GEOTECNIA VIAL Y DISEÑO DE PAVIMENTOS

SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO

«MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA»

Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias – Bolívar

Octubre de 2026

DESTINATARIOS

DESTINATARIO	COPIA DIGITAL	COPIA IMPRESA
DISTRITO TURÍSTICO Y CULTURAL DE CARTAGENA DE INDIAS – DEPARTAMENTO DE BOLÍVAR	01	01

EJECUCIÓN, REVISIÓN Y APROBACIÓN

VERSIÓN	MODIFICACIÓN			FECHA
01	Versión Inicial			Octubre 2026
TÍTULO DEL DOCUMENTO:	GEOTECNIA VIAL Y DISEÑO DE PAVIMENTOS - MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA			
DOCUMENTO No.:	001			
RESPONSABLES DE LA ELABORACIÓN	**Nombres:**			
	Firma:			
	Matrícula Profesional:			
	Fecha:	Octubre de 2026		

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 5
2. ALCANCE Y OBJETIVOS 6
2.1. ALCANCE 6
2.2. OBJETIVO GENERAL 6
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 6
3. LOCALIZACIÓN 7
3.1. LOCALIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO 7
2.2. LOCALIZACIÓN DEL SECTOR PUENTE LAS PALMAS 7
6. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA 10
6.1. METODOLOGÍA 10
6.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO 10
6.3. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD DE LA SUBRASANTE 10
6.4. GRANULOMETRÍA 13
6.5. CLASIFICACIÓN DE SUELOS 13
6.5.1. SISTEMA AASHTO 14
6.5.2. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS) 15
6.5.3. RESUMEN DE CLASIFICACIÓN 15
6.6. CAPACIDAD DE SOPORTE (CBR) DE LA SUBRASANTE 16
6.7. CLASIFICACIÓN DE SUBRASANTE Y CBR DE DISEÑO 19
7. MATERIALES VIALES 21
8. CONSIDERACIONES DE TRÁNSITO 22
9. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO 22
9.1. DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO AASHTO 93 22
9.2. PARÁMETROS DE DISEÑO 22
9.2.1. PERIODO DE DISEÑO 22
9.2.2. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (k) 22
9.2.3. TRÁNSITO 24
9.2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS LOSAS DE CONCRETO 24
9.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA 25
9.4. GEOMETRÍA Y MODULACIÓN DE LAS LOSAS 27
9.5. JUNTAS, BARRAS DE ANCLAJE Y PASADORES 27
9.6. REFUERZO DE LAS LOSAS 29
10. MANTENIMIENTO VIAL 31

10.1 MANTENIMIENTO DEL PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO 31
10.2. RESELLADO DE JUNTAS Y/O GRIETAS 31
10.2.1. DESCRIPCIÓN 31
10.2.2. MATERIALES 32
10.2.3. PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN 32
10.2.4. FRECUENCIA 34
11.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 35
12. REFERENCIAS 36
13. ANEXOS 36

1. INTRODUCCIÓN

El presente documento reúne el estudio de geotecnia vial y diseño de pavimentos del proyecto **«MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA»**, a cargo de la Secretaría de Infraestructura del Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias.

El proyecto se desarrolla en el sector del **Puente Las Palmas**, que hace parte de los accesos al sector de Manga y lo comunica con el Pie del Cerro, y en las vías y espacios públicos de su entorno inmediato, incluida la Avenida del Lago. Se trata de una conexión de uso cotidiano para el tránsito vehicular, de transporte público y peatonal, cuya estructura existente presenta deterioro que ha motivado intervenciones temporales y restricciones al paso de vehículos de carga pesada.

Como solución a la conexión, se plantea un puente de un solo vano, con luz libre hidráulica de 38,50 m, estribos localizados fuera del cauce y cimentación profunda en pilotes de 20 m, con la cota inferior de las vigas dispuesta un metro por encima de la cota máxima de lámina de agua definida en el estudio oceanográfico–hidrológico.

Los diseños incluyen el diseño geométrico y el urbanismo del sector: vía proyectada en pavimento rígido (concreto hidráulico MR 4,2 MPa sobre subbase granular, con juntas transversales con dovelas y juntas longitudinales con barras de amarre), bordillos, andenes en concreto con refuerzo en acero y losetas podotáctiles de alerta y de guía para garantizar la accesibilidad universal.

Con la intervención se busca mejorar la seguridad y la continuidad de la movilidad vehicular y peatonal en el sector, la accesibilidad a los barrios y servicios cercanos y el manejo de las aguas de escorrentía, así como la calidad del espacio público de su área de influencia.

Tabla 1. Datos generales del proyecto

PROYECTO	«MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA»
ENTIDAD	Secretaría de Infraestructura – Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias (Bolívar)
LOCALIZACIÓN	Sector Puente Las Palmas y Avenida del Lago, zona urbana de Cartagena de Indias (Manga – Pie del Cerro)
ELEMENTO PRINCIPAL	Puente de un solo vano, luz libre hidráulica de 38,50 m, estribos fuera del cauce, pilotes de 20 m
OBRAS COMPLEMENTARIAS	Vía proyectada en pavimento rígido, bordillos, andenes y losetas podotáctiles
PLANOS DE REFERENCIA	DISG_PUENTE LAS PALMAS – Planta general, diseño geométrico y urbanismo (4 hojas), versión 1.0, 14/10/2026

Fuente: Elaboración propia a partir de los planos de diseño geométrico y urbanismo del proyecto.

2. ALCANCE Y OBJETIVOS

2.1. ALCANCE

El presente documento desarrolla el estudio de geotecnia vial y diseño de pavimentos para el proyecto "*MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA*", con el fin de caracterizar geotécnicamente la subrasante de los tramos a intervenir y definir los parámetros de soporte requeridos para el diseño de la estructura de pavimento rígido.

2.2. OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio de geotecnia vial y diseño de pavimentos, a nivel de Fase III – Estudios y Diseños Definitivos, del proyecto denominado "*MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA*", garantizando el cumplimiento de la normativa técnica vigente del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) y de los lineamientos del Ministerio de Transporte.

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A continuación, se presentan los objetivos específicos del presente estudio:

- Establecer las características de materiales aptos para el buen desempeño en la estructura de pavimento.
- Caracterizar las variables que influyen en el diseño final de las estructuras de pavimento como el tránsito, los materiales, el suelo de fundación, entre otros.
- Proponer y analizar una solución estructural y funcional a la problemática de transitabilidad y conectividad identificada en el corredor vial.
- Diseñar la estructura de pavimento más adecuada de acuerdo con las condiciones de carga, medioambientales y geotécnicas del sector.
- Definir los espesores y la geometría adecuada para garantizar una estructura de pavimento resistente al paso de las cargas vehiculares y los factores medioambientales en la zona del proyecto durante su vida útil.
- Detallar las especificaciones técnicas requeridas para la ejecución del proyecto, dentro del tiempo establecido, y bajo los parámetros exigidos por la normatividad vigente.

3. LOCALIZACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto se localiza en el Distrito Turístico y Cultural de Cartagena de Indias, capital del departamento de Bolívar, en la región Caribe colombiana, sobre el litoral del mar Caribe. El Distrito se encuentra a una altitud aproximada de 2 m.s.n.m., en torno a las coordenadas 10°25' de latitud norte y 75°32' de longitud oeste.

Limita al norte y al occidente con el mar Caribe; al oriente con los municipios de Santa Catalina, Clemencia, Santa Rosa y Turbaco; y al sur con los municipios de Arjona y Turbaná. Su territorio incluye cuerpos de agua de especial relevancia, como la bahía de Cartagena, la Ciénaga de la Virgen y el sistema de caños y lagunas internas.

El clima es cálido tropical, con temperaturas medias anuales cercanas a 27 °C a 28 °C, humedad relativa elevada y régimen de lluvias bimodal (abril a junio y, con mayor intensidad, agosto a noviembre). Esta condición, sumada a la topografía plana y a los niveles freáticos altos, incide en el comportamiento de las estructuras, la cimentación y el drenaje superficial.



Figura 1. Localización del Distrito de Cartagena de Indias

Fuente: Wikipedia

2.2. LOCALIZACIÓN DEL SECTOR PUENTE LAS PALMAS

El Puente Las Palmas se ubica en el área urbana de Cartagena, en el sector de acceso a Manga, donde comunica este barrio con el Pie del Cerro. Su entorno inmediato es un área urbana consolidada, con tejido residencial y de servicios, espacios públicos y zonas verdes, y la Avenida del Lago como eje vial asociado. El puente salva un cuerpo de agua del sistema interno de la ciudad, cuya dinámica es objeto del estudio oceanográfico–hidrológico del proyecto.

La implantación general del diseño geométrico y del urbanismo del sector se presenta en las Figuras 2 y 3, con las vías proyectadas, el pavimento rígido existente, los andenes, los bordillos proyectados y los elementos existentes (arborización, postes y manholes).

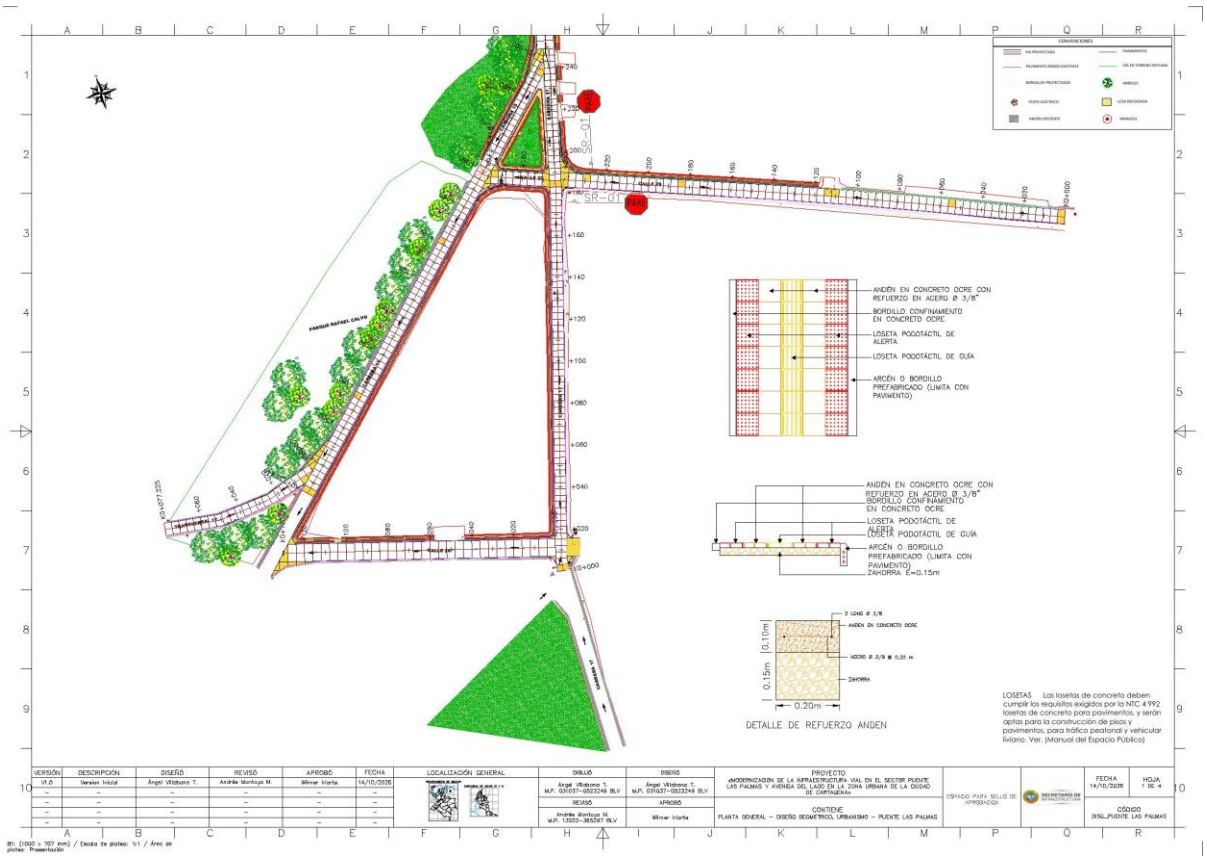


Figura 2. Planta general – diseño geométrico y urbanismo, hoja 1 de 4

Fuente: Plano DISG_PUENTE LAS PALMAS, Secretaría de Infraestructura (14/10/2026).

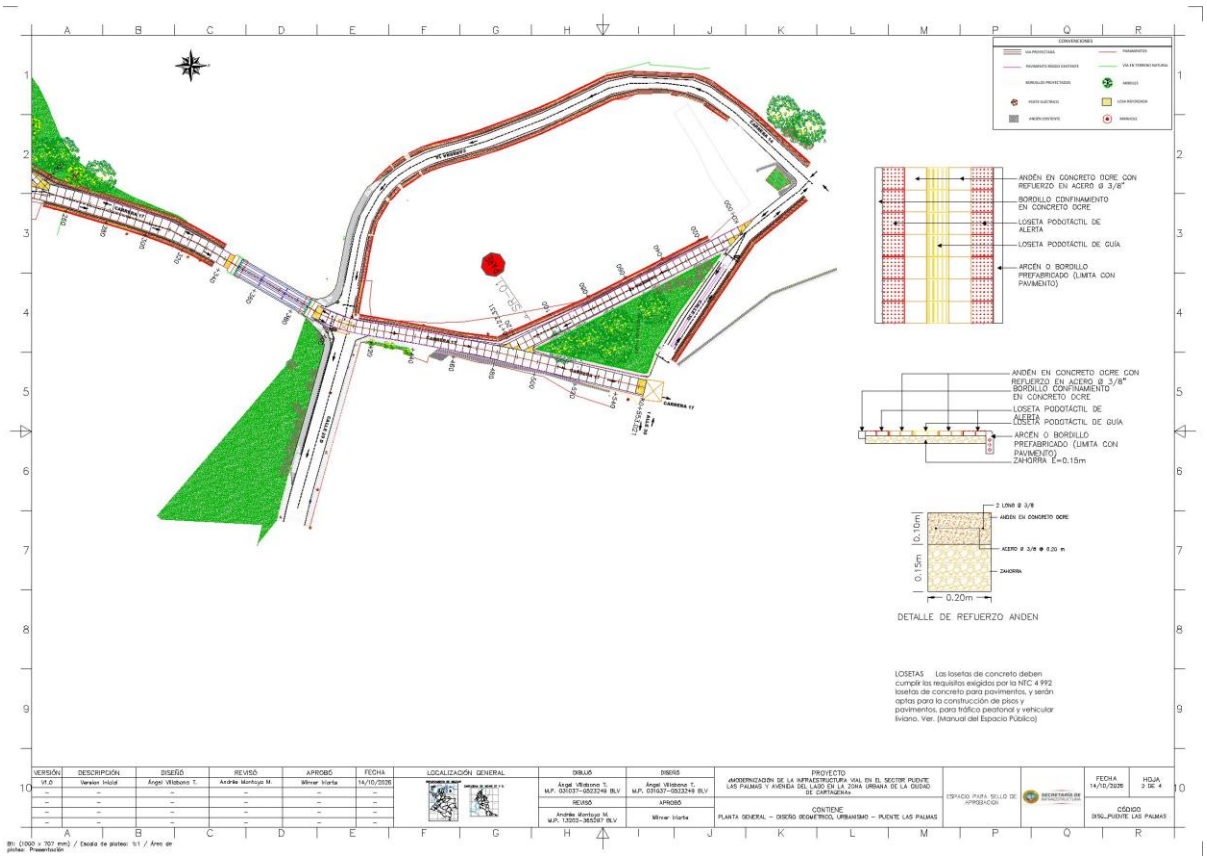


Figura 3. Planta general – diseño geométrico y urbanismo, hoja 2 de 4

Fuente: Plano DISG_PUENTE LAS PALMAS, Secretaría de Infraestructura (14/10/2026).

6. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

A continuación se resumen los principales resultados obtenidos de la caracterización de geotecnia para el proyecto.

6.1. METODOLOGÍA

Para caracterizar las propiedades de los suelos existentes en el área del proyecto se desarrolló una etapa de exploración geotécnica, la cual consistió en la realización de apiques a lo largo de los tramos en estudio. A partir de estas labores, se definieron los estratos del subsuelo, hasta la profundidad mencionada, con el propósito de realizar los ensayos de campo y laboratorio requeridos para estimar las propiedades de los materiales que van a servir como fundación de las obras a proyectar. En particular, se realizaron los siguientes ensayos:

- Humedad natural del suelo:
    - I.N.V. E-122-22. Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo – agregado.
- Límites de Atterberg:
    - I.N.V. E-125-22. Determinación del límite líquido de los suelos.
    - I.N.V. E-126-22. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- Análisis granulométrico de suelos por tamizado:
    - I.N.V. E-123-22. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.
- Capacidad de soporte de la subrasante:
    - I.N.V. E-148-22. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.

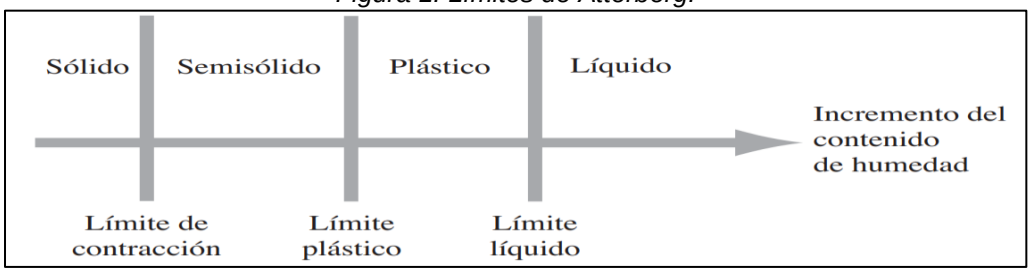
6.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización de los suelos de subrasante, los cuales son contrastados con criterios y especificaciones definidos en la literatura técnica asociada a la mecánica de suelos y la geotécnica para pavimentos.
En particular, el análisis comprende los aspectos asociados a la humedad, plasticidad, granulometría, clasificación y capacidad de soporte de los suelos identificados en el corredor. De esta forma se busca definir si los suelos del proyecto garantizan una fundación adecuada para las estructuras de pavimento a considerar o si se requieren labores de mejoramiento de sus propiedades mecánicas.

6.3. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD DE LA SUBRASANTE

En la literatura asociada al estudio de la mecánica de suelos se define que, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos, delimitados por los Límites de Consistencia o Límites de Atterberg, tal como se presenta en la Figura 1.

Figura 1. Límites de Atterberg.



Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja.

Diferentes apiques se realizaron, siguiendo las recomendaciones de INVIAS para proyectos viales. A partir de los ensayos realizados a las muestras tomadas en campo, se determinaron los porcentajes de humedad natural y los límites de Atterberg, específicamente los valores de límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP), los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Humedad y Consistencia

APIQUE No.	PROFUNDIDAD DEL ESTRATO (m)		HUMEDAD (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
	LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR				
Apique 1	0.00	1.50	16.4	30	23	7
Apique 2	0.00	1.50	17.0	32	21	11
Apique 3	0.00	1.50	17.4	31	24	7
Apique 4	0.00	1.50	13.7	31	22	9
Apique 5	0.00	1.50	18.2	33	22	11

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados presentados en la tabla anterior permiten estimar algunas características del suelo que serán relevantes al momento de definir sus propiedades mecánicas como material de fundación. Entre estas se pueden mencionar la compresibilidad, la plasticidad, el contenido de arcillas y el potencial de expansión o hinchamiento. La Tabla 2 define un criterio para estimar la compresibilidad del suelo en función de su Límite Líquido.

Tabla 2. Compresibilidad del Suelo.

TÉRMINO UTILIZADO	LÍMITE LÍQUIDO (LL)
Ligera a baja compresibilidad	0 a 29
Moderada a intermedia compresibilidad	30 a 50
Alta compresibilidad	mayor a 50

Fuente: Mecánica de Suelos, K. Terzaghi.

Contrastando los valores de límite líquido de la Tabla 3 con el criterio de la Tabla 4, se puede determinar que los suelos de subrasante del presente estudio presentan compresibilidad ligera a moderada a intermedia (LL entre 30 % y 33 %) en los demás apiques.

Tabla 3. Resultados de compresibilidad del suelo

APIQUES	TERMINO UTILIZADO
Todos	Moderada a intermedia compresibilidad (LL entre 30 % y 33 %)

Fuente: Elaboración Propia

Por otra parte, las siguientes tablas presentan criterios de clasificación de resistencia y características basados en el índice de plasticidad.

Tabla 4. Clasificación de los suelos según su índice de plasticidad

TÉRMINO UTILIZADO	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)	RESISTENCIA EN ESTADO SECO
No Plástico	0 a 3	Muy Baja
Ligeramente Plástico	4 a 14	Ligera
Medianamente Plástico	15 a 30	Mediana
Muy Plástico	Mayor a 30	Alta

Fuente: Mecánica de Suelos, K. Terzaghi.

Tabla 5. Características del suelo de acuerdo con su índice de plasticidad.

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	CARACTERÍSTICA
IP > 20	Suelos Muy Arcillosos
20 > IP > 10	Suelos Arcillosos
10 > IP > 4	Suelos Poco Arcillosos
IP = 0	Suelos Exentos de Arcilla

Fuente: Mecánica de Suelos, K. Terzaghi.

De acuerdo con los valores de índice de plasticidad de los tramos de interés y los criterios de las tablas anteriores, se puede observar que los suelos estudiados son ligeramente plásticos, y corresponden en su mayoría a suelos arcillosos, ver Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación del suelo de subrasante de los tramos de acuerdo con su índice de plasticidad.

RESISTENCIA EN ESTADO SECO	CARACTERÍSTICA DE ACUERDO CON SU PLASTICIDAD
Ligeramente plástico	Suelos arcillosos

Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito del INVIAS presenta el siguiente criterio para calificar cualitativamente el potencial de expansión del suelo de subrasante a partir de su límite líquido y su índice de plasticidad, ver Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de los suelos según su potencial de hinchamiento.

LL (%)	IP (%)	CLASIFICACIÓN DEL HINCHAMIENTO POTENCIAL
> 60	> 35	Alto
50 - 60	25 - 35	Marginal
< 50	< 25	Bajo

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito, INVIAS.

Finalmente, con base en este criterio, los suelos de subrasante de las vías analizadas son categorizados como de bajo potencial de hinchamiento.

Tabla 8. Resultado de la clasificación de los suelos según su potencial de hinchamiento.

TRAMOS	CLASIFICACIÓN DEL HINCHAMIENTO POTENCIAL
Todos	Bajo (LL < 50 % e IP < 25 %)

Fuente: Elaboración Propia.

6.4. GRANULOMETRÍA

A cada una de las muestras tomadas en los tramos analizados se le realizó un análisis granulométrico. Este estudio consiste en la determinación de la gama de tamaños de partículas presentes en los suelos, expresados como un porcentaje de su peso seco total. Los resultados obtenidos para las muestras estudiadas se resumen en las tablas siguientes.

Tabla 9. Resultados del análisis granulométrico

APIQUE No.	MUESTRA No.	GRANULOMETRÍA (%) QUE PASA							
		1"	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 10	N° 40	N° 200
Apique 1	1	100.0	100.0	100.0	100.0	98.3	91.9	84.9	77.7
Apique 2	1	100.0	100.0	100.0	100.0	98.3	90.4	84.1	75.4
Apique 3	1	100.0	100.0	100.0	100.0	98.5	93.5	85.2	75.8
Apique 4	1	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	93.3	83.5	75.3
Apique 5	1	100.0	100.0	100.0	100.0	98.6	92.9	86.5	77.6

Fuente: Elaboración Propia.

6.5. CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En esta sección se describen algunas metodologías reconocidas internacionalmente para clasificar los suelos en grupos y subgrupos en función de sus propiedades mecánicas y el comportamiento esperado para sus aplicaciones de ingeniería. Específicamente, se utilizarán dos sistemas de clasificación ampliamente utilizados por la comunidad ingenieril: el sistema de

la American Association of State Highway Transportation Officials (AASHTO) y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Ambos sistemas están basados en las propiedades de humedad, consistencia y granulometría del suelo, las cuales fueron abordadas en secciones anteriores.

6.5.1. SISTEMA AASHTO

Este sistema está definido por la norma ASTM D-3282. La Tabla 10 resume el método de clasificación de suelos de la AASHTO, el cual clasifica el suelo en siete grupos (A1 – A7) con algunos subgrupos particulares, y finalmente describe cualitativamente el comportamiento del suelo clasificado como material de subrasante.

Tabla 10. Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO.

Clasificación general	**Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)**						
	A-1			**A-2**			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina		Limo o grava arcillosa y arena		
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Clasificación general	**Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)**			
Grupo de clasificación	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6†
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)				
Núm. 10				
Núm. 40				
Núm. 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo			

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$
†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja.

Adicionalmente, para complementar la evaluación de la calidad del suelo como material de subrasante de manera cuantitativa, el método incorpora un número llamado Índice de Grupo (IG), puede ser calculado con la siguiente expresión:

Donde:
F = Porcentaje que pasa el tamiz N° 200.
LL = Límite Líquido.
IP = Índice de Plasticidad.
En general, la calidad del comportamiento de un suelo como material de subrasante es inversamente proporcional al índice de grupo.

6.5.2. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS)

Este sistema está definido por la norma ASTM D-2487. En este, el suelo se divide en dos grandes categorías, que posteriormente se subclasifican de acuerdo con las especificaciones que se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	**Gravas** Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos[a]	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$[c]	GW
			$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$[c]	GP
		Gravas con finos Más de 12% finos[a,d]	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM
			$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos[b]	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$[c]	SW
			$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3$[c]	SP
		Arenas con finos Más de 12% finos[b,d]	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM
			$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	**Limos y arcillas** Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)[e]	CL
			$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)[e]	ML
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL	OL
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos *PI* en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH
			Gráficos *PI* por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH	OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt

[a] Gravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.
[b] Arenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.
[c] $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$
[d] Si $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.
[e] Si $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, Braja.

6.5.3. RESUMEN DE CLASIFICACIÓN

Una vez descritos los sistemas de clasificación de suelos a utilizar, se procede a la clasificación de las muestras tomadas en las vías en estudio, cuyos resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 12. Clasificación de los suelos de subrasante

APIQUE	MUESTRA No.	CLASIFICACIÓN			CLASIFICACIÓN GENERAL COMO SUBRASANTE
		AASHTO	ÍNDICE DE GRUPO	SUCS	
Apique 1	1	A-4	8	CL-ML	Regular a malo
Apique 2	1	A-6	8	CL	Regular a malo
Apique 3	1	A-4	8	ML	Regular a malo
Apique 4	1	A-4	8	ML	Regular a malo
Apique 5	1	A-6	8	CL	Regular a malo

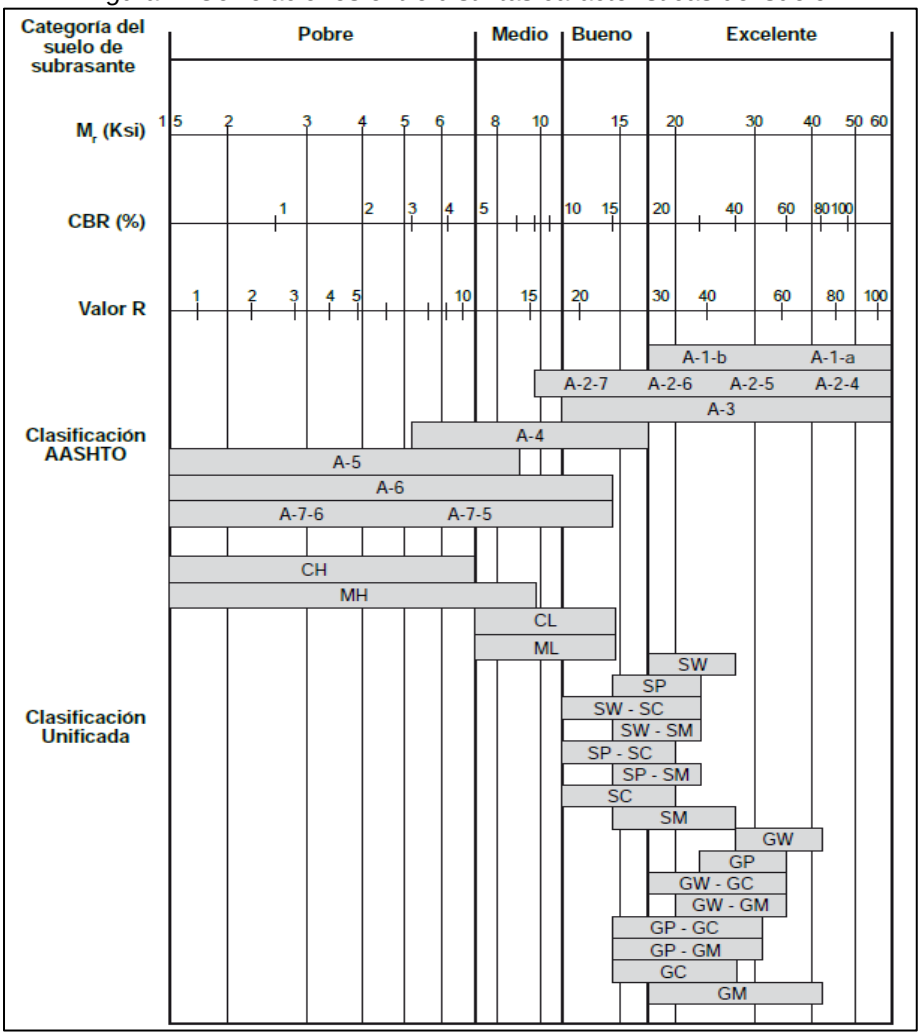
Fuente: Elaboración Propia.

6.6. CAPACIDAD DE SOPORTE (CBR) DE LA SUBRASANTE

De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito del INVIAS, la caracterización de las propiedades mecánicas de la subrasante se puede realizar por medio del análisis de los valores de CBR obtenidos por cada unidad definitiva de diseño.

En el manual de la AASHTO se reporta el diagrama que se presenta en la Figura 2, en la que se puede estimar un valor de CBR (%) en función de la clasificación del suelo. Sin embargo, con el objetivo de tener una representación de la capacidad de soporte de la subrasante con mayor precisión y seguridad, en el presente estudio se realizaron ensayos de CBR sobre muestras inalteradas para las diferentes muestras evaluadas a nivel de subrasante en la exploración geotécnica.

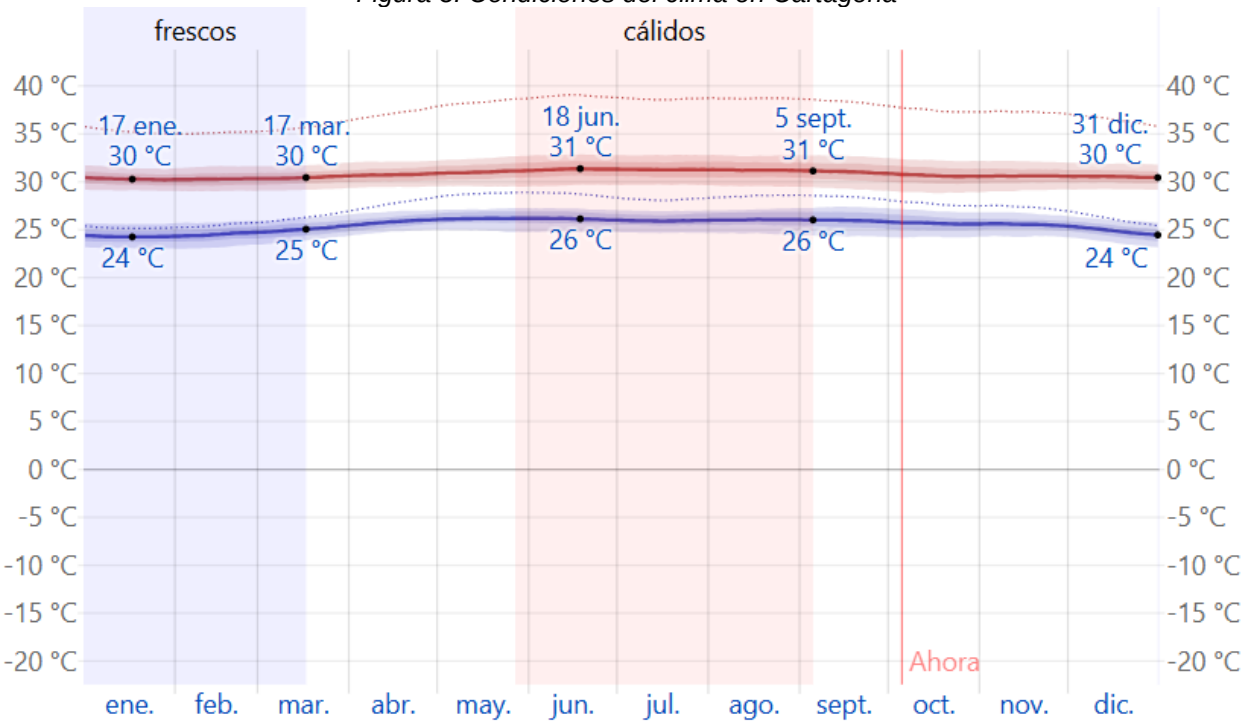
Figura 2. Correlaciones entre distintas características del suelo.



Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito, INVIAS.

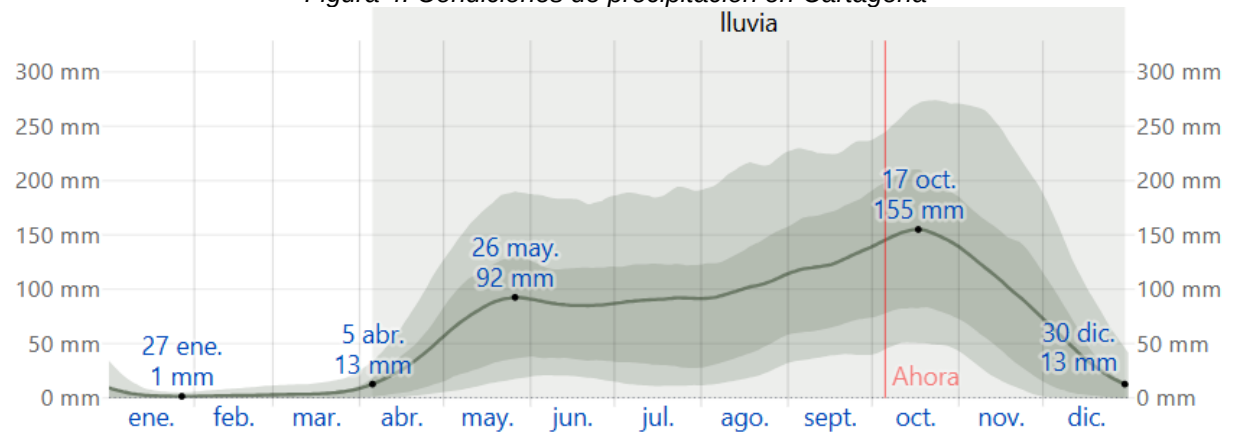
De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Transito del INVIAS, las condiciones de humedad para realizar el ensayo de CBR deben definirse en función de las condiciones climáticas de la zona, específicamente con base en la temperatura media anual TMAP (°C) y la precipitación media anual (mm). En particular la zona del proyecto presenta altas temperaturas, con valores en el rango entre 24°C y 31°C. Por otro lado, meses como octubre llegan a tener precipitaciones mensuales promedio de 133 mm y picos de 260 mm, ver Figura 3 y Figura 4, respectivamente. Por esta razón, se adoptaron las condiciones sumergidas para el análisis de la capacidad de soporte de la subrasante en términos de CBR (condición crítica). De esta manera se garantiza una condición crítica y que el pavimento tendrá un óptimo funcionamiento en todas las épocas del año.

Figura 3. Condiciones del clima en Cartagena



Fuente: Weatherspark.

Figura 4. Condiciones de precipitación en Cartagena



Fuente: Weatherspark.

La siguiente tabla resume los valores de CBR identificados a lo largo de los apiques realizados, los cuales pueden ser utilizados para el diseño de las estructuras de pavimento. Es importante mencionar que los resultados de los ensayos se presentan en el capítulo de Anexos del presente informe.

Tabla 13. Valores de CBR (%) de suelos de subrasante

APIQUE	MUESTRA No.	CLASIFICACIÓN			CBR SUMERGIDO (%)
		AASHTO	ÍNDICE DE GRUPO	SUCS	
Apique 1	1	A-4	8	CL-ML	1.7
Apique 2	1	A-6	8	CL	1.4
Apique 3	1	A-4	8	ML	1.5
Apique 4	1	A-4	8	ML	1.5
Apique 5	1	A-6	8	CL	1.4

Fuente: Elaboración Propia.

En general, a partir de la información presentada en las tablas anteriores se evaluará la variabilidad de los valores de resistencia mecánica, en términos de CBR (%), a lo largo de los tramos analizados, con el fin de definir si se adopta un único valor de diseño para los siete tramos del proyecto o si se requiere su sectorización en unidades homogéneas. El CBR de diseño se seleccionó como el valor promedio (media aritmética), siguiendo las recomendaciones del Instituto del Asfalto para proyectos de bajos volúmenes de tránsito, obteniéndose un CBR de diseño de 1.52 %. Adicionalmente, en caso de confirmarse una subrasante arcillosa de baja capacidad portante, se recomienda colocar un reemplazo con zahorra de espesor de 15 cm seguido por un geotextil tejido T2400 sobre la zahorra.

6.7. CLASIFICACIÓN DE SUBRASANTE Y CBR DE DISEÑO

Teniendo en cuenta la *Tabla 14* “Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia” del Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito” del INVIAS en la clasificación de la Subrasante se tienen cinco clases de fundación en función de la capacidad de soporte (CBR), las cuales varían desde S1 hasta S5.

Tabla 14. Clasificación de la subrasante de acuerdo con su resistencia

Clase o Tipo	CBR (%)
S1	< 2
S2	2 - 5
S3	5 - 10
S4	10 - 20
S5	>20

Fuente: Manual de Diseño de Pavimentos De Concretos Para Vías Con Bajos, Medios y Altos Volúmenes De Tránsito, INVIAS.

Los tramos de este proyecto clasifican como clase S1. En caso de que la capacidad portante de la subrasante resulte muy baja, con un valor de CBR de diseño menor a 3 %, y teniendo en cuenta que las especificaciones definidas por el INVIAS recomiendan procedimientos de mejoramiento o estabilización del terreno en suelos con CBR < 3 %, se recomienda colocar un reemplazo con zahorra de espesor de 15 cm seguido por un geotextil tejido T2400 sobre la zahorra. Para calcular el CBR mínimo de mejoramiento de la subrasante se aplica la metodología de Ivanov por medio de la siguiente ecuación:

Donde:

E_e Módulo equivalente de subrasante mejorada (kg/cm2).
E_0 Módulo de elasticidad de la subrasante (kg/cm2).
E_1 Módulo de elasticidad del material de mejoramiento (kg/cm2).
S Espesor del material de mejoramiento (cm).
A Constante con valor igual a 15.

El módulo de elasticidad dinámicos de cada capa se obtiene a partir de las siguientes correlaciones establecidas a partir de experiencias locales y cartas de la AASHTO:

Correlación 1: Para el módulo resiliente de la subrasante la ecuación propuesta es para CBR <8%

Mr (kg/cm2) = 100*CBR

Correlación 2: Para el módulo resiliente de la subrasante la ecuación propuesta es para CBR >8%

Mr (kg/cm2) = 130*CBR^0.714

Para el cálculo del módulo equivalente por el método de Ivanov se empleó la correlación 2 (Mr = 130·CBR^0.714) tanto para la subrasante como para el material de mejoramiento, en concordancia con la memoria de cálculo del anexo de laboratorios y, con base en este resultado, se calcula el CBR equivalente de la interacción de la subrasante con el mejoramiento, obteniendo un valor de CBR de diseño de 3 %.

Memoria de cálculo – Método de Ivanov

CBR DEL CORREDOR		$E_{INF.}$	$E_{SUP.}$	n	$n^{3.5}$	h_1(cm)	h_1 / 2a	$\tan^{-1}(n*h_1/2a)$ (rad)	$1-(1/n^{3.5})$	2/p	2/p*J*I	E_{equiv} (Kg/cm2)	CBR
SUBRASANTE	MAT. GRANULAR	(kg/cm^2)											
1.52	10.0	175	673	1.71	6.57	15.0	0.49	0.70	0.85	0.64	0.38	282	**3.0**

SISTEMA EQUIVALENTE

CBR $_{EQUIVALENTE}$ = 3.0 %

CBR DISEÑO			$E_{INF.}$	$E_{SUP.}$	E_{EQUIV}	n	$n^{3.5}$	$1-(1/n^{3.5})$	2/p	2/p*I	$1-(E_{INF}/E_{EQUIV})$	tan(L/K)	h1 (cm)
SUBRASANTE	MAT. GRANULAR	EQUIV.	(Kg/cm^2)										
1.52	10.0	**3.0**	175	673	**282.1**	1.71	6.57	0.85	0.64	0.54	0.38	0.84	**15.02**

ESPESOR NECESARIO
PARA OBTENER EL MÓDULO EQUIVALENTE
ALTURA DEL RELLENO (h_1) = **15.02** **cm**

$E_{INFERIOR}$ = 130 x $CBR^{0,714}$
$E_{SUPERIOR}$ = 130 x $CBR^{0,714}$
h_1 corresponde al espesor entre máximo y mínimo del material granular

$$h_1 = \frac{2a}{n} * \mathrm{Tan}\left[\frac{\left(1-\frac{E_{inferior}}{E_{equivalente}}\right)}{\frac{2}{\pi}*\left(1-\frac{1}{n^{3.5}}\right)}\right]$$

$$n = \left(\frac{E_{superior}}{E_{inferior}}\right)^{1/2.5}$$

Fuente: Elaboración propia a partir de la hoja IVANOV del anexo.

De acuerdo con lo anterior, se deben mejorar las características de la subrasante usando un mejoramiento con reemplazo con zahorra de espesor de 15 cm seguido por un geotextil tejido T2400 sobre la zahorra, obteniendo un CBR de diseño de 3 %. Con esto el proyecto clasificaría como clase S2. Adicionalmente, contemplar este material disminuye los espesores del pavimento en concreto, tal como se presenta en el diseño de pavimentos del proyecto. El cálculo del relleno para el mejoramiento de la subrasante por medio del método de Ivanov se muestra en el Anexo.

7. MATERIALES VIALES

Los materiales para la construcción de la infraestructura vial, sin excepción, deben cumplir con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías - INVIAS. A continuación, se describen algunos de los aspectos más relevantes a considerar en la definición de los materiales del proyecto.

- **Subrasante:** Los suelos arenosos se consideran aceptables como materiales de subrasante, pero sus características se ven modificadas cuando aparecen combinados con materiales arcillosos, estos suelos son medianamente competentes para soportar cargas vehiculares con un adecuado control de las aguas. En particular, se requiere de suelos con CBR mayor a 3% para garantizar una capa de fundación apropiada para las estructuras de pavimento a proyectar. En caso contrario, como en suelos expansivos o demasiado blandos, se deberá contemplar alguna de las estrategias de mejoramiento de suelos disponibles en el estado de la práctica.
- **Terraplenes:** El material debe cumplir las disposiciones definidas en el capítulo 2, artículos 220-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.
- **Afirmado:** El material debe cumplir las disposiciones definidas en el capítulo 3, artículo 311-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.
- **Subbase Granular:** El material debe cumplir las disposiciones definidas en el capítulo 3, artículos 300-22 y 320-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Este material debe tener como mínimo un CBR de 30% para proyectos con nivel de tránsito NT1.
- **Base Granular:** El material debe cumplir las disposiciones definidas en el capítulo 3, artículos 300-22 y 330-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Este material debe tener como mínimo un CBR de 80% para proyectos con nivel de tránsito NT1.
- **Concreto hidráulico:** Se deben cumplir las disposiciones definidas en el capítulo 5, artículo 500-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.
- **Acero de Refuerzo:** se deben cumplir las disposiciones definidas en el capítulo 6, artículo 640-22 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

8. CONSIDERACIONES DE TRÁNSITO

Para el análisis del tránsito se cuenta con el estudio de tránsito del proyecto, elaborado de acuerdo con el Manual INVÍAS de pavimentos de concreto. Los análisis se realizaron considerando un periodo de diseño de 20 años (2027 a 2046), factores camión para pavimento rígido calculados con la ecuación AASHTO-93 con cargas máximas legales (Resolución 4100 de 2004). Este estudio reporta un número de ejes equivalentes de 8.2 T en el periodo de diseño, el diseño de **1.738.904 ejes equivalentes de 8,2 t** en el carril de diseño para un periodo de 20 años, el cual es usado en este informe para el diseño de pavimentos.

9. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

En esta sección se describen los procedimientos de diseño utilizados para la definición de la estructura de pavimento contemplada en el proyecto.

9.1. DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO – MÉTODO AASHTO 93

Actualmente, existen un gran número de metodologías de diseño de estructuras de pavimento, las cuales se clasifican como empíricas, mecanísticas o mecanístico-empíricas, dependiendo de los criterios de análisis que utilizan para definir los espesores de diseño y predecir su comportamiento en función de unos parámetros de entrada. Para el diseño de la estructura de pavimento rígido del proyecto será utilizada la metodología AASHTO 93, la cual es probablemente la metodología más implementada para el diseño de pavimentos rígidos. El espesor de diseño se determina en función de los parámetros de diseño que se analizarán en las siguientes secciones.

9.2. PARÁMETROS DE DISEÑO

9.2.1. PERIODO DE DISEÑO

El periodo de diseño corresponde al lapso transcurrido desde el inicio de la vida en servicio de la estructura de pavimento, hasta que los deterioros generados por las condiciones operativas (tránsito y condiciones medioambientales) hacen que la vía pierda su desempeño estructural y funcional. En el dimensionamiento de la estructura de pavimento rígido se adoptará un periodo de diseño de 20 años.

9.2.2. MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE (k)

La capacidad de soporte del suelo en pavimentos de concreto rígido se define en términos del módulo de reacción de la subrasante (k), conocido también como el “Coeficiente de balasto” o el “Módulo de Westergaard”. Este parámetro representa la relación entre la presión necesaria para aplicar una deformación definida producto de la aplicación de ciclos de carga-descarga sobre el suelo.

Este parámetro se obtiene por medio de la prueba de placa definida por la norma I.N.V. E-168-22; sin embargo, en la práctica puede correlacionarse con el CBR (%) o con el módulo resiliente de la subrasante.

Siguiendo las recomendaciones del estudio de suelos, se deben mejorar las características de la subrasante usando un mejoramiento con reemplazo con zahorra de espesor de 15 cm seguido por un geotextil tejido T2400 sobre la zahorra, obteniendo un CBR de diseño de 3 %. Sin

embargo, dicho CBR aún cuando cumple con el mínimo de 3% exigido por INVIAS, representa una capacidad estructural muy baja, y se pueden obtener grandes deformaciones y agrietamientos de la estructura de pavimentos. Por tal razón, se recomienda coloca de material de mejoramiento en subbase granular de tipo Triturado calizo comprendido entre 1 1/2", 1", 3/4" en proporciones iguales de 35 cm de espesor. Esta capa de material de triturado ayuda a mitigar el fenómeno de erosión y aumenta la durabilidad de la estructura del pavimento. De igual manera, el uso de esta capa mejora la capacidad de soporte de la fundación, lo que a su vez representa una disminución del espesor de concreto requerido para satisfacer las solicitaciones de diseño. El cálculo del aporte de esta capa se presenta en la siguiente imagen

Memoria de cálculo – Método de Ivanov

CÁLCULO ESTIMATIVO DEL CBR EQUIVALENTE EN LA SUPERFICIE DE LA CAPA DE MEJORAMIENTO POR MEDIO DE LA FÓRMULA DE IVANOV

CBR DEL CORREDOR		$E_{INF.}$	$E_{SUP.}$	n	$n^{3.5}$	h_1(cm)	h_1 / 2a	$\tan^{-1}(n*h_1/2a)$ (rad)	$1-(1/n^{3.5})$	2/p	2/p*J*I	E_{equiv} (Kg/cm2)	CBR
SUBRASANTE	MAT. GRANULAR	(kg/cm^2)											
3.00	30.0	285	1474	1.93	9.99	35.0	1.15	1.15	0.90	0.64	0.66	831	**13.5**

SISTEMA EQUIVALENTE

CBR $_{EQUIVALENTE}$ = 13.5 %

CBR DISEÑO			$E_{INF.}$	$E_{SUP.}$	E_{EQUIV}	n	$n^{3.5}$	$1-(1/n^{3.5})$	2/p	2/p*I	$1-(E_{INF}/E_{EQUIV})$	tan(L/K)	h1 (cm)
SUBRASANTE	MAT. GRANULAR	EQUIV.	(Kg/cm^2)										
3.00	30.0	**13.5**	285	1474	**831.5**	1.93	9.99	0.90	0.64	0.57	0.66	2.22	**35.01**

ESPESOR NECESARIO
PARA OBTENER EL MÓDULO EQUIVALENTE
ALTURA DEL RELLENO (h_1) = **35.01** **cm**

$E_{INFERIOR}$ = $130 \times CBR^{0,714}$

$E_{SUPERIOR}$ = $130 \times CBR^{0,714}$

h_1 corresponde al espesor entre máximo y mínimo del material granular

$$h_1 = \frac{2a}{n} * \mathrm{Tan}\left[\frac{\left(1-\frac{E_{inferior}}{E_{equivalente}}\right)}{\frac{2}{\pi}*\left(1-\frac{1}{n^{3.5}}\right)}\right]$$

$$n = \left(\frac{E_{superior}}{E_{inferior}}\right)^{1/2.5}$$

Fuente: Elaboración propia a partir de la metodología de IVANOV

El CBR de diseño previamente calculado se convirtió a módulo de reacción de la subrasante de acuerdo con el software de la American Concrete Pavement Association (ACPA), una de las organizaciones más importantes a nivel mundial en el campo de la ingeniería de pavimentos de concreto corresponde a un módulo resiliente de 11236 psi o un **módulo de reacción de la subrasante de 223 pci**.

Figura 5. Cálculo del K de la Subrasante.



Fuente: http://apps.acpa.org/applibrary/KValue/.

9.2.3. TRÁNSITO

La metodología AASHTO 93 requiere la caracterización del tránsito en términos del número de ejes equivalentes de 8,2 t (W_{18}) en el carril de diseño, determinado en el capítulo de consideraciones de tránsito. El diseño se controla con W_{18} = 1.738.904, el cual corresponde al tramo con mayor número de ejes equivalentes en el carril de diseño en el periodo de diseño.

9.2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS LOSAS DE CONCRETO

A continuación, se resumen las características requeridas para el diseño del espesor del pavimento:

- Índice de servicio inicial 4,5 y final 2,5 (ΔPSI = 2,0), valores sugeridos por la AASHTO-93 para pavimentos rígidos y coherentes con los factores de equivalencia del estudio de tránsito.
- Confiabilidad R de 95 % (Zr = −1,645) y desviación estándar So de 0,40, siguiendo las recomendaciones de la AASHTO-93 para vías de alta importancia (ver Tabla 15).
- Coeficiente de drenaje Cd igual a 0,75 debido a las características malas de drenaje del suelo de fundación (arcillas de baja plasticidad y altas humedades, sin un adecuado sistema de drenaje) (ver Tabla 16).
- Coeficiente de transmisión de cargas J igual a 3,1, valor conservador para estructuras

con pasadores y confinamiento lateral por medio de bordillos o cunetas (ver Tabla 9).

- Módulo de elasticidad del concreto Ec de 28.000 MPa (valor típico).
- Módulo de rotura del concreto MR de 4,2 MPa (valor típico para este tipo de proyectos).
- Dovelas o pasadores de transmisión de carga en las juntas transversales.

Tabla 15. Valores de confiabilidad

TIPO DE CAMINO	CONFIABILIDAD RECOMENDADA	
	ZONA URBANA	ZONA RURAL
Rutas interestatales y Autopistas	85 – 99.9	80 – 90.9
Arterias principales	80 – 99	75 – 99
Colectoras	80 – 95	75 – 95
Locales	50 - 80	50-80

Fuente: Adaptado de la Guía AASHTO-93 para el diseño de pavimentos.

Tabla 16. Valores del coeficiente de drenaje

Valores del coeficiente de drenaje				
Calidad del 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	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10
Bueno	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Mediano	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Malo	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Muy Malo	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70

Fuente: Adaptado de la Guía AASHTO-93 para el diseño de pavimentos.

Tabla 17. Valores del coeficiente de transmisión de carga

Valores del Coeficiente de Transmisión de Cargas, J				
Berma	De Asfalto		De Concreto	
Tipo de Pavimento	Si	No	Si	No
1. No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
2. Reforzado continuo	2.9 - 3.2	--	2.3 - 2.9	--

Fuente: Adaptado de la Guía AASHTO-93 para el diseño de pavimentos.

9.3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

De acuerdo con los parámetros definidos en las secciones anteriores, el espesor de la losa se determinó con la ecuación de diseño de la AASHTO-93 para pavimentos rígidos:

$$log_{10}W_{18} = Zr \cdot So + 7{,}35 \cdot log_{10}(D+1) - 0{,}06 + log_{10}(\Delta PSI/3{,}0) / [1 + 1{,}624 \times 10^{7}/(D+1)^{8{,}46}]$$

$$+ (4{,}22 - 0{,}32 \cdot pt) \cdot \log_{10}\{ Sc \cdot Cd \cdot (D^{0{,}75} - 1{,}132) / [215{,}63 \cdot J \cdot (D^{0{,}75} - 18{,}42/(Ec/k)^{0{,}25})]\}$$

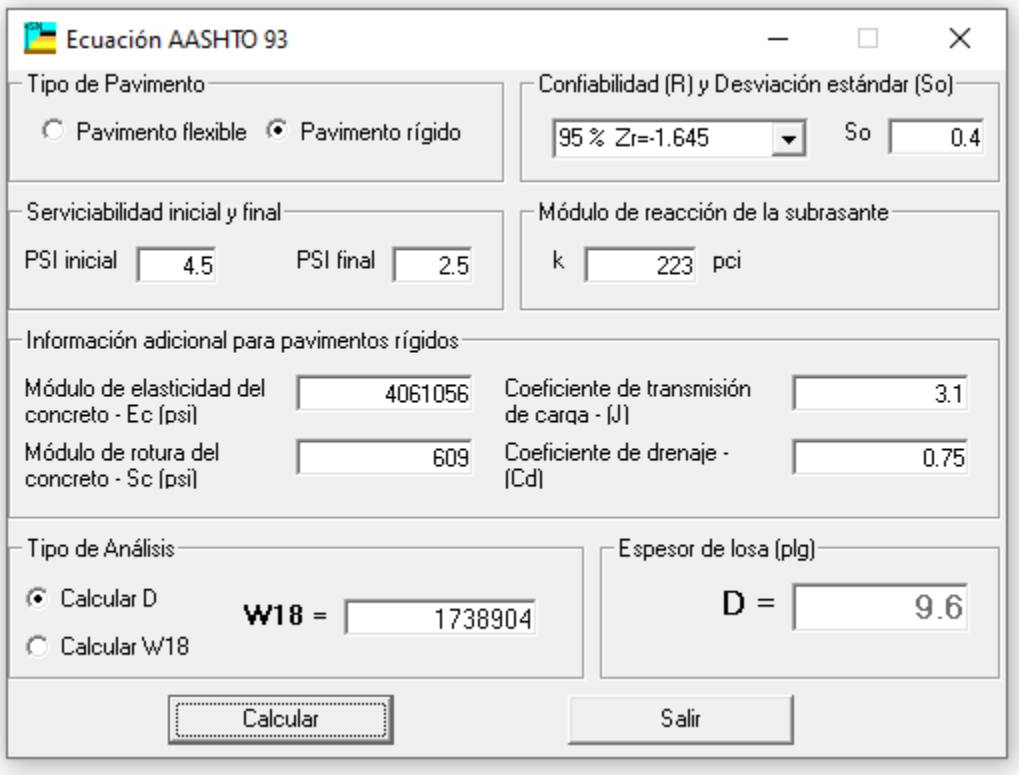
Donde D es el espesor de la losa (pulg), Sc el módulo de rotura (psi), Ec el módulo de elasticidad del concreto (psi) y k el módulo de reacción de la subrasante (pci). Las siguientes tablas muestran el espesor requerido para la estructura de pavimento diseñada.

Tabla 18. Parámetros de entrada – diseño AASHTO-93

Parámetro	Valor
Periodo de diseño	20 años
Ejes equivalentes de diseño, W_{18}	1.738.904
Módulo de reacción de la subrasante, k	223 pci
Módulo de rotura del concreto, Sc	4,2 MPa (609 psi)
Módulo de elasticidad del concreto, Ec	28.000 MPa (4.061.056 psi)
Coeficiente de transmisión de carga, J	3,1
Coeficiente de drenaje, Cd	0,7
Confiabilidad, R / Zr	95 % / −1,645
Desviación estándar, So	0,40
Serviciabilidad inicial / final (ΔPSI)	4,5 / 2,5 (2,0)

Fuente: Elaboración propia.

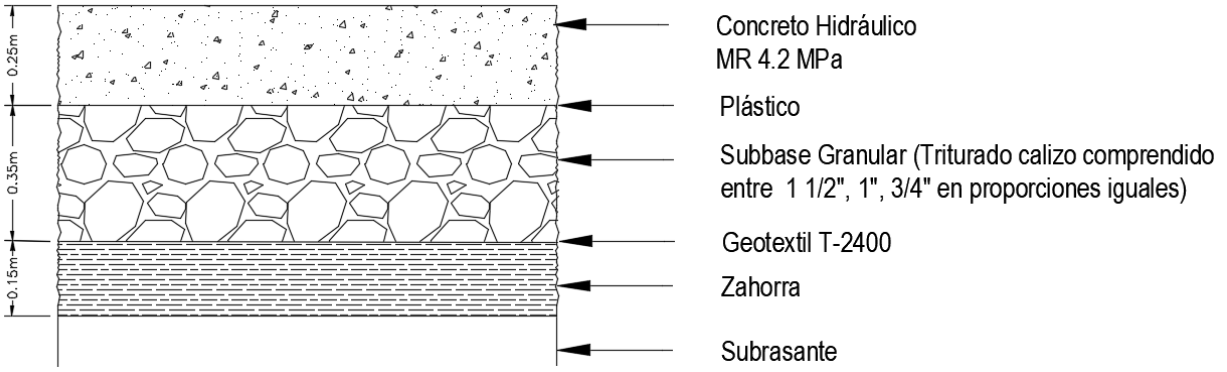
Tabla 19. Determinación del espesor de losa requerido



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, se determinó un espesor mínimo de losa de concreto (9.6 pulgadas), que se redondea al entero superior constructivamente viable de **25 cm (250 mm)**. Debido a la similitud en las características del tránsito y la subrasante de los diferentes tramos, se adopta por tanto una única estructura de pavimento rígido para los distintos tramos del proyecto, que se presenta en la siguiente figura.

Figura 6. Estructura de pavimento rígido



Fuente: Elaboración propia.

9.4. GEOMETRÍA Y MODULACIÓN DE LAS LOSAS

En general, el espaciamiento de las juntas transversales y longitudinales depende de las condiciones locales de los materiales y el clima. En este sentido, la modulación de las losas debe satisfacer los siguientes criterios:

De acuerdo con la guía AASHTO:

- El espaciamiento entre juntas (en pies) no debe exceder dos veces el espesor de la losa (en pulgadas).
- La relación Largo / Ancho de la losa no debe exceder el valor de 1.25.

De acuerdo con el Manual de diseño del INVÍAS:

- Las losas deben ser lo más cuadradas posible para garantizar un mejor comportamiento estructural y su relación Largo/Ancho oscile en el rango de 1 a 1.3.

De acuerdo con la guía de diseño de juntas de la PCA:

- El espaciamiento entre juntas no debe ser mayor a 20 pies (6 metros).

Atendiendo a los criterios mencionados anteriormente, y siguiendo los lineamientos del diseño geométrico, se propone que todas las losas se modulen de forma cuadrada para evitar, en lo posible, el uso de parrillas de refuerzo.

9.5. JUNTAS, BARRAS DE ANCLAJE Y PASADORES

En este proyecto se considera el uso de dovelas para garantizar una adecuada transferencia de carga y la disminución de los esfuerzos y deflexiones en las juntas de las losas de concreto hidráulico que componen la estructura de pavimento. Estas barras se colocarán en la mitad del espesor de la losa y deberán permitir los desplazamientos relativos de la losa por efecto de la expansión o contracción del concreto.

El Manual de diseño de pavimentos de concreto del INVÍAS brinda las recomendaciones de la Tabla 20 para la selección de los pasadores de carga.

Tabla 20. Recomendaciones para la selección de los pasadores de carga

Espesor del pavimento	Diámetro del pasador		Longitud	Separación entre centros
	mm	Pulgada	mm	mm
0 - 100	13	1/2	250	300
110 - 130	16	5/8	300	300
140 - 150	19	3/4	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 1/4	450	300
260 - 280	35	1 3/8	450	300
290 - 300	38	1 1/2	500	300

Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto, INVÍAS (2008).

Considerando el espesor de pavimento propuesto de 25 cm, se requiere el uso de pasadores de carga con diámetro de 1 ¼ pulgadas (32 mm), longitud de 45 cm separados los mismos cada 30 centímetros.

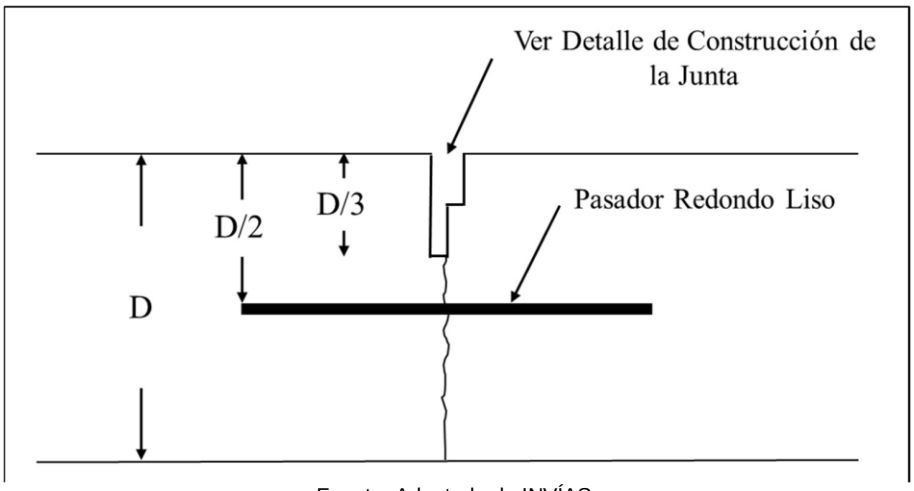
Por otra parte, se utilizarán barras de amarre en las juntas longitudinales del pavimento para controlar los deslizamientos de las losas de un carril respecto a las del carril adyacente. De acuerdo con el Manual de diseño del INVÍAS (Tabla 13), se requieren barras de 1/2 pulgada (12,7 mm) de acero con fy = 280 MPa, de 0,85 m de longitud y con separación entre barras de 1,1 m. En las Figuras 7 y 8 se presentan los esquemas del corte y del tratamiento típico de las juntas.

Tabla 21. Recomendaciones para la selección de las barras de anclaje

Espesor de losa (mm)	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 (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)		
		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)
Acero de fy= 187,5 MPa (40.000 psi)												
150	0,45	0,80	0,75	0,65	0,60	1,20	1,20	1,20	0,70	1,20	1,20	1,20
175		0,70	0,60	0,55		1,20	1,10	1,00		1,20	1,20	1,20
200		0,60	0,55	0,50		1,05	1,00	0,90		1,20	1,20	1,20
225		0,55	0,50	0,45		0,85	0,85	0,80		1,20	1,20	1,20
250		0,45	0,45	0,40		0,85	0,80	0,70		1,20	1,20	1,10
Acero de fy= 280 MPa (60.000 psi)												
150	0,65	1,20	1,10	1,00	0,85	1,20	1,20	1,20	1,00	1,20	1,20	1,20
175		1,05	0,95	0,85		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
200		0,90	0,80	0,75		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
225		0,80	0,75	0,65		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
250		0,70	0,65	0,60		1,20	1,15	1,10		1,20	1,20	1,20

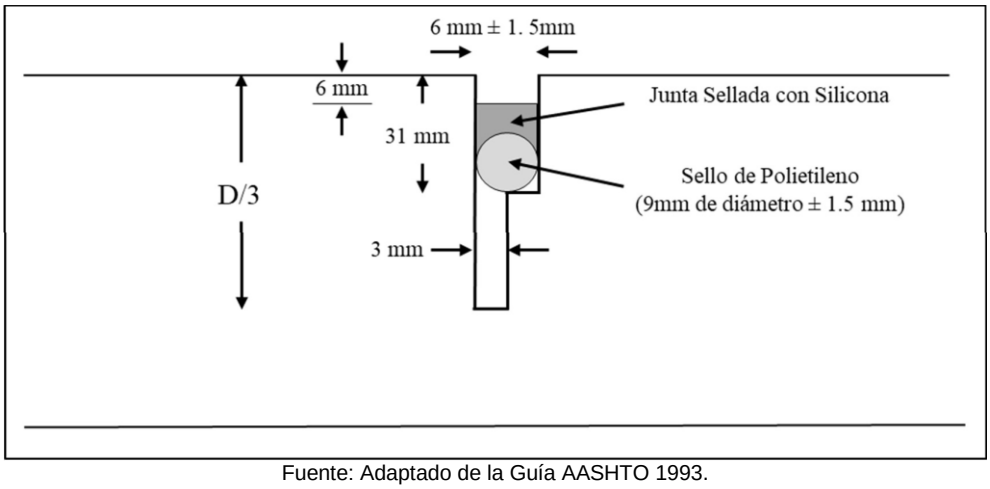
Fuente: Manual de diseño de pavimentos de concreto, INVÍAS (2008).

Figura 7. Esquema de corte de juntas



Fuente: Adaptado de INVÍAS.

Figura 8. Tratamiento de junta típico



Fuente: Adaptado de la Guía AASHTO 1993.

9.6. REFUERZO DE LAS LOSAS

En el Capítulo 5 de las Especificaciones Generales de Construcción de carreteras del INVIAS se establece que todas o algunas de las losas diseñadas pueden requerir una o dos parrillas de refuerzo como sistema para controlar la aparición o ensanche de grieta. En este sentido, como guía general, establece que se requerirá la colocación de estas parrillas en aquellas losas que presenten las siguientes características:

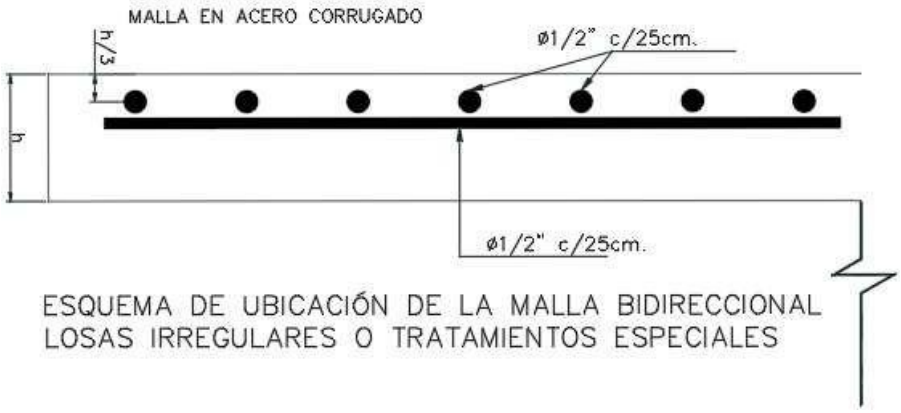
- Longitud de la losa (mayor dimensión en planta) superior a 24 veces el espesor de esta.
- Losas con relación largo/ancho mayor que 1.4.
- Losas de forma irregular (diferentes de la rectangular o cuadrada).
- Losas con aberturas en su interior para acomodar elementos tales como pozos de

inspección o sumideros.

- Losas en las cuales no coinciden las juntas con las losas adyacentes.

En estos casos, el acero de refuerzo de las losas estará constituido por barras corrugadas con límite de fluencia (fy) de 420 MPa, diámetro de ½ de pulgada y separación entre centros de 25 cm como refuerzo del pavimento de concreto. La Figura 9 presenta el esquema de la malla de refuerzo.

Figura 9. Esquema de refuerzo de losas



Fuente: Adaptado de la Guía AASHTO 1993.

10. MANTENIMIENTO VIAL

El Mantenimiento se define como la conservación de una cosa en buen estado o en una situación determinada para evitar su degradación. En el caso de las vías se establecen tres niveles de mantenimiento:

- El mantenimiento rutinario comprende todas aquellas actividades requeridas para conservar una vía de regular a buen estado, las cuales se repiten una o más veces al año. También, incluye aquellas labores de reparación vial destinadas a recuperar elementos menores dañados, deteriorados o destruidos, tal como los barandales de puentes, obras de drenaje menores, señalización vertical y horizontal, muros de retención y actividades afines.
- El mantenimiento periódico abarca las obras de conservación vial que se repiten en períodos de más de un año para elevar la vía a un nivel de servicio de regular a buen estado. En este tipo de mantenimientos se incluye la colocación de sobrecapas/sobrecarpetas en pavimentos existentes en alto grado de deterioro.
- El mantenimiento preventivo consiste en actividades y obras de mantenimiento destinadas a prevenir fallas en la vía antes de su ocurrencia.

En un sentido amplio las acciones de mantenimiento tratan de preservar el patrimonio vial y evitar situaciones que pueden inducir, en forma progresiva, a varias acciones: perdida de serviciabilidad vial, accidentabilidad, deterioro prematuro de las obras y situaciones de riesgo para los usuarios.

10.1 MANTENIMIENTO DEL PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO

En una estructura de pavimento rígido, con el objetivo de garantizar niveles adecuados de serviciabilidad en la vía (comodidad y seguridad al usuario), durante su vida útil, se considerarán las siguientes actividades de mantenimiento:

- Resellado de juntas y/o grietas.

10.2. RESELLADO DE JUNTAS Y/O GRIETAS

Se considera que de un buen sellado de juntas depende la vida de un pavimento de concreto, razón por la cual las normas exigen este proceso tanto en la construcción como en el mantenimiento.

10.2.1. DESCRIPCIÓN

Las juntas son parte importante de los pavimentos de concreto y se hacen con el fin de controlar los esfuerzos que se presentan en el concreto como consecuencia de los movimientos de contracción y de dilatación del material y a los cambios de temperatura y humedad, entre la cara superficial y la de soporte de las losas de concreto. El sellado de las juntas persigue fundamentalmente:

- Minimizar la infiltración del agua superficial, puesto que esta ablanda la base y propicia el bombeo (salida de finos a través de la junta) con lo que la losa pierde apoyo, corriéndose el riesgo de su rotura.
- Evitar la entrada de materiales duros e incompresibles a la junta, que pueden desportillar

los bordes y permitir daños mayores al dilatarse las losas.

- Disminuir la corrosión de los pasadores de las losas del pavimento evitando la entrada de humedad a través de las juntas.

Las juntas que se deben someter al proceso de resellado son aquellas, en las que no se dan movimientos verticales grandes entre las losas que forman la junta. Antes de resellar las juntas se deben clasificar en función del ancho que ellas presenten según su ancho, como se indica a continuación:

- Juntas con ancho hasta de 12 mm.
- Juntas con ancho entre 12 mm y 20 mm.
- Juntas con ancho entre 20 mm y 30 mm.
- Grietas con ancho entre 3 mm y 30 mm.
- Juntas y grietas con ancho superior a 30 mm.
- Juntas longitudinales de cualquier ancho.

10.2.2. MATERIALES

El material para el sello debe cumplir con lo mencionado particularmente en el Artículo I.N.V. 500-22 o con las del productor, en caso de que no estén cubiertas por el INVIAS, siempre y cuando tengan el visto bueno del interventor.
Después de agrupar las juntas y fisuras según el ancho y la dirección, se escoge el material de sello siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Juntas con ancho hasta de 12 mm: Los productos recomendados son aquellos que con una deformación admisible entre el 20% y el 30%, cumplan con los requisitos establecidos en las normas correspondientes. Los imprimantes y cordones de respaldo serán los adecuados y compatibles con el sellador.
- Juntas con ancho entre 12 mm y 20 mm: Para sellar estas juntas, los productos recomendados son los del tipo termoplástico, aplicados en caliente, que tengan una deformación admisible entre el 10% y el 20% y que cumplan con las normas correspondientes.
- Juntas con ancho entre 20 mm y 30 mm, Grietas con ancho entre 3 mm y 30 mm y Juntas longitudinales de cualquier ancho: Los productos recomendados son del tipo masillas asfálticas, modificadas con polímero, que tengan las siguientes características: Penetración, 25°C, 100g, 5s, 101mm: máx.60; Ductilidad, 0°C, mm: mín.20; Filler, porcentaje en peso: máx.25; Punto Ablandamiento, °C: mín.58
- Juntas y grietas con ancho superior a 30 mm: En estos casos se recomienda usar una mezcla de arena-emulsión asfáltica, con una dosis mínima de 18% de emulsión.

10.2.3. PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

La operación de sellado de las juntas implica los siguientes procesos:

- Limpieza: Las juntas y grietas que contengan restos de sellos antiguos o materiales extraños, se limpian con cuidado en toda su extensión y profundidad, con la ayuda de hojas de sierra, herramientas manuales u otros equipos adecuados, que permitan remover el sello, o relleno antiguo, sin afectar al concreto. La limpieza se termina soplando

la junta con aire comprimido, libre de aceite, con una presión mínima de 120 psi, que elimine todo vestigio de material contaminante, incluso el polvo.

- Imprimación: Cuando se especifican materiales para imprimar, se debe tener cuidado, que se produzca la adherencia pedida entre el producto usado para sellar y las paredes de las juntas o grietas.
- Sellado de juntas con ancho hasta de 12 mm: En las juntas que no tengan la caja para alojar el material de sello, se les debe formar cortando el concreto de manera que se forme la caja, con un ancho de 8 mm a 12 mm y con una profundidad entre 22 y 35 mm, según el tipo de sellador y respaldo por emplear, el cual se debe ajustar a lo recomendado por el fabricante del material sellador y ser ligeramente más ancho que la junta de manera que ajuste bien.
- Sellado de juntas con ancho entre 12 mm y 20 mm: Para estas juntas se seguirá un procedimiento similar al descrito para las juntas de hasta 12 mm de ancho, salvo que el ancho de la caja será de hasta 20 mm, y su profundidad la necesaria para insertar el cordón de respaldo. Las juntas clasificadas en este grupo se sellan con productos termoplásticos que se meten en la junta a una profundidad de 14 mm o más y con un espacio libre entre las superficies del sello y de la losa, de mínimo 4 mm. El imprimante se deberá ajustar a las recomendaciones del fabricante del sellador.
- Sellado de juntas con ancho entre 20 mm y 30 mm: Las juntas con ancho entre 20 mm y 30 mm se limpian según lo ya mencionado y se sellan con productos del tipo masilla asfáltica. La profundidad del sello será como mínimo de 15 mm, debiendo quedar entre 4 y 5 mm por debajo de la superficie del pavimento.
- Sellado de grietas con ancho entre 3 mm y 30 mm: Se limpian de acuerdo con lo especificado anteriormente y luego se biselan los bordes mediante equipo esmerilador u otro aprobado, para formar una cavidad con un ancho mínimo de 6 mm. Estas grietas se sellarán con productos tipo masilla asfáltica. El espesor del material sellador será como mínimo de 15 mm, cualquiera que sea el ancho superficial de la grieta, y deberá quedar entre 4 y 5 mm por debajo de la superficie del pavimento.
- Sellado de juntas y grietas con ancho superior a 30 mm: Después de hacer la limpieza de las juntas y grietas se procede a sellarlas con una mezcla de arena-emulsión asfáltica, siempre que el ancho promedio no exceda los 100 mm, en cuyo caso, el sellado se hace con una mezcla en caliente. En ambos casos el espesor del material sellador será como mínimo 20 mm. El relleno deberá quedar de 4 a 5 mm por debajo de la superficie del pavimento. Las paredes de las juntas y grietas se deberán imprimar con emulsión asfáltica diluida en agua por partes iguales. Se imprime por jornada la longitud que se alcance a sellar en un día de trabajo.
- Sellado de las juntas longitudinales con cualquier ancho: Las juntas longitudinales se limpian según lo descrito anteriormente, y se sellan con productos tipo masilla asfáltica que se ajusten a los requisitos ya estipulados
- Preparación de las mezclas de sellado: Salvo que las instrucciones del fabricante de un determinado producto indiquen otra cosa, o cuando se utilice un imprimante con base en emulsiones asfálticas, las juntas y grietas deberán estar secas antes de comenzar el sellado, el cual se recomienda que se haga con una temperatura entre 5°C y 30°C. La

preparación del producto de sellado se hace buscando que se obtenga un material homogéneo y con características estables. La manera de mezclar y homogenizar los productos de sellado son objeto de recomendaciones y especificaciones, que se deben consultar con los proveedores de los productos o con las autoridades pertinentes, antes de emprender las labores de reparación de las juntas.

10.2.4. FRECUENCIA

La primera actividad de mantenimiento suele realizarse después de 2-5 años de vida útil.
Mientras la vía está en funcionamiento se deberán realizar los trabajos de limpieza, conservación, reparación y reconstrucción del pavimento que sean necesarios para mantener la condición de la vía en buen estado. La frecuencia de las intervenciones y las cantidades de obra a ejecutar podrán variar de acuerdo con las circunstancias climáticas y otras características, pero siempre deberán cumplir con las especificaciones y parámetros técnicos exigidos.

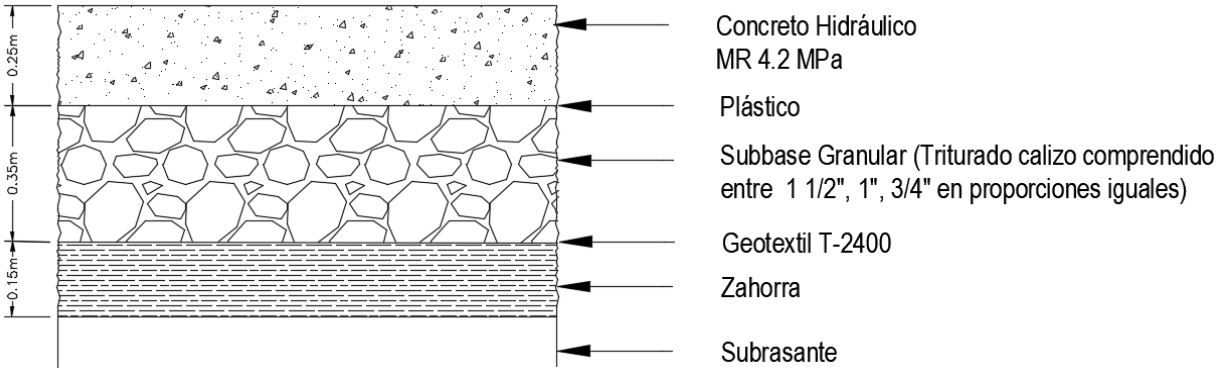
11.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente informe desarrolló el estudio de geotecnia vial y diseño de pavimento en concreto hidráulico para el proyecto "*MODERNIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL EN EL SECTOR PUENTE LAS PALMAS Y AVENIDA DEL LAGO EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE CARTAGENA*", con el fin de proveer una solución estructural que garantice la operación vehicular en condiciones satisfactorias de serviciabilidad durante un periodo de diseño de 20 años.

La subrasante de los tramos evaluados está conformada principalmente arcillas de baja plasticidad (CL, A-6), con un CBR sumergido promedio de 1,52 % (clase S1). Por ello se recomendó en el estudio de suelos colocar un reemplazo con zahorra de espesor de 15 cm seguido por un geotextil tejido T2400 sobre la zahorra. Encima de este material se planteó un mejoramiento con Triturado calizo comprendido entre 1 1/2", 1", 3/4" en proporciones iguales de 35 cm de espesor, con el que se obtiene un CBR equivalente de 13,5 % (clase S4) y un módulo de reacción equivalente de 223 pci. Esta capa, además, reduce el espesor de las losas de concreto, mitiga el fenómeno de erosión y prolonga la vida útil de la estructura de pavimento.

Con la metodología AASHTO-93, el espesor mínimo de losa requerido para cada uno de los tramos y se obtuvo una losa de 25 cm para todo el proyecto. Se contrastaron las especificaciones del Manual de diseño del INVÍAS y la guía AASHTO-93 para la modulación de las losas y las propiedades de las barras de acero. La Figura 10 presenta un esquema típico de la sección de la solución de pavimento rígido. Los detalles de la estructura de pavimentos en diferentes cortes y secciones se presentan en el plano de detalles de losas, el cual se encuentra como un documento anexo al presente informe.

Figura 10. Estructura de pavimento rígido – sección típica



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se debe realizar un adecuado control de calidad siguiendo las especificaciones técnicas definidas por el INVIAS para garantizar que la obra, una vez construida, cumpla con los requerimientos del diseño, especialmente la garantía de ofrecer un buen servicio a los usuarios durante su vida útil.

12. REFERENCIAS

AASHTO (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.

Braja, D. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

Huang, Y. H. (1993). Pavement Analysis and Design.

INVÍAS (2007). Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos para Vías con Bajos Volúmenes de Tránsito.

INVÍAS (2008). Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.

INVÍAS (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

INVÍAS (2022). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras.

Ministerio de Transporte (2004). Resolución 4100 de 2004.

PCA (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.

PCA (1975). Joint Design for Concrete Highway and Street Pavements.

Terzaghi, K. (1978). Mecánica de Suelos.

Estudio de suelos del proyecto, Cartagena (2026).

Estudio de tránsito del proyecto, Cartagena (2026).

13. ANEXOS

- Ensayos de laboratorio del proyecto: resultados de los ensayos de laboratorio y memoria de cálculo del método de Ivanov.
- Plano de detalles de la estructura de pavimento.