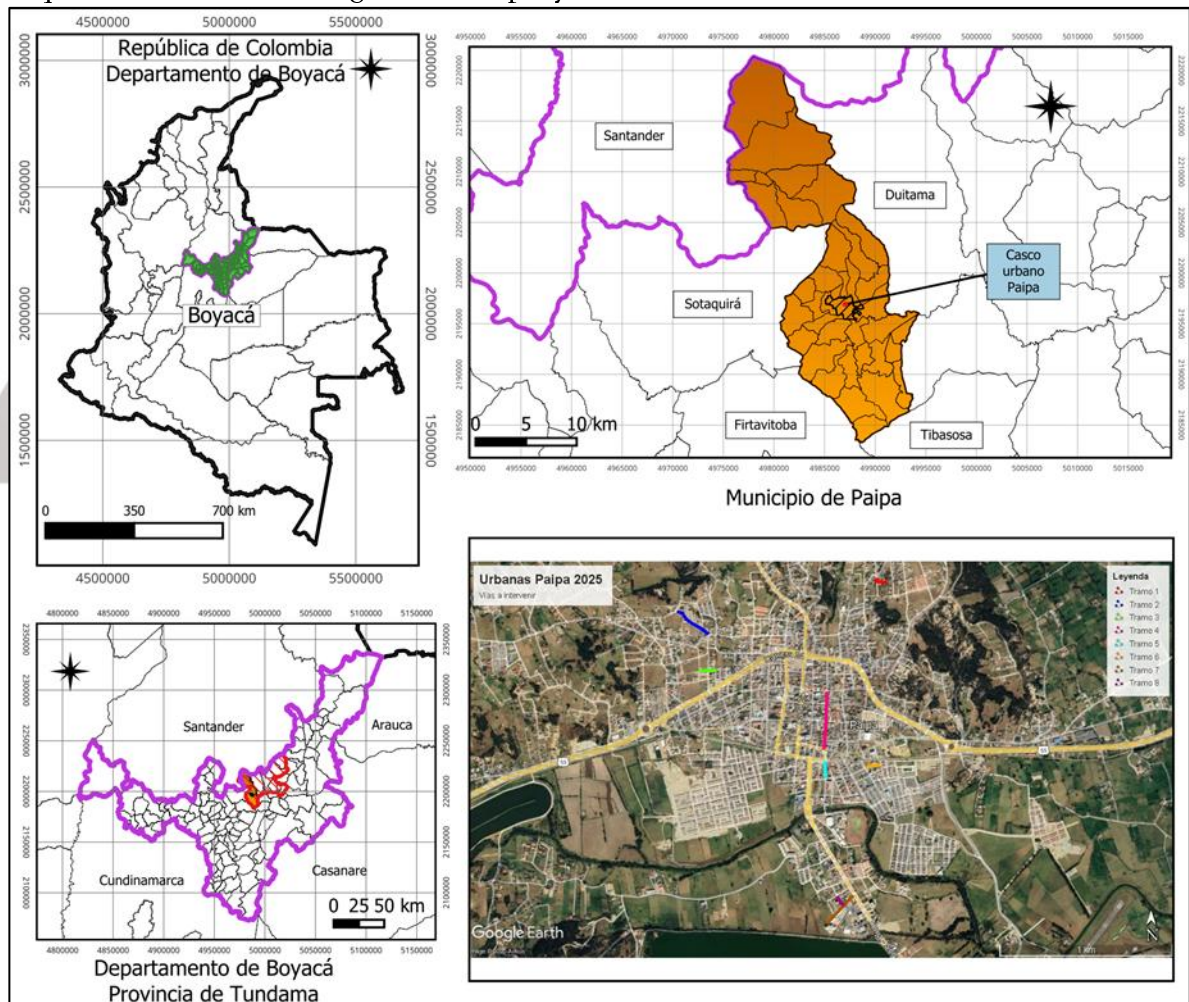
1.2 Ubicación

El sitio del proyecto se encuentra localizado en el departamento de Boyacá, en la provincia de Tundama, a una distancia de 41 Km de la ciudad de Tunja, y 15 Km de Duitama, en jurisdicción del municipio de Paipa del departamento de Boyacá.

El inicio del proyecto se encuentra en la intersección de la **CALLE 26 ENTRE CARRERAS 23 Y 19**.

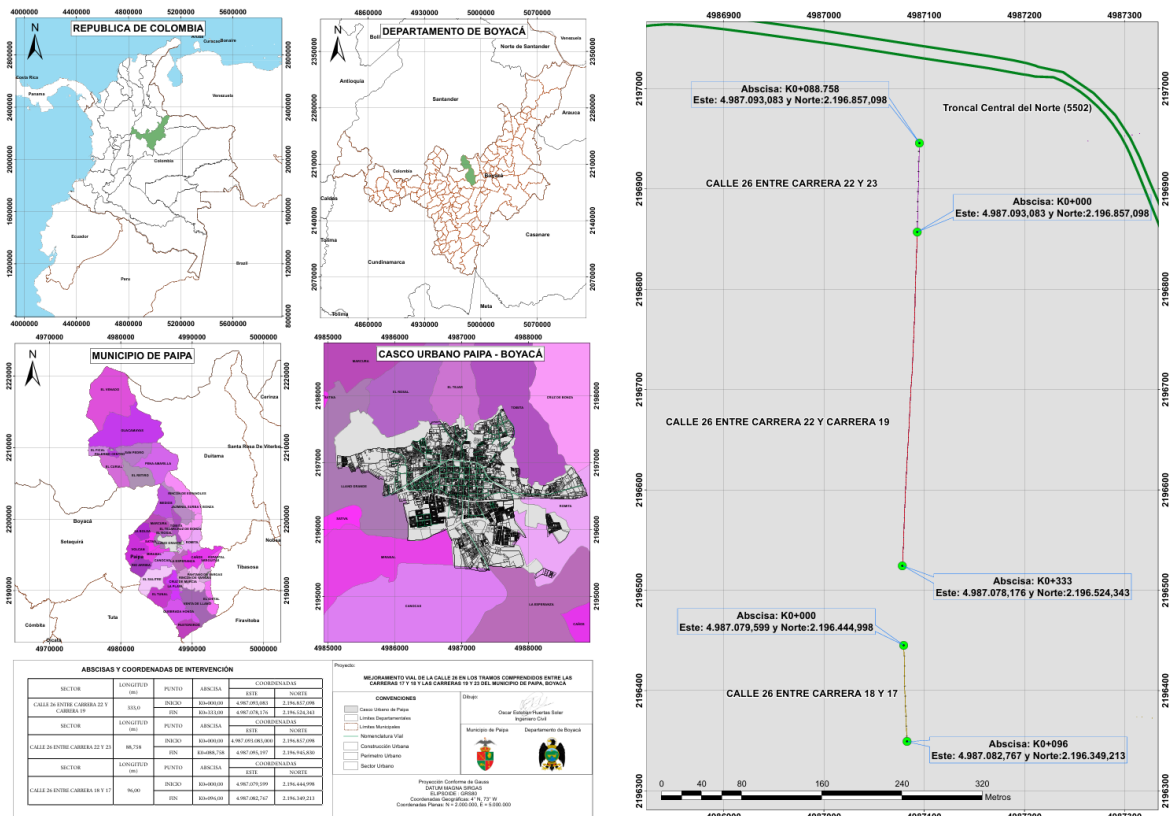
REGIÓN.	ANDINA
DEPARTAMENTO:	BOYACÁ
PROVINCIA:	Tundama
MUNICIPIO:	Paipa
TOPOGRAFÍA:	Plano - Ondulado
VÍAS:	Urbana
CLIMA:	14.3° C
ALTITUD:	991 m.s.n.m

Esquema 1. Localización general del proyecto.



Fuente: El estudio

Esquema 2. Localización específica del proyecto



Fuente: El estudio

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO - ALCANCE

A continuación, se presentan el objetivo general, objetivos específicos y alcance del presente informe.

2.1 Objetivo general

Determinar la configuración estructural del pavimento el proyecto “MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ – sector centro del casco urbano del municipio de Paipa – departamento de Boyacá.

Objetivos específicos

- Definir la configuración estructural del pavimento teniendo en cuenta las condiciones geométricas del proyecto, consideraciones de tránsito y exploración geotécnica.
- Calcular los espesores de diseño a partir de la metodología AASHTO-93 y posterior verificación mediante evaluación mecanicista.
- Presentar las respectivas conclusiones y recomendaciones.

2.2 Alcance

Determinar la configuración estructural para el tramo de vía en estudio, mediante las consideraciones de tránsito de diseño, condiciones de subrasante definidas en el estudio geotécnico del proyecto, condiciones ambientales, geométricas y particulares del tramo en estudio.

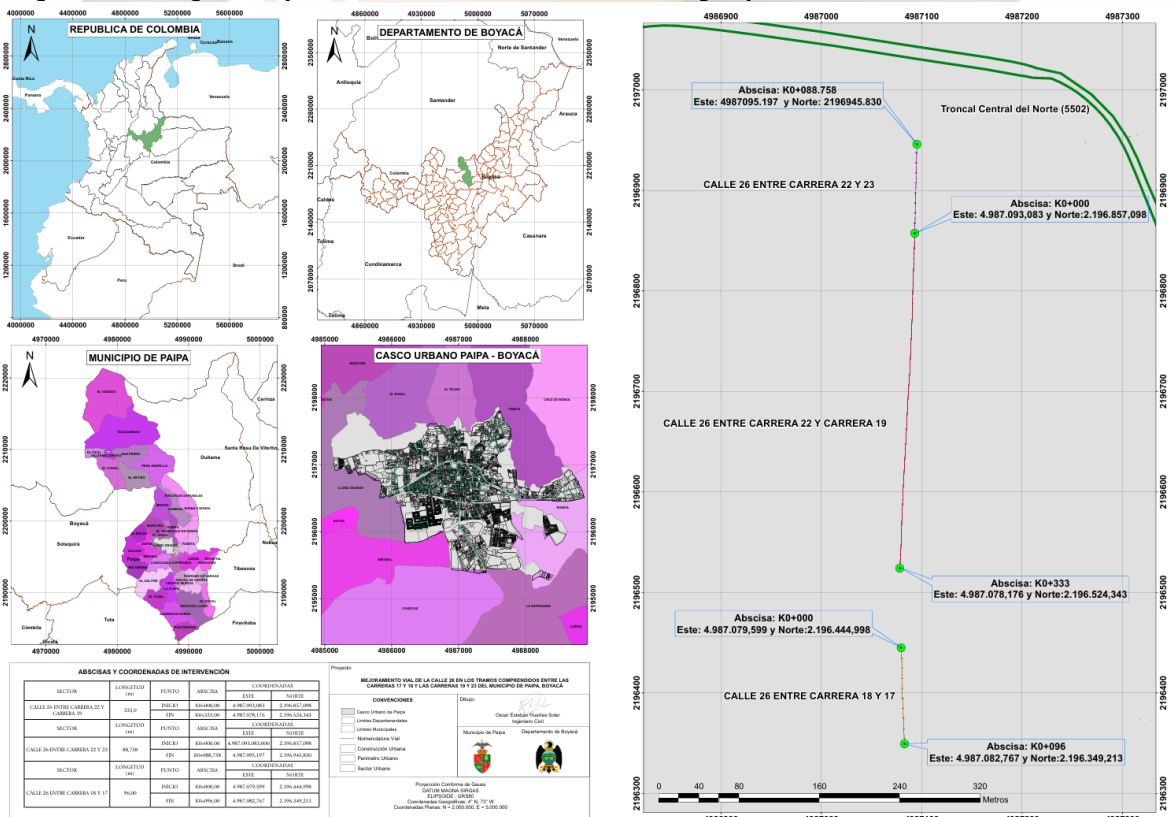
Para el caso del proyecto se tiene contemplado la intervención de la Calle 26 en los tramos comprendidos entre las Carreras 17 y 18 y las Carreras 19 y 23 del municipio de paipa, Boyacá, a continuación, se relaciona las coordenadas y las abscisas respectivas, un aspecto a tener en cuenta es que las abscisas que se relacionan en la tabla están de acuerdo con el diseño geométrico:

Tabla 1 Coordenadas y abscisas de intervención del proyecto

SECTOR	LONGITUD (m)	PUNTO	ABSCISA	COORDENADAS	
				ESTE	NORTE
CALLE 26 ENTRE CARRERA 22 Y CARRERA 19	333,0	INICIO	K0+000,00	4.987.093,083	2.196.857,098
		FIN	K0+333,00	4.987.078,176	2.196.524,343
CALLE 26 ENTRE CARRERA 22 Y 23	88,758	INICIO	K0+000,00	4.987.093,0830	2.196.857,098
		FIN	K0+088,758	4.987.095,1970	2.196.945,830
SECTOR	LONGITUD (m)	PUNTO	ABSCISA	COORDENADAS	
				ESTE	NORTE
CALLE 26 ENTRE CARRERA 18 Y 17	96,00	INICIO	K0+000,00	4.987.079,599	2.196.444,998
		FIN	K0+096,00	4.987.082,767	2.196.349,213

Fuente: El Estudio.

Esquema 3 Esquema y abscisas de intervención del proyecto



Fuente: El Estudio.

3 PARÁMETROS DE DISEÑO

El diseño estructural de pavimentos implica la consideración y análisis de factores como: Las características del suelo de subrasante, tipo, frecuencia y configuración de cargas esperadas, condiciones climáticas – ambientales y calidad de materiales, etc. los cuales se abordarán secuencialmente en el desarrollo del presente informe.

3.1 Periodo de diseño

La estructura del pavimento de la vía, tendrá un Periodo de diseño acorde al tipo de estructura a evaluar de acuerdo a las condiciones esperadas de tráfico; periodo en el cual no se requerirá ningún mantenimiento estructural y llegará a su serviciabilidad final.

Periodo de diseño pavimento flexible = 10 años

Periodo de diseño pavimento rígido = 20 años

3.2 Tránsito de diseño

La variable tránsito necesaria para determinar la estructura del pavimento, es el número de ejes equivalentes a 8,2 toneladas que circularán por el carril de diseño, durante el periodo de vida útil, el estudio de tránsito estableció una (1) unidades homogéneas de tránsito, las cuales presentan los siguientes valores recomendados resaltados en negrita, y pueden ser consultados en mayor detalle en el informe de estudio de tránsito. En el anexo 1 se presentan las tablas resúmenes de las proyecciones del tránsito de diseño.

Tabla 2. Tránsitos de diseño

Periodo de diseño (Años)	Pavimento flexible	Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño		
		Pavimento rígido		
		D=175 mm	D=200 mm	D=225 mm
5	523 171	451 191	455 119	456 710
10	1 191 461	1 027 537	1 036 482	1 040 105
15	2 043 693	1 762 516	1 777 860	1 784 076
20	3 132 554	2 701 568	2 725 088	2 734 613

Fuente: Elaboración propia – Estudio de tránsito.

La siguiente tabla presenta los tránsitos promedios diarios “TPD” establecidos en el componente del estudio de tránsito.

Tabla 3. Resumen de los TPD establecidos para el proyecto

TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL								
TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SOBRE LA VÍA	TIPO DE VEHÍCULO							TOTAL
	AUTOS	BUSES	C2- P	C2- G	C3 - C4	C5	>C5	
								
	TPDS	1578	193	39	25	4	0	
% TIPO DE VEHÍCULO	85.8%	10.5%	2.1%	1.4%	0.2%	0.0%	0.0%	1839
								100%

Fuente: Elaboración propia a partir del informe del componente de tránsito.

3.3 Condiciones atmosféricas¹

La temperatura y la precipitación, son variables que influyen de manera significativa en la durabilidad de los materiales que conforman las capas del pavimento y se definieron de acuerdo a la información disponible en el municipio.

Temperatura media anual ponderada (w-MAAT°C) w-MAAT = 14.3 °C

Precipitación media anual (mm) P (mm) = 991

De acuerdo al INVÍAS, según las condiciones climatológicas de la zona del proyecto, se debe trabajar con resultados de CBR en condición sumergida.

¹ Estación agrometeorológica Tunguavita - IDEAM

3.4 Características de la subrasante

De acuerdo con las condiciones de la vía y el estudio de suelos se realizaron 1 apiques para la caracterización de las capas existentes y la toma de CBR de la subrasante, determinando²:

A continuación, se presenta la tabla resumen de los valores obtenidos.

Tabla 4. Resumen de las características geomecánicas de los apiques realizados

SECTOR	DIRECCION	APIQUE	CBR ANTES DE INMERSION %	CBR DESPUES DE INMERSION%	AASTHO IG %	PROP. INDICE %	PDC %	EXPANSION %	ESPESOR MATERIAL GRANULAR
4	Calle 26 entre carrera 22 y carrera 19	4	4.5	3.1	8.5	10.5	5.0	0.23	0.35
		5	5.1	3.2	7.5	8.9	9.1	0.26	0.35
		PROMEDIO	4.8	3.2	8.0	9.7	7.1	0.2	0.4

Fuente: Tabla 4 del informe de geotécnico de suelos.

En el apique realizado, no se identificaron niveles freáticos³, y según el grado de plasticidad, límite líquido y los niveles de humedad encontrados se concluye que los suelos existentes tienen potencial de expansión bajo.⁴

A continuación, se presenta la tabla resumen de los valores de CBR obtenidos en la exploración geotécnica, reportando los valores promedio de la exploración.

Tabla 5. Valores de CBR del suelo natural o subrasante

Unidad de diseño	1	
Abscisa inicio	K0+000	K0+000
Abscisa fin	K0+333	K0+088.758
Condición	Natural	Sumergido
CBR (%)	4.80	3.10
Mr (Kg/cm²)	480	363
Mr (lb(pulg²))	6857	5271
Mr (N/m²)	4.80E+07	3.63E+07
Mr (MPa)	48	36.3
K (Kg/cm³)	3.76	2.78
K (lb/pulg³)	135.8	100.4
K (MPa/m)	37.6	27.8

Fuente: Elaboración propia a partir de Tabla 4.

² Datos estudio geotécnico realizado por APP control Ingeniería S.A.S.

³ Ver numera 2.1.1 del informe geotécnico de suelos.

⁴ Ver numeral 2.1.2 del informe geotécnico de suelos.

La sectorización propuesta para unidades geotécnicas obedece a condiciones de resistencia de la subrasante, para este caso y según las características climatológicas de la zona del proyecto, se toma como condición de diseño los valores correspondientes a CBR's en condición sumergida.

Tabla 6. Sectorización unidades de diseño

Unidad de diseño	1	
Abscisa inicio	K0+000	K0+000
Abscisa fin	K0+333	K0+088.758
CBR (%)	3.10	
Mr (Kg/cm ²)	363	
Mr (lb(pulg ²))	5271	
Mr (N/m ²)	3.63E+07	
Mr (MPa)	36.3	
K (Kg/cm ³)	2.78	
K (lb/pulg ³)	100.4	
K (MPa/m)	27.8	

Fuente: Elaboración propia

2.4.1 Módulo resiliente mejorado

Para este caso, y considerando que únicamente se dispone de un (1) apique para la caracterización de la subrasante y la estructura del pavimento existente, el espesor del material granular hallado en la exploración (hasta 0,35 m) se tomará en caso de lograr aprovecharse como capa estructural como un factor de seguridad en el comportamiento estructural del pavimento.

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

3.5 Características de los materiales

Según los niveles de tránsito esperados, los materiales que conformarán la estructura de pavimento, deberán cumplir los requisitos exigidos para materiales con nivel de tránsito tipo NT-2 o clase B, establecidos según las especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS 2022, las cuales pueden ser consultados en la página WEB del INVÍAS.

3.6 Métodos de diseño

Los procedimientos para el diseño estructural del pavimento presentado en este estudio, son aplicables para este tipo de vías. Con el fin de encontrar la solución más favorable para el proyecto, se realiza un análisis detallado por diferentes métodos de diseño, que nos permita concluir con la estructura del

pavimento que debe alcanzar el nivel de servicio deseado. A continuación, se presenta los métodos de diseño desarrollados en el presente estudio:

- Con el fin de encontrar la solución más favorable para el proyecto, se realiza un análisis detallado por la metodología descrita en la Guía AASHTO 93 para el diseño de estructuras de pavimentos, todo esto verificando los criterios de diseño por la metodología racional o mecanicista.



4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Después de capturar toda la información referente a las condiciones climáticas, niveles de tránsito, condiciones de resistencia del suelo de la subrasante y características de los materiales definidos para cada una de las capas, se diseña la estructura del pavimento del tramo de vía en estudio.

4.1 Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles

En este método se consideran los siguientes parámetros y variables de diseño

3.1.1 Restricciones de tiempo

Se desarrolla el diseño del pavimento para un periodo de diseño: $N = 10$ años.

Tránsito: N' en 10 años = 1 191 461 Ejes de 8,2 ton cd/pd

3.1.2 Nivel de confiabilidad, (R)

Por las características del proyecto, se considera un nivel de Confiabilidad del 85%.

3.1.3 Desviación Normal Estándar, (Z_r)

Para un nivel de confiabilidad del 85%, se obtiene una desviación normal estándar de -1,037.

3.1.4 Error normal combinado, S_o

Para un pavimento flexible nuevo, se toma un error normal combinado de 0.45.

3.1.5 Efectos ambientales

Temperatura media anual ponderada del aire $T_{MAP} = 14.3$ °C.

Precipitación media anual (mm) = 991

3.1.6 Criterios de comportamiento

Serviciabilidad: Para encontrar el número estructural del pavimento en este método se tuvo en cuenta niveles de serviciabilidad recomendadas por la AASHTO-93.

Serviciabilidad Inicial $P_o = 4,2$ (Pavimentos flexibles)

Serviciabilidad Final $P_t = 2,0$ (Carreteras)

Delta PSI = $P_o - P_t = 4,2 - 2,0 = 2,2$

3.1.7 Propiedades de los materiales

- Módulo resiliente de subrasante:

Según el estudio geotécnico de suelos los CBR's de la subrasante son menores al 10%, por lo tanto M_r de la subrasante se determinan con las siguientes expresiones, las cuales son ingresadas según las unidades requeridas por la formula a emplear:

$$\begin{aligned} M_r &= 17.6 \times \text{CBR}^{0.64}(\%); && \text{en MPa.} \\ M_r &= 2555 \times \text{CBR}^{0.64}(\%); && \text{en lb/pulg}^2. \\ M_r &= M_r (\text{MPa}) \times 10; && \text{en Kg/cm}^2. \end{aligned}$$

Tabla 7. Módulos resilientes de la subrasante del tramo vial

Unidad de diseño	1	
Abscisa inicio	K0+000	K0+000
Abscisa fin	K0+333	K0+088.758
CBR (%)	3.10	
M_r (Kg/cm ²)	363	
M_r (lb(pulg ²))	5271	
M_r (N/m ²)	3.63E+07	
M_r (MPa)	36.3	
K (Kg/cm ³)	2.78	
K (lb/pulg ³)	100.4	
K (MPa/m)	27.8	

Fuente: Elaboración propia

3.1.8 Coeficientes de capas

Concreto Asfáltico: Ante la falta de más datos para determinar el módulo de la carpeta asfáltica, y tomando la características climatológicas del área, para un clima frio seco con temperatura media anual ponderada del aire, TMAP de 13°C, el manual de diseño de pavimentos asfalticos para vías con medios y

altos volúmenes de tránsito del INVÍAS en la tabla 8.1 recomienda coeficientes estructurales entre 0.37-0.44, para este caso se toma una coeficiente estructural de 0.37, y usando la ecuación de la AASHTO-93 se despeja el módulo dinámico de esta capa, para su respectiva modelación:

$$a_1 = 0,0052E^{0.555}, E_1, \text{ MPa.}$$

$$\text{Con } a_1 = 0,37 \quad \text{entonces } E_1 = 2174 \text{ MPa} \approx 2170 \text{ MPa}$$

Base Granular: Según la especificación del INVÍAS para materiales de carreteras y con base en el nivel de tránsito determinado, el aporte estructural de esta capa se establece para un material con CBR $\geq 80\%$ según el nivel de tránsito.

$$a_2 = 0,032 \text{ CBR}^{0.32}$$

$$a_2 = 0,13 \text{ para nivel de tránsito 2 con CBR} \geq 80\%$$

$$a_2 = 0,249 \log (E_{bg}) - 0,977, E_{bg} \text{ Módulo del material de base granular, lb/pulg}^2.$$

$$\text{Con } a_2 = 0,13 \quad \text{entonces } E_2 = 27911 \text{ lb/pulg}^2 = 192 \text{ MPa}$$

Sub-base Granular: Calculado para un material con CBR $\geq 30\%$, se obtiene el valor correspondiente del coeficiente estructural a_3 .

$$a_3 = 0,058 \text{ CBR}^{0.19}$$

$$a_3 = 0,11 \text{ para nivel de tránsito 2 con CBR} \geq 30\%$$

$$a_3 = 0,227 \log (E_{sbg}) - 0,839, E_{sbg} \text{ Módulo del material de subbase granular, lb/pulg}^2.$$

$$\text{Con } a_3 = 0,11 \quad \text{entonces } E_3 = 15157 \text{ lb/pulg}^2 = 104 \text{ MPa}$$

3.1.9 Características estructurales del pavimento

De acuerdo con la calidad del drenaje y el tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación, y con ayuda de la Tabla 8 se determina los valores de m_i para cada una de las capas de la estructura del pavimento.

Tabla 8. Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de las capas de base y Subbase granular

Calidad de Drenaje	% de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación			
	<1%	1 - 5%	5 - 25%	>25%
Excelente	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
Buena	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	0,8 – 0,60	0,60
Muy pobre	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: AASHTO guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II 25.

Para este informe, y según los niveles de tránsito, el consultor considera prudente, utilizar los valores de diseño para las diferentes capas de la estructura de pavimento, resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 9. Coeficientes de aporte estructural (ai), de drenaje (mi), módulos y relación de Poisson tomados

Material	ai	mi	E (MPa)	Relación de Poisson
Concreto Asfáltico	0.35		2170	0.35
Base granular	0.13	1.00	192	0.40
Subbase granular	0.11	0.80	104	0.40
Subrasante			36.3	0.45

Fuente: Elaboración propia.

Diseño de espesores

Número estructural del pavimento SN: se emplea la fórmula básica de la AASHTO como se observa a continuación:

Ecuación 1. Ecuación AASHTO pavimentos flexibles

$$\text{Log}(N_{8.2\text{ton}}) = Z_r \times S_o + 9.36 \times \text{Log}(SN_f + 1) - 0.20 + \left[\frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta IPS}{4.2 - 1.5}\right)}{\left(0.40 + \left(\frac{1094}{(SN_f + 1)^{5.19}}\right)\right)} \right] - 2.32 \times \text{Log}(Mr) - 8.07$$

Dónde:

$N_{8.2\text{ton}}$ = Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño

Z_r = Desviación normal estándar

S_o = Error normal combinado de la previsión del tránsito y del comportamiento.

Δ IPS = Nivel de Serviciabilidad

M_r = Módulo resiliente de la subrasante, en lb/pulg²

S_N = Número estructural futuro, pulgadas.

Para el análisis por el método de la AASHTO-93, se utiliza la interfaz para la solución del método, compilada por el Ing. MSc. Luis Ricardo Vásquez y presentadas en el anexo 2, a continuación se presenta el resumen de los S_N requerido calculados.

Tabla 10. Resumen S_N calculados pavimentos flexibles

Nivel de confianza, R	85%
Desviación estándar. S_o	0.45
Nivel de serviciabilidad inicial, P_o	4.2
Nivel de serviciabilidad final, P_t	2.0
Tránsito de diseño, Ejes Equivalentes a 8.2 ton cd/pd	1 191 461
CBR subrasante saturada, %	3.10
MR de diseño mejorado, Lb/pulg ²	5271
S_N Requerido	3.71

Fuente: Elaboración propia.

Determinado el S_N requerido del pavimento, con la expresión que relaciona el número estructural de cada capa como función de los coeficientes de aporte, drenaje y espesores⁵, mediante iteraciones a partir de los espesores mínimos establecidos por la metodología, se halla la configuración de la estructura de espesores convenientemente combinados, que aporten un numero estructural mayor o igual al solicitado por el tránsito.

$$S_N = a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot h_2 + a_3 \cdot m_3 \cdot h_3 + a_4 \cdot m_4 \cdot h_4 + \dots + a_n \cdot m_n \cdot h_n.$$

⁵AASHTO guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II-22

a_i : coeficientes de capa
 m_i : calidad del drenaje
 h_i : espesor de la capa

En el anexo 3 se presentan la combinación de espesores que satisfacen el criterio de diseño de la AASHTO-93 ($SN_{tránsito} \leq SN_{estructura}$), las cuales corresponden a la siguiente configuración estructural.

A continuación, se presentan el resumen de las alternativas propuestas por la metodología AASHTO - 93 para el proyecto, las cuales se proyectan para un periodo de diseño de 10 años.

Tabla 11. Resumen alternativas analizadas método AASHTO

	ai	mi	E (MPa)	μ
Carpeta asfáltica	0.37	-	2170	0.35
Base granular	0.13	1.0	192	0.40
Subbase granular	0.11	0.80	104	0.40
Subrasante			36.3	0.45

Nivel de confianza, R	85%			
Desviación estándar. So	0.45			
Nivel de serviciabilidad inicial, P ₀	4.2			
Nivel de serviciabilidad final, P _t	2.0			
Tránsito de diseño, Ejes Equiv a 8.2 ton cd/pd	1191461			
CBR subrasante saturada, %	3.10			
MR de diseño, MPa	36.3			
ALTERNATIVA, e (cm)				
SÍMBOLO	CÓDIGO	MATERIAL	1	2
	MDC - 19	Mezcla Densa en Caliente INV 450-22	8	9
	BG - 38	Base Granular INV 330-22	15	20
	SBG-50	Sub Base Granular INV 320-22	55	45
Espesor de la estructura (cm)			78	74
Cumple criterio AASHTO			SI	SI

Notas:

1- Espesores en cm.

2- En negrita estructura recomendada

RESUMEN VALORES DE DISEÑO
AASHTO

SN Requerido	3.71
SN Aportado	3.84 3.89

Fuente: Elaboración propia

4.2 PLANTEAMIENTO DE LA REDUCCIÓN DE ESPESORES GRANULARES MEDIANTE EL REFUERZO DE LA ESTRUCTURA CON GEOMALLA BIAXIAL COEXTRUIDA

Teniendo en cuenta los espesores obtenidos y que pueden llegar a reducirse mediante la implementación de geosintéticos, se procede a evaluar la disminución de espesores de la estructura de pavimento mediante la inclusión de una geomalla biaxial con esfuerzo a la tensión bidireccional de 30 KN/m (Denominada actualmente P-BX 30-30), con el objetivo de lograr 4 beneficios principales:

1. Restricción del desplazamiento lateral de los agregados de la base a subbase.
2. Aumento del confinamiento y de la resistencia de la base a subbase en la vecindad del refuerzo.
3. Mejoramiento en la distribución de esfuerzos sobre la subrasante.
4. Reducción del esfuerzo y deformación por corte sobre la subrasante.

La contribución estructural de una geomalla PAVCO o similar en un sistema de pavimento flexible puede cuantificarse con el incremento al esfuerzo del coeficiente de la capa de la base de la vía. Por lo tanto, el cálculo del nuevo número estructural se convierte en:

$$SN = a_1 * h_1 + a_2 * LCR * h_{2r} * m_2 + a_3 * h_{3r} * m_3$$

La onvinación de espesores de la estructura de pavimento convencional se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Espesores de las capas de la estructura de pavimento convencional

Capa	Coeficiente estructural, a_i	Espesor, h_i (pulg)	Espesor, h_i (cm)	Coeficiente de drenaje, m_i	SN $a_i * h_i * m_i$
Concreto Asfáltico	0.37	3.54	9.00	0.00	1.31
Base granular	0.13	7.87	20.00	1.00	1.02
Subbase granular	0.11	17.72	45.00	0.80	1.56

SN tránsito	3.71	≤	SN estructura	3.89
-------------	------	---	---------------	------

Cumple la condición

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente se calcula el número estructural de la estructura de pavimento convencional a una donde se contemple tan solo material de subbase granular ajustandose el número estructural de la estructura de pavimento convencional, por lo tanto:

Tabla 13. Espesores de las capas de la estructura de pavimento sustituyendo la subbase granular

Capa	Coefficiente estructural, a_i	Espesor, h_i (pulg)	Espesor, h_i (cm)	Coefficiente de drenaje, m_i	SN $a_i \cdot h_i \cdot m_i$
Concreto Asfáltico	0.37	3.54	9		1.31
Base granular	0.13	0.00	0	1.00	0.00
Subbase granular	0.11	29.37	74.6	0.80	2.58

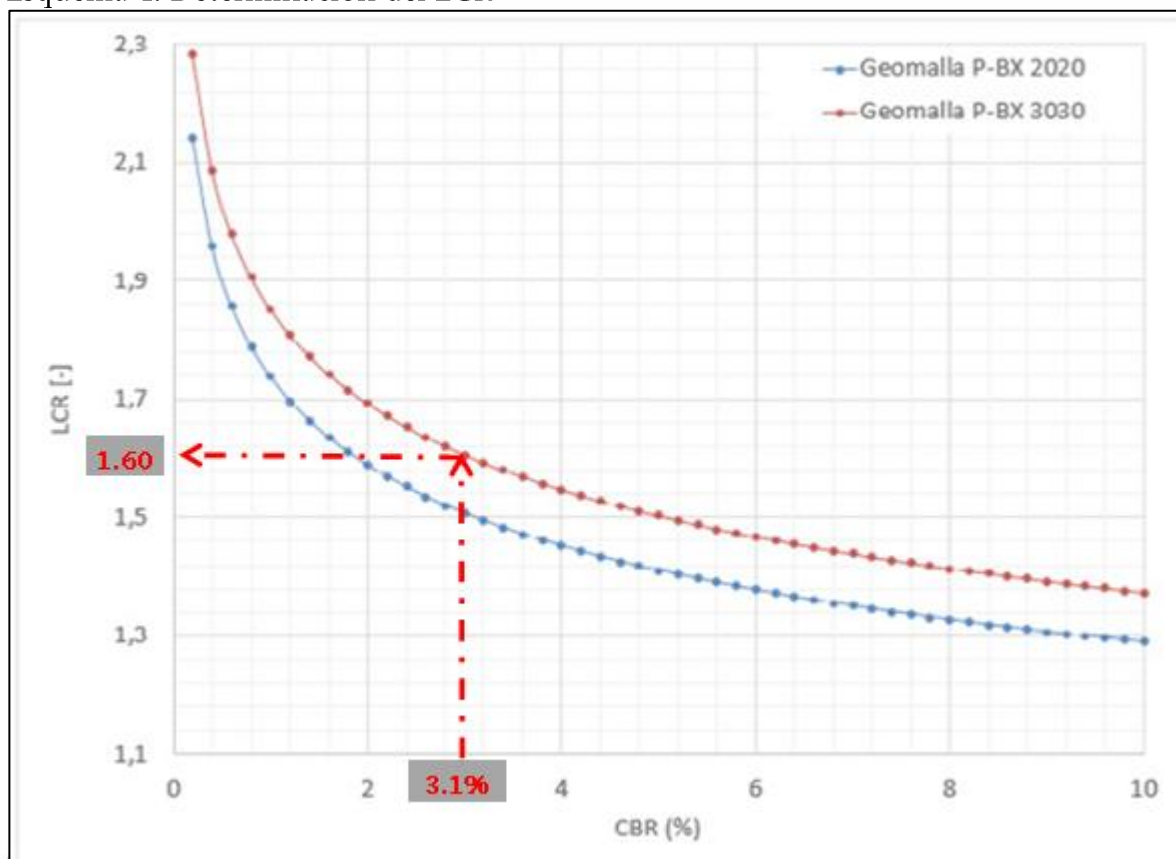
SN tránsito	3.71	≤	SN estructura	3.90
-------------	------	---	---------------	------

Cumple la condición

Fuente: Elaboración propia.

Empleando una geomalla Tipo P-BX 30-30 con esfuerzo a la tensión bidireccional de 30 KN/m, para una subrasante de CBR = 3.1%, del Esquema 4 el valor de LCR o valor de aporte de la geomalla a la capa granular de la estructura de 1.60, la cual se traduce en disminución de los espesores granulares que conforman la estructura de pavimento reforzado, además del incremento de la calidad del material donde se proyecta instalar, tal es el caso de un incremento del modulo de elasticidad en 1.60 a un radio de afectación del material granular estimado de 30 cm (15 cm superiores e inferiores de la profundidad de instalación de la geomalla).

Esquema 4. Determinación del LCR



Fuente: Figura 6.8 - Manual de diseño con geosintéticos PAVCO versión 10.

Para incluir el aporte de la geomalla dentro de la estructura de pavimento y obtener una disminución de espesor, se debe mantener constante a través de los cálculos realizados el valor inicial del número estructural.

$$\begin{array}{lcl} \boxed{\text{SNr}} & = & \boxed{\text{SN}} \\ \boxed{\text{SNr}} & = & \boxed{a_1 * h_1 + a_3 * \text{LCR} * h_{3r} * m_3} \end{array}$$

Una vez hallado el nuevo espesor de la capa granular, por la utilización de la geomalla, se calcula el número estructural de la misma.

$$\boxed{\text{SN}_{\text{GR}}} = \boxed{a_3 * h_{3r} * m_3}$$

Como la estructura seguirá manteniendo la misma conformación de materiales de base y subbase, se deben calcular los nuevos espesores de dichas capas en función del número estructural de la capa de subbase obtenido en el paso anterior y con sus coeficientes de capa respectivos.

$$SN_{GR} = a_2 * h_{2r} * m_2 + a_3 * h_{3r} * m_3$$

Debido a que se tienen dos incógnitas y una sola ecuación, se debe realizar un proceso de iteración para obtener unos espesores de capa razonables para la estructura. Para el espesor de la base granular no se recomienda que este valor se encuentre por debajo de los 20 cm o 8 pulgadas. Para la solución del problema, se deja constante el espesor de la base granular de la estructura inicial que cumple con todos los criterios de diseño y se despeja de la ecuación el espesor de la subbase granular.

$$SN_{GR} = a_2 * h_{2r} * m_2 + a_3 * h_{3r} * m_3$$

Para que la estructura sea constructivamente viable, los espesores calculados por lo general son modificados para facilitar su proceso constructivo. Es por eso que se debe verificar que la variación de estos no altere el desempeño de la estructura, por lo que el número estructural de las capas granulares con respecto al paso anterior, debe ser en lo posible iguales.

Finalmente la reducción total de la estructura de pavimento mediante la inclusión de la geomalla Biaxial es de 28 cm, no obtente, por confiabilidad de los materiales, procesos constructivos y criterio ingeniril, se limita la reducción efectiva a 20 cm.

Tabla 14. Comparación reducción de espesores mediante la inclusión de la geomalla biaxial

Capa	Espesores iniciales (cm)	Espesores finales mediante la inclusión de la geomalla biaxial (cm)
Concreto Asfáltico	9	9
Base granular	20	20
Subbase granular	45	17
Altura total (cm)	74	46
Reducción (cm)	28	
Reducción adoptada(cm)	15	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen los criterios de diseño generales que debe cumplir la estructura de pavimento, con la correspondiente modelación de la estructura usando el software BISAR 3.0 de la Shell.

4.3 Análisis elástico multicapa

Con el fin de verificar los espesores de las capas de la estructura a diseñar, a continuación, se realiza un análisis elástico multicapa, utilizando el programa desarrollado por la SHELL (BISAR 3.0), programa que calcula los esfuerzos y deformaciones máximas que una rueda doble colocada en la superficie produce en los niveles de interface de un sistema elástico multicapa, constituido por cada una de las capas, caracterizadas por el espesor, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Se debe verificar: **Valor de servicio < Valor admisible**

3.3.1 Cargas aplicadas

Eje Estándar: 80 kN (8.2t) de peso total, 40kN (4.1t) por extremo del eje, 2 llantas en cada extremo.

Radio de Carga = 10,8 cm

Separación entre Llantas = 32,4cm

Presión de Contacto = 5,6 kg/cm²

3.3.2 Criterios de diseños de estructuras de pavimentos flexibles – valores admisibles

A continuación, se presentan los criterios de verificación utilizados para el diseño de las estructuras de pavimento.

4.3.2.1 Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica er adm criterio de la Shell

De acuerdo con el criterio de la Shell la ley de comportamiento de la deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica es la siguiente:

$$\epsilon_{\text{radm}} = (0,856Vb + 1,08)E_1^{-0,36}(N/K)^{-0,20}$$

Donde:

$$Vb_1 = 11,0\%$$

$$E_1 = 2,00 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad \text{Módulo concreto asfáltico}$$

$$N_{\text{dis}} = \text{Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.}$$

$$K_1 = 10,0$$

4.3.2.2 Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante ϵZ_{adm} criterio de la Shell

El criterio de la Shell o ley de comportamiento de la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante está en función de la confiabilidad:

$$\epsilon Z_{\text{adm}} = 2,1 \text{ E-02} * N^{-0,25} \text{ (85\% de confiabilidad)}$$

$$N_{\text{dis}} = \text{Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.}$$

4.3.2.3 Esfuerzo vertical de compresión admisible sobre la subrasante, σz_{adm} .

El esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante se determina de acuerdo a los criterios de Dormon – Kerhoven y la CRR de Bélgica, los cuales son los siguientes:

- Criterio de Dormon – Kerhoven.

$$\sigma z_{\text{adm}} = (0,007E_{\text{sub}}/1 + 0,7 * \text{Log } N); \text{ Kg/cm}^2$$

Donde:

Ndis= Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.

E_{sub} = Módulo de elasticidad de la subrasante; Kg/cm²

- Criterio de la CRR de Bélgica

$$\sigma Z_{adm} = ((0,9607 \text{ CBR}^{1,2}) / (N^{0,229})) ; \text{ Kg/cm}^2$$

Dónde:

Ndis= Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.

CBR= Valore del CBR de diseño de la subrasante; %

4.3.2.4 Deflexión admisible del modelo estructural

Para la determinación de la deflexión admisible se utilizó el criterio de Yang H. Huang.

$$\Delta_{adm} = 26,32202 \text{ N}^{-0.2438}; \text{ mm}$$

Dónde:

Ndis= Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.

Δ_{adm} = Deflexión admisible del modelo estructural

En el anexo 5 se muestran las tablas resumen de comparación de valores de servicio versus los valores admisibles, y en el anexo 4 se presentan los reportes de las modelaciones de la estructura de pavimento, modelados mediante el programa BISAR 3.0 de la Shell.

5 DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO RÍGIDO

Después de capturar toda la información referente a las condiciones climáticas, niveles de tránsito, condiciones de resistencia del suelo de la subrasante y características de los materiales definidos para cada una de las capas, se diseña la alternativa de estructura del pavimento rígido de la vía en estudio.

5.1 Método AASHTO para diseño de pavimentos rígidos

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada con el número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el pavimento. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de Ejes Equivalentes, es decir, transforma los Ejes de Pesos Normales de los vehículos que circularán por la vía, en Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips (8.2 Ton) también conocidos como ESAL's.

En este método y diseño de estructura de pavimento, se consideran los siguientes parámetros:

4.1.1 Parámetros de diseño

5.1.1.1 Periodo de diseño, (n)

Se desarrolla el diseño del pavimento para un Periodo de diseño: $N = 20$ años.

5.1.1.2 Tránsito de diseño, (Ndis)

2 734 613 ejes equivalentes a 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño

5.1.1.3 Nivel de confiabilidad, (R)

Por las características del proyecto, se considera un nivel de Confiabilidad del 85%.

5.1.1.4 Desviación Normal Estándar, (Z_r)

Para un nivel de confiabilidad del 85%, se obtiene una desviación normal estándar de -1,037.

5.1.1.5 Error normal combinado, (So)

Para un pavimento rígido nuevo, se toma un error normal combinado de 0.35.

5.1.1.6 Nivel de Serviciabilidad inicial, (Po)

Se parte de un valor inicial de 4.5.

5.1.1.7 Nivel de Serviciabilidad final, (Pt)

El valor donde ocurre la falla de 2.0.

5.1.1.8 Diferencia en el nivel de Serviciabilidad, (ΔIPS)

Serviciabilidad inicial $P_0 = 4,5$ y una Serviciabilidad final $P_t = 2,0$, obteniéndose una diferencia del nivel de Serviciabilidad $\Delta IPS = 4,5 - 2,0 = 2,5$

5.1.1.9 Resistencia de la subrasante, (Mr, K)

Módulo resiliente de la subrasante, (Mr)

Para una capacidad de soporte expresada en términos de CBR y de acuerdo con la ecuación recomendada por la AASHTO para materiales se tiene:

$$Mr \text{ [lb/pulg}^2\text{]} = 2555 * CBR^{0.64} (\%)$$

Módulo de reacción de la subrasante, (K)

$$K \text{ [kg/cm}^3\text{]} = 0,25 + 5,15 * \text{Log}(\text{CBR } \%)$$

$$K \text{ [pci]} = 36,05 k \text{ [kg/cm}^3\text{]}$$

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Tabla 15. Características de resistencia de la subrasante para el diseño de pavimento

Unidad de diseño	1	
Abscisa inicio	K0+000	K0+000
Abscisa fin	K0+333	K0+088.758
CBR (%)	3.10	
Mr (Kg/cm ²)	363	
Mr (lb(pulg ²))	5271	
Mr (N/m ²)	3.63E+07	
Mr (MPa)	36.3	
K (Kg/cm ³)	2.78	
K (lb/pulg ³)	100.4	
K (MPa/m)	27.8	

Fuente: Elaboración propia

5.1.1.10 Características del concreto, (S_c , E_c)

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

Módulo de ruptura del concreto M_r (S_c , resistencia a la flexión)

$$S_c = 0.8 (f'c)^{0.5} : \text{resistencia a la compresión del concreto (MPa)}$$

Debido al tipo de nivel de tránsito (NT-2), se plantea módulo de rotura mínimo de 4.0 MPa (582.9 lb/pulg²)

$$4.0 \text{ MPa} = 0.8 * (f'c)^{0.5}$$

$$f'c = (4.0/0.8)^2$$

$$f'c = 25.0 \text{ MPa}, 255 \text{ Kg/cm}^2, 3643 \text{ lb/pulg}^2.$$

Módulo de elasticidad del concreto: como no se conoce el tipo de materiales a emplear en la mezcla, se emplea la siguiente ecuación:

$$E_c = 12500(f'c)^{0.5} \text{ resistencia a la compresión del concreto (kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 199\,613 \text{ kg/cm}^2, 2\,851\,613 \text{ lb/pulg}^2$$

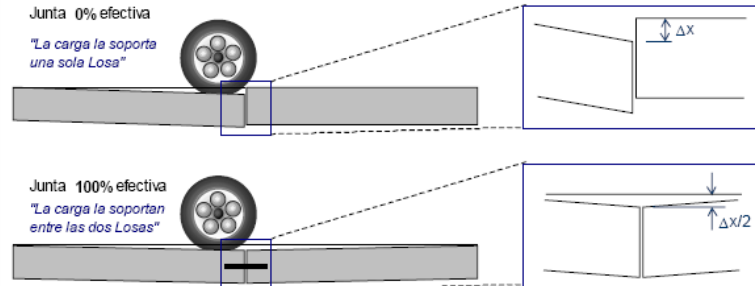
5.1.1.11 Transferencia de cargas, (J)

Se adopta un valor de 2.8, para losas en concreto simple con mecanismos de transferencia de carga y bermas de concreto.

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento. En este caso se proyecta la transferencia de carga por barras de transferencia de carga o dovelas.

El Coeficiente de transferencia de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.

Esquema 5. Efecto del mecanismo de transferencia de carga.



5.1.1.12 Características de la subbase granular

Se deberá instalar una subbase granular con CBR $\geq 30\%$ compactada al 95% de su peso seco volumétrico máximo. Teniendo en cuenta el niveles de tránsito "NT-2", el valor mínimo de CBR exigido para el material de subbase granular es del 30%, el cual según la AASHTO tiene un módulo de elasticidad de 15.157 lb/pulg², 1.061 Kg/cm² o 104 MPa.

5.1.1.13 Factor de pérdida de soporte, (Ls)

Con el tipo de material de subbase granular se tiene un valor de $L_s = 1.5$.

5.1.1.14 Módulo de reacción del Conjunto (K_{ef})

Utilizando el programa ASMODO desarrollado por el Ing. Giovanni Edgar Rincón Ochoa, programa que a partir del módulo Resiliente de la subrasante, módulo de reacción de la subrasante, espesor de la subbase granular, módulo dinámico de la subbase granular, espesor estimado de la losa de concreto, pérdida de soporte, se obtiene el módulo de reacción efectivo conjunto estructural subbase granular subrasante, se supone un espesor de la losa de 9 pulg. El espesor de la subbase granular se estima de 15 cm.

Tabla 16. Valores iniciales y de diseño.

Módulo de rotura del concreto, Sc	
Sc ($f'c$ en MPa)	$0.8 (f'c)^{0.5}$
$f'c$ (Kg/cm ²)	255
Sc (Kg/cm ²)	40.8
Sc (lb/pulg ²)	582.9
Sc (MPa)	4.0
Módulo de elasticidad del concreto	
Ec	$12500 (f'c)^{0.5}$
Ec (Kg/cm ²)	199613
Ec (lb/pulg ²)	2851613
Ec (MPa)	19570
CBR Subbase granular (%)	30
E_{sbg} (kg/cm ²)	1061
E_{sbg} (lb/pulg ²)	15157
E_{sbg} (MPa)	104.0
CBR Subrasante (%)	3.1
Mr (kg/cm ²)	363
Mr (lb/pulg ²)	5271
Mr (MPa)	36.3
K (Kg/cm ³)	2.8
K (lb/pulg ³)	100.4
K (MPa/m)	27.8

Fuente: El estudio

Se procede a calcular el módulo de reacción efectivo de la subrasante (k_{ef}) de acuerdo al espesor asumido de subbase, módulo de reacción de la subrasante, espesor estimado de la losa de concreto, y el factor de pérdida de soporte, obteniendo en K_{ef} de 35.7 lb/pulg³. Ver anexo 6.

5.1.1.15 Coeficiente de drenaje, C_d

De acuerdo con la Tabla 17 y a las condiciones climáticas de la zona del proyecto, se adopta la calidad de drenaje para la subbase granular en este caso como pobre, para el cual el coeficiente de drenaje, $C_d = 0,8$

Tabla 17. Valores del coeficiente de drenaje, Cd

Calidad de Drenaje	Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próxima a la saturación			
	Menos del 1%	1 - 5%	5 - 25%	Más del 25%
Excelente	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Buena	1.20 - 1.15	1.25 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Aceptable	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Pobre	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy pobre	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, Washington D.C., 1993. P. II-26.

5.1.1.16 Espesor de la losa de concreto

Reemplazando las variables de los numerales anteriores en la ecuación básica de diseño (Ecuación 2), se obtiene un espesor de la losa de concreto el cual se toma teniendo en cuenta el tránsito de diseño, las características del concreto, y los coeficientes de drenaje, entre otros.

Ecuación 2. Ecuación AASHTO pavimentos rígidos

$$\log(N) = Z_r \times S_o + 7.35 \times \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left[\frac{\Delta IPS}{4.5 - 1.5}\right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^{-7}}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \times \log\left[\frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

Donde:

- N:** Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el período de diseño.
- Z_r :** Desviación normal estándar.
- S_o :** Error normal combinado de la previsión del tránsito y del comportamiento.
- ΔIPS :** Diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial P_o y final P_t .
- P_t :** Serviciabilidad final.
- S_c :** Módulo de rotura del concreto a la flexo tracción a los 28 días, lb/pulg².
- E_c :** Módulo de elasticidad del concreto, lb/pulg².
- C_d :** Coeficiente de drenaje.
- J :** Coeficiente de transmisión de carga en las juntas.
- k :** Módulo de reacción del conjunto sobre la cual se apoya la losa de concreto, lb/pulg³.
- D :** Espesor de la losa de concreto, pulgadas.

Para el análisis por el método de la AASHTO-93, se utiliza la interfaz para la solución del método, compilada por el Ing. MSc. Luis Ricardo Vásquez, en el anexo 7, se presenta el cálculo del SN requerido.

Tabla 18. Resumen SN calculados pavimentos rígidos

Nivel de confianza, R	85%
Desviación estándar. So	0.35
Nivel de serviciabilidad inicial, P _o	4.5
Nivel de serviciabilidad final, P _t	2
Tránsito de diseño, Ejes Equiv a 8.2 ton cd/pd	2 734 613
Módulo de elasticidad del concreto E _c , Lb/pulg ²	2 851 613
Módulo de rotura del concreto S _c , Lb/pulg ²	582.9
Coeficiente de transferencia de carga, J	2.8
Coeficiente de drenaje, Cd	0.8
K efectivo	35.7
Espesor de la losa D, pulg	9.1
Espesor de la losa D, cm	23.1
Espesor de la losa recomendado D, cm	23

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra el resumen de los espesores de los espesores obtenidos por la metodología de diseño de pavimentos por la metodología AASHTO.

Tabla 19. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.

SÍMBOLO	CÓDIGO	MATERIAL	Espesor cm
	Losa de concreto	Concreto hidráulico MR 4.0 MPa INV 500-22	23
	SBG-50	Sub Base Granular SBG-50 INV 320-22 CBR > 30%	15

Fuente: El estudio

5.2 Cálculo de esfuerzos y deflexiones de la losa

Para el diseño de la losa de concreto, se calculan los esfuerzos y las deflexiones en el borde, en el interior y en la esquina de la losa, utilizando las expresiones utilizadas para el chequeo de los esfuerzos y deflexiones expuestas en la mecánica de pavimentos rígidos, los cuales se relacionan a continuación, y tomando como carga de análisis la correspondiente al eje de camión rígido tipo C2G de 11 toneladas en el simple y como carga aplicada sobre la losa la

correspondiente a 5,5 toneladas, con un radio de carga de 17,68 cm, y una presión de contacto de 5,6 kg/cm².

4.2.1 Formulación para el chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa

5.2.1.1 Esfuerzos debidos a las cargas del tránsito

- Esfuerzo de tensión en la esquina de la losa, σ_e

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left(1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right)$$

Donde:

σ_e = Esfuerzo de tensión en la esquina de la losa, Lb/pulg²

h = Espesor de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

$$I = \left[\frac{E h^3}{12 (1 - \mu^2) k} \right]^{0.25}$$

Donde:

l = Radio de rigidez relativa en pulgadas.

E= Módulo de elasticidad del concreto en libras/pulg².

h= Espesor de la losa en pulgadas.

μ = Relación de Poisson del concreto.

k= Módulo de reacción de la subrasante en libras/pulg³.

- Esfuerzo de tensión en el interior de la losa, σ_i

$$\sigma_i = 0.316 \frac{P}{h^2} \left[4x \log \left(\frac{l}{b} \right) + 1.069 \right]$$

Donde:

σ_i = Esfuerzo de tensión en el interior de la losa, Lb/pulg²

P = Carga aplicada, Lb

h = Espesor de la losa, pulg

l = Radio de rigidez relativa, pulg

$$b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h \quad \text{Si } a < 1.724h$$

$$b = a \quad \text{Si } a \geq 1.724h$$

a = Radio del área cargada, pulg

- Esfuerzo de tensión en el borde de la losa, σ_b

$$\sigma_b = 0.572 \frac{P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{b} \right) + 0.359 \right]$$

Donde:

σ_b = Esfuerzo de tensión en el borde de la losa, Lb/pulg²

P = Carga aplicada, Lb

h = Espesor de la losa, pulg

l = Radio de rigidez relativa, pulg

$$b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h$$

Si $a < 1.724h$

$$b = a \quad \text{Si } a \geq 1.724h$$

a = Radio del área cargada, pulg

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

5.2.1.2 Deflexiones en pavimentos rígidos por acción del tránsito

- Deflexiones en esquina de la losa. Δ_e

$$\Delta_e = \frac{P}{kl^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right]$$

Donde:

Δ_e = Deflexión en la esquina de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

k = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg³

- Deflexión en el borde de la losa, Δ_b

$$\Delta_b = \frac{0.413P}{kl^2} \left[1 - 0.82 \left(\frac{a}{l} \right) \right]$$

Donde:

Δ_b = Deflexión en el borde de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

k = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg³

- Deflexión en el interior de la losa, Δ_i

$$\Delta_i = \frac{P}{8Kl^2} \left[1 + \frac{1}{2\pi} \left(Ln \left(\frac{a}{2l} \right) - 0.673 \right) \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right]$$

Donde:

Δ_i = Deflexión en el interior de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

k = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg³

4.2.2 Chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa

5.2.2.1 Chequeo de esfuerzos en la losa de concreto

El resumen del cálculo de los esfuerzos de tensión en la losa de concreto, se presenta en el anexo 8 y de la información contenida en este se aprecia que los esfuerzos actuantes de tensión en la losa son menores al esfuerzo a la flexotracción del concreto de las alternativas analizadas por la AASHTO, por lo tanto, la losa está bien diseñada.

Los resultados permiten apreciar que el punto más débil de la losa es el borde por la magnitud de la de los esfuerzos actuantes lo cual se puede traducir en fracturas si los esfuerzos actuantes son mayores a los admisibles.

5.2.2.2 Chequeo de deflexiones en la losa de concreto

El resumen del cálculo de las deflexiones en la losa de concreto, se presenta en el anexo 9. Y los resultados permiten apreciar que el punto más débil de la losa son las esquinas por las magnitudes de la deflexión, lo cual se puede traducir en fracturas si los esfuerzos actuantes son mayores a los admisibles. Se debe verificar mediante ensayos de módulo de rotura de vigas prismáticas la deflexión máxima permitida por el concreto que se use en obra, en todo caso, se espera que las deflexiones en estos puntos sean asumidas por las barras de transferencia de carga de las losas, (ver Esquema 5).

5.3 Dimensiones de la losa y elementos de transferencia de carga

4.3.1 Dimensiones de la losa

Para el dimensionamiento de la losa de concreto, se tiene dos criterios importantes los cuales son:

- Criterio del Espesor:
 $L=25 D$
- Criterio de la AASHTO:
 $L=1.25 A$

Aplicando los criterios descritos anteriormente, se obtienen las siguientes dimensiones máximas de la losa.

Tabla 20. Dimensiones máximas de la losa.

Espesor de la losa, e, (m)	0.23
Longitud de la losa (m),	5.75
Criterio 1, $L=25 \cdot e$	
Ancho de la losa	4.6
$(A=L/1.25)$	
Longitud máxima según AASHTO - 93, (m)	4.5
Ancho máximo según longitud máxima según AASHTO-93, (m)	3.6
Ancho de la losa según ancho de calzada típico, (m)	3.0
Longitud máxima de la losa según ancho de calzada típico, (m)	3.75

Fuente: El estudio.

Para anchos de calzada diferentes a 6.0m, se recomienda implementar las siguientes dimensiones de losa según el ancho de la calzada.

Tabla 21. Dimensiones de la losa según ancho de la calzada.

Ancho de calzada, (C), m	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0	6.2	6.4	6.6	6.8	7.0	7.2
Ancho de carril, (A=C/2), m	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
Longitud de la losa, (L=1.25*A), m	3.1	3.2	3.3	3.5	3.6	3.7	3.8	4.0	4.1	4.2	4.3	4.5

Fuente: El estudio.

Cálculo de los pasadores: para losas de 19 cm de espesor, entrando con este valor se tiene:

Tabla 22. Requisitos mínimos para las dovelas en las juntas.

ESPESOR DE LA LOSA, (mm)	DIÁMETRO DEL PASADOR		LONGITUD TOTAL, (mm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS, (mm)
	mm	pulgadas		
0 – 100	13	½	250	300
110 – 130	16	5/8	300	300
140 – 150	19	¾	350	300
160 – 180	22	7/8	350	300
190 – 200	25	1	350	300
210 – 230	29	1 1/8	400	300
240 – 250	32	1 ¼	450	300
260 – 280	35	1 3/8	450	300
290 – 300	38	1 ½	500	300

Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE – ICPC. Manual de diseño de pavimento de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá D.C.

- Diámetro del pasador liso = 1 1/8 pulg
- Longitud del pasador = 400 mm
- Separación entre centros = 300 mm

Cálculo de las barras de anclaje: para losas de 23 cm de espesor, entrando a la siguiente tabla tenemos:

Tabla 23. Recomendación para las barras de anclaje

ESPESOR DE LA LOSA, cm	BARRAS DE ϕ 9.5 mm (3/8")				BARRAS DE ϕ 12.7 mm (1/2")				BARRAS DE ϕ 15.9 mm (5/8")			
	Longitud, mm	Separación entre barras, m			Longitud, mm	Separación entre barras, m			Longitud, mm	Separación entre barras, m		
		Carril de 3.05 m	Carril de 3.35 m	Carril de 3.65 m		Carril de 3.05 m	Carril de 3.35 m	Carril de 3.65 m		Carril de 3.05 m	Carril de 3.35 m	Carril de 3.65 m
Acero de $f_y = 187.5$ MPa (40,000 lb/pulg ²)												
15.0	450	0.80	0.75	0.65	600	1.20	1.20	1.20	700	1.20	1.20	1.20
17.5		0.70	0.60	0.55		1.20	1.10	1.00		1.20	1.20	1.20
20.0		0.60	0.55	0.50		1.05	1.00	0.90		1.20	1.20	1.20
22.5		0.55	0.50	0.45		0.95	0.85	0.80		1.20	1.20	1.20
25.0		0.45	0.45	0.40		0.85	0.80	0.70		1.20	1.20	1.10
Acero de $f_y = 280$ MPa (60,000 lb/pulg ²)												
15.0	650	1.20	1.10	1.00	850	1.20	1.20	1.20	1000	1.20	1.20	1.20
17.5		1.05	0.95	0.85		1.20	1.20	1.20		1.20	1.20	1.20
20.0		0.90	0.80	0.75		1.20	1.20	1.20		1.20	1.20	1.20
22.5		0.80	0.75	0.65		1.20	1.20	1.20		1.20	1.20	1.20
25.0		0.70	0.65	0.60		1.20	1.15	1.10		1.20	1.20	1.20

Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE – ICPC. Manual de diseño de pavimento de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá D.C.

Se adoptan los siguientes valores:

- Diámetro de la barra = 1/2" o 12.7 mm.
- Acero de $f_y = 60\,000$ lb/pulg².
- Longitud de la barra = 850 mm.
- Separación entre centros = 1.2 m.

5.4 Diseño y construcción de las juntas

Las juntas del pavimento rígido van a ser las responsables del control del agrietamiento, así como de mantener la capacidad estructural del pavimento y su calidad de servicio en los más altos niveles al menor costo anual.

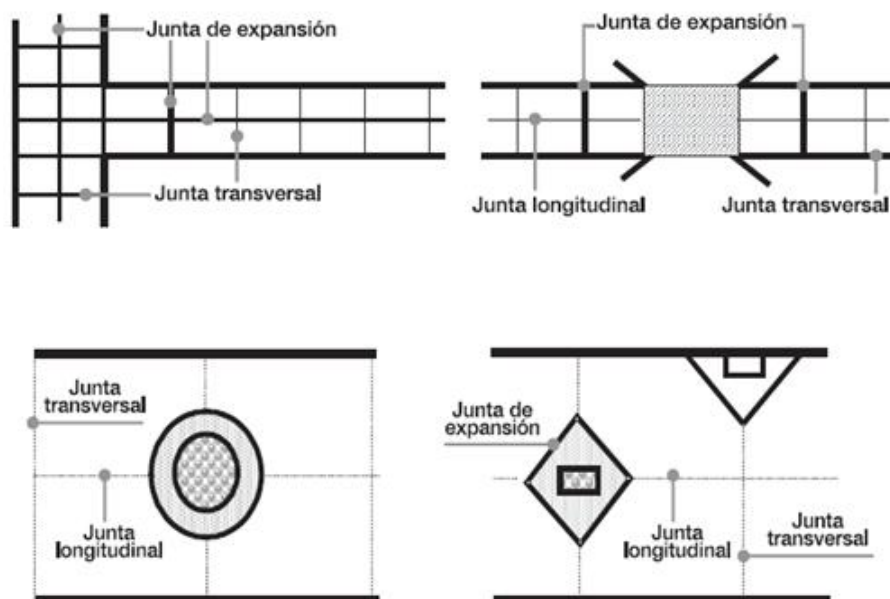
Además, las juntas cumplen funciones más específicas, como lo son:

- El control del agrietamiento transversal y longitudinal provocado por las restricciones de contracción combinándose con los efectos de pandeo ó alabeo de las losas, así como las cargas del tráfico.
- Dividir el pavimento en incrementos prácticos para la construcción (por ejemplo, los carriles de circulación).
- Absorber los esfuerzos provocados por los movimientos de las losas.
- Proveer una adecuada transferencia de carga.
- Darle forma al depósito para el sellado de la junta.

4.4.1 Tipos de juntas

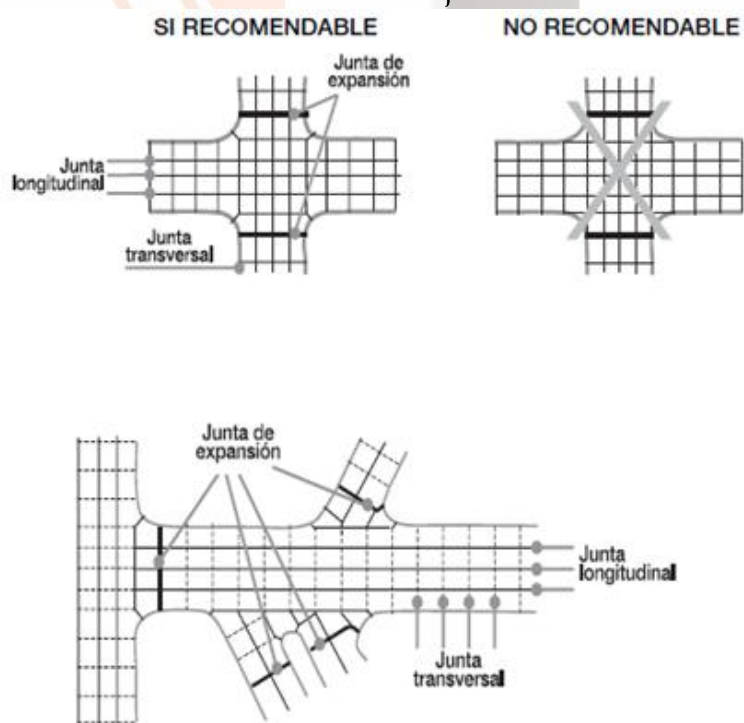
Los tipos de juntas a usar en el pavimento rígido son las siguientes

Esquema 6. Tipos de juntas



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Esquema 7. Recomendaciones construcción de juntas.



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Las juntas longitudinales de contracción cortando con disco en el concreto endurecido o formando una ranura en el concreto fresco, de una manera muy similar al caso de las juntas transversales de contracción, sin embargo la profundidad del corte o de la ranura deberá ser de un tercio del espesor ($D/3$) y el tiempo o el momento para hacer el corte inicial no es tan crítico como en el caso de las juntas transversales de contracción ya que el movimiento de contracción longitudinal no es tan grande como la contracción transversal.

El corte de las juntas longitudinales deberá realizarse antes de 48 horas y antes de que cualquier equipo pesado o vehículo circule sobre el pavimento. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como una fuerte caída en la temperatura ambiente durante la primera o segunda noche, se pueden presentar agrietamientos longitudinales más temprano, por lo que es una buena práctica el realizar el corte tan pronto como sea pueda hacer.

4.4.2 Recomendaciones para el diseño de las juntas

Las siguientes recomendaciones se hacen para un correcto diseño de juntas:

- Evitar losas de forma irregular.
- La separación máxima entre juntas transversales deberá ser de 25 veces el espesor ó 4.5 metros, la que sea menor.
- Mantener losas tan cuadradas como sea posible, ya que losas angostas y largas tienden a agrietarse en mayor cantidad que las cuadradas.
- Todas las juntas de contracción transversales, deberán ser continuas a través de la guarnición y tener una profundidad igual a $1/3$ del espesor del pavimento.
- En las juntas de aislamiento, el relleno deberá ser a toda la profundidad y extenderse por la guarnición.
- Si no se cuenta con guarniciones, las juntas longitudinales deberán amarrarse con barras de amarre.
- Ajustes menores en la ubicación de las juntas, desplazando o inclinando algunas juntas para que coincidan con los pozos de visita o alcantarillas mejoran el comportamiento del pavimento.
- Cuando el área pavimentada cuenta con estructuras de drenaje, colocar las juntas de manera que coincidan con las estructuras.

4.4.3 Sellado de las juntas

La ranura entre juntas debe sellarse, tanto para impedir la entrada de agua a la Subrasante como para evitar la penetración de cuerpos extraños dentro de la junta, como también evitar que se produzca el bombeo. Adicionalmente, el sello mejora la calidad del rodamiento.

El material sellante ideal debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Ser impermeable.
- Deformarse sin rotura, de acuerdo con los movimientos que ocurran en la junta.
- Recuperar su forma original después de repeticiones cíclicas de la deformación.
- Permanecer en contacto con las caras de la junta.
- No fluir con la gravedad.
- No reblandecerse excesivamente a las mayores temperaturas de servicio.
- No endurecerse ni notarse quebradizo a temperaturas bajas de servicio.
- No perder sus cualidades con la edad ni con la acción del medio.
- Resistir al ataque químico.

4.4.4 Limpieza Previa

Previo al sellado, la abertura de la junta deberá ser limpiada a fondo de compuestos de curado, residuos, natas y cualquier otro material ajeno. La limpieza de las caras de la junta afecta directamente la adherencia del sellante al concreto. Una limpieza pobre reduce la adherencia del sellador a la interface con la junta, lo que reduce significativamente la efectividad del sellador. Por lo tanto, la correcta limpieza es esencial para obtener una superficie de junta que no perjudicará el lazo o adhesión con el sellador. La limpieza se puede hacer con sand-blast, agua, aire a presión, cepillado de alambre o de varias otras maneras, esto dependiendo de las condiciones de la junta y las recomendaciones del fabricante del sellador.

Tipos de sellantes

1. **Masillas:** Compuestas por un líquido viscoso (asfalto) al cual se adicionan materiales llenantes, como fibras de asbesto.

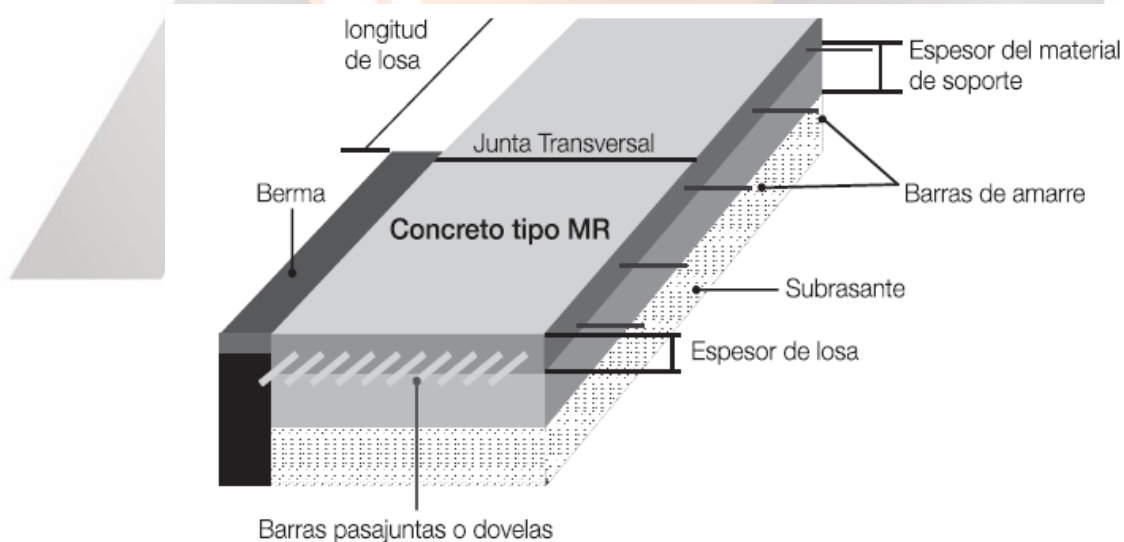
2. **Sellantes Termoplásticos:** EL GRAYDIN EE, y el GRAYDIN ASCAS IMPERSEL.
3. **Sellantes de curado Químico:** SIKAFLEX-T 68 y el COLMA JOINT SEALER, ambos de Sika.

En general, según los equipos de construcción con los que se cuentan, se recomienda implementar los procesos constructivos descritos en las especiaciones generales de construcción de carreteras del INVÍAS, en el Artículo INV-500-22.

5.5 Modelo estructural del pavimento rígido

A continuación, se presenta el modelo estructural de las losas de pavimento rígido, el cual muestra el dimensionamiento de los diferentes elementos.

Esquema 8. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido



Fuente: INVÍAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

- Concreto tipo: 4.0 MPa
- Espesor de la losa: 23 cm.
- Material de soporte tipo: Subbase granular CBR $\geq$ 30%, clase B
- Espesor material de soporte: 15 cm

- Barras pasajuntas o dovelas: D= 1 1/8 pulg lisa, longitud de 40 cm, separadas cada 30 cm, engrasadas en una de sus puntas.
- Barras de amarre: D=1/2 Pulg, longitud 85 cm, separadas cada 120 cm.
- Berma: Se garantizará por sardineles de confinamiento o losas contiguas que se encuentren en buen estado.

El ancho de la losa no deberá ser mayor a 4.5 m por ningún motivo, en caso de requerirse mayores anchos, se deberá optar por construir en la calzada tres losas en sentido longitudinal, sin exceder un largo de 1.25 veces el ancho de la losa. Los anchos y longitudes de la losa según el ancho de la calzada pueden ser consultados en la Tabla 21.



6 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La estructura de pavimento deberá realizarse con la normatividad vigente del INVÍAS (especificaciones 2022), los materiales que se empleen deberán cumplir con las especificaciones que se presentan a continuación que son correspondientes a un nivel de tránsito NT2 – Clase B para estructuras de pavimento rígido, especificaciones generales de construcción de carreteras que pueden ser descargadas de la página WEB del INVÍAS.

6.1 Subbase Granular INV E 320 – 22 - Base Granular INV E 330 –22

Se presentan especificaciones técnicas y recomendaciones generales para la instalación de estos materiales como se observa:

Tabla 24. Requisitos de los agregados para subbases granulares INVÍAS 2022.

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%): - 500 revoluciones	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	30	35	-
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%).	E-125	25	25	25
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

Nota: se puede validar el requisito de durabilidad, empleando cualquiera de los dos sulfatos indicados.

Fuente: Artículo 320-22 INVÍAS

Tabla 25. Requisitos de los agregados para bases granulares INVÍAS 2022.

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular		
		Clase A	Clase B	Clase C
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%): - 500 revoluciones	E-218	50	50	50
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).	E-238	30	35	-
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	12 18	12 18	12 18
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%).	E-125	25	25	25
Índice de Plasticidad, máximo (%).	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%).	E-133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo.	E-148	40	30	30

Nota: se puede validar el requisito de durabilidad, empleando cualquiera de los dos sulfatos indicados.

Fuente: Artículo 330-22 INVÍAS

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Gradación: la gradación debe ajustarse a las siguientes bandas granulométricas para cada caso:

Tabla 26. Franja granulométrica subbase granular.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)								
	50,0	37,5	25,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	2 Pulgadas	1 ½ Pulgadas	1 Pulgada	1/2 Pulgada	3/8 Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
	Pasa tamiz (%)								
SBG-50 (Nota)	100	70 – 95	60 – 90	45 – 75	40 – 70	25 – 55	15 – 40	6 – 25	2 – 15
SBG-38 (Nota)	-	100	75 – 95	55 – 85	45 – 75	30 – 60	20 – 45	8 – 30	2 – 15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %				6 %			3 %

Nota: el número indica el tamaño máximo, en milímetros, de las partículas en la gradación empleada.

Fuente: Artículo 320-22 INVÍAS.

Tabla 27. Franja granulométrica base granular.

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)							
	37,5	25,0	19,0	9,5	4,75	2,00	0,425	0,075
	1½ Pulgadas	1 Pulgada	¾ Pulgada	⅜ Pulgada	Nro. 4	Nro. 10	Nro. 40	Nro. 200
	Pasa tamiz (%)							
Bases granulares de gradación gruesa								
BG-40	100	75 — 100	65 — 90	45 — 68	30 — 50	15 — 32	7 — 20	0 — 9
BG-27	-	100	75 — 100	52 — 78	35 — 59	20 — 40	8 — 22	0 — 9
Bases granulares de gradación fina								
BG-38	100	70 — 100	60 — 90	45 — 75	30 — 60	20 — 45	10 — 30	5 — 15
BG-25	-	100	70 — 100	50 — 80	35 — 65	20 — 45	10 — 30	5 — 15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Fuente: Artículo 330-22 INVÍAS.

- El material se colocará y se extenderá en capas de 15 cm, el espesor de cada capa y el número de pasadas para lograr la compactación adecuada se realizarán de acuerdo al equipo que emplee el constructor.
- El material se deberá humedecer hasta obtener un contenido de humedad próximo al óptimo, se deberá compactar hasta obtener el porcentaje ideal de la densidad seca máxima del ensayo de Proctor modificado, para base este porcentaje debe ser 98% y para subbase de 95%.

- Los materiales para la construcción deberán ser extraídos de canteras y/o depósitos aluviales previamente estudiados y aceptados por la interventoría, y se recomienda hacer controles de calidad de material continuos con el fin de garantizar la funcionalidad de estos.
- Para proteger los materiales al contacto con el agua, se recomienda emplear materiales granulares con porcentajes bajos en el contenido de finos (pasa malla 200), baja plasticidad.
- La base y subbase tendrá una densidad uniforme en toda su extensión y profundidad y ese requisito se observará de manera especial en las zonas cercanas a las estructuras de confinamiento, sumideros, cajas de inspección etc.



6.2 Capa asfáltica: Mezcla densa en caliente MDC – 19. INV E 450 - 22

Tabla 28. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

Característica	Norma de ensayo	Nivel de tránsito		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%). (Nota 1): - Capa de: rodadura/intermedia/base, 500 revoluciones - Capa de: rodadura/intermedia/base, 100 revoluciones	INV E-218	25/35/- 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25/35/35 5/7/7
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%): - Capa de: rodadura/intermedia/base	INV E-238	-	25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura/intermedia/base - Valor en seco, mínimo (kN) - Relación húmedo/seco, mínima (%)	INV E-224	- -	- -	110/90/75 75/75/75
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo.	INV E-232	45	45	45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%).	INV E-220	18	18	18
Análisis petrográfico				
Cuantifica los porcentajes relativos de los diferentes minerales y las tipologías de rocas que componen el agregado (Nota 2).	ASTM C295	-	-	Reportar
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%).	INV E-237	0,5	0,5	0,5
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de Plasticidad, máximo (%).	INV E-125 e INV E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%).	INV E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo.	INV E-235	10	10	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%).	INV E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%): - Una Cara: rodadura/intermedia/base - Dos caras: rodadura/intermedia/base	INV E-227	75/60/- -/-/-	75/75/60 60/-/-	85/75/60 70/-/-
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%): - Capa de: rodadura/intermedia/base	INV E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35
Adhesividad (O)				
Agregado grueso: cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%).	INV E-757		Reportar	
Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel-Weber), índice mínimo.	INV E-774		4	

Nota 1: se aceptan valores superiores de desgaste siempre y cuando el valor de Micro-Deval se cumpla; esta nota no resulta aplicable para tránsito NT1.

Nota 2: este ensayo es aplicable únicamente para tránsito NT3. El informe debe cuantificar los porcentajes relativos de los diferentes minerales y las tipologías de rocas que componen el agregado, debe incluir advertencia sobre la presencia de minerales contaminantes, deletéreos, con posibles reactividades químicas, inestables o susceptibles a cambios volumétricos. Debe indicar el grado de meteorización o de alteración del agregado, y la porosidad. También debe incluir valores de acidez y carga de partícula con un concepto sobre la adherencia con el asfalto y las emulsiones.

Fuente: Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Gradación:

Tabla 29. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

Característica	Nivel de tránsito		
	NT1	NT2	NT3
Proporción de arena natural: porcentaje (%) de la masa total del agregado combinado.	≤ 25	≤ 25	≤ 15
Proporción de arena natural: porcentaje (%) de la masa total del agregado fino.		≤ 50	

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Tabla 30. Porción y requisitos del llenante mineral.

Característica	Norma de ensayo INV	Nivel de tránsito		
		NT1	NT2	NT3
Proporción de llenante mineral de aporte: (porcentaje (%) en masa del llenante total)				
- Capa de rodadura	-	-	≥ 25	≥ 50
- Capa intermedia	-	-	≥ 25	≥ 50
- Capa de base	-	-	-	≥ 25
Granulometría del llenante mineral de aporte:				
- % que pasa tamiz de 1,18 mm (nro. 16)			100	
- % que pasa tamiz de 0,600 mm (nro. 30)	E-215		97 – 100	
- % que pasa tamiz de 0,150 mm (nro. 100)			95 – 100	
- % que pasa tamiz de 0,075 mm (nro. 200)			70 – 100	
Densidad <i>bulk</i> (g/cm³).	E-225		0,5 – 0,8	
Vacíos del llenante seco compactado (%).	E-229	-	≥ 38	

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Tabla 31. Franja granulométrica recomendada mezcla densa en caliente.

Tipo de mezcla	Tamiz (mm / U.S. Standard)									
	37,5 1 1/2 Pulgadas	25,0 1 Pulgada	19,0 3/4 Pulgada	12,5 1/2 Pulgada	9,5 3/8 Pulgada	4,75 Nro. 4	2,00 Nro. 10	0,425 Nro. 40	0,180 Nro. 80	0,075 Nro. 200
	Pasa tamiz (%)									
Densa	MDC-25	-	100	67 – 85	60 – 77	43 – 59	29 – 45	14 – 25	8 – 17	4 – 8
	MDC-19	-	100	80 – 95	70 – 88	49 – 65	29 – 45	14 – 25	8 – 17	4 – 8
	MDC-10	-	-	-	100	65 – 87	43 – 61	16 – 29	9 – 19	5 – 10
Semidensa	MSC-25	100	80 – 95	65 – 80	55 – 70	40 – 55	24 – 38	9 – 20	6 – 12	3 – 7
	MSC-19	-	100	80 – 95	65 – 80	40 – 55	24 – 38	9 – 20	6 – 12	3 – 7
Gruesa	MGC-38	100	75 – 95	47 – 67	40 – 60	28 – 46	17 – 32	7 – 17	4 – 11	2 – 6
	MGC-25	-	100	75 – 95	55 – 75	28 – 46	17 – 32	7 – 17	4 – 11	2 – 6
Alto módulo	MAM-25	-	100	65 – 80	55 – 70	40 – 55	24 – 38	10 – 20	8 – 14	6 – 9
	MAM-19	-	-	80 – 95	65 – 80	40 – 55	24 – 38	9 – 20	6 – 12	3 – 7
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	-	-	-	4 %	-	-	-	3 %	-	2 %

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Tabla 32. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

Característica		Norma de Ensayo INV	Mezclas densas, semidensas y gruesas			Mezcla de alto módulo
			Categoría de tránsito			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)			5 000	7 500 (16 875)	9 000 (20 250)	15 000
Flujo (mm). (Nota 2)			2,0 — 4,0	2,0 — 4,0 (3,0 — 6,0)	2,0 — 3,5 (3,0 — 5,3)	2,0 — 3,0
Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)			2,0 — 4,0	3,0 — 5,0 (4,5 — 7,5)	3,0 — 6,0 (4,5 — 9,0)	-
Vacíos con aire (Va) (%). (Nota 3)	Rodadura	E-736 E-799	3,0 — 5,0	3,0 — 5,0	3,0 — 5,0	4,0 — 6,0
	Intermedia		4,0 — 8,0	4,0 — 7,0	4,0 — 7,0	4,0 — 6,0
	Base		NA	5,0 — 8,0	5,0 — 8,0	4,0 — 6,0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), mínimo (%)	T. Máx. 38 mm	E-799		13,0		-
	T. Máx. 25 mm			14,0		14,0
	T. Máx. 19 mm			15,0		-
	T. Máx. 10 mm			16,0		-
Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)		E-799	65 — 80	65 — 78	65 — 75	63 — 75
Relación Llenante/Ligante efectivo, en peso		E-799		0,8 — 1,2		1,2 — 1,4
Concentración de llenante, valor máximo		E-745		Valor crítico		
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey		-		Reportar		
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo (µm)		E-741			7,5	

Nota 1: se debe usar la norma de ensayo INV E-800, en lugar de la INV E-748 cuando los agregados tengan un tamaño máximo superior a veinticinco milímetros (25 mm) (1 pulgada). Los valores entre paréntesis corresponden a ensayos efectuados, de acuerdo con la norma INV E-800.

Nota 2: para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se puede aceptar un valor de flujo hasta de cinco milímetros (5,0 mm). En cualquier caso, se debe cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla para la relación Estabilidad/Flujo.

Nota 3: para bacheos en capas de cincuenta a setenta y cinco milímetros (50 mm – 75 mm) de espesor, se deben exigir los requisitos de vacíos con aire de «intermedia» y para los de capas de más de setenta y cinco milímetros (75 mm) se deben exigir los requisitos para «base». Si se llegase a efectuar un bacheo con mezcla asfáltica en caliente en espesor mayor de setenta y cinco milímetros (75 mm) en una vía cuyo tránsito de proyecto es NT1, se debe aplicar el criterio de vacíos con aire para las capas de «base» con tránsito NT2 (5 % – 8 %).

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

- En el proceso del diseño y dosificación de materiales para la mezcla asfáltica se deberá emplear el método Marshall, el cual debe garantizar que las propiedades intrínsecas de esta se encuentran en los siguientes valores de acuerdo con la variable a analizar:
- La temperatura de mezclado no debe ser menos a 120 °C.
- Una vez terminada la base granular. se dispondrá de un riego de liga de tipo CRR 1 o CRR 2 de acuerdo con el artículo 421 del INVÍAS. La superficie de la base debe ser uniforme y para una mejor adhesión se procederá a realizar una limpieza mediante barredoras o sopladoras mecánicamente en sitios accesibles y escobas manuales donde estas no puedan acceder.
- La dosificación del ligante será definida por el Interventor. sobre la base de las pruebas iniciales en obra. En condiciones normales. se recomiendan dosificaciones del orden de doscientos a trescientos gramos de ligante residual por metro cuadrado (200 a 300 g/m²).
- No se abrirá paso del tránsito en la superficie en que ha sido aplicado el riego de liga. a menos que el interventor lo autorice.

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El tránsito de diseño, exploración geotécnica y condiciones ambientales permitieron definir 1 unidad de diseño, la cual aplica para toda la longitud del proyecto.
2. La exploración geotécnica y condiciones ambientales permitieron definir una (1) zona homogénea, la cual aplica para toda la longitud del proyecto.
3. La exploración geotécnica a partir de 1 apique permitió sectorizar y resumir las propiedades propias de los materiales que conforman la estructura de pavimento existente, además de la subrasante, las cuales se muestran de manera resumida en la Tabla 33, y pueden ser consultados en el informe geotécnico desarrollado para el proyecto.

Tabla 33. Características de la subrasante

SECTOR	DIRECCION	APIQUE	CBR ANTES DE INMERSION %	CBR DESPUES DE INMERSION%	AASTHO IG %	PROP. INDICE %	PDC %	EXPANSION %	ESPESOR MATERIAL GRANULAR
4	Calle 26 entre carrera 22 y carrera 19	4	4.5	3.1	8.5	10.5	5.0	0.23	0.35
		5	5.1	3.2	7.5	8.9	9.1	0.26	0.35
		PROMEDIO	4.8	3.2	8.0	9.7	7.1	0.2	0.4

Fuente: Tabla 4 - Estudio geotécnico realizado por APP control Ingeniería SAS.

4. Para este caso, y considerando que únicamente se dispone de un (1) apique para la caracterización de la subrasante y la estructura del pavimento existente, el espesor del material granular hallado en la exploración (hasta 0,35 m) se tomará en caso de lograr aprovecharse como capa estructural como un factor de seguridad en el comportamiento estructural del pavimento.
5. Los parámetros de resistencia de la subrasante de diseño se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 34. Características de diseño de la subrasante por unida de diseño

Unidad de diseño	1	
Abscisa inicio	K0+000	K0+000
Abscisa fin	K0+333	K0+088.758
CBR (%)	3.10	
Mr (Kg/cm²)	363	
Mr (lb(pulg²)	5271	
Mr (N/m²)	3.63E+07	
Mr (MPa)	36.3	
K (Kg/cm³)	2.78	
K (lb/pulg³)	100.4	
K (MPa/m)	27.8	

Fuente: El estudio.

6. La estructura de pavimento deberá diseñarse y ejecutarse conforme a la normatividad vigente del INVÍAS (Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, edición 2022). Los materiales utilizados deberán cumplir con las especificaciones técnicas correspondientes al nivel de tránsito NT2 – Clase B. Estas especificaciones pueden ser consultadas y descargadas en la página web oficial del INVÍAS.

7. En la Tabla 35 se presentan las estructuras de pavimento flexible analizadas en este informe, en negrita se resalta la estructura de pavimento recomendada a implementar en el proyecto en caso de decidirse implementar una estructura en pavimento flexible.

8. Debido a que las exploraciones de campo son puntuales, en caso de encontrar suelos con capacidades de soporte evidentemente menores a las consideradas, se deberán realizar las labores de mejoramiento en campo a juicio del profesional responsable de la obra e interventoría.

Tabla 35. Resumen alternativas analizadas pavimento flexible

	ai	mi	E (MPa)	μ
Carpeta asfáltica	0.37	-	2170	0.35
Base granular	0.13	1.0	192	0.40
Subbase granular	0.11	0.80	104	0.40
Subrasante			36.3	0.45

Nivel de confianza, R			85%	
Desviación estándar. So			0.45	
Nivel de serviciabilidad inicial, P_0			4.2	
Nivel de serviciabilidad final, Pt			2.0	
Tránsito de diseño, Ejes Equiv a 8.2 ton cd/pd			1191461	
CBR subrasante saturada, %			3.10	
MR de diseño, MPa			36.3	
			ALTERNATIVA, e (cm)	
SÍMBOLO	CÓDIGO	MATERIAL	1	2
	MDC - 19	Mezcla Densa en Caliente INV 450-22	8	9
	BG - 38	Base Granular INV 330-22	15	20
	SBG-50	Sub Base Granular INV 320-22	55	45
Espesor de la estructura (cm)			78	74
Cumple criterio AASHTO			SI	SI

Notas:

1- Espesores en cm.

2- En negrita estructura recomendada

RESUMEN VALORES DE DISEÑO
AASHTO

SN Requerido	3.71	
SN Aportado	3.84	3.89

RESUMEN PORCENTAJES DE
CONSUMO REVISIÓN RACIONAL

Deformación radial admisible por tracción en la base de la carpeta asfáltica		85.7	78.5
Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante		60.9	63.2
Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante	D-K	29.9	31.0
	CRR	95.4	98.8
Deflexión admisible del modelo estructural		90.0	85.6

Fuente: El estudio

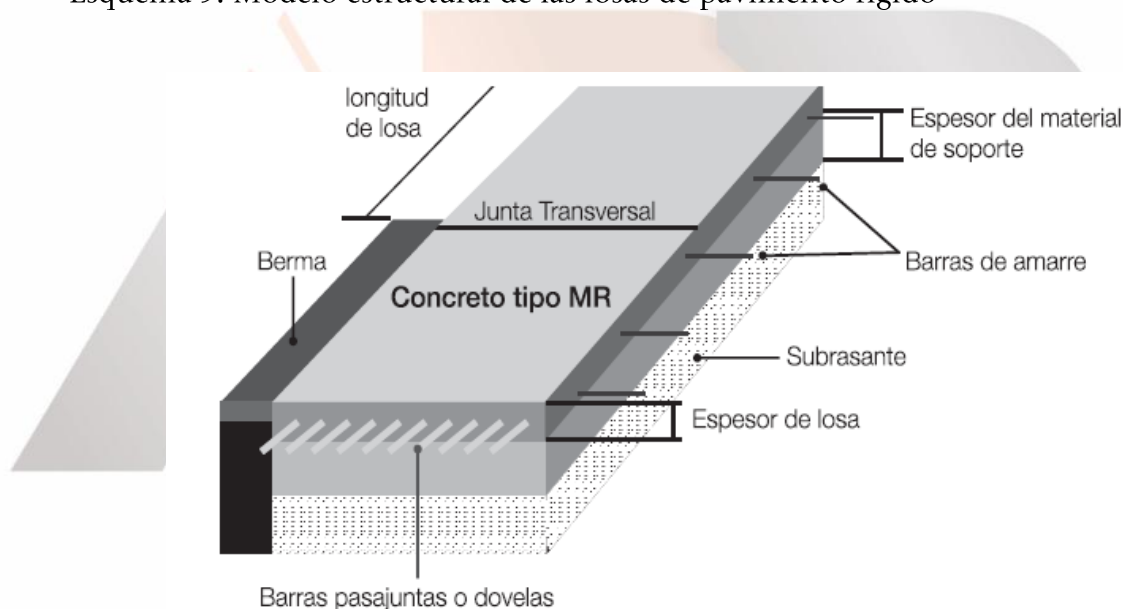
9. En La Tabla 36 se presentan las estructuras de pavimento rígido analizadas en este informe, en negrita se resalta la estructura de pavimento recomendada a implementar en el proyecto en caso de decidirse implementar una estructura en pavimento rígido.

Tabla 36. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.

SÍMBOLO	CÓDIGO	MATERIAL	Espesor cm
	Losa de concreto	Concreto hidráulico MR 4.0 MPa INV 500-22	23
	SBG-50	Sub Base Granular SBG-50 INV 320-22 CBR > 30%	15

Fuente: El estudio

Esquema 9. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

- Concreto tipo: 4.0 MPa
- Espesor de la losa: 23 cm.
- Material de soporte tipo: Subbase granular CBR $\geq$ 30%, clase B.
- Espesor material de soporte: 15 cm
- Barras pasajuntas o dovelas: D= 1 1/8 pulg lisa, longitud de 40 cm, separadas cada 30 cm, engrasadas en una de sus puntas.
- Barras de amarre: D=1/2 Pulg, longitud 85 cm, separadas cada 120 cm.

- Berma: Se garantizará por sardineles de confinamiento o losas contiguas que se encuentren en buen estado.

10. Si las condiciones de desarrollo de la vida útil de la estructura cambian, se deberán recalcular los espesores de refuerzo a que haya lugar.

11. En la Tabla 37 se presenta un análisis económico de estas alternativas según descripción y precios de ítems de precios unitarios de la gobernación de Boyacá del año 2025, donde se presenta el valor por metro cuadrado de estructura.

Tabla 37. Evaluación económica de alternativas.

MATERIAL	Valor Unitario \$	Unidad	Alt flexible 1	Alt flexible 2	Alt flexible - Reforzada	Alt rígida
Mezcla Densa en Caliente	1127227.78	m ³	8	9	9	0
Base Granular	145808.19	m ³	15	20	20	0
Sub Base Granular	140355.91	m ³	55	45	25	15
Mejoramiento subrasante con afirmado	106587.96	m ³	0	0	0	0
Losa MR39	998846.54	m ³	0	0	0	0
Losa MR40	1006494.42	m ³	0	0	0	23
Imprimación	4913.16	m ²	1	1	1	0
Geomalla	24961	m ²	0	0	1	0
Adoquín en concreto, e=8cm	129473.04	m ²	0	0	0	0
Altura excavación	33952.53	m ³	78	74	54	38
Acero f'y=280 MPa	6843.45	Kg	0	0	0	1.32
Acero f'y=420 MPa	7675.05	Kg	0	0	0	2.89
Transporte materiales asfálticos***	3452.4	m ³ /Km	8	9	9	0
Transporte materiales granulares***	2765.1	m ³ /Km	70	65	45	15
Costo inicial (en miles de pesos)		\$/m ²	273.7	274.4	251.2	306.6
Porcentaje considerado para rehabilitación		%	70	70	71	0
Costo considerado para rehabilitación		\$/m ²	191.6	192.1	175.9	0.0
Año de rehabilitación		año	10	10	10	0
Tasa de descuento anual**			9	9	9	9
Valor Presente Rehabilitación		\$/m ²	80.9	81.1	74.3	0.0
Total Valor presente neto (en miles de pesos)		\$/m ²	354.7	355.5	325.5	306.6

Nota:

* Valor de la excavación por efectos de la altura total de la estructura

** Tasa Social de Descuento recomendada por el DNP para proyectos de inversión pública

*** Distancia de acarreo materiales asfálticos 24 Km (Planta EVM)

**** Distancia de acarreo materiales granulares 24 Km (Planta EVM)

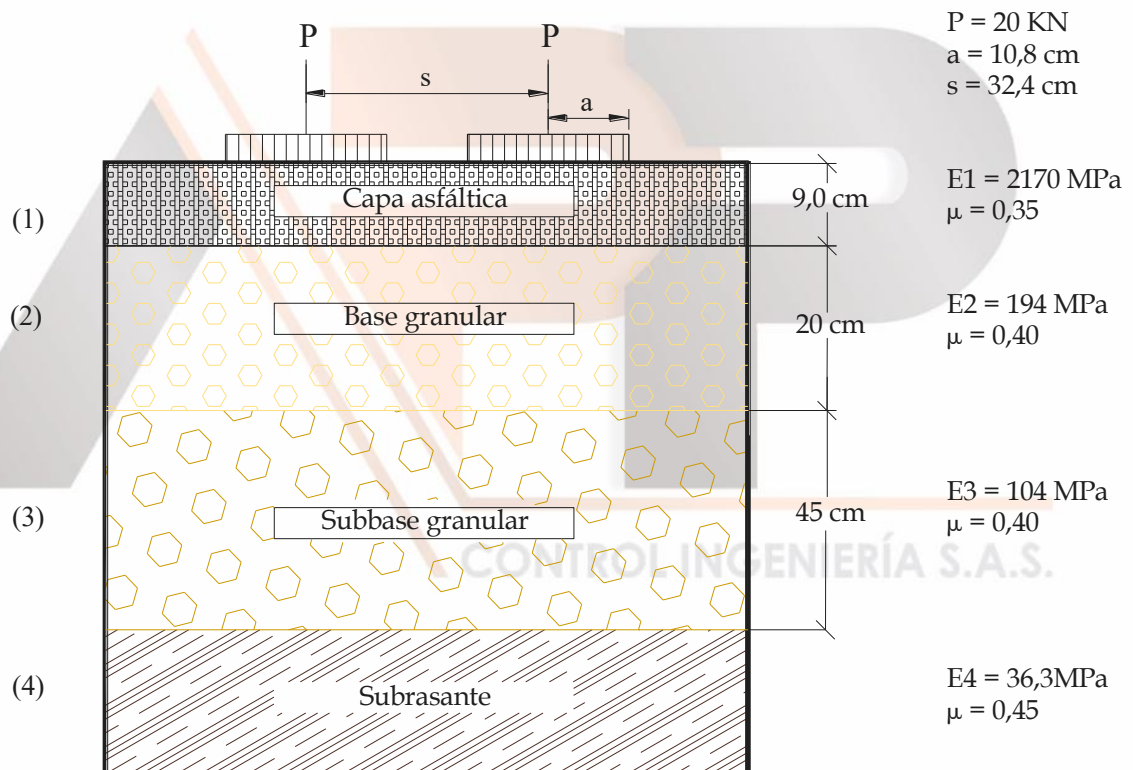
Fuente: El estudio

12. De la Tabla 37 se puede concluir que la alternativa de menor costo presente neto evaluado a periodo de análisis de 20 años corresponde a la alternativa de pavimento rígido, pero presenta costos iniciales mayores para su implementación comparándola con alternativas de pavimentos flexibles, no obstante y teniendo en

cuenta el componente económico y técnico del proyecto, se recomienda la implementación de la alternativa pavimento flexible reforzada con geomalla biaxial (Ver Esquema 11), que presenta ventajas en cuanto a menores restricciones en la profundidad de implantación del pavimento por interacción con redes de servicios públicos como alcantarillados existentes, estructura que adicionalmente presenta ventajas económicas frente a otras alternativas. Por lo tanto, la alternativa seleccionada es la del Esquema 10, a implementar en el proyecto.

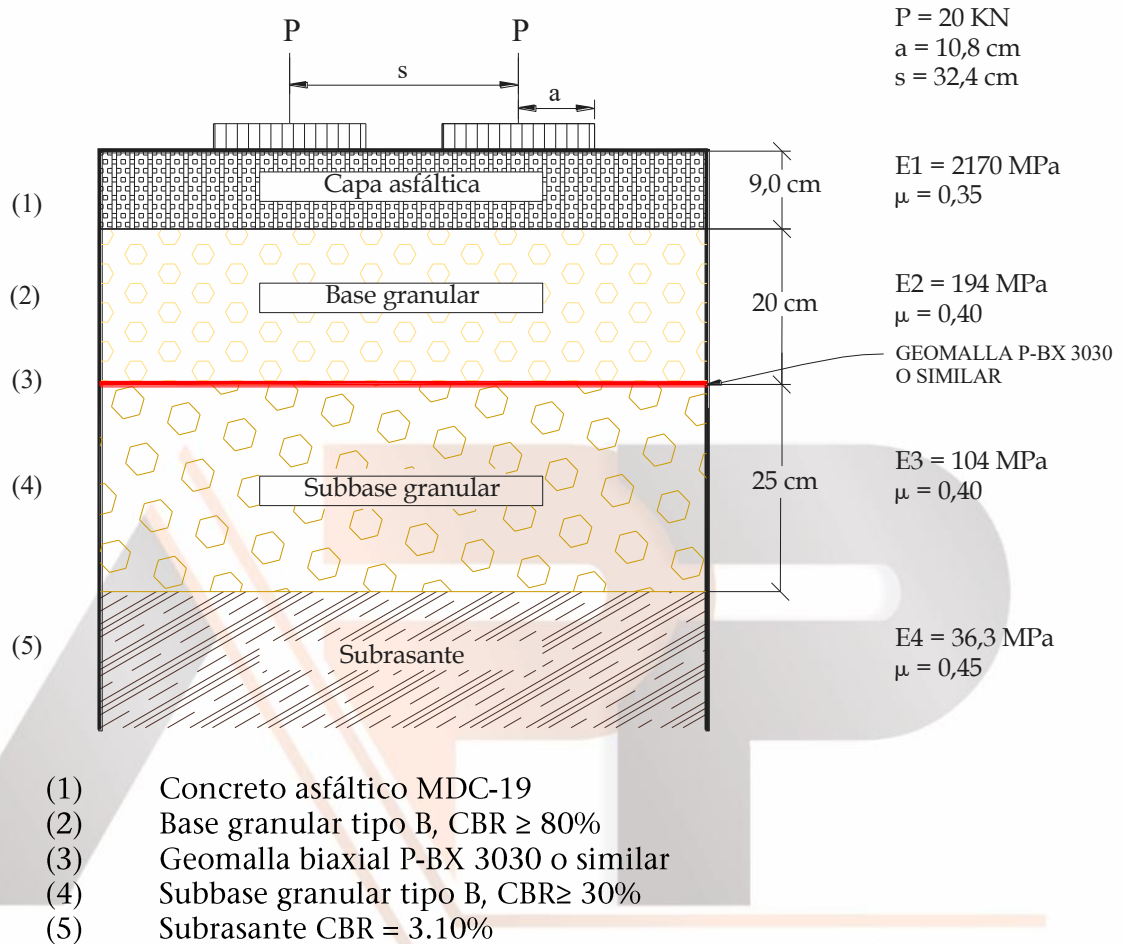
13. A continuación, se presentan los modelos estructurales recomendados a implementar en el proyecto según tipo de estructura.

Esquema 10. Modelo estructural del pavimento flexible recomendado

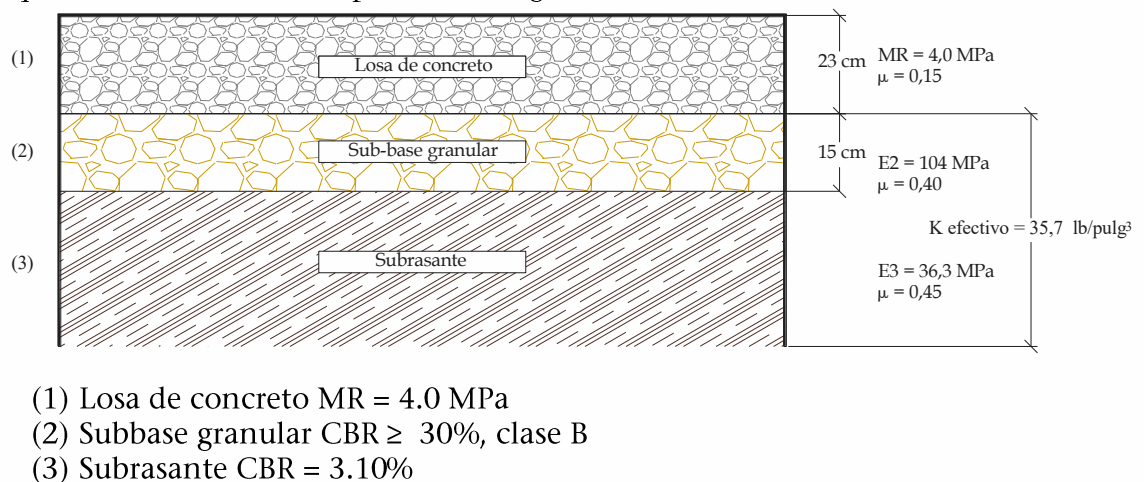


- (1) Concreto asfáltico MDC-19
- (2) Base granular tipo B, CBR $\geq 80\%$
- (3) Subbase granular tipo B, CBR $\geq 30\%$
- (4) Subrasante CBR = 3.10%

Esquema 11. Modelo estructural del pavimento flexible reforzado con geomalla biaxial recomendado



Esquema 12. Estructura de pavimento rígido recomendada



Recomendaciones

1. Se recomienda proyectar una pendiente transversal Bombeo $\geq 2\%$ para cada uno de los materiales del pavimento, obteniendo una evacuación rápida de las aguas de escorrentía superficial y como consecuencia el buen funcionamiento de la estructura.
2. El suelo de fundación de la estructura de pavimento debe ser aprobado por el ingeniero Geotécnista o de suelos.
3. Debido a que las exploraciones de campo son puntuales, en caso de encontrar suelos con capacidades de soporte evidentemente menores a las consideradas (CBR = 3.1%), se deberán realizar las labores de mejoramiento de campo necesarias.
4. Se recomienda utilizar como producto de sellante de las juntas SIKAROAD y SIKAFLEX 1CSL o productos similares.
5. Se recomienda instalar previamente a la estructura de pavimento los diferentes sistemas de drenaje tanto superficial y subsuperficial, así como las redes de servicios públicos, para evitar futuras intervenciones a la estructura de pavimento, y con esto asegurar la vida útil de la estructura de pavimento con un adecuado nivel de servicio.
6. Durante la etapa constructiva los materiales deberán someterse a controles de calidad en cuanto a plasticidad, durabilidad, gradación, estabilidad, compactación y demás que estipulen las normas vigentes, para así garantizar el buen desempeño en conjunto con la estructura del pavimento.
7. Para que la estructura se mantenga dentro de las condiciones de durabilidad, seguridad y confort para los usuarios, es recomendable hacer un seguimiento al pavimento mediante inspecciones visuales que permitan identificar deterioros que puedan ser corregidos a tiempo y no incurrir en gastos elevados.

8. Para la etapa de replanteo se recomienda que sea dirigido por un Ingeniero Civil o de Transporte y Vías con experiencia en este tipo de proyectos.
9. Si por algún motivo es necesaria la construcción de losas irregulares, estas deben ser reforzadas con dos parrillas de barras #4 separadas cada 0.20m y de $f'y = 420$ MPa.
10. En las zonas de transición con estructuras existentes (e4estructuras de pavimento al inicio y fin del tramo a intervenir), se deberá realizar un aumento gradual del espesor de la losa, con espesor final equivalente al 120% del espesor inicial, desarrollado en una longitud mínima de 1,5 m.



8 LIMITACIONES

1. Los resultados obtenidos en el informe, las conclusiones y recomendaciones dadas, están basados en el estudio de suelos adelantado por APP control ingeniería S.A.S., y condiciones de operación de tránsito esperadas para el proyecto, por lo que cualquier cambio implicará nuevas condiciones que deberán ser evaluadas en el estudio de tránsito, geotécnico y estructural del pavimento.
2. El presente informe no contempla el análisis de la mezcla asfáltica (granulometrías y contenidos de asfalto), pues no se tiene información de los materiales que se utilizaran, ni está en el alcance de la propuesta presentada.
3. El análisis de la estructura de pavimento no contempla la identificación de sitios geológicamente inestables, con deficiencias en la fundación y eventos hidrológicos que amenacen la estabilidad de la estructura.
4. Si durante la construcción de la estructura, aparecen circunstancias no previstas en este informe, se debe avisar inmediatamente al Ingeniero Consultor para buscar las soluciones y recomendaciones más convenientes.

Cordialmente.



CARLOS AUGUSTO VARGAS IGUA
Ingeniero civil
Especialista en Geotécnia vial y pavimentos
Especialista en gerencia de proyectos de construcción
M.P. 25202-100599 CND

Paipa, septiembre de 2025

9 ANEXOS

Lista de anexos

Anexo 1. Tablas de proyección del tránsito de diseño

Anexo 2. Determinación de SN requeridos pavimentos flexibles

Anexo 3. Espesores propuestos estructuras de pavimentos flexibles método AASHTO-93

Anexo 4. Modelaciones BISAR 3.0 de la Shell

Anexo 5. Revisión mecanicista de estructuras de pavimentos flexibles

Anexo 6. Determinación módulo de reacción afectivo de la subrasante K_f

Anexo 7. Determinación del espesor de la losa, ecuación AASHTO pavimentos rígidos

Anexo 8. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Esfuerzos)

Anexo 9. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Deflexiones)

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Anexo 1. Tablas de proyección del tránsito de diseño



Tránsito pavimento flexible

TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL								
TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SOBRE LA VÍA	TIPO DE VEHÍCULO							TOTAL
	AUTOS	BUSES	C2- P	C2- G	C3 - C4	C5	>C5	
								
	TPDS	1578	193	39	25	4	0	
% TIPO DE VEHÍCULO	85.8%	10.5%	2.1%	1.4%	0.2%	0.0%	0.0%	1839
								100%

Factores adoptados y cálculo de factor camión	
F. Direcc, Fd	1.00
F. Distrib, Fca	0.75
Parámetro Zr	1.037
F. Camión Fc	0.85

Tránsito de diseño pavimento Flexible				
Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%)	5.0%			
Nivel de Confianza, (Nc)	85%			
Valor del parámetro Zr	1.037			
Periodo de diseño, n	5	10	15	20
Fp	5.66	12.89	22.11	33.89
N	343 922	783 242	1 343 482	2 059 277
Tránsito atraído, Tat	51 588	117 486	201 522	308 892
Tránsito generado, TG	51 588	117 486	201 522	308 892
Tránsito desarrollado, TD	17 196	39 162	67 174	102 964
N _{Dis}	464 295	1 057 377	1 813 701	2 780 024
N' = N * 1.127	523 171	1 191 461	2 043 693	3 132 554

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Tránsito pavimento rígido

TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL								
TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SOBRE LA VÍA	TIPO DE VEHÍCULO							TOTAL
	AUTOS	BUSES	C2- P	C2- G	C3 - C4	C5	>C5	
								
TPDS	1578	193	39	25	4	0	0	1839
% TIPO DE VEHÍCULO	85.8%	10.5%	2.1%	1.4%	0.2%	0.0%	0.0%	100%

Tránsito de diseño pavimento rígidos D = 175 mm				
Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%)	5.0%			
Nivel de Confianza, (Nc)	85%			
Valor del parámetro Zr	1.037			
Periodo de diseño, n	5	10	15	20
Fp	5.66	12.89	22.11	33.89
N	296 604	675 482	1 158 642	1 775 956
Tránsito atraído, Tat	44 491	101 322	173 796	266 393
Tránsito generado, TG	44 491	101 322	173 796	266 393
Tránsito desarrollado, TD	14 830	33 774	57 932	88 798
N _{Dis}	400 415	911 901	1 564 167	2 397 541
N' = N * 1.127	451 191	1 027 537	1 762 516	2 701 568

Tránsito de diseño pavimento rígidos D = 200 mm				
Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%)	5.0%			
Nivel de Confianza, (Nc)	85%			
Valor del parámetro Zr	1.037			
Periodo de diseño, n	5	10	15	20
Fp	5.66	12.89	22.11	33.89
N	299 186	681 362	1 168 729	1 791 417
Tránsito atraído, Tat	44 878	102 204	175 309	268 713
Tránsito generado, TG	44 878	102 204	175 309	268 713
Tránsito desarrollado, TD	14 959	34 068	58 436	89 571
N _{Dis}	403 901	919 839	1 577 784	2 418 413
N' = N * 1.127	455 119	1 036 482	1 777 860	2 725 088

Tránsito de diseño pavimento rígidos D = 225 mm				
Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%)	5.0%			
Nivel de Confianza, (Nc)	85%			
Valor del parámetro Zr	1.037			
Periodo de diseño, n	5	10	15	20
Fp	5.66	12.89	22.11	33.89
N	300 232	683 744	1 172 815	1 797 679
Tránsito atraído, Tat	45 035	102 562	175 922	269 652
Tránsito generado, TG	45 035	102 562	175 922	269 652
Tránsito desarrollado, TD	15 012	34 187	58 641	89 884
N _{Dis}	405 313	923 054	1 583 300	2 426 867
N' = N * 1.127	456 710	1 040 105	1 784 076	2 734 613

Anexo 2. Determinación de SN requeridos pavimentos flexibles

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
85 % Zr=-1.037 So 0.45

Serviciabilidad inicial y final
PSI inicial 4.2 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante
Mr 5271 psi

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)		Coefficiente de transmisión de carga - (J)	
Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)		Coefficiente de drenaje - (Cd)	

Tipo de Análisis
☒ Calcular SN **W18 =** 1191461

Número Estructural
SN = 3.71

☐ Calcular W18

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Anexo 3. Espesores propuestos estructuras de pavimentos flexibles método AASHTO-93

Alternativa 1

Capa	Coefficiente estructural, a_i	Espesor, h_i (pulg)	Espesor, h_i (cm)	Coefficiente de drenaje, m_i	SN $a_i \cdot h_i \cdot m_i$
Concreto Asfáltico	0.37	3.15	8		1.17
Base granular	0.13	5.91	15	1	0.77
Subbase granular	0.11	21.65	55	0.8	1.91

SN tránsito	3.71	$\leq$	SN estructura	3.84
-------------	------	--------	---------------	------

Cumple la condición

Alternativa 2

Capa	Coefficiente estructural, a_i	Espesor, h_i (pulg)	Espesor, h_i (cm)	Coefficiente de drenaje, m_i	SN $a_i \cdot h_i \cdot m_i$
Concreto Asfáltico	0.37	3.54	9		1.31
Base granular	0.13	7.87	20	1	1.02
Subbase granular	0.11	17.72	45	0.8	1.56

SN tránsito	3.71	$\leq$	SN estructura	3.89
-------------	------	--------	---------------	------

Cumple la condición

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Anexo 4. Modelaciones BISAR 3.0 de la Shell

 BISAR 3.0 - Block Report Urbanas Paipa 2025 - T4 System 1: Alternativa 1									
Loads									
Structure									
Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)		Shear Angle (Degrees)
							Stress (MPa)	Radius (m)	
1	0.080	2.170E+03	0.35	1	2.000E+01	5.458E-01	0.000E+00	1.080E-01	0.000E+00
2	0.150	1.520E+02	0.40	2	2.000E+01	5.458E-01	0.000E+00	1.080E-01	1.620E-01
3	0.550	1.040E+02	0.40						0.000E+00
4		3.630E+01	0.45						0.000E+00

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses			Strains			Displacements		
					XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX μ strain	YY μ strain	ZZ μ strain	UX (μ m)	UY (μ m)	UZ (μ m)
1	1	0.000E+00	1.620E-01	0.000E+00	-1.600E+00	-1.393E+00	-5.458E-01	-4.248E+02	-2.958E+02	2.313E+02	0.000E+00	-2.349E+01	7.823E+02
2	1	0.000E+00	1.620E-01	8.000E-02	1.042E+00	8.611E-01	-2.270E-01	3.781E+02	2.653E+02	-4.116E+02	0.000E+00	1.362E+01	7.742E+02
3	4	0.000E+00	0.000E+00	7.801E-01	5.277E-05	-3.388E-04	-1.418E-02	1.815E+02	1.658E+02	-3.872E+02	0.000E+00	0.000E+00	4.453E+02



BISAR 3.0 - Block Report
Urbanas Paipa 2025 - T4
System 2: Alternativa 2

Structure

Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Vertical		Horizontal (Shear)		Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
				Load Number	Load (kN)	Stress (MPa)	Load (kN)				
1	0.090	2.170E+03	0.35	1	2.000E+01	5.458E-01	0.000E+00	1.080E-01	0.000E+00	-1.620E-01	0.000E+00
2	0.200	1.920E+02	0.40	2	2.000E+01	5.458E-01	0.000E+00	1.080E-01	0.000E+00	1.620E-01	0.000E+00
3	0.450	1.040E+02	0.40								
4		3.630E+01	0.45								

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	Stresses			Strains			Displacements		
					XX (MPa)	YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX μ strain	YY μ strain	ZZ μ strain	UX (μ m)	UY (μ m)	UZ (μ m)
1	1	0.000E+00	1.620E-01	0.000E+00	-1.462E+00	-1.272E+00	-5.458E-01	-3.804E+02	-2.623E+02	1.893E+02	0.000E+00	-2.295E+01	7.438E+02
2	1	0.000E+00	1.620E-01	9.000E-02	9.542E-01	7.810E-01	-2.028E-01	3.465E+02	2.387E+02	-3.733E+02	0.000E+00	1.409E+01	7.344E+02
3	4	0.000E+00	0.000E+00	7.401E-01	8.824E-05	-3.424E-04	-1.469E-02	1.887E+02	1.715E+02	-4.014E+02	0.000E+00	0.000E+00	4.543E+02

Código:
INF-DIPAV-195-04
Versión: 01
Fecha: Sept 2025

Anexo 5. Revisión mecanicista de estructuras de pavimentos flexibles

Alternativa 1

CRITERIO	VALOR ADMISIBLE		VALOR DE SERVICIO	(VS/VA) *100%	CUMPLE O NO CUMPLE	
DEFORMACIÓN RADIAL ADMISIBLE POR TRACCIÓN EN LA BASE DE LA CARPETA ASFÁLTICA	εr Admisible=		4.41E-04	3.78E-04	86	CUMPLE
DEFORMACIÓN VERTICAL ADMISIBLE POR COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE	εz Admisible (NC=85%)		6.36E-04	3.87E-04	60.9	CUMPLE
ESFUERZO VERTICAL ADMISIBLE DE COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE	σz Admisible=	DORMON-KERHOVEN,(Kg/cm²)=	0.484	0.145	29.9	CUMPLE
		CRR de BÉLGICA,(Kg/cm²)=	0.152	0.145	95.4	CUMPLE
DEFLEXIÓN ADMISIBLE DEL MODELO ESTRUCTURAL	Δ Admisible, (mm)=		0.869	0.782	90.0	CUMPLE

Alternativa 2

CRITERIO	VALOR ADMISIBLE		VALOR DE SERVICIO	(VS/VA) *100%	CUMPLE O NO CUMPLE	
DEFORMACIÓN RADIAL ADMISIBLE POR TRACCIÓN EN LA BASE DE LA CARPETA ASFÁLTICA	εr Admisible=		4.41E-04	3.47E-04	79	CUMPLE
DEFORMACIÓN VERTICAL ADMISIBLE POR COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE	εz Admisible (NC=85%)		6.36E-04	4.01E-04	63.2	CUMPLE
ESFUERZO VERTICAL ADMISIBLE DE COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE	σz Admisible=	DORMON-KERHOVEN,(Kg/cm²)=	0.484	0.150	31.0	CUMPLE
		CRR de BÉLGICA,(Kg/cm²)=	0.152	0.150	98.8	CUMPLE
DEFLEXIÓN ADMISIBLE DEL MODELO ESTRUCTURAL	Δ Admisible, (mm)=		0.869	0.744	85.6	CUMPLE

Anexo 6. Determinación módulo de reacción afectivo de la subrasante Kef

Módulo de Reacción Efectivo de la Subrasa...

Archivo Resultados Ayuda

**MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE
METODO AASHTO 1993**

Unidades:
☒ U.S. ☐ S.I.

Módulo Resiliente de la Subrasante, Mr: 5271 lb/pulg²

Módulo de Reaccion de la Subrasante, Ks: 100.4 lb/pulg³ ¿Ks?

Espesor de la Subbase Granular, Dsb: 6 pulgadas

Módulo de la Subbase Granular, Esb: 15157 lb/pulg²

☐ Estrato Rocoso

Espesor Estimado Losa de Concreto, D: 9 pulgadas

Pérdida de Soporte, Ls: 1.5 ¿Ls?

Salir Reporte **Calcular**

Módulo de Reacción Compuesto, Kc: 267.5 lb/pulg³

Valores de K (lb/pulg ³)	Daño Relativo Ur
Ks 100.4	110.8
Kc 267.5	81.3

Daño Relativo Promedio, $\bar{U}_r$: 96.1

Módulo de Reacción Promedio, $\bar{K}_c$: 164.4 lb/pulg³

Módulo Efectivo de Reacción, Kef: 35.7 lb/pulg³

Anexo 7. Determinación del espesor de la losa, ecuación AASHTO pavimentos rígido

Ecuación AASHTO 93

Tipo de Pavimento
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)
 85 % Zr=-1.037 So 0.35

Serviciabilidad inicial y final
 PSI inicial 4.5 PSI final 2

Módulo de reacción de la subrasante
 k 35.7 pci

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) 2851613 Coeficiente de transmisión de carga - (J) 2.8

Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) 582.9 Coeficiente de drenaje - (Cd) 0.8

Tipo de Análisis
☒ Calcular D **W18 =** 2734613

Espesor de losa (plg)
D = 9.1

Calcular Salir

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Anexo 8. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Esfuerzos)

Posición en la losa	Autor	Esfuerzo de tensión (lb/pulg ²)	Módulo de rotura del concreto, Sc (lb/pulg ²)	(σ/Sc) * 100%
Esquina	Westergard	270.97	582.9	46.5
	Ioannides y otros	275.45		47.3
Interior	Westergard	211.10		36.2
Borde	Westergard	322.05		55.2



**Anexo 9. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto
(Deflexiones)**

Posición en la losa	Autor	Deflexión (pulg)	Deflexión (mm)
Esquina	Westergard	0.1386	3.52
	Ioannides y otros	0.1667	4.235
Interior	Westergard	0.0187	0.474
Borde	Westergard	0.0573	1.455

