MEJORAMIENTO DE VÍAS URBANAS EN PAVIMENTO RÍGIDO Y CONSTRUCCIÓN DE CORONAS Y REHABILITACIÓN DE POZOS DE ALCANTARILLADO, DEL BARRIO COMUNEROS DEL MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES, SANTANDER



MEMORIAS DE DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO

PROPIETARIO

MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES
SANTANDER

SABANA DE TORRES – SANTANDER

OCTUBRE 2026

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO 6
1. OBJETO Y ALCANCE 7
2. GENERALIDADES DEL SITIO 8
2.1. LOCALIZACIÓN 8
2.2. CLIMA 8
2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 10
2.4. HIDROLOGÍA Y NIVEL FREÁTICO 11
3. MARCO TEÓRICO 11
3.1. INTERPRETACIÓN DE LA EXPLORACIÓN DE LA SUBRASANTE 11
3.2. PAVIMENTO RÍGIDO: MÉTODO PCA-84 14
3.3. PAVIMENTO RÍGIDO: MÉTODO AASHTO-93 15
3.4. JUNTAS 16
4. CRITERIOS DE DISEÑO 17
5. TRÁNSITO 18
6. SUBRASANTE 21
RECOMENDACIONES PARA LA SUBRASANTE 24
7. PAVIMENTO RÍGIDO 24
7.1. DISEÑO POR EL MÉTODO PCA-84 24
7.2. VERIFICACIÓN AASHTO-93 25
7.3. ALTERNATIVAS EVALUADAS 25
7.4. DRENAJE Y PROTECCIÓN DEL APOYO 28
8. DISEÑO DE JUNTAS 30
8.1. MODULACIÓN 30
8.2. ABERTURA DE LAS JUNTAS TRANSVERSALES 31
8.3. TRANSFERENCIA DE CARGA 32
8.4. JUNTAS LONGITUDINALES 33
8.5. CORTE Y SELLADO 34
8.6. JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN, AISLAMIENTO Y EXPANSIÓN 34

8.7. EMPALME CON PAVIMENTOS EXISTENTES Y VÍAS EN AFIRMADO 34
8.8. JUNTAS EN ESTRUCTURAS DE DRENAJE EXISTENTES Y POR CONSTRUIR 36
8.9. RESUMEN DE LOS TIPOS DE JUNTAS 41
9. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS 41
10. VERIFICACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS 42
10.1. MODELO 43
10.2. VALIDACIÓN 44
10.3. RESULTADOS 44
10.4. VERIFICACIÓN 47
11. COMPARACIÓN CON PAVIMENTO FLEXIBLE 47
12. PROCESO CONSTRUCTIVO 51
12.1. SUBRASANTE Y BASE 51
12.2. FORMALETAS, PASADORES Y BARRAS DE ANCLAJE 51
12.3. VACIADO, ACABADO Y CURADO 52
12.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS JUNTAS 53
12.5. APERTURA AL TRÁNSITO Y CONTROL 54
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 54
13.1. CONCLUSIONES 54
13.2. RECOMENDACIONES 55
14. REFERENCIAS 55
15. ANEXOS 56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los datos y resultados del diseño 7
Tabla 2. Criterios de diseño 17
Tabla 3. Tránsito de diseño 19
Tabla 4. Camión de diseño C3 20
Tabla 5. Puntos de exploración y CBR de subrasante 22

Tabla 6. Resultados de los ensayos PDC 22
Tabla 7. Resumen de los sondeos SPT 22
Tabla 8. Estratos de la exploración 22
Tabla 9. CBR estimado con el SPT en la zona de subrasante 23
Tabla 10. Resultados PCA-84 25
Tabla 11. Alternativas de pavimento rígido evaluadas 26
Tabla 12. Combinaciones evaluadas y resultado 26
Tabla 13. Piezas de sardinel prefabricado 30
Tabla 14. Modulación de juntas para otros anchos de calzada con losa de 22,0 cm 31
Tabla 15. Condiciones para juntas transversales sin pasadores 32
Tabla 16. Diseño de pasadores 32
Tabla 17. Dimensiones de las cavidades de sellado 34
Tabla 18. Tipos de juntas del proyecto 41
Tabla 19. Datos del modelo de elementos finitos 43
Tabla 20. Validación del modelo contra soluciones cerradas 44
Tabla 21. Deflexión y tracción máximas por posición de carga 44
Tabla 22. Verificación por elementos finitos 47
Tabla 23. Comparación técnica del pavimento rígido y del flexible en las condiciones del sitio 48
Tabla 24. Plan de conservación considerado en el ciclo de vida 49
Tabla 25. Cuantificación de las reconstrucciones del pavimento flexible 50
Tabla 26. Índices de costo en el ciclo de vida de 25 años 50

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización de Sabana de Torres en el departamento de Santander 8
Ilustración 2. Casco urbano de Sabana de Torres, imagen satelital 9
Ilustración 3. Localización de la vía y de los puntos de exploración, imagen satelital 9
Ilustración 4. Temperaturas máximas diarias en Sabana de Torres: número de días de cada mes por rango de temperatura 10

Ilustración 5. Precipitación diaria en Sabana de Torres: número de días de cada mes por rango de lluvia 10

Ilustración 6. Camión de diseño C3: configuración, cargas por eje y dimensiones máximas según la Resolución 4100 de 2004, modificada por la Resolución 1782 de 2009 20

Ilustración 7. Espectro de cargas por eje, derivado de la composición del aforo con los factores daño INVÍAS 21

Ilustración 8. Consumo de fatiga y erosión según el espesor de losa (PCA-84) 24

Ilustración 9. Espesor de losa adoptado frente al requerido por la PCA-84 en cada alternativa rígida 26

Ilustración 10. Sección transversal de la calzada con sardinel prefabricado, dibujada a escala 28

Ilustración 11. Sardinel prefabricado A-10 instalado: sección transversal a escala y alzado de las piezas 29

Ilustración 12. Planta de modulación de juntas, con pasadores y barras de anclaje 30

Ilustración 13. Abertura de la junta transversal según la longitud de la losa 32

Ilustración 14. Reparto de la carga de rueda entre los pasadores de la junta 33

Ilustración 15. Detalle de la junta transversal de contracción y del sello (esquema sin escala) 35

Ilustración 16. Detalles de las juntas longitudinal, de construcción y de aislamiento (esquemas sin escala) 35

Ilustración 17. Empalme con un pavimento de concreto existente, a escala 36

Ilustración 18. Empalme con un pavimento asfáltico existente, a escala 37

Ilustración 19. Empalme con una vía en afirmado, a escala 38

Ilustración 20. Juntas de aislamiento en pozos de inspección y sumideros, planta a escala 38

Ilustración 21. Sección de las juntas de aislamiento en pozo de inspección y en sumidero, a escala 39

Ilustración 22. Pavimento sobre una alcantarilla de cajón o tubería transversal, corte longitudinal a escala 40

Ilustración 23. Junta de aislamiento con pasador y capuchón contra una estructura a nivel de la rasante, a escala 40

Ilustración 24. Esquema de sección de las alternativas rígidas seleccionadas (espesores en cm) ... 42

Ilustración 25. Modelo de elementos finitos de la alternativa A1: capas, apoyo, malla, juntas y carga 43

Ilustración 26. A1. Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa: tracción principal sobre la deformada de la malla 45

Ilustración 27. A1. Eje sencillo en la esquina: deflexión sobre la deformada de la malla 45

Ilustración 28. A1. Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa: mapas de deflexión y tracción en planta (sentido del tránsito de izquierda a derecha) 46

Ilustración 29. A1. Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa: esfuerzo vertical en la base y la subrasante, en la sección transversal que pasa por el eje 46

Ilustración 30. Alternativa rígida A1 y estructura flexible equivalente (espesores en cm) 49

Ilustración 31. Costo acumulado en valor presente durante 25 años (índice: costo inicial del rígido = 1,00) 50

Ilustración 32. Canasta de pasadores sugerida para las juntas transversales de contracción (vista isométrica) 53

CONTROL DEL DOCUMENTO

Identificación

Campo	Contenido
Documento	Memorias de diseño de pavimento rígido, Carrera 25 entre calles 15A y 16, calzada de 7,20 m
Propietario	Municipio de Sabana de Torres
Localización	Sabana de Torres, Santander
Versión	V01
Fecha de emisión	22/10/2026
Elaboró	Ing. Luis Alberto Cervera Terán, M.P. 68202-72037 STD

Registro de versiones

Versión	Fecha	Descripción del cambio
V01	22/10/2026	Primera emisión

RESUMEN EJECUTIVO

Esta memoria sustenta el diseño del pavimento rígido de la Carrera 25 entre calles 15A y 16, en Sabana de Torres, Santander: una calzada de 7,20 m en 2 carriles, con bombeo de 2 % hacia sardineles prefabricados, para un período de diseño de 25 años. La estructura que se construirá es una losa de concreto de 22,0 cm, con módulo de rotura de 4,1 MPa, sobre 15 cm de base granular.

El tránsito de diseño es de $6{,}65\times10^5$ ejes equivalentes de 80 kN, con 75,1 vehículos pesados por día (categoría T0 del manual ICPC-INVÍAS). La subrasante tiene CBR de diseño de 13,1 %, el menor de la exploración, medido en PDC-03 (PDC); con él resultan un módulo resiliente de 91,4 MPa y un módulo de reacción de 57,8 MPa/m, que la base eleva a 65,8 MPa/m. El espesor de la losa queda fijado por las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS (T0, S4), que fijan el espesor mínimo; la PCA-84 pide 18,0 cm y la AASHTO-93 19,5 cm, de modo que la losa adoptada tiene consumos de 0,0 % por fatiga y 1,0 % por erosión.

Tabla **1**. Resumen de los datos y resultados del diseño

Aspecto	Resultado
Vía	Carrera 25 entre calles 15A y 16; calzada de 7,20 m en 2 carriles
Tránsito de diseño	$6{,}65\times10^5$ ejes de 80 kN en 25 años; 75,1 vehículos pesados por día; categoría T0; camión de diseño C3, 6 t + tándem de 22 t (PBV 28 t)
Subrasante	CBR de diseño 13,1 %; M_R 91,4 MPa; k 57,8 MPa/m; clase S4 (ICPC-INVÍAS)
Estructura recomendada (A1)	Losa de 22,0 cm, MR 4,1 MPa (f'_c 28 MPa); base granular clase B de 15 cm
Losas y juntas	Losas de 3,60 × 3,60 m; pasadores Ø 1" × 40 cm cada 30 cm; barras de anclaje Ø 3/8" × 65 cm cada 65 cm; corte de 74 mm y sello de 6 mm
Drenaje	Bombeo de 2 %; pendiente longitudinal mínima de 0,5 %; sardinel prefabricado; juntas selladas
Verificación PCA-84 y AASHTO-93	Fatiga 0,0 %; erosión 1,0 %; AASHTO-93 requiere 19,5 cm
Verificación por elementos finitos	2,16 MPa (53 % del MR) de tracción máxima con los ejes máximos según la norma; transferencia de carga 84,4 %
Ciclo de vida frente al flexible	Índice de costo en valor presente a 25 años: rígido 1,02; flexible 1,40 (costo inicial del rígido = 1,00)

Los capítulos siguientes sustentan estas cifras: el tránsito y la subrasante fijan las solicitaciones y el soporte; los métodos PCA-84 y AASHTO-93 y las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS fijan el espesor; el diseño de juntas dimensiona las losas, los pasadores y las barras de anclaje; la selección compara las alternativas que no resultan dominadas; el modelo de elementos finitos comprueba esfuerzos y deformaciones con los ejes máximos según la norma; la comparación con el pavimento flexible muestra que el rígido cuesta menos en el ciclo de vida, y el proceso constructivo resume los procedimientos sugeridos y remite a la norma que los rige.

1. OBJETO Y ALCANCE

El diseño sigue el Manual de diseño de pavimentos de concreto ICPC-INVÍAS (2008) y las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS 2022, Art. 500. En este documento se presenta el diseño de la estructura de pavimento rígido de la Carrera 25 entre calles 15A y 16, en Sabana de Torres, Santander, dentro del proyecto Pavimentos Sabana de Torres. Se evaluaron varias alternativas de estructura y se recomienda la más conveniente para las condiciones del sitio.

La memoria recoge los métodos de cálculo, los criterios adoptados, el estudio del tránsito y de la subrasante, el dimensionamiento, el diseño de juntas, la selección de alternativas y las especificaciones de construcción.

2. GENERALIDADES DEL SITIO

2.1. LOCALIZACIÓN

La Carrera 25 entre calles 15A y 16 está en el casco urbano de Sabana de Torres, al noroeste del departamento de Santander, en el Magdalena Medio santandereano, a unos 110 km de Bucaramanga y a una elevación aproximada de 132 m s. n. m. La Ilustración 3 muestra el tramo de diseño y la ubicación de los puntos de exploración.

2.2. CLIMA

Sabana de Torres tiene clima cálido húmedo según la clasificación de Caldas-Lang. Según las normales climatológicas del IDEAM (1981 a 2010), la temperatura media es de 27,6 °C y la máxima media diaria de 33,5 °C; las mínimas nocturnas rondan los 23 °C y la oscilación diaria pesa más que la estacional. La humedad relativa media es de 83 % y el brillo solar, de 1.600 a 1.800 horas al año.



Ilustración 1. Localización de Sabana de Torres en el departamento de Santander

Fuente: estudio de suelos y geotecnia del Box Culvert de la Calle 16, Sabana de Torres (2026)

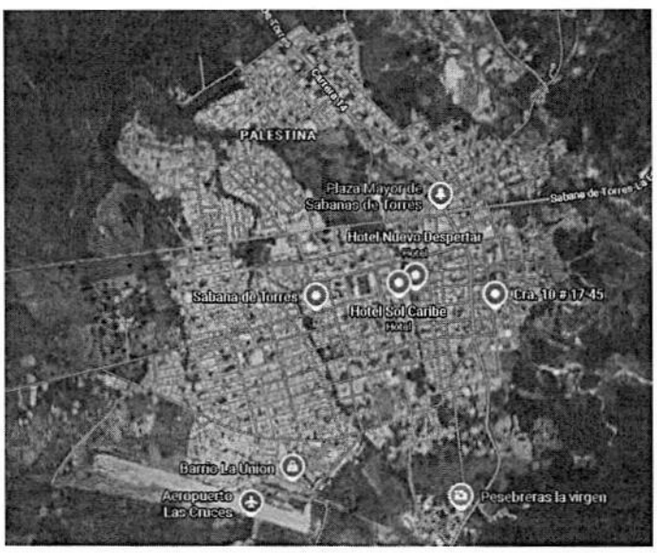


Ilustración 2. Casco urbano de Sabana de Torres, imagen satelital

Fuente: estudio de suelos y geotecnia del Box Culvert de la Calle 16, Sabana de Torres (2026)



Ilustración 3. Localización de la vía y de los puntos de exploración, imagen satelital

Fuente: Google Maps (2026); localización de los puntos de exploración: elaboración propia

El régimen de lluvias es bimodal, gobernado por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical, con 2.400 a 3.000 mm al año. Las temporadas húmedas van de abril a junio y de septiembre a

noviembre; la segunda es la más intensa. La temporada seca principal va de enero a marzo y el veranillo, de julio a agosto.

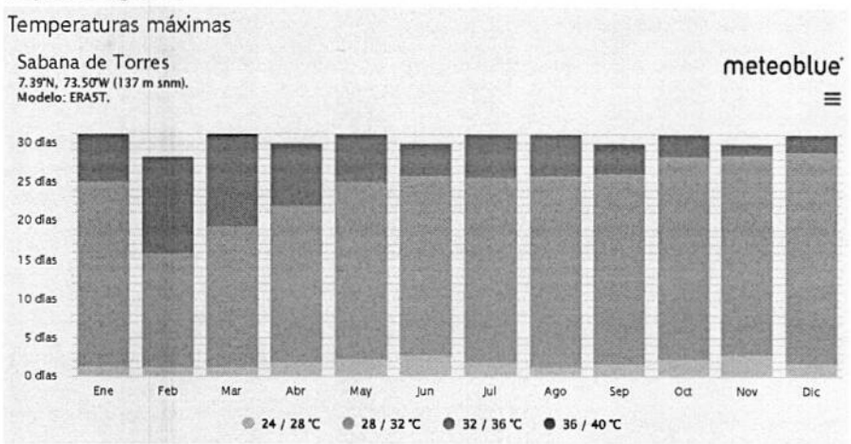


Ilustración 4. Temperaturas máximas diarias en Sabana de Torres: número de días de cada mes por rango de temperatura

Fuente: meteoblue, modelo ERA5T, 7,39° N y 73,50° W

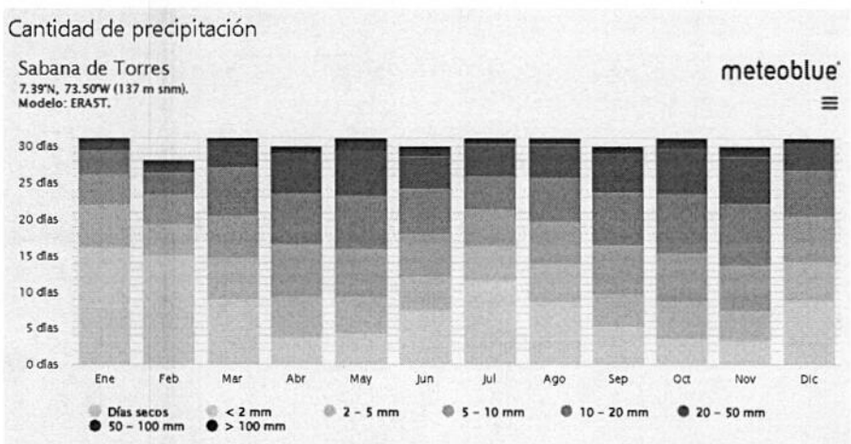


Ilustración 5. Precipitación diaria en Sabana de Torres: número de días de cada mes por rango de lluvia

Fuente: meteoblue, modelo ERA5T, 7,39° N y 73,50° W

Para la obra, estas condiciones significan lluvias intensas en buena parte del año, alta evaporación en las horas de sol y concreto caliente al vaciarlo. El bombeo de la calzada, el sellado de las juntas y el curado con agua que fija el proceso constructivo responden a ellas.

2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Sabana de Torres se ubica en el sector norte de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, sobre depósitos cuaternarios aluviales y fluviolacustres de los ríos Lebrija y Sogamoso. Bajo ellos están la

Formación Mesa, del Plioceno al Pleistoceno, de conglomerados, areniscas y arcillolitas, y en profundidad los grupos Real y Colorado (ANH, 2010; SGC, 2017; Gómez et al., 2005, citados en el estudio de suelos del Box Culvert de la Calle 16).

En el municipio se distinguen tres unidades geomorfológicas: la planicie aluvial activa, de 50 a 120 m s. n. m., inundable, con suelos finos saturados y nivel freático entre 0 y 3 m; las sabanas y terrazas disectadas, de 100 a 300 m s. n. m., con suelos residuales y nivel freático de 3 a 6 m; y el lomerío oriental, de 200 a 400 m s. n. m. Por su elevación, el casco urbano está en la unidad de sabanas y terrazas.

La geología se presenta a escala regional, sin ampliarla, porque no es relevante para este tipo de estructura: el pavimento y su zona de influencia no superan 2 m de profundidad. La losa reparte la carga, y el esfuerzo vertical que llega a la subrasante es de pocos kPa (capítulo de verificación por elementos finitos). A esa profundidad el comportamiento lo definen los suelos de la exploración, con los ensayos SPT, PDC y de laboratorio que se presentan en el capítulo de subrasante; las unidades geológicas más profundas no intervienen en el diseño.

2.4. HIDROLOGÍA Y NIVEL FREÁTICO

Las aguas lluvias del casco urbano drenan hacia la subzona hidrográfica del río Sogamoso, que desemboca en el Magdalena entre Puerto Wilches y Barrancabermeja. En el estudio del Box Culvert de la Calle 16, en el mismo casco urbano, el subsuelo está formado por arenas SM, SC y SP de compacidad baja a media, con el nivel freático a 3,5 m.

En esta vía, el laboratorio clasifica la subrasante como arena bien gradada con limo (SW-SM) no plástica, y el nivel freático se encontró a 2,60 m de profundidad. Esos resultados concuerdan con el marco geológico: suelos granulares finos de terraza, sin arcillas expansivas y con el agua por debajo de la zona de influencia del pavimento.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. INTERPRETACIÓN DE LA EXPLORACIÓN DE LA SUBRASANTE

El soporte de la subrasante se expresa con el CBR. La exploración lo obtiene por tres caminos: el ensayo CBR de laboratorio, cuando existe; las correlaciones de los ensayos de campo, PDC y SPT; y las correlaciones con las propiedades índice de las muestras clasificadas en el laboratorio. En cada punto manda el CBR de laboratorio; sin él, el menor entre el PDC y el SPT, y solo sin ensayos de campo válidos, el de las propiedades índice. La clasificación de laboratorio (SUCS, INV E-181) define el tipo de suelo y reemplaza la descripción de campo del sondeo, que es preliminar; a las muestras que no se clasificaron se les aplica la clasificación de laboratorio más cercana del mismo sondeo.

Penetrómetro dinámico de cono (PDC). El ensayo (INV E-172-13, ASTM D6951) hinca un cono de 60° y 20 mm de diámetro con un martillo de 8 kg que cae 575 mm, y registra la penetración acumulada. El índice DN es la penetración por golpe. El perfil se divide en capas donde cambia la

pendiente de la curva de golpes acumulados contra profundidad, y cada capa toma el DN medio de sus lecturas (ASTM D6951, numeral 7.2). El CBR de cada capa se obtiene con las correlaciones del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (Webster et al., 1992 y 1994), que la ASTM D6951 adopta: la general, para todos los suelos salvo las arcillas de baja plasticidad (CL) con CBR menor de 10 % y las de alta plasticidad (CH), y una propia para cada una de esas dos.

Todos los suelos, salvo CL con CBR menor de 10 % y CH:

$$\mathrm{CBR} = \frac{292}{\mathrm{DN}^{1,12}}$$

Arcillas de baja plasticidad (CL) con CBR menor de 10 %:

$$\mathrm{CBR} = \frac{1}{(0{,}017019 \cdot \mathrm{DN})^2}$$

Arcillas de alta plasticidad (CH):

$$\mathrm{CBR} = \frac{1}{0{,}002871 \cdot \mathrm{DN}}$$

Donde:

CBR: relación de soporte de California, en %

DN: índice de penetración del cono, en mm/golpe

El valor es un CBR en el sitio, con la humedad natural del suelo en la fecha del ensayo. El manual INVÍAS (2007, 4.4.1) pide que el PDC penetre al menos 0,80 m bajo la subrasante, y el diseño toma la capa de menor soporte dentro de esa zona.

Ensayo de penetración estándar (SPT). El ensayo (INV E-111-13, ASTM D1586) cuenta los golpes de un martillo de 63,5 kg con caída de 760 mm para hincar el muestreador en tres tramos de 150 mm; N es la suma de los dos últimos. El N de campo se corrige a la energía de referencia del 60 % y por la longitud de varillaje, que en sondeos someros pierde parte de la energía (Skempton, 1986):

$$N_{60} = N \cdot \frac{E_R}{60} \cdot \lambda_R$$

Donde:

N_{60}: número de golpes corregido a 60 % de energía

N: número de golpes de campo

E_R: eficiencia de energía del equipo, en %

λ_R: factor por longitud de varillaje: 0,75 con varillas de menos de 3 m y hasta 1,00 con 10 m o más

La correlación entre el SPT y el CBR depende del tipo de suelo, que fija la clasificación de laboratorio. En suelos granulares se usa la de Livneh (1989, Transportation Research Record 1219), calibrada con ensayos CBR en el sitio en suelos granulares y aplicable para CBR de 15 % o más; los valores menores quedan fuera de su rango y no se usan en el diseño:

$$\log(\mathrm{CBR}) = -5{,}13 + 6{,}55 \cdot (\log \mathrm{SPT})^{-0{,}26}$$

$$\mathrm{SPT} = \frac{300}{N}$$

Donde:

CBR: relación de soporte de California, en %
SPT: penetración media por golpe, en mm/golpe
N: número de golpes para hincar 300 mm el muestreador, corregido por energía al 60 % (N_{60})

En suelos cohesivos se estima primero la resistencia al corte no drenada con la relación de Terzaghi y Peck (1967) y luego el CBR con la de Black y Lister (1979), propuesta para subrasantes de arcilla, válida en suelos finos saturados o casi saturados:

$$S_u = 6{,}25 \cdot N_{60}$$

$$\mathrm{CBR} = \frac{S_u}{23}$$

Donde:

S_u: resistencia al corte no drenada, en kPa
N_{60}: número de golpes corregido
CBR: relación de soporte resultante, en %

En los dos casos el CBR del SPT es una estimación indirecta: se usa para identificar la zona de menor soporte y para contrastar el PDC, y en el punto de exploración se toma el menor de los dos.

Propiedades índice. Sin ensayos de campo válidos, el CBR se estima con las ecuaciones del manual INVÍAS (2007, 4.4.1), que dependen del producto wPI entre el pasa 200 (en decimal) y el índice de plasticidad. Para suelos con wPI = 0 se usa el diámetro D_{60} de la curva granulométrica:

$$\mathrm{CBR} = 28{,}09 \cdot {D_{60}}^{0{,}358} \quad (\mathrm{wPI} = 0)$$

$$\mathrm{CBR} = \frac{75}{1 + 0{,}728 \cdot \mathrm{wPI}} \quad (\mathrm{wPI} > 0)$$

Donde:

D_{60}: tamaño de partícula por el que pasa el 60 % de la muestra, en mm
wPI: producto del pasa 200, en decimal, por el índice de plasticidad, en %
CBR: valor estimado, en %

El pasa 200 es la fracción total menor de 0,075 mm: lo que se pierde en el lavado más lo que pasa en el tamizado en seco, referido a la masa seca inicial (INV E-123).

CBR de diseño. Con menos de cinco puntos de exploración, el CBR de diseño es el menor de ellos, de modo que la estructura cubre la zona de menor soporte (INVÍAS 2007, 4.4.1, paso 6.2); con cinco o más se aplica el percentil del Instituto del Asfalto según el nivel de tránsito.

3.2. PAVIMENTO RÍGIDO: MÉTODO PCA-84

El Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, elaborado por el Instituto Colombiano de Productores de Cemento para el INVÍAS (ICPC-INVÍAS, 2008), es el documento con que el INVÍAS rige el diseño de pavimentos de concreto. Sus tablas de diseño (Tablas 4-1 a 4-7) dan el espesor de losa según la categoría de tránsito (T0 a T6, por ejes equivalentes), la clase de subrasante (S1 a S5), el módulo de rotura del concreto, el tipo de apoyo y la transferencia de carga. Esas tablas se construyeron con los dos métodos de diseño de pavimentos de concreto más usados en Colombia, el de la PCA (1984) y el de la AASHTO (1993) (capítulo 4). Esta memoria los aplica con el tránsito propio de la vía. La losa de concreto se modela como una placa delgada sobre una fundación de Winkler, o de líquido denso: un lecho de resortes independientes cuya rigidez es el módulo de reacción k. La rigidez relativa entre losa y apoyo se expresa con el radio de rigidez relativa *l*. Los esfuerzos y deflexiones del método se obtuvieron por elementos finitos (programa JSLAB) para las posiciones críticas de carga: el borde longitudinal a media losa para el esfuerzo y la esquina para la deflexión.

$$\ell = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12(1-\mu^2)k}}$$

Donde:

l: radio de rigidez relativa, en m
E: módulo de elasticidad del concreto, en MPa
h: espesor de la losa, en m
μ: relación de Poisson del concreto, igual a 0,15
k: módulo de reacción del apoyo, en MPa/m

Con *l* grande la losa reparte la carga en un área mayor del apoyo.
El método verifica dos modos de falla. El primero es la fatiga del concreto: el esfuerzo equivalente de borde, dividido entre el módulo de rotura, da la relación de esfuerzos S_r, y esta fija el número admisible de repeticiones N_f. El segundo es la erosión del apoyo: la potencia P mide la tasa de trabajo con que la carga en la esquina deforma la fundación, causa de bombeo, pérdida de soporte y escalonamiento, y fija el número admisible N_e.

$$\log N_f = 11{,}737 - 12{,}077 \cdot S_r \quad (S_r \geq 0{,}55) \qquad N_f = \left(\frac{4{,}2577}{S_r - 0{,}4325}\right)^{3{,}268} \quad (0{,}45 < S_r < 0{,}55)$$

$$P = 268{,}7\frac{p^2}{h \cdot k^{0{,}73}} \qquad \log N_e = 14{,}524 - 6{,}777(C_1 P - 9)^{0{,}103} - \log C_2$$

Donde:

S_r: relación de esfuerzos, cociente entre el esfuerzo equivalente de borde σ_{eq} y el módulo de rotura MR del concreto; σ_{eq} lo tabula la PCA-84 según el tipo de eje, el espesor de losa, el k del apoyo y la berma
N_f: número admisible de repeticiones de un eje por fatiga

P: potencia, o tasa de trabajo, con que la carga en la esquina deforma el apoyo
p: presión de la losa sobre el apoyo bajo la esquina, igual a k por la deflexión de esquina, en psi
h: espesor de la losa, en pulgadas
k: módulo de reacción del apoyo, en pci
N_e: número admisible de repeticiones por erosión
C_1: factor de ajuste por tipo de apoyo: 1,0 sobre base granular y 0,9 sobre base tratada
C_2: factor por berma: 0,06 sin berma de concreto y 0,94 con berma de concreto unida a la losa

Las expresiones de erosión se aplican en las unidades originales del método.
Con $S_r \leq 0{,}45$ las repeticiones admisibles por fatiga son ilimitadas. El daño de cada grupo de cargas se acumula según la hipótesis de Miner, y el espesor es adecuado cuando ambos consumos son iguales o menores al 100 %. Las cargas se mayoran por el factor de seguridad LSF. Los ejes trídem se tratan con el Apéndice C del método.

$$\text{Consumo} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \cdot 100 \leq 100\%$$

Donde:

n_i: número de repeticiones esperadas del grupo de carga i en el carril de diseño durante el período de diseño
N_i: número admisible de repeticiones del grupo i: N_f para la fatiga y N_e para la erosión

Las cargas de cada grupo entran a las tablas multiplicadas por el factor de seguridad de carga LSF.

3.3. PAVIMENTO RÍGIDO: MÉTODO AASHTO-93

Es el segundo método adoptado por el manual ICPC-INVÍAS. Es empírico y proviene del AASHO Road Test. Relaciona el número de ejes equivalentes de 80 kN (W_{18}) que llevan la serviciabilidad desde p_i hasta p_t con el espesor de losa D, las propiedades del concreto (S_c, E_c), el soporte (k), la transferencia de carga (J) y el drenaje (C_d). La confiabilidad R introduce el producto $Z_R \cdot S_o$, que cubre la dispersión del tránsito y del comportamiento. En esta memoria se usa como verificación del espesor obtenido por la PCA-84.

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 7{,}35\log(D+1) - 0{,}06 + \frac{\log(\Delta PSI/3)}{1 + 1{,}624 \cdot 10^7/(D+1)^{8{,}46}} + (4{,}22 - 0{,}32 p_t)\log\frac{S_c C_d (D^{0{,}75} - 1{,}132)}{215{,}63 J (D^{0{,}75} - 18{,}42/(E_c/k)^{0{,}25})}$$

Donde:

W_{18}: número de ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño durante el período de diseño
Z_R: desviación normal estándar asociada a la confiabilidad R

S_o: desviación estándar combinada del tránsito y del comportamiento
D: espesor de la losa, en pulgadas
ΔPSI: pérdida de serviciabilidad, $p_i - p_t$
p_i, p_t: serviciabilidad inicial y final
S_c: módulo de rotura del concreto, en psi
C_d: coeficiente de drenaje
J: coeficiente de transferencia de carga en juntas y bordes
E_c: módulo de elasticidad del concreto, en psi
k: módulo de reacción del apoyo, en pci

La ecuación es empírica y se resuelve en esas unidades; los resultados se presentan en el Sistema Internacional.

3.4. JUNTAS

Las juntas permiten que la losa se contraiga, se dilate y se alabee sin fisurarse al azar. En las juntas transversales de contracción, el corte de un tercio del espesor debilita la sección y la losa se fisura bajo él. La carga de una losa pasa a la siguiente por la fricción entre las caras rugosas de esa fisura o mediante pasadores, barras lisas colocadas a media altura.
La fricción solo transmite carga mientras la fisura se mantenga cerrada. El manual ICPC-INVÍAS acepta juntas sin pasadores cuando la abertura no supera 1 mm y se cumplen las demás condiciones del numeral 6.1.2.1; de lo contrario, exige pasadores. La abertura se estima con la expresión de la guía AASHTO-93:

$$\Delta L = C \cdot L \cdot (\alpha_c \cdot \Delta T + \varepsilon)$$

Donde:

ΔL: abertura de la junta transversal, en mm
C: factor de fricción con el apoyo: 0,80 sobre material granular y 0,65 sobre material tratado
L: longitud de la losa, igual a la separación entre juntas transversales, en mm
α_c: coeficiente de dilatación térmica del concreto, en 1/°C; depende del agregado
ΔT: diferencia entre la temperatura del concreto al colocarlo y la mínima del sitio, en °C
ε: retracción por secado del concreto, en mm/mm; disminuye al aumentar la resistencia a la tracción indirecta

El pasador se analiza como una viga sobre apoyo elástico. El que está bajo la rueda toma la mayor parte de la carga transmitida, y los vecinos, una fracción que decrece linealmente hasta 1,8·*l*. La presión que el pasador ejerce sobre el concreto no debe superar el valor admisible f_b, que depende del diámetro y de la resistencia del concreto:

$$y_0 = \frac{P_t(2+\beta z)}{4\beta^3 E_d I_d} \qquad \beta = \sqrt[4]{\frac{Kd}{4E_d I_d}} \qquad \sigma_b = K \cdot y_0 \leq f_b = \frac{101{,}6 - d}{76{,}2} \cdot f_c{}'$$

Donde:

y_0: deflexión del pasador en la cara de la junta, en mm
P_t: carga que recibe el pasador más solicitado, en N
β: rigidez relativa entre el pasador y el concreto que lo rodea, en 1/mm
z: ancho de la junta, en mm
E_d: módulo de elasticidad del acero del pasador, 200.000 MPa
I_d: momento de inercia del pasador, $\pi \cdot d^4/64$, en mm^4
K: módulo de soporte del concreto bajo el pasador, 407 N/mm^3
d: diámetro del pasador, en mm
σ_b: esfuerzo de aplastamiento del concreto en la cara de la junta, en MPa
f_b: esfuerzo de aplastamiento admisible, en MPa
f'_c: resistencia a la compresión del concreto, en MPa

En la expresión de f_b, 101,6 mm y 76,2 mm son las constantes de 4 y 3 pulgadas de la formulación original.

Las barras de anclaje, corrugadas, mantienen unidas las losas a lado y lado de la junta longitudinal. Su sección resiste la fricción de la losa con el apoyo hasta el borde libre más cercano; el manual ICPC-INVÍAS tabula la separación resultante:

$$A_s = \frac{b \cdot f \cdot w}{f_s}$$

Donde:

A_s: área de acero requerida por metro de junta longitudinal, en mm^2/m
b: distancia de la junta al borde libre más cercano, en m
f: coeficiente de fricción entre la losa y el apoyo, del orden de 1,5 sobre materiales granulares
w: peso de la losa por unidad de área, en N/m^2
f_s: esfuerzo de trabajo del acero, una fracción de su límite de fluencia, en MPa

4. CRITERIOS DE DISEÑO

El manual ICPC-INVÍAS de pavimentos de concreto está escrito para carreteras. En vías urbanas se toma como referencia técnica y se complementa con los espectros de carga urbanos de la PCA-84. Los criterios que gobiernan el diseño son los siguientes:

Tabla **2**. Criterios de diseño

Criterio	Valor adoptado	Fundamento
Período de diseño	25 años	ICPC-INVÍAS 2008

Criterio	Valor adoptado	Fundamento
Tránsito	Composición vehicular con factores daño INVÍAS; espectro derivado de la composición del aforo con los factores daño INVÍAS	INVÍAS 2007, Tabla 2.4; PCA-84, Tablas 9 y 15
Subrasante	CBR de diseño 13,1 % (menor de 2 puntos)	Menor valor de la exploración, INVÍAS 2007, 4.4.1, paso 6.2
Concreto	MR 4,10 MPa (f'_c 28 MPa), no menor que el mínimo de 4,0 MPa; $f'_c \geq 28$ MPa	INVÍAS 2022, Tabla 500-8; ICPC-INVÍAS 2008
Rígido: criterio de aceptación	Fatiga y erosión ≤ 100 %; espesor ≥ 13 cm y $\geq$ AASHTO-93	PCA-84; ICPC-INVÍAS 2008
Rígido: AASHTO-93	R = 85 %, So = 0,35, ΔPSI = 2,5	AASHTO-93, Parte II
Juntas	L $\leq$ menor entre 5 m y 24·e; relación de lados $\leq 1,3$; juntas sin pasadores solo si se cumplen las condiciones del ICPC-INVÍAS; pasadores verificados al aplastamiento	INVÍAS 2022, Art. 500; ICPC-INVÍAS 2008, cap. 6
Selección de alternativas	Matriz técnica de 6 criterios de igual peso	Capítulo 9 de esta memoria

5. TRÁNSITO

TPD de 126 veh/día con 59,6 % de buses y camiones según el aforo, es decir 75,1 vehículos pesados por día en los dos sentidos (ADTT); crecimiento de 2,6 % anual, Fd = 0,50 y Fca = 1,00. La PCA-84 reparte esos vehículos entre los grupos de carga del espectro y cuenta las repeticiones de cada grupo en el carril de diseño:

$$n_i = \frac{e_i}{1000} \cdot \mathrm{ADTT} \cdot 365 \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r} \cdot F_d \cdot F_{\mathrm{ca}}$$

Donde:

n_i: número de repeticiones del grupo de carga i en el carril de diseño durante el período de diseño

e_i: número de ejes del grupo i por cada 1.000 vehículos pesados, del espectro de cargas

ADTT: número de vehículos pesados por día en los dos sentidos

r: tasa de crecimiento anual del tránsito, en decimal

n: período de diseño, en años

F_d: factor de distribución por dirección

F_{ca}: factor de distribución por carril

El tránsito de diseño se toma del aforo más exigente de los estudios disponibles para el sector, el de la Calle 10 (estudio de tránsito del barrio Buenos Aires, junio de 2024, siete días): 62 vehículos pesados por día, que con el 15 % de tránsito generado y la proyección a 2026 con el 2,64 % anual dan 75,1 vehículos pesados por día. Los aforos de 2019 sobre la Carrera 11 (calles 2 a 8A) y la Carrera 25 (calles 13 a 16) registran entre 16 y 17 vehículos comerciales por día, de modo que el valor

adoptado los cubre con amplitud. Las cargas por eje se derivan de la composición de ese aforo con los factores daño INVÍAS.

Tabla **3**. Tránsito de diseño

Parámetro	Valor
Período de diseño (años)	25
Camiones en el carril de diseño	476.796
Ejes equivalentes de 80 kN de diseño	$6{,}65\times10^{5}$
Categoría	T0 (ICPC-INVÍAS)

Los $6{,}65\times10^{5}$ ejes equivalentes salen del aforo adoptado, con los factores de equivalencia del pavimento de concreto, que dependen del espesor de losa. Con ese valor la vía queda en la categoría T0 del manual ICPC-INVÍAS, que va hasta $1{,}00\times10^{6}$ ejes; el tránsito medido queda 34 % por debajo del límite superior de la categoría. La categoría solo se usa para entrar a las tablas de diseño del manual; los métodos PCA-84 y AASHTO-93 trabajan con el tránsito de los conteos, eje por eje.
El camión de diseño es el vehículo más pesado de la composición del aforo: el C3, camión rígido de tres ejes de la categoría C3-C4, con eje delantero sencillo de llanta sencilla de 6 t y eje trasero tándem de llanta doble de 22 t, para un peso bruto vehicular máximo de 28 t (Resolución 4100 de 2004, Art. 8, modificado por la Resolución 1782 de 2009). La Ilustración 6 y la Tabla 4 muestran su configuración, sus cargas por eje y sus dimensiones máximas según la Resolución 4100 de 2004 (Arts. 7, 8 y 9), con el peso bruto vehicular de la Resolución 1782 de 2009. Las cargas máximas por eje según la norma, el sencillo de llanta doble de 11 t y el tándem de ocho llantas de 22 t, son las que se aplican en el modelo de elementos finitos; el espesor se dimensiona con el espectro completo de la composición.

Camión de diseño C3, camión rígido de tres ejes (designación 3, Resolución 4100 de 2004)

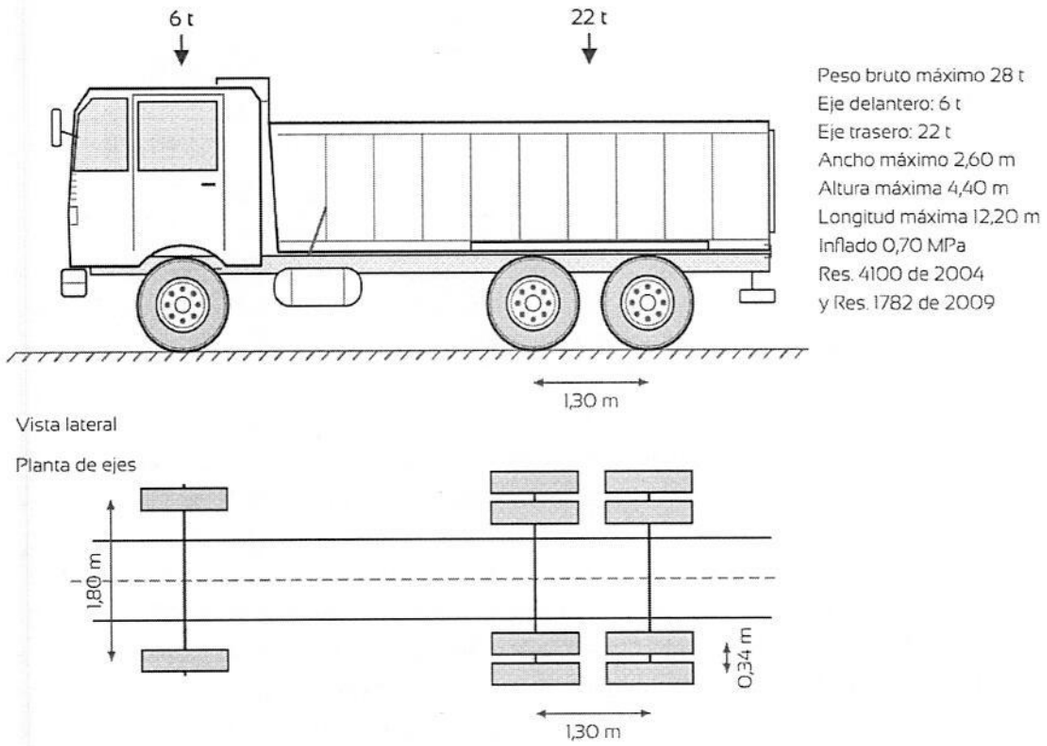


Ilustración 6. Camión de diseño C3: configuración, cargas por eje y dimensiones máximas según la Resolución 4100 de 2004, modificada por la Resolución 1782 de 2009

Fuente: elaboración propia

Tabla **4.** Camión de diseño C3

Característica	Valor	Fuente
Designación	C3, camión rígido de tres ejes	Resolución 4100 de 2004, Art. 4 (designación 3)
Eje delantero sencillo de dos llantas	6 t	Resolución 4100 de 2004, Art. 9
Eje trasero tándem de ocho llantas	22 t; ejes a 1,30 m	Resolución 4100 de 2004, Art. 9
Peso bruto vehicular máximo	28 t; tolerancia de medición 700 kg	Resolución 4100 de 2004, Art. 8, modificado por la Resolución 1782 de 2009
Dimensiones máximas	Ancho 2,60 m; altura 4,40 m; longitud 12,20 m	Resolución 4100 de 2004, Art. 7
Llantas	Trocha de 1,80 m; duales a 0,34 m; presión de inflado de 0,70 MPa	Parámetros del modelo de elementos finitos

El espectro de cargas por eje se deriva de la composición del aforo (Ilustración 7). Cada clase de vehículo pesado se representa con sus ejes cargados (70 %) y vacíos; las cargas por eje reproducen los factores daño del manual INVÍAS (2007) con la ley de cuarta potencia, referida a 6,6 t en eje sencillo de llanta sencilla, 8,2 t en sencillo de llanta doble, 15 t en tándem y 23 t en trídem, con el eje direccional típico de cada clase. Así el espectro representa los buses y camiones que circulan por la vía, en lugar de los espectros de ejemplo de la PCA-84, que provienen de carreteras de Estados Unidos. Cada grupo de carga se convierte en repeticiones esperadas en el carril de diseño durante el período de diseño.

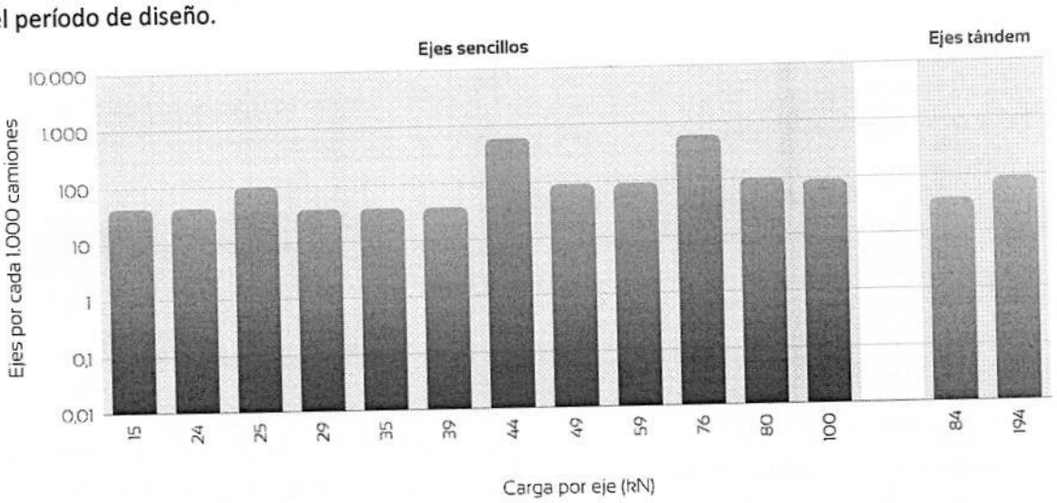


Ilustración 7. Espectro de cargas por eje, derivado de la composición del aforo con los factores daño INVÍAS

Fuente: elaboración propia

6. SUBRASANTE

La Carrera 25 está en afirmado de grava de canto rodado, que funciona como subbase existente sobre la subrasante hasta unos 0,50 m; el SPT y el PDC se ejecutaron por debajo de ella. La subrasante natural es arena bien gradada con limo, de color café y naranja con manchas de oxidación (SW-SM, A-1-b, no plástica): entre 0,6 y 1,0 m el índice PDC es de 16 mm/golpe, entre 1,0 y 1,45 m es compacta (N de campo de 27 a 37, índice PDC de 4 a 10 mm/golpe) y desde 1,45 m baja a 11 a 14 mm/golpe, con humedad de 13 %; el nivel freático está a 2,60 m. El diseño toma el CBR de la capa natural superior, la de menor soporte, y no cuenta el aporte del afirmado existente que quede bajo la nueva estructura.

Los registros de exploración de los sondeos SPT y de los ensayos PDC se presentan en el Anexo A; los resultados de los ensayos de laboratorio, en el Anexo B, y el registro fotográfico, en el Anexo C.

La exploración de campo comprende 1 ensayo de penetración dinámica de cono (PDC) y 1 sondeo SPT, en 2 puntos de la vía, localizados en la Ilustración 3. Bajo el afirmado de grava de canto rodado, la subrasante natural se encontró a 0,50 m de profundidad. La subrasante se evalúa desde 0,50 m

bajo el terreno actual, en una zona de 0,80 m. En cada punto se adopta el CBR de laboratorio; en su defecto, el menor entre el del PDC y el estimado con el SPT, y en último término el de las propiedades índice. Cuando una fuente tiene varios valores en la zona rige el menor.

Tabla **5**. Puntos de exploración y CBR de subrasante

Punto	SUCS	IP (%)	Pasa 200 (%)	CBR lab. (%)	CBR PDC (%)	CBR SPT (%)	CBR adoptado (%)	Fuente	NF bajo subrasante (m)
PDC-03	SW-SM	–	–	–	13,1	–	13,1	PDC	no detectado
SPT-02	SW-SM	NP	9	–	–	23,1	23,1	SPT	2,10

Los ensayos de penetración dinámica de cono se ejecutaron según INV E-172-13 y ASTM D6951, con los registros del Anexo A; el CBR de cada capa se obtiene del índice DN con la correlación del numeral 3.1 que corresponde al suelo.

Tabla **6**. Resultados de los ensayos PDC

Ensayo	Punto	Abscisa	Prof. máx. (mm)	Capa subrasante	DN (mm/golpe)	CBR (%)	Correlación
PDC-03	PDC-03	Carrera 25 con Calle 15A	1.575	1	16,00	13,1	USACE (Webster)

Los sondeos SPT (ASTM D1586, INV E-111-13), cuyos registros están en el Anexo A, definen la estratigrafía y el nivel freático; el N60 corrige el N de campo por energía y longitud de varillaje.

Tabla **7**. Resumen de los sondeos SPT

Sondeo	Prof. explorada (m)	Nivel freático (m)	N60 mínimo en 1,5 m bajo subrasante	Estratos blandos o sueltos
SPT-02	3,00	2,60	14,3	No

Los estratos encontrados se resumen a continuación. El tipo de suelo de cada tramo es el de la clasificación de laboratorio (resultados en el Anexo B) de la misma muestra o, si esta no se clasificó, el de la muestra clasificada más cercana del mismo sondeo; la descripción de campo del registro es preliminar y no se usa. En los PDC, los estratos son las capas del perfil de penetración, con el suelo de la clasificación asignada.

Tabla **8**. Estratos de la exploración

Punto	Prof. (m)	Suelo según el laboratorio	N campo	DN (mm/golpe)	Pasa 200 (%)	Humedad (%)
SPT-02	0,55 a 1,00	Arena bien gradada con limo (SW-SM), A-1-b	37	–	9	4,5
SPT-02	1,05 a 1,50	Arena bien gradada con limo (SW-SM), A-1-b; clasificación de la muestra a 0,75 m	27	–	–	–

Punto	Prof. (m)	Suelo según el laboratorio	N campo	DN (mm/golpe)	Pasa 200 (%)	Humedad (%)
SPT-02	1,55 a 2,00	Arena bien gradada con limo (SW-SM), A-1-b; clasificación de la muestra a 2,25 m	19	–	–	–
SPT-02	2,05 a 2,50	Arena bien gradada con limo (SW-SM), A-1-b	11	–	8	12,9
SPT-02	2,55 a 3,00	Arena bien gradada con limo (SW-SM), A-1-b; clasificación de la muestra a 2,25 m	47	–	–	–
PDC-03	0,60 a 1,00	Arena bien gradada con limo (SW-SM)	–	16,0	–	–
PDC-03	1,00 a 1,58	Arena bien gradada con limo (SW-SM)	–	8,8	–	–

El CBR de cada muestra del SPT en la zona de subrasante se estima con las correlaciones del numeral 3.1, según el tipo de suelo:

Tabla **9**. CBR estimado con el SPT en la zona de subrasante

Sondeo	Prof. (m)	Suelo	N campo	N60	Correlación	CBR (%)
SPT-02	1,00	Granular (SW-SM, laboratorio)	37	27,8	Livneh (1989)	23,1

Potencial de expansión bajo según los límites de consistencia (INVÍAS 2007, Tabla 4.2) y no expansiva según el ICPC-INVÍAS (Tabla 2-11). El nivel freático más alto queda a 2,10 m bajo la subrasante. La clase estimada por tipo de suelo y nivel freático (ICPC-INVÍAS, Tabla 2-14) es S5; es solo indicativa: el diseño usa la clase que resulta del CBR de diseño.

Los valores de CBR de la subrasante, ordenados de mayor a menor, son: SPT-02 23,1 %; PDC-03 13,1 %.

El CBR de diseño es 13,1 %, el menor de los 2 puntos de exploración, de modo que la estructura queda dimensionada para la zona de menor capacidad de soporte del tramo y cubre a las demás. La exploración de 2 puntos es suficiente para el diseño por las siguientes razones: el tramo es una vía urbana de longitud corta, sobre una misma unidad geológica y con igual condición de drenaje; la normativa vigente no fija un número mínimo de puntos de exploración ni de ensayos para el diseño de pavimentos urbanos, y deja el programa de exploración al criterio del diseñador (el manual INVÍAS 2007 propone una metodología sugerida para carreteras de bajo volumen y el manual ICPC-INVÍAS no establece un número); como referencia, la guía IDU GU-IC-019 para vías urbanas de bajo volumen considera un sondeo por tramo de 100 a 150 m, que la exploración de la vía supera; la subrasante se caracterizó con ensayos independientes (PDC, SPT), que se complementan entre sí; el PDC registra el perfil continuo de resistencia en toda la zona de subrasante, lo que permite reconocer las capas débiles en cada punto; y el valor adoptado es el más bajo de la exploración, que corresponde al criterio conservador del Manual INVÍAS 2007 (4.4.1, paso 6.2).

Módulo resiliente de 91,4 MPa por la correlación del manual INVÍAS (2007, ecuación 6):

$$M_R = 17{,}6 \cdot \mathrm{CBR}^{0{,}64}$$

Donde:

M_R: módulo resiliente de la subrasante, en MPa
CBR: relación de soporte de diseño, en %

El módulo de reacción de la subrasante se obtiene con la correlación de la FAA (AC 150/5320-6):

$$k = 7{,}79 \cdot \mathrm{CBR}^{0{,}7788}$$

Donde:

k: módulo de reacción de la subrasante, en MPa/m, equivalente al del ensayo de placa de 762 mm
CBR: relación de soporte de diseño, en %

Módulo de reacción de la subrasante k = 57,8 MPa/m. La base aumenta el k efectivo sobre el que se apoya la losa (Tabla 1 de la PCA-84); con base granular de 15 cm el k combinado es 65,8 MPa/m.

RECOMENDACIONES PARA LA SUBRASANTE

1. La subrasante se compactará al 95 % de la densidad seca máxima del ensayo Proctor modificado (INV E-142), libre de materia orgánica, y se protegerá de la saturación durante la construcción con el drenaje superficial previsto.

7. PAVIMENTO RÍGIDO

7.1. DISEÑO POR EL MÉTODO PCA-84

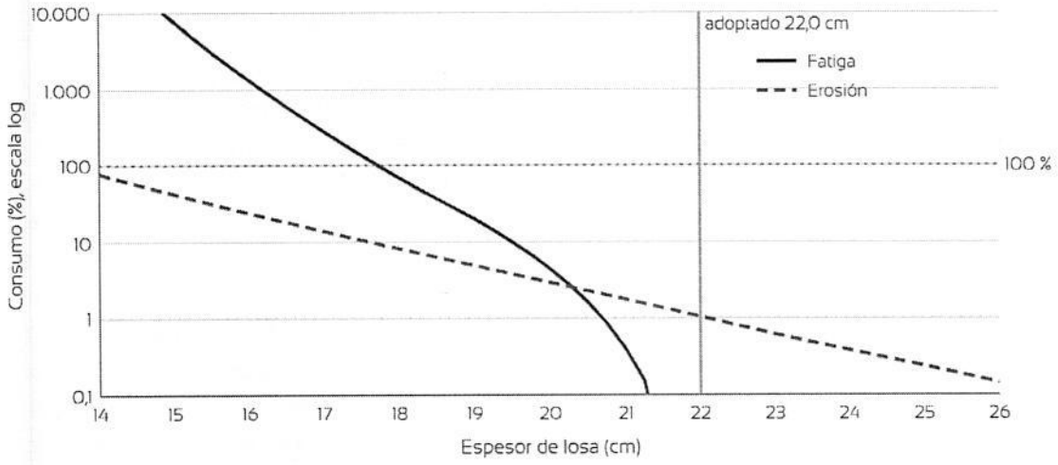


Ilustración 8. Consumo de fatiga y erosión según el espesor de losa (PCA-84)

Fuente: elaboración propia

La equivalencia entre módulo de rotura y resistencia a la compresión es la de ACI 330R (ec. 2-1), MR = $0{,}445 \cdot f'_c{}^{2/3}$ en MPa; en obra se controla con la curva de correlación propia de la mezcla (ICPC-INVÍAS 2008, cap. 3). Concreto MR 4,10 MPa (f'_c 28 MPa) y f'_c especificado de 28,0 MPa, con coeficiente de variación de 15 % y LSF = 1,0. Diseño sin berma de concreto atada y con pasadores, con 6,0 % de camiones circulando por el borde.

Tabla **10**. Resultados PCA-84

Resultado	Valor
Espesor requerido (fatiga)	17,72 cm
Espesor requerido (erosión)	13,59 cm
Espesor adoptado	22,0 cm
Consumo de fatiga	0,0 %
Consumo de erosión	1,0 %

La Ilustración 8 muestra cómo varían los consumos con el espesor de losa. El espesor que pide la PCA-84 es el menor con el que ambas curvas quedan por debajo del 100 %; el adoptado es el mayor entre este y los demás criterios del numeral 7.1.

El concreto especificado, de f'_c 28 MPa y MR 4,10 MPa, cumple el módulo de rotura mínimo de 4,0 MPa del manual ICPC-INVÍAS para 75,1 camiones/día.

Las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS (Tablas 4-1 a 4-7), para tránsito T0, subrasante S4, MR 4,1 MPa (f'_c 28 MPa), con pasadores y sin berma, fijan 22 cm sobre base granular. El diseño adopta ese valor como espesor mínimo, y en esta vía es el que gobierna.

7.2. VERIFICACIÓN AASHTO-93

R = 85 % (Z_R = -1,036), S_o = 0,35, ΔPSI = 2,5 (p_0 = 4,5 y p_t = 2,0), J = 3,2, C_d = 0,70, E_c = 24.870 MPa y k = 65,8 MPa/m. Para $6{,}65 \times 10^5$ ejes equivalentes el espesor requerido es 19,04 cm, 19,5 cm redondeado a 0,5 cm, valor que usan las tablas de esta memoria, y la losa de 22,0 cm soporta $1{,}54 \times 10^6$ ejes.

El espesor se obtiene con la ecuación AASHTO-93 del numeral 3.3.

Con la rasante actual, la estructura nueva, de 0,37 m, llega a 0,37 m de profundidad. Entre su fondo y la subrasante natural, a 0,50 m, quedan 0,13 m que se retirarán con la estructura actual y se repondrán con subbase granular clase B (Art. 320) compactada al 95 % del Proctor modificado; esa capa no se cuenta en el diseño.

El CBR de diseño corresponde a la humedad natural de la subrasante. La calzada no lleva subdrenes, y la verificación AASHTO-93 adopta C_d = 0,70, el de calidad de drenaje muy pobre (7.4).

7.3. ALTERNATIVAS EVALUADAS

Se evalúan estructuras de concreto sobre base granular de 15 o 20 cm, sola o sobre 15 cm de subbase granular, con y sin pasadores, todas con el concreto especificado, de f'_c 28 MPa y MR 4,10

MPa; de cada estructura y espesor de losa se conserva el de menor costo. No se emplean bases tratadas con cemento. Con base y subbase el k combinado se obtiene en dos pasos con la Tabla 1 de la PCA-84: primero sobre la subbase y luego, con ese valor como apoyo, sobre la base. En cada una el espesor de losa es el mayor entre cuatro valores: el requerido por la PCA-84, redondeado a 0,5 cm y no menor de 13 cm; el requerido por AASHTO-93; el de las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS para su tipo de apoyo; y el que permite losas con relación de lados no mayor de 1,25 en el carril de 3,60 m con $L \leq 24 \cdot h$. La configuración de 7.1 aparece marcada en la tabla. Con pasadores se usa J = 3,2 y sin ellos J = 3,8, salvo en la configuración del diseño, que conserva el J adoptado.

Tabla **11**. Alternativas de pavimento rígido evaluadas

Id	Estructura	k (MPa/m)	PCA-84 (cm)	AASHTO-93 (cm)	Juntas (cm)	ICPC (cm)	Losa (cm)	Fija la losa	Fatiga (%)	Erosión (%)
A1	22,0 cm, MR 4,1, con pasadores, BG 15 cm (7.1)	65,8	18,0	19,5	12,0	22	22,0	Manual ICPC-INVÍAS	0,0	1,0

Se evaluaron 8 combinaciones de apoyo y transferencia de carga con concreto de f'_c 28 MPa (MR 4,10 MPa). Su resultado es el siguiente:

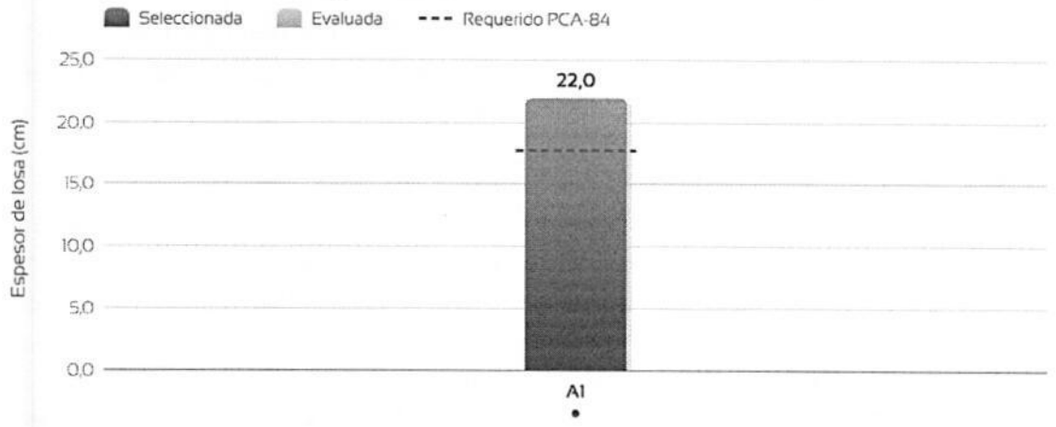


Ilustración 9. Espesor de losa adoptado frente al requerido por la PCA-84 en cada alternativa rígida

Fuente: elaboración propia

Tabla **12**. Combinaciones evaluadas y resultado

Apoyo	Pasadores	k (MPa/m)	Losa (cm)	Fija la losa	Resultado
15 cm de base granular	Sí	65,8	22,0	Manual ICPC-INVÍAS	Alternativa A1
20 cm de base granular	Sí	72,7	22,0	Manual ICPC-INVÍAS	Descartada: A1 tiene la misma losa o menor con menos material

Apoyo	Pasadores	k (MPa/m)	Losa (cm)	Fija la losa	Resultado
15 cm de base granular y 15 cm de subbase	Sí	73,8	22,0	Manual ICPC-INVÍAS	Descartada: A1 tiene la misma losa o menor con menos material
20 cm de base granular y 15 cm de subbase	Sí	80,7	22,0	Manual ICPC-INVÍAS	Descartada: A1 tiene la misma losa o menor con menos material
Los cuatro apoyos	No	–	–	–	No admisible: la junta se abre 2,06 mm, más de 1 mm (ICPC-INVÍAS 6.1.2.1)

Se descartan 3 combinaciones porque otra alternativa las iguala o mejora en espesor de losa, espesor total, costo, módulo de rotura y transferencia de carga, sin ser peor en ninguno. Son las estructuras sobre 20 cm de base granular, 15 cm de base granular y 15 cm de subbase, 20 cm de base granular y 15 cm de subbase: suben el k combinado a valores entre 72,7 y 80,7 MPa/m, pero conservan la misma losa que la alternativa equivalente sobre la base de menor espesor, porque el espesor lo fijan las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS, que para apoyo granular no distinguen el espesor de base ni la subbase. Esas capas solo añadirían costo y excavación.

7.4. DRENAJE Y PROTECCIÓN DEL APOYO

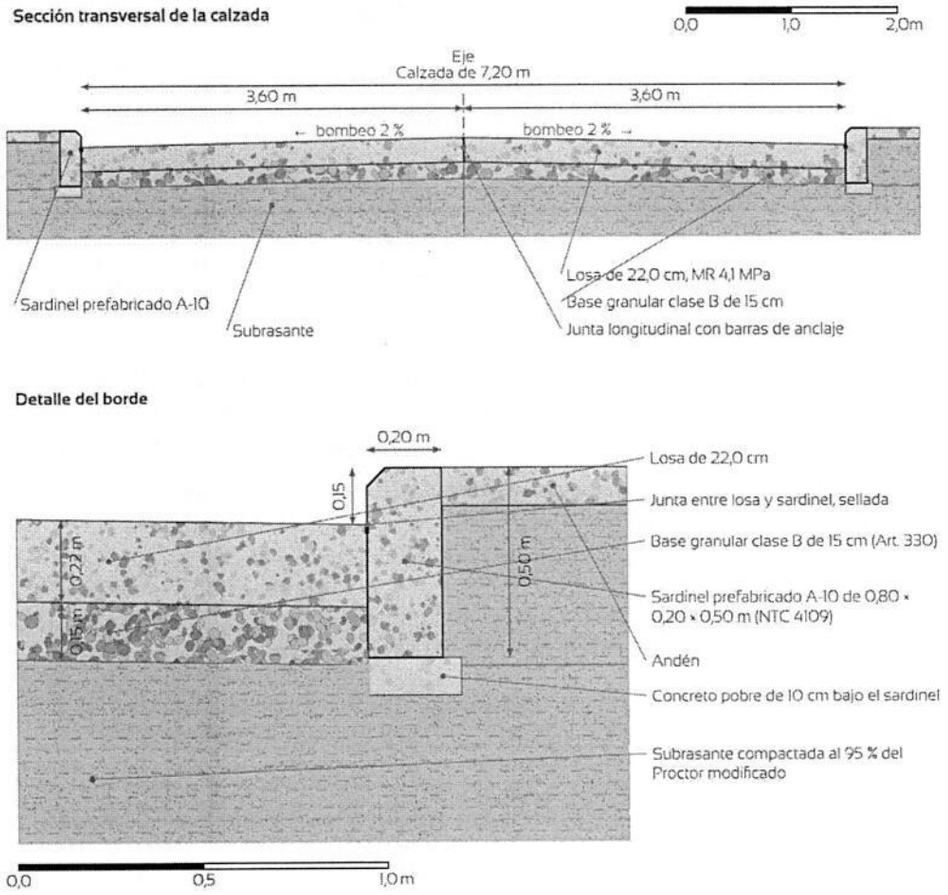


Ilustración 10. Sección transversal de la calzada con sardinel prefabricado, dibujada a escala

Fuente: elaboración propia

La calzada tendrá bombeo transversal de 2 %, a dos aguas desde el eje, y la rasante tendrá pendiente longitudinal no menor de 0,5 %, para que el agua corra junto a los sardineles hasta los sumideros (INVÍAS, Manual de diseño geométrico de carreteras, 2008). Donde la pendiente sea menor, los sumideros se acercarán hasta que el agua no se empoce. Las juntas se mantendrán selladas, que es la primera barrera contra la entrada de agua al apoyo.

El clima es húmedo y la subrasante tiene CBR de diseño de 13,1 %, con el nivel freático a 2,10 m bajo la subrasante. No se coloca geotextil de separación bajo la base. La subrasante es granular y no plástica (SW-SM); sus finos no forman lodo con el agua, y los pasadores limitan la deflexión de las esquinas de las losas, que es lo que bombea los finos hacia la base. El diseño reserva el geotextil de

separación para las subrasantes con CBR de 8 % o menos o con finos plásticos, en las que los finos sí migran a la base.

La calzada no lleva subdrenes. El sardinel y su lecho de concreto cierran el borde de la base, de modo que el agua que entra por las juntas, principal fuente de agua en la base (Moulton, 1980), no tiene salida lateral, y el diseño trata la base como un apoyo sin drenaje subsuperficial. La protección del apoyo descansa en el bombeo de 2 % y la pendiente longitudinal, que llevan la lluvia a los sumideros sin empozarse; en las juntas selladas; y en una subrasante granular no plástica, con el nivel freático a 2,10 m por debajo.

La AASHTO-93 recoge esta condición con el coeficiente de drenaje (Parte II, 2.4.1, Tabla 2.5). Con la base más del 25 % del tiempo cerca de la saturación y sin salida para el agua, la calidad de drenaje es muy pobre y $C_d = 0{,}70$, el valor que usa la verificación (7.2). Con él la AASHTO-93 pide 19,5 cm, y la losa de 22,0 cm, fijada por las tablas del manual ICPC-INVÍAS, los supera en 2,5 cm. Si además se reduce el módulo de reacción en 30 % por saturación, la AASHTO-93 pide 20,0 cm.

Los bordes de la calzada se confinarán con sardinel prefabricado de concreto tipo A-10, la pieza de uso corriente en las vías urbanas de Colombia y de suministro habitual en el área metropolitana de Bucaramanga. Se instalará antes de la base, sobre un lecho de concreto pobre de 10 cm, alineado con hilo y nivelado, con juntas de máximo 1 cm rellenas con mortero 1:3, y sobresaldrá 15 cm de la superficie de la calzada. En curvas y ajustes de longitud se usarán las piezas cortas de la misma sección; en los accesos vehiculares y las rampas peatonales, la pieza rebajada para rampa.

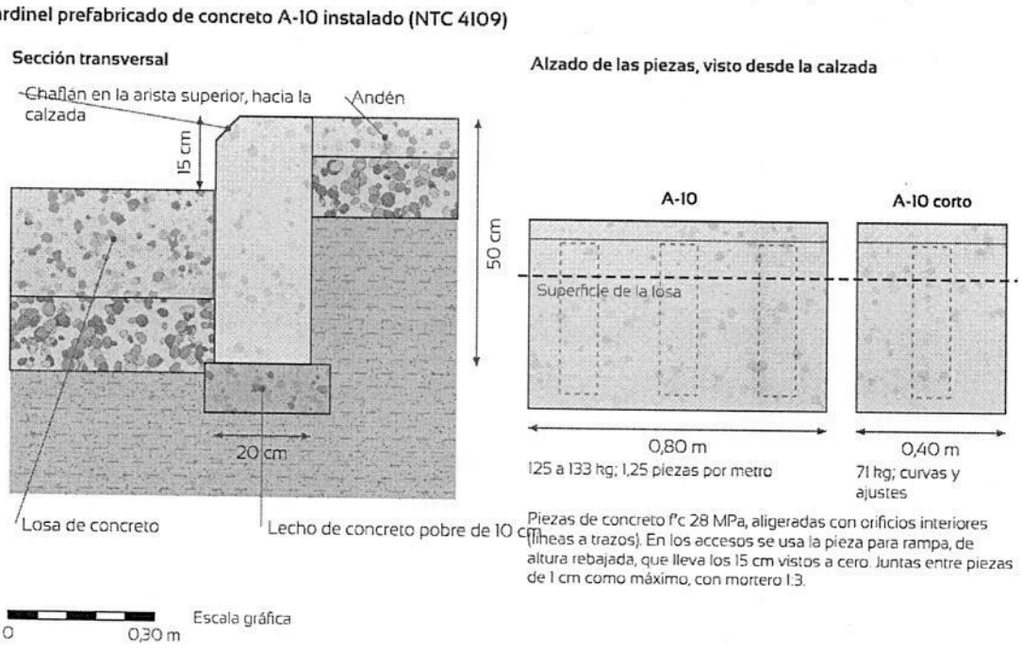


Ilustración 11. Sardinel prefabricado A-10 instalado: sección transversal a escala y alzado de las piezas

Fuente: elaboración propia

Tabla **13**. Piezas de sardinel prefabricado

Pieza	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Peso aproximado (kg)	Uso
Sardinel A-10	0,80	0,20	0,50	125 a 133	Borde de calzada en tramo recto; 1,25 piezas por metro
Sardinel A-10 corto	0,40 y 0,20	0,20	0,50	71 (0,40 m)	Curvas, esquinas y ajustes de longitud
Sardinel para rampa	0,80	0,20	rebajado	91	Accesos vehiculares y rampas peatonales

Las piezas son de concreto con resistencia a la compresión de 28 MPa y módulo de rotura de 3,5 MPa a 28 días, con tolerancias de ± 5 mm en el largo y ± 3 mm en el ancho y el alto (NTC 4109). El sardinel A-10 es aligerado, con tres orificios verticales.

8. DISEÑO DE JUNTAS

8.1. MODULACIÓN

La calzada de 7,20 m se dividirá en 2 franjas de 3,60 m, separadas por una junta longitudinal en el eje; ninguna superará 4 m (ICPC-INVÍAS 6.2.2). Las juntas transversales se ubicarán cada 3,60 m, por debajo del menor entre 5 m y 24 veces el espesor, 5,00 m (INVÍAS 2022, 500.4.6.12). La relación entre el lado mayor y el menor de la losa es 1,00, dentro del límite de 1,3 (ICPC-INVÍAS 6.2.3). Con longitud inferior a $5{,}5 \cdot l = 4{,}32$ m y relación de lados no mayor de 1,25, las losas no requieren parrilla de refuerzo (INVÍAS 2022, 500.2.2.3).

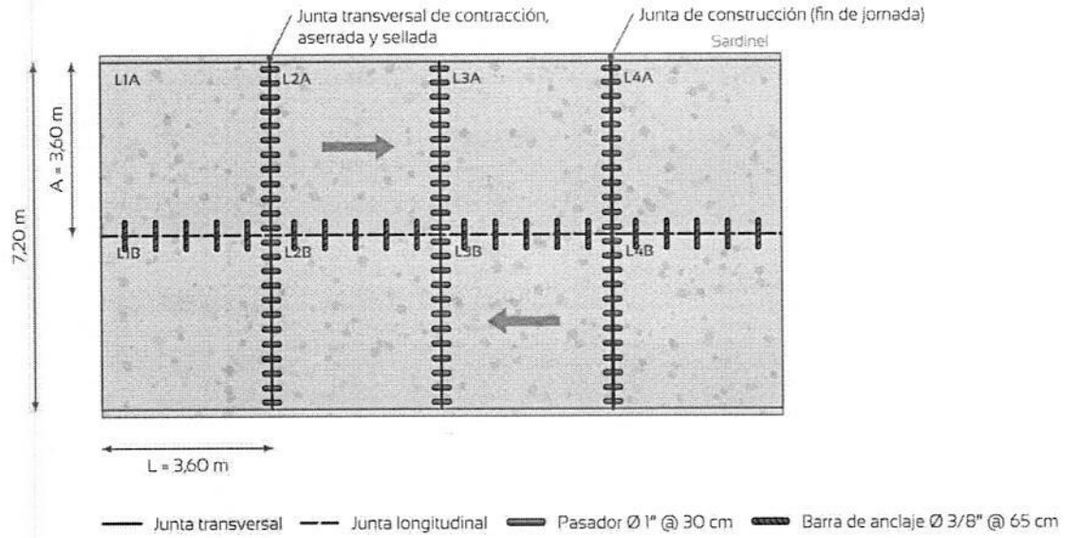


Ilustración 12. Planta de modulación de juntas, con pasadores y barras de anclaje

Fuente: elaboración propia

Si el ancho de calzada cambia a lo largo del tramo, en ensanches, bahías, accesos o intersecciones, la modulación se ajustará con la misma losa de 22,0 cm y estas reglas: las franjas no superarán 4 m de ancho (ICPC-INVÍAS 6.2.2); la relación entre el lado mayor y el menor de cada losa no superará 1,25 (ICPC-INVÍAS 6.2.3); la longitud de losa no superará 5,00 m, el menor entre 5 m y 24 veces el espesor (INVÍAS 2022, Art. 500), ni 4,32 m, 5,5 veces el radio de rigidez relativa, para no requerir parrilla; y los ángulos entre juntas no serán menores de 60° (ACPA, guía de modulación de intersecciones). La Tabla 14 da la modulación para otros anchos.

Tabla **14**. Modulación de juntas para otros anchos de calzada con losa de 22,0 cm

Ancho de calzada (m)	Franjas	Ancho de franja (m)	Longitud de losa (m)	Relación de lados	Refuerzo	Cavidad del sello (mm)
5,00	2	2,50	2,50	1,00	Sin parrilla	6
5,50	2	2,75	2,75	1,00	Sin parrilla	6
6,00	2	3,00	3,00	1,00	Sin parrilla	6
6,50	2	3,25	3,25	1,00	Sin parrilla	6
7,00	2	3,50	3,50	1,00	Sin parrilla	6
7,50	2	3,75	3,75	1,00	Sin parrilla	8
8,00	2	4,00	4,00	1,00	Sin parrilla	8
8,50	3	2,83	2,80	1,01	Sin parrilla	6
9,00	3	3,00	3,00	1,00	Sin parrilla	6

En las transiciones de ancho, las juntas longitudinales se prolongarán sin quiebres y las transversales se alinearán con las de las losas vecinas; donde la geometría deje losas irregulares, se subdividirán hasta cumplir la relación de lados. Las juntas coincidirán con los pozos de inspección y sumideros, que se aislarán con juntas de aislamiento (INVÍAS 2022, 500.4.6.14).

8.2. ABERTURA DE LAS JUNTAS TRANSVERSALES

Con agregado metamórfico ($\alpha_c = 11{,}9\times10^{-6}/°C$), resistencia a la tracción indirecta de 2,94 MPa, igual a $0{,}56\cdot\sqrt{f'_c}$ (ACI 318-08, R8.6.1) ($\varepsilon = 5{,}60\times10^{-4}$), C = 0,80 y ΔT = 13 °C, la junta se abre 2,06 mm. ΔT resulta de 35 °C del concreto al colocarlo y 22 °C de mínima ambiental. La Ilustración 13 muestra cómo crece la abertura con la longitud de la losa.

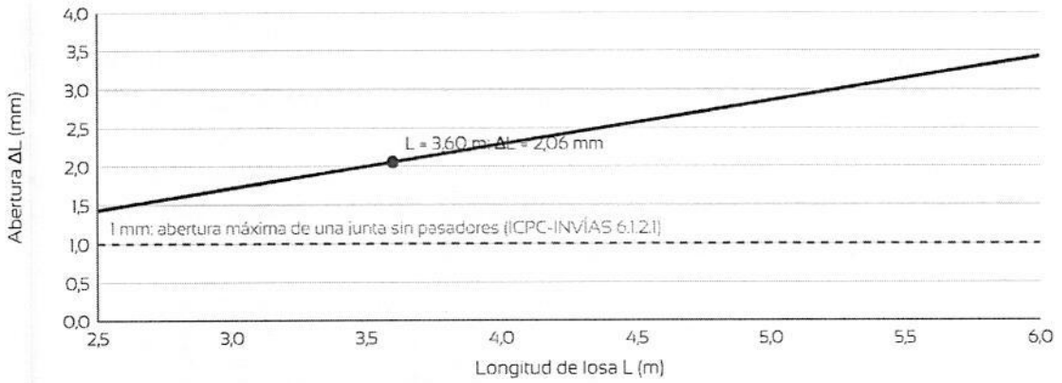


Ilustración 13. Abertura de la junta transversal según la longitud de la losa

Fuente: elaboración propia

8.3. TRANSFERENCIA DE CARGA

Tabla **15**. Condiciones para juntas transversales sin pasadores

Condición para juntas sin pasadores (ICPC-INVÍAS 6.1.2.1)	Proyecto	Cumple
Longitud de losa menor que 5 m	3,60 m	Sí
Apoyo no susceptible de bombeo	base granular	Sí
Menos de 175 camiones por día y por carril	52,3 camiones/día	Sí
Clima favorable: temperatura mínima ≥ 4 °C	22 °C	Sí
Abertura de la junta ≤ 1 mm	ΔL = 2,06 mm	No

Todas las juntas transversales llevarán pasadores, porque el proyecto no cumple la condición de abertura de la junta ≤ 1 mm (ICPC-INVÍAS 6.1.2.2; INVÍAS 2022, 500.2.2.1).

La abertura de la junta, $\Delta L = C \cdot L \cdot (\alpha \cdot \Delta T + \varepsilon) = 2{,}06$ mm, la controla la retracción del concreto, que aporta el 78 %. Para bajarla a 1 mm la losa tendría que medir 1,75 m, menos que los 2,88 m que admite la relación de lados, y aun colocando el concreto a la temperatura mínima la abertura sería 1,61 mm. Ninguna medida práctica deja la abertura en el límite que permite transferir la carga por fricción entre las caras de la fisura, por lo que la transferencia se confía a pasadores. El sello de 6 mm trabaja al 34 % de deformación, dentro de su capacidad de ±35 %.

Para una losa de 22,0 cm, la Tabla 6-2 del manual ICPC-INVÍAS indica pasadores de Ø 1 1/8". El diámetro se comprueba contra el aplastamiento del concreto con la rueda de diseño de 50,0 kN en el borde de la losa. Esa rueda corresponde al semieje más pesado del espectro afectado por LSF = 1,0. El 45 % de la carga pasa a la losa vecina (ICPC-INVÍAS 6.1.2.2) y se reparte en $1{,}8 \cdot l = 1{,}41$ m. Se toman $K = 407$ N/mm^3, $E_d = 200.000$ MPa y $z = 3{,}0$ mm.

Tabla **16**. Diseño de pasadores

Concepto	Valor
Diámetro adoptado	Ø 1"

Concepto	Valor
Longitud y separación	40 cm @ 30 cm; la primera a 15 cm del borde
Carga en el pasador más solicitado, P_t	7,82 kN
Suma de los factores de reparto de los pasadores que toman la carga, Σf	2,88
Rigidez relativa entre el pasador y el concreto, β	0,0282 1/mm
Deflexión del pasador en la cara de la junta, y_0	0,0445 mm
Esfuerzo de aplastamiento del concreto, σ_b	18,1 MPa
Esfuerzo de aplastamiento admisible, f_b	28,0 MPa
Longitud embebida en cada losa	20,0 cm, no menor que 6 veces el diámetro, 15,2 cm

Se adoptan pasadores de Ø 1"; su suficiencia la demuestran la verificación al aplastamiento y la eficiencia de transferencia de carga del modelo de elementos finitos (capítulo 10). El aplastamiento, σ_b = 18,1 MPa, es menor que el admisible, 28,0 MPa. Los pasadores son de acero redondo liso fy 420 MPa, con película anticorrosiva epoxi-zinc y antiadherente en toda su longitud. Se instalan en canastas, paralelos entre sí, al eje de la calzada y a la superficie, con desviación máxima de 10 mm (INVÍAS 2022, 500.2.2.1).

8.4. JUNTAS LONGITUDINALES

La junta longitudinal es de construcción si se pavimenta por franjas, o se corta a un tercio del espesor si se vacía la calzada completa. Lleva barras de anclaje corrugadas fy 420 MPa (INVÍAS 2022, 500.2.2.2) de Ø 3/8" y 65 cm de longitud, cada 65 cm, a media altura y perpendiculares a la junta (ICPC-INVÍAS, Tabla 6-1). Cada losa lleva 5 barras; la primera queda a 50 cm de la junta transversal, a más de 38 cm, para no interferir con los pasadores.

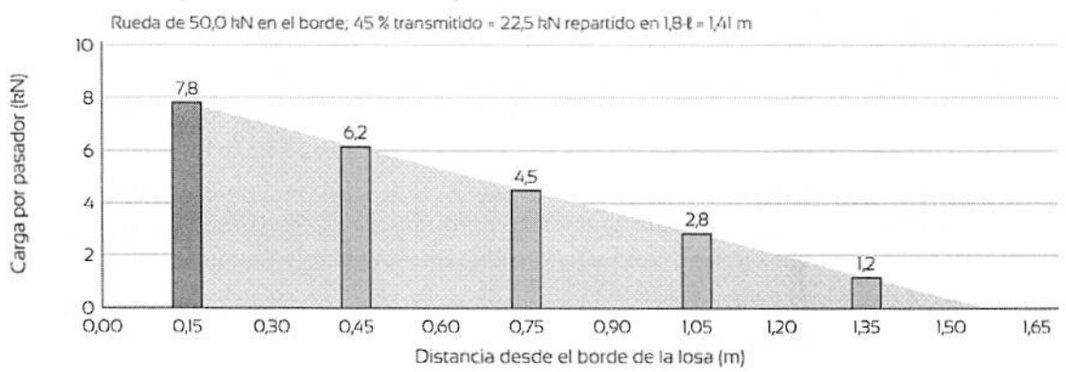


Ilustración 14. Reparto de la carga de rueda entre los pasadores de la junta

Fuente: elaboración propia

8.5. CORTE Y SELLADO

Las juntas se cortan con disco diamantado, primero las transversales y después las longitudinales. El corte inicial tiene 3 mm de ancho y 74 mm de profundidad, un tercio del espesor (INVÍAS 2022, 500.4.6.12). La cavidad de sellado se ensancha lo necesario para que el sello elastomérico, con capacidad de movimiento de ±35 % (Tabla 500-4), absorba la abertura de la junta. El sello queda 3 mm por debajo de la superficie. El cordón de respaldo tiene un diámetro al menos 25 % mayor que el ancho de la cavidad (INVÍAS 2022, 500.2.5.2 y 500.4.6.15).

Tabla **17**. Dimensiones de las cavidades de sellado

Junta	Ancho de la cavidad (mm)	Espesor del sello (mm)	Rebaje (mm)	Cordón de respaldo Ø (mm)	Profundidad de la cavidad (mm)	Deformación del sello
Transversal	6	6	3	10	19	34 %
Longitudinal	6	6	3	10	19	No aplica

8.6. JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN, AISLAMIENTO Y EXPANSIÓN

Las juntas transversales de construcción se hacen en el sitio de una junta prevista, a tope y con los mismos pasadores. Si la interrupción ocurre en los dos primeros tercios de la losa, se colocan barras de anclaje (INVÍAS 2022, 500.4.6.13). Alrededor de pozos de inspección y sumideros se construyen juntas de aislamiento en todo el espesor, con material preformado de 19 mm y sin barras. Se ubican a no menos de 30 cm del elemento y desde sus vértices salen juntas de contracción (INVÍAS 2022, 500.4.6.14.1; ICPC-INVÍAS 6.2.1). Las losas con aberturas llevan parrilla de refuerzo (500.2.2.3). Con una temperatura mínima de 22 °C no se requieren juntas de expansión (500.4.6.14.2).

8.7. EMPALME CON PAVIMENTOS EXISTENTES Y VÍAS EN AFIRMADO

En los cruces y en los extremos del tramo, la losa terminará en una junta transversal de construcción perpendicular al eje, alineada con las juntas de la vía que llega. Contra un pavimento de concreto existente, la junta será de tope con pasadores de Ø 1" × 40 cm cada 30 cm, perforados en la losa existente y anclados con resina epóxica (INVÍAS 2022, 500.4.6.13); si las juntas de ambas vías no coinciden, se usará junta de aislamiento con relleno preformado de 19 mm, sin pasadores. Contra un pavimento asfáltico, el borde del concreto se confinará con una viga de concreto de 0,25 m de ancho y 37 cm de altura, igual al espesor de losa y base, vaciada monolíticamente con la losa; el asfalto existente se cortará en línea recta, se retirará la parte deteriorada y se reparará hasta la viga, con riego de liga en la cara de contacto. Así el borde de la losa no quedará apoyado en el asfalto y el asfalto no se desplazará contra la losa.

Contra una vía en afirmado, la losa terminará en una junta transversal de construcción con una viga de borde de concreto de 0,25 m de ancho, vaciada monolíticamente con la losa y prolongada 20 cm por debajo de la base, con 57 cm de altura total. En ese extremo la losa trabaja como borde libre,

sin una losa vecina que le transmita carga, y el afirmado contiguo pierde nivel con el tránsito y la lluvia; la viga apoya el borde y cierra la base, de modo que el agua no la socave cuando el afirmado se desgaste. Su peralte supera el engrosamiento de 20 % del espesor o 50 mm que la ACI 330R-08 recomienda para los bordes cargados sin transferencia (3.2 y 3.7.3). El afirmado se reconformará y compactará al 95 % del Proctor modificado en una franja de 3,0 m contra la viga, a ras con la losa, y la junta longitudinal del eje continuará en la viga con sus barras de anclaje. Si después se pavimenta esa vía, la nueva losa se empalmará contra la viga con junta de tope y pasadores anclados con epóxico, como contra un pavimento de concreto existente.

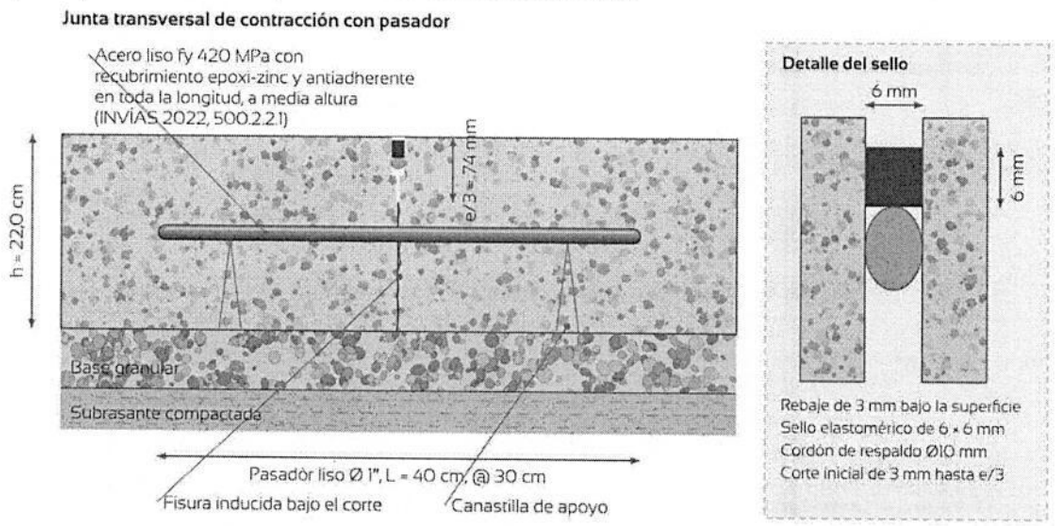


Ilustración 15. Detalle de la junta transversal de contracción y del sello (esquema sin escala)

Fuente: elaboración propia



Ilustración 16. Detalles de las juntas longitudinal, de construcción y de aislamiento (esquemas sin escala)

Fuente: elaboración propia

8.8. JUNTAS EN ESTRUCTURAS DE DRENAJE EXISTENTES Y POR CONSTRUIR

Los pozos de inspección, los sumideros y las cajas que queden dentro de la calzada, existentes o por construir, se aislarán de la losa con una caja de juntas de aislamiento en todo el espesor, con relleno preformado de 19 mm y sello, sin barras, a 30 cm del marco o de la caja. El espacio entre el marco y la junta se llenará con un collar de concreto de la misma resistencia, vaciado después de la losa y nivelado con la tapa. La caja se centrará en la junta transversal más cercana, que se reemplazará por las dos juntas de contracción que saldrán de los vértices de la caja hasta el borde de la franja; así ninguna losa resultará esbelta. Los paneles que contienen la abertura llevarán parrilla de refuerzo Ø 3/8" cada 30 cm a un tercio del espesor (INVÍAS 2022, 500.2.2.3 y 500.4.6.14.1; ICPC-INVÍAS 6.2.1). En los sumideros junto al sardinel, el aislamiento rodeará los tres lados libres.

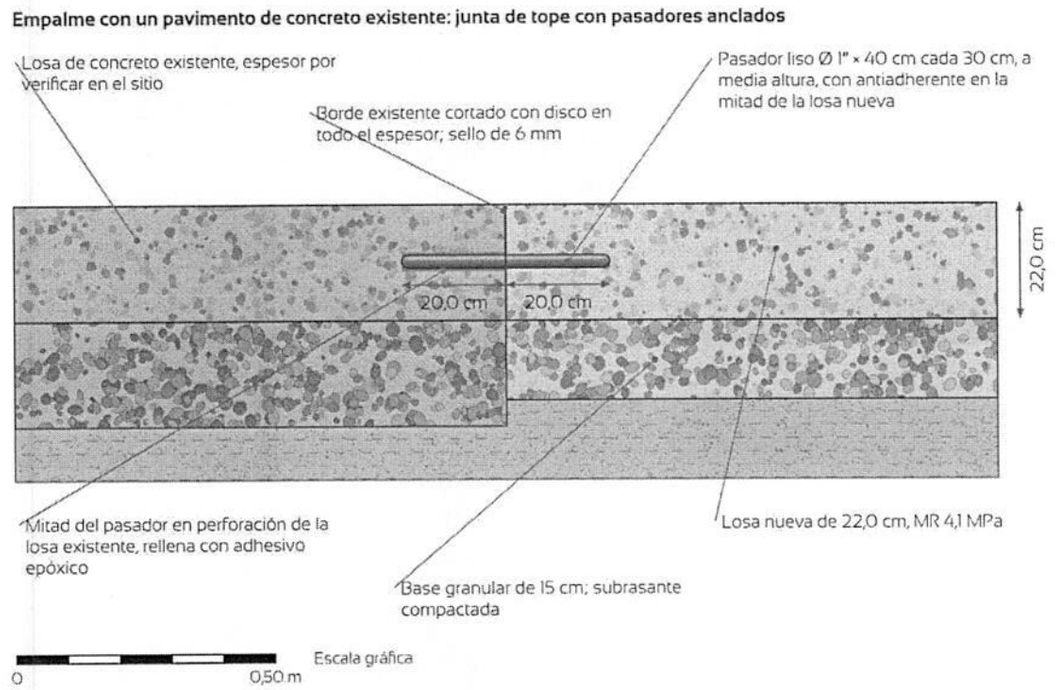


Ilustración 17. Empalme con un pavimento de concreto existente, a escala

Fuente: elaboración propia

Las alcantarillas de cajón y las tuberías transversales que crucen bajo la calzada tendrán al menos 30 cm de relleno entre su cara superior y la base. La excavación se rellenará en capas compactadas con relleno para estructuras (INVÍAS 2022, Art. 610) hasta la subrasante. Las juntas transversales seguirán la modulación general, con sus pasadores, y las losas que queden sobre la excavación llevarán parrilla de refuerzo Ø 3/8" cada 30 cm, para controlar las fisuras por un asentamiento diferencial del relleno.

La rasante conserva las cotas de la vía actual y de los accesos a los predios; la fija el diseño geométrico sobre el levantamiento topográfico del tramo, y el recubrimiento de las tuberías no obliga a subirla. Donde una tubería existente quede con menos de 30 cm de relleno bajo la base, se envolverá en concreto de 14 MPa con 10 cm de espesor alrededor del tubo. Si la cara superior de la estructura llega a la base o a la losa, se tratará como estructura a nivel de la rasante, con junta de aislamiento.

Contra las estructuras cuya cara superior quede a nivel de la rasante y reciba el tránsito, como la losa superior de una alcantarilla de cajón, un cabezal, una cuneta transversal o el estribo de un puente, la losa terminará en una junta de aislamiento con relleno preformado de 19 mm en todo el espesor. Se colocarán pasadores de Ø 1" × 40 cm cada 30 cm. Cada pasador se anclará con adhesivo epóxico en una perforación de la estructura. En la mitad que queda en la losa llevará antiadherente y un capuchón de expansión con 25 mm de holgura, de modo que la junta transmitirá la carga sin impedir el movimiento de la losa (INVÍAS 2022, 500.4.6.14).

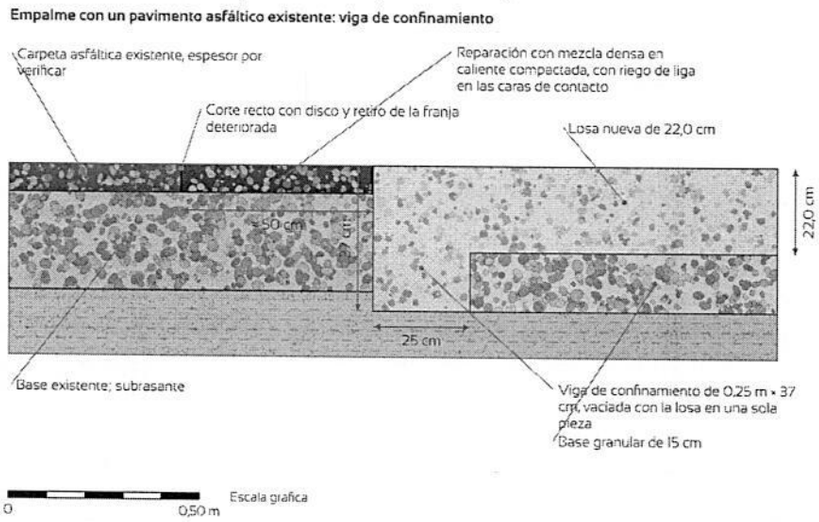


Ilustración 18. Empalme con un pavimento asfáltico existente, a escala

Fuente: elaboración propia

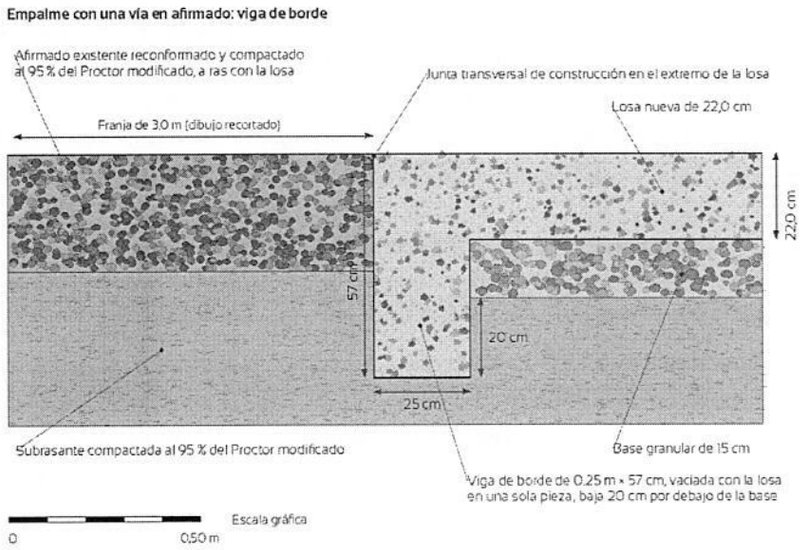


Ilustración 19. Empalme con una vía en afirmado, a escala

Fuente: elaboración propia

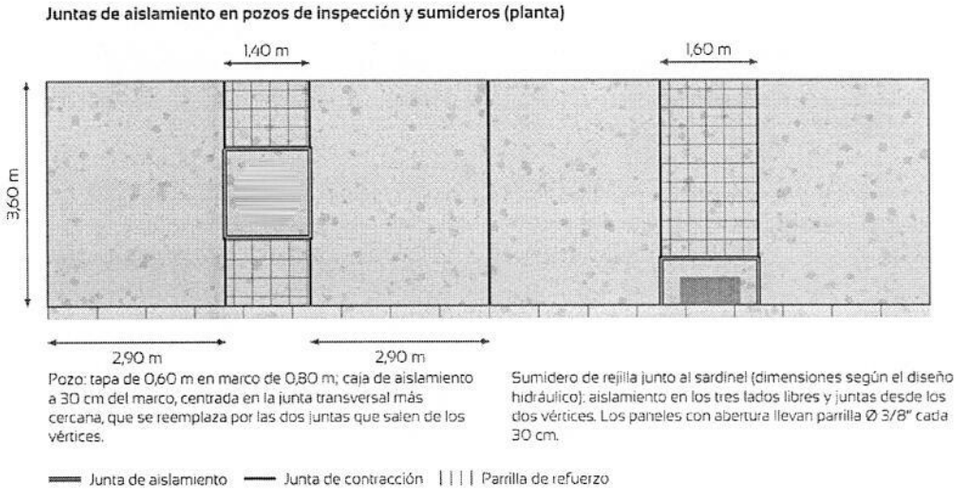


Ilustración 20. Juntas de aislamiento en pozos de inspección y sumideros, planta a escala

Fuente: elaboración propia

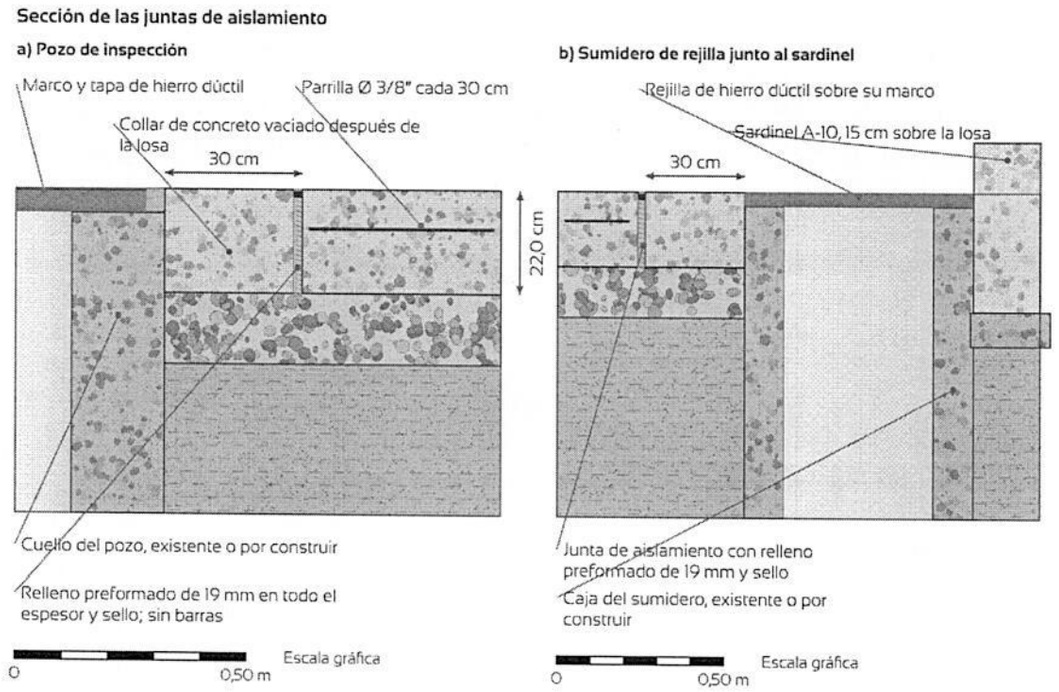


Ilustración 21. Sección de las juntas de aislamiento en pozo de inspección y en sumidero, a escala

Fuente: elaboración propia

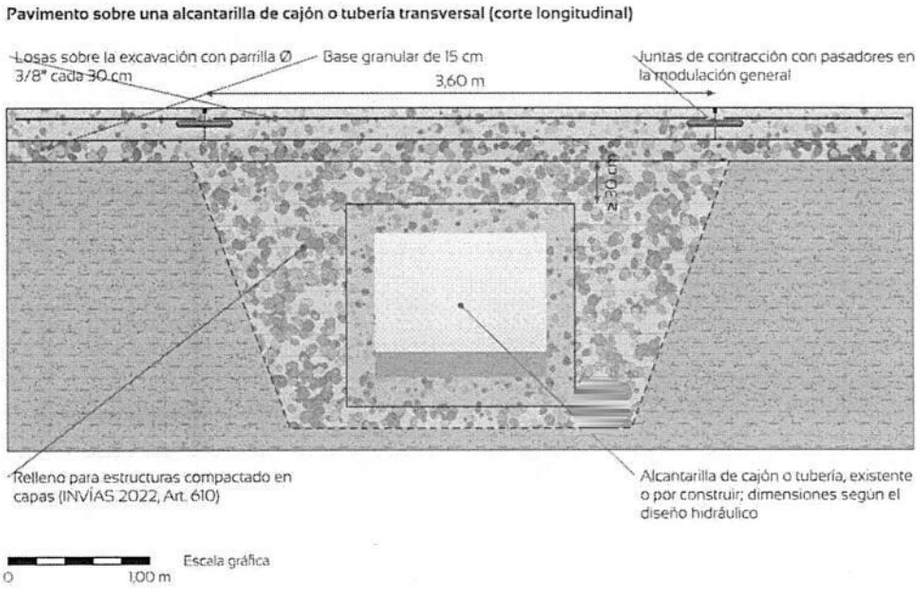


Ilustración 22. Pavimento sobre una alcantarilla de cajón o tubería transversal, corte longitudinal a escala

Fuente: elaboración propia

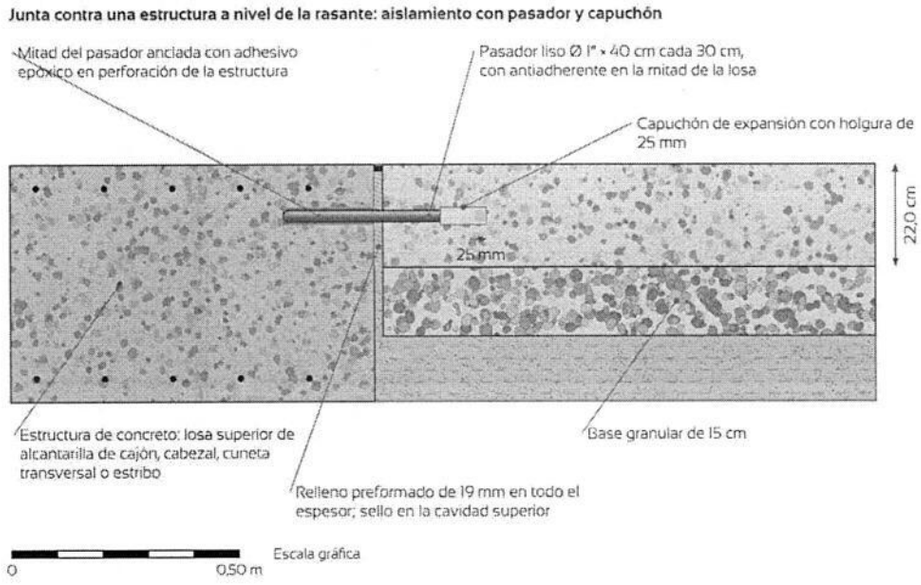


Ilustración 23. Junta de aislamiento con pasador y capuchón contra una estructura a nivel de la rasante, a escala

Fuente: elaboración propia

8.9. RESUMEN DE LOS TIPOS DE JUNTAS

Tabla **18**. Tipos de juntas del proyecto

Junta	Ubicación	Configuración
Transversal de contracción	Cada 3,60 m	Corte de 74 mm; pasadores Ø 1" × 40 cm cada 30 cm en canasta; sello de 6 mm
Longitudinal	Eje de la calzada	Corte de un tercio del espesor o junta de construcción; barras de anclaje Ø 3/8" × 65 cm cada 65 cm
Transversal de construcción	Fin de jornada, en el sitio de una junta prevista	Junta de tope con los mismos pasadores; barras de anclaje si cae en los dos primeros tercios de la losa
Empalme con concreto existente	Extremos del tramo y cruces	Junta de tope con pasadores anclados con epóxico en la losa existente
Empalme con asfalto existente	Extremos del tramo y cruces	Viga de confinamiento de 0,25 m vaciada con la losa; reparación del asfalto con riego de liga
Empalme con vía en afirmado	Extremos del tramo y cruces con vías sin pavimentar	Viga de borde de 0,25 m × 57 cm vaciada con la losa; afirmado compactado en 3,0 m a ras con la losa
Aislamiento en pozos y sumideros	Alrededor de cada estructura en la calzada	Relleno preformado de 19 mm a 30 cm del marco; collar de concreto; juntas desde los vértices; parrilla
Sobre alcantarillas	Losas sobre la excavación de la estructura	Modulación general; parrilla de refuerzo; relleno para estructuras compactado
Contra estructura a nivel de la rasante	Alcantarillas de cajón, cabezales, cunetas transversales, puentes	Aislamiento con relleno preformado; pasadores anclados con capuchón de expansión
Expansión	Intersecciones y estructuras	No se requiere: temperatura mínima de 22 °C

9. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En esta vía solo una alternativa cumple el diseño sin quedar dominada (numeral 7.3), de modo que no hay opciones que comparar: se recomienda esa estructura.

Se selecciona:

- **Opción recomendada, A1**: losa 22,0 cm de MR 4,1 MPa con pasadores sobre 15 cm de base granular. El espesor queda fijado por las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS (T0, S4), que fijan el espesor mínimo, con consumos de 0,0 % por fatiga y 1,0 % por erosión. Losas de 3,60 × 3,60 m, pasadores Ø 1" a 30 cm. Los pasadores mejoran la transferencia de carga y reducen el escalonamiento. La base granular uniformiza el apoyo y controla el bombeo.

Se recomienda la alternativa **A1**. El período de diseño es de 25 años, con mantenimiento de resellado de juntas y reparación puntual de losas.

A1. Losa 22,0 cm con pasadores

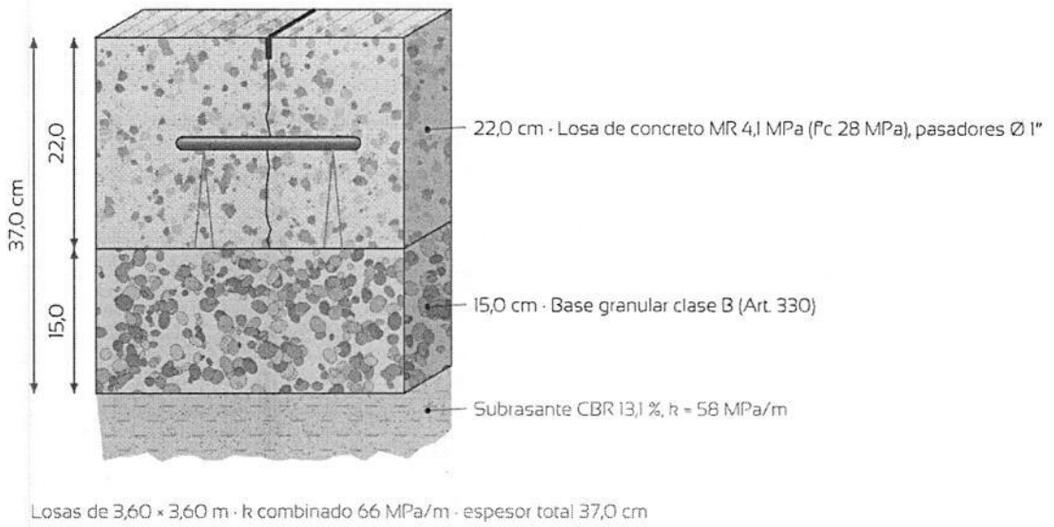


Ilustración 24. Esquema de sección de las alternativas rígidas seleccionadas (espesores en cm)

Fuente: elaboración propia

10. VERIFICACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

La estructura seleccionada se verifica con un modelo de elementos finitos del sistema de losas, elaborado con SlabSolver FEM, software libre de análisis de pavimentos rígidos. Cada losa se discretiza con elementos cuadriláteros de placa gruesa de Reissner-Mindlin, de cuatro nodos y tres grados de libertad por nodo, con integración reducida selectiva del cortante; el apoyo es un medio de Winkler con el módulo de reacción combinado de cada alternativa. Las juntas se representan con nodos independientes a cada lado, unidos por resortes cuya rigidez es la de los pasadores en la junta transversal, calculada con la teoría de Friberg, y la de las barras de anclaje en la longitudinal, sin contar la fricción entre las caras.

$$K_p = \frac{1}{\frac{2(2+\beta z)}{4\beta^3 E_s I} + \frac{z^3}{12 E_s I}} \qquad \beta = \sqrt[4]{\frac{Kd}{4E_s I}}$$

Donde:

K_p: rigidez vertical de un pasador, en kN/m
β: rigidez relativa entre el pasador y el concreto, en 1/m
z: ancho de la junta, en m
E_s: módulo de elasticidad del acero, 200 GPa
I: momento de inercia del pasador, $\pi \cdot d^4/64$, en m^4

d: diámetro del pasador, en m

K: módulo de soporte del concreto sobre el pasador, 407 GPa/m

La rigidez de la junta por metro es K_p dividida por la separación de los pasadores; las barras de anclaje se modelan con la misma expresión y z = 1 mm.

10.1. MODELO

Se modelan 2 franjas de 3,60 m con dos losas de 3,60 m, con la junta transversal, la junta longitudinal y el borde libre del carril exterior, sin berma. La malla tiene elementos de 7,5 cm, 9.604 nodos y 28.812 ecuaciones por alternativa. Las cargas son los ejes máximos según la norma, la Resolución 4100 de 2004, modificada por la Resolución 1782 de 2009: el sencillo de llanta doble de 11 t (107,9 kN) y el tándem de 22 t (215,7 kN), con llantas a 0,70 MPa, duales a 0,34 m, trocha de 1,80 m y ejes del tándem a 1,30 m.

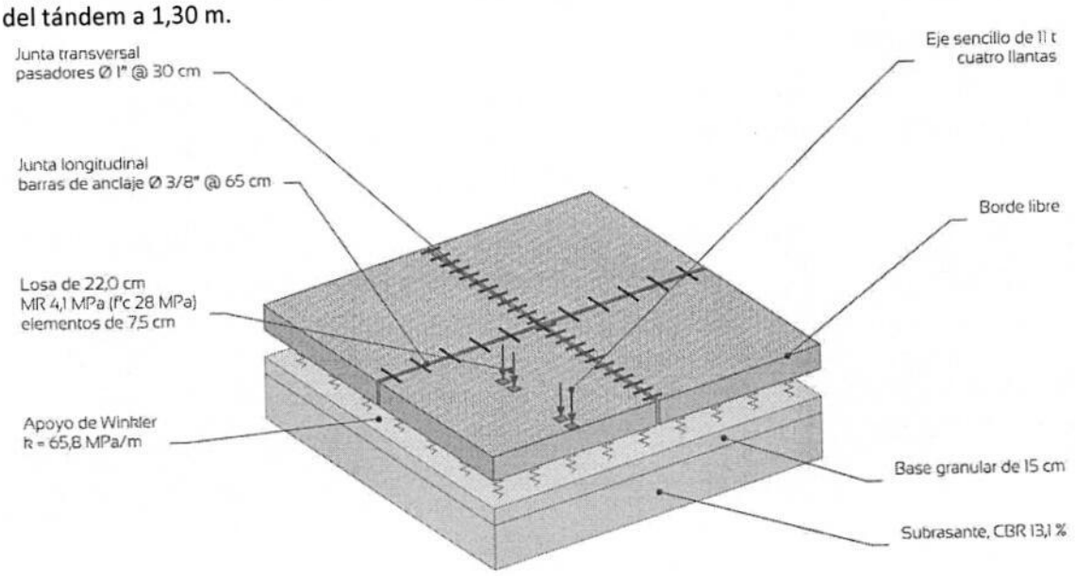


Ilustración 25. Modelo de elementos finitos de la alternativa A1: capas, apoyo, malla, juntas y carga

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Datos del modelo de elementos finitos

Parámetro	A1
Losa	22,0 cm, MR 4,1 MPa (f'_c 28 MPa)
Módulo de elasticidad del concreto	24.870 MPa
k combinado	65,8 MPa/m
Radio de rigidez relativa *l*	0,765 m
Rigidez por pasador	87.922 kN/m
Rigidez por barra de anclaje	15.924 kN/m

10.2. VALIDACIÓN

El programa se contrasta con las soluciones cerradas de Westergaard (interior y borde) e Ioannides (esquina) en una losa aislada de 6,1 m de lado, con el espesor, el concreto y el apoyo de A1, bajo 53,9 kN en un círculo de 15,7 cm de radio. Las diferencias no superan el 9 %; se deben a que las soluciones cerradas suponen placa delgada y carga circular, mientras el modelo incluye la deformación por cortante y reparte la carga en una huella cuadrada.

Tabla **20.** Validación del modelo contra soluciones cerradas

Posición	Tracción, modelo (MPa)	Tracción, solución cerrada (MPa)	Deflexión, modelo (mm)	Deflexión, solución cerrada (mm)
Interior	1,30	1,38	0,184	0,172
Borde	2,38	2,56	0,544	0,502
Esquina	2,02	1,97	1,407	1,407

10.3. RESULTADOS

Se analizan seis posiciones de carga en cada alternativa. La Tabla 21 resume la deflexión y la tracción máximas; las figuras muestran la deformada de la malla de A1 en los casos que gobiernan.

Tabla **21.** Deflexión y tracción máximas por posición de carga

Caso	A1: deflexión (mm)	A1: tracción (MPa)
Eje sencillo centrado en el carril, a mitad de la losa	0,258	1,34
Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa	0,510	2,16
Eje sencillo en la esquina (borde libre y junta transversal)	0,773	1,04
Eje sencillo junto a la junta transversal, centrado en el carril	0,454	1,11
Eje tándem en el borde libre, a mitad de la losa	0,760	1,86
Eje tándem en la esquina	0,902	1,44

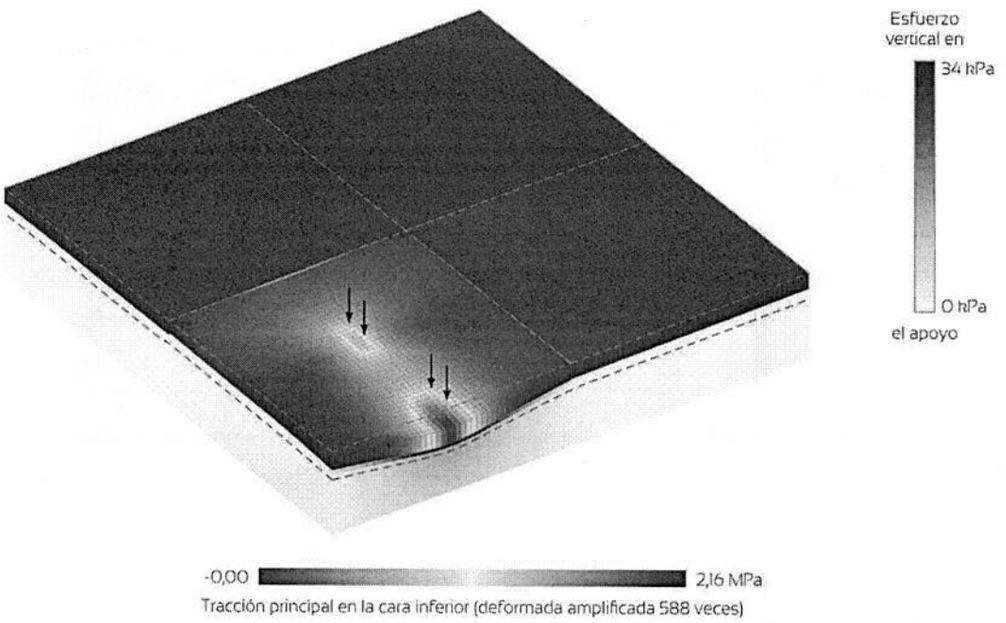


Ilustración 26. A1. Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa: tracción principal sobre la deformada de la malla

Fuente: elaboración propia

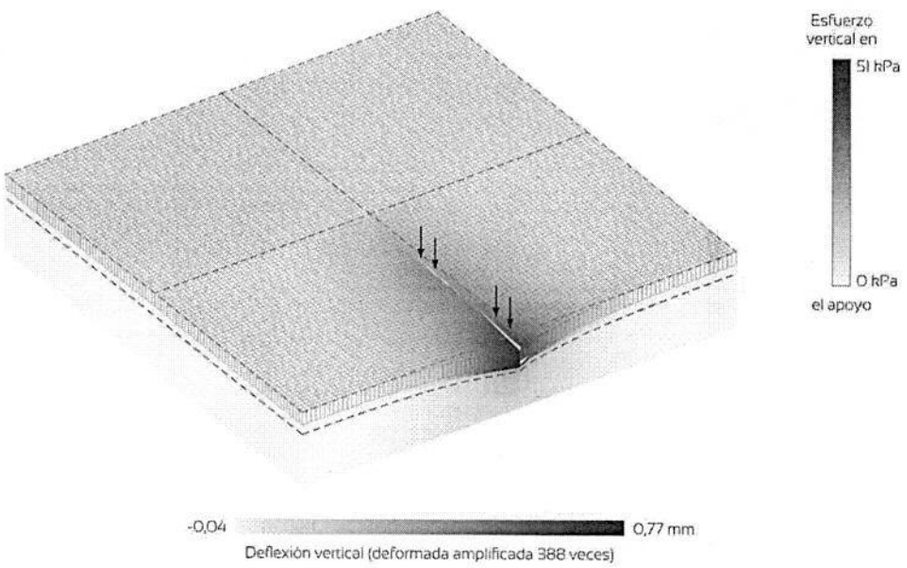


Ilustración 27. A1. Eje sencillo en la esquina: deflexión sobre la deformada de la malla

Fuente: elaboración propia

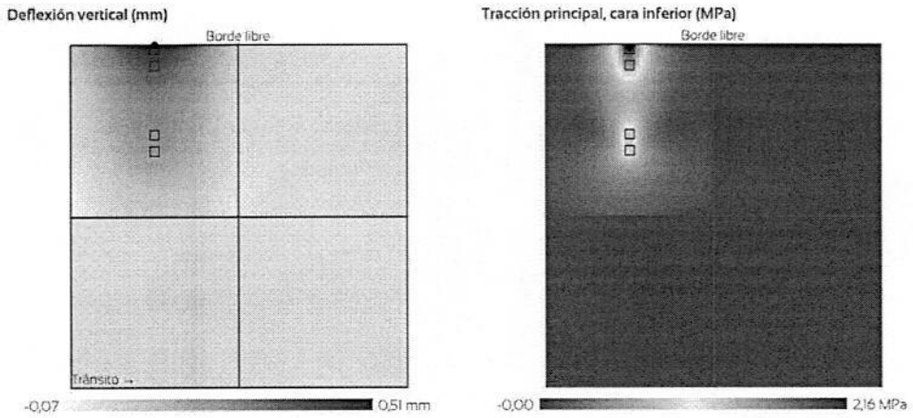


Ilustración 28. A1. Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa: mapas de deflexión y tracción en planta (sentido del tránsito de izquierda a derecha)

Fuente: elaboración propia

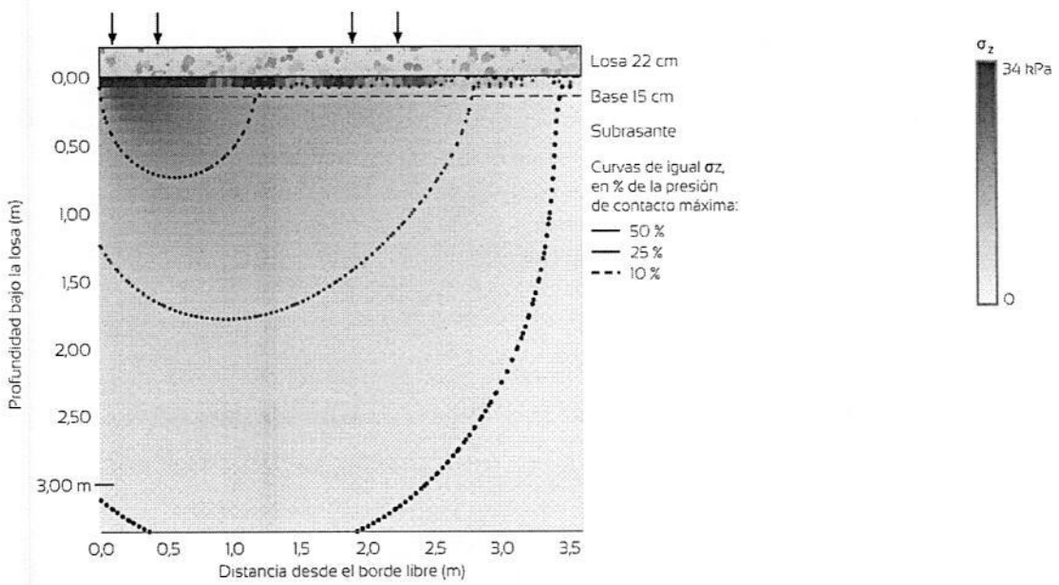


Ilustración 29. A1. Eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa: esfuerzo vertical en la base y la subrasante, en la sección transversal que pasa por el eje

Fuente: elaboración propia

Bajo la losa, la presión de contacto máxima es de 33,6 kPa, frente a 700 kPa de presión de inflado de las llantas: la losa reparte la carga en un área amplia. El esfuerzo vertical en las capas de apoyo se estima superponiendo la solución de Boussinesq para la presión de contacto del modelo, como en un medio elástico homogéneo; baja al 10 % de la presión de contacto máxima a 3,00 m bajo la

losa, 2,85 m dentro de la subrasante. Las figuras muestran ese esfuerzo en las caras del bloque de apoyo y en la sección de la carga.

La mayor tracción, 2,16 MPa, aparece en la cara inferior con eje sencillo en el borde libre, a mitad de la losa. La mayor deflexión del eje sencillo, 0,773 mm, ocurre en la esquina; en la junta transversal la losa cargada desciende 0,454 mm y la vecina 0,383 mm, por la acción de los pasadores.

10.4. VERIFICACIÓN

La fatiga y la erosión se evalúan con las leyes de la PCA-84 y la hipótesis de Miner, con el espectro de cargas del tránsito de diseño y los esfuerzos y deflexiones del modelo escalados con la carga de cada grupo de ejes; el esfuerzo de borde se afecta por la fracción de camiones junto al borde (0,895) y por la variación de la resistencia del concreto (0,953). Los consumos difieren de los del dimensionamiento porque el modelo toma los esfuerzos y deflexiones de las losas modeladas, con sus juntas y bordes, en lugar de los factores tabulados de la PCA-84; en los dos casos quedan muy por debajo del 100 %.

Tabla **22**. Verificación por elementos finitos

Criterio	Límite	A1
Esfuerzo máximo de tracción bajo los ejes máximos según la norma	menor que el MR	2,16 MPa (53 % del MR)
Consumo de fatiga con los esfuerzos del modelo	≤ 100 % (ley de fatiga PCA-84, Miner)	0,0 %
Daño por erosión con la deflexión de esquina del modelo	≤ 100 % (ley de erosión PCA-84, Miner)	4,0 %
Eficiencia de transferencia de carga en la junta transversal	≥ 80 % (criterio de diseño del proyecto)	84,4 %

El modelo confirma el diseño: con los ejes máximos según la norma la tracción no supera el 53 % del módulo de rotura, la fatiga y la erosión quedan por debajo del 100 % y las juntas con pasadores transfieren la carga con la eficiencia que exige el criterio de diseño, no menor de 80 %. Las deformaciones cumplen los criterios de diseño.

11. COMPARACIÓN CON PAVIMENTO FLEXIBLE

Para respaldar la elección del pavimento rígido se dimensionó, con el mismo tránsito y la misma subrasante, la estructura flexible equivalente del manual INVÍAS para bajos volúmenes de tránsito: 9,5 cm mezcla densa en caliente MDC-19 + 15,0 cm base granular + 15,0 cm subbase granular, categoría T2, con SN dispuesto de 2,84 frente a 1,87 requerido para el período de 10 años del manual. La comparación se hace contra la alternativa recomendada A1.

Sabana de Torres tiene clima cálido y húmedo: temperatura media de 27,6 °C, máxima media diaria de 33,5 °C, humedad relativa del 83 % y lluvias de 2.400 a 3.000 mm al año, con dos temporadas húmedas, de abril a junio y de septiembre a noviembre (IDEAM, normales climatológicas 1981 a

2010). Son las condiciones que más castigan una carpeta asfáltica y las que mejor aprovecha una losa de concreto.

Tabla **23**. Comparación técnica del pavimento rígido y del flexible en las condiciones del sitio

Aspecto	Rígido A1	Flexible equivalente
Estructura	Losa de 22,0 cm, MR 4,1 MPa (f'_c 28 MPa), sobre 15 cm de base granular; espesor total 37,0 cm	9,5 cm de MDC-19 sobre capas granulares; espesor total 39,5 cm
Vida de diseño	25 años	10 años; reconstrucción al final de cada período
Calor	El concreto conserva su rigidez a alta temperatura: no se ahuella ni se deforma bajo cargas lentas o detenidas	El ligante se ablanda con la temperatura del pavimento; aparecen ahuellamiento y corrimientos en paraderos, intersecciones y pendientes
Lluvias intensas	Losa impermeable; las juntas selladas protegen la base	El agua que penetra desprende el asfalto del agregado y origina fisuras, baches y ahuellamiento
Radiación solar	Sin oxidación del material de rodadura	El ligante se oxida y se vuelve frágil; fisuración por envejecimiento
Reflectancia de la superficie	25 a 40 %: superficie más fresca y mejor visibilidad nocturna con el mismo alumbrado	5 % nueva, 15 a 20 % envejecida
Conservación	Resellado de juntas y reparación puntual de losas	Sello de fisuras y bacheo; reconstrucción de la estructura al final de cada período de diseño
Reparación	Losa por losa, en todo el espesor, con materiales y equipos corrientes; restitución de pasadores si hace falta	Requiere mezcla de planta en caliente y equipos de fresado y extendido
Apertura al tránsito	Cuando el concreto alcanza el 85 % del módulo de rotura	Al enfriarse la mezcla

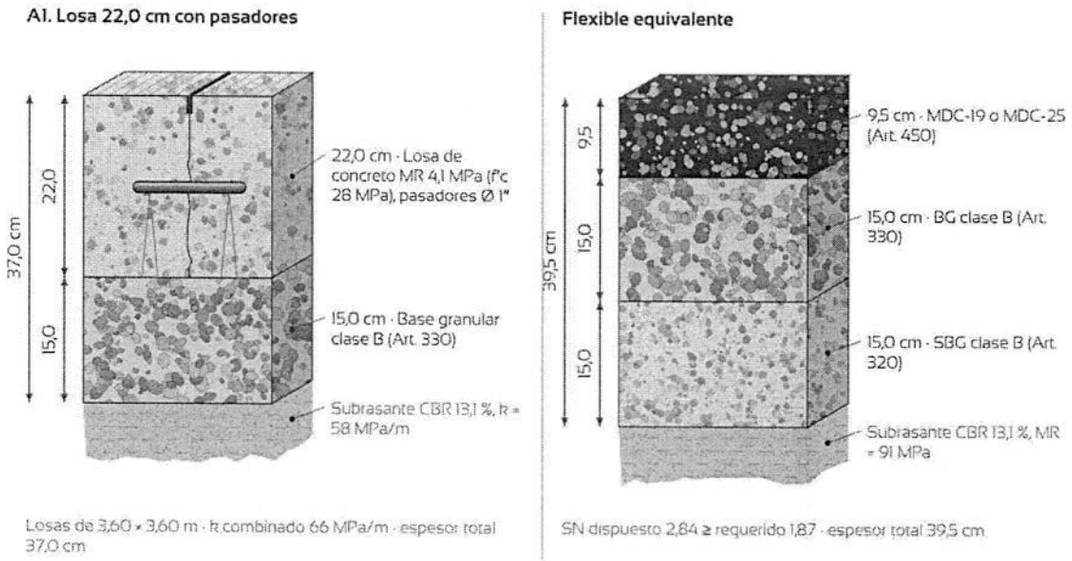


Ilustración 30. Alternativa rígida A1 y estructura flexible equivalente (espesores en cm)

Fuente: elaboración propia

Los efectos de la temperatura y del agua sobre las mezclas asfálticas son los documentados por la FHWA (2000 y 1998); los valores de reflectancia son los de la EPA (2008) para superficies nuevas y envejecidas.

Las dos soluciones se comparan para el mismo servicio: 25 años de vía en condición aceptable. El flexible se diseña para 10 años, de modo que al final de cada período de diseño su estructura llega a la serviciabilidad final y se reconstruye; en 25 años eso ocurre 2 veces, y la última reconstrucción conserva al final del período una vida remanente que se descuenta como valor residual. Cada reconstrucción incluye la remoción de toda la estructura existente, carpeta y capas granulares, con retiro de sobrantes, y una estructura nueva diseñada con el manual INVÍAS para el tránsito de los diez años siguientes, mayor que el del período anterior por el crecimiento de 2,6 % anual; por eso los espesores aumentan en cada reconstrucción.

El costo se compara en valor presente durante 25 años, con la tasa social de descuento del 9 % real anual (DNP, Resolución 1092 de 2022). La Tabla 24 resume el plan de conservación de cada estructura y la Tabla 25, los índices de costo resultantes.

Tabla **24.** Plan de conservación considerado en el ciclo de vida

Año	Rígido A1	Flexible equivalente
5		Sello de fisuras y bacheo del 3 % del área
10	Limpieza y resellado de todas las juntas	Reconstrucción al final de la vida de diseño de 10 años: remoción de toda la estructura (39,5 cm) y estructura nueva para $2{,}60\times10^5$ ejes de 80 kN del período siguiente: 10,0 cm de MDC + 15,0 cm de BG + 15,0 cm de SBG

Año	Rígido A1	Flexible equivalente
15	Reparación en todo el espesor del 1 % de las losas	Sello de fisuras y bacheo del 3 % del área
20	Limpieza y resellado de todas las juntas	Reconstrucción al final de la vida de diseño de 10 años: remoción de toda la estructura (40,0 cm) y estructura nueva para $3{,}37\times10^5$ ejes de 80 kN del período siguiente: 10,5 cm de MDC + 15,0 cm de BG + 15,0 cm de SBG

Cada reconstrucción se cuantifica con la remoción de toda la estructura existente, a $ 227.867 por metro cúbico (apertura mecánica de caja y retiro de sobrantes con acarreo libre de 5 km, Gobernación de Boyacá, lista de precios 2025, ítem 1.01), y con la estructura nueva que pide el manual INVÍAS para el tránsito del período siguiente, que crece 2,6 % al año:

Tabla **25**. Cuantificación de las reconstrucciones del pavimento flexible

Año	Ejes de 80 kN del período	Estructura nueva	Espesor removido (cm)	Remoción (COP/m²)	Estructura nueva (COP/m²)	Total (COP/m²)
10	$2{,}60\times10^5$	10,0 MDC + 15,0 BG + 15,0 SBG	39,5	$ 90.007	$ 173.902	$ 263.910
20	$3{,}37\times10^5$	10,5 MDC + 15,0 BG + 15,0 SBG	40,0	$ 91.147	$ 179.398	$ 270.544

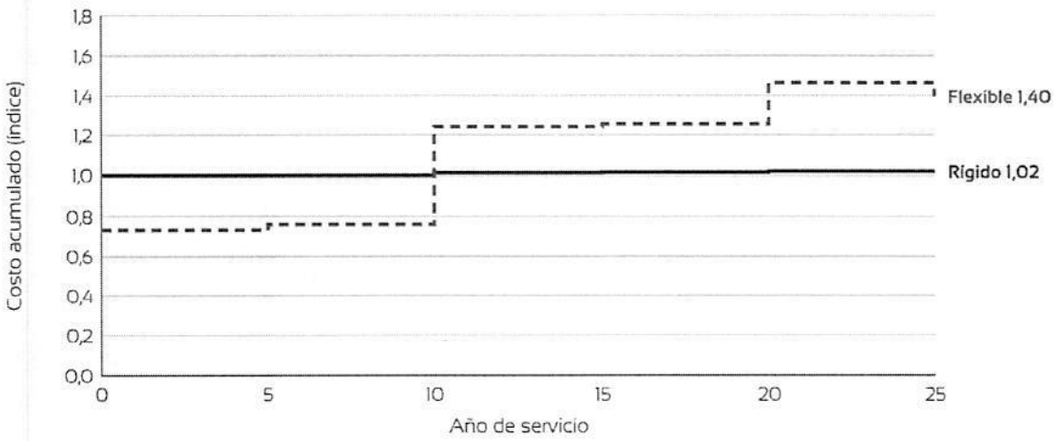


Ilustración 31. Costo acumulado en valor presente durante 25 años (índice: costo inicial del rígido = 1,00)

Fuente: elaboración propia

Tabla **26**. Índices de costo en el ciclo de vida de 25 años

Concepto (índice, costo inicial del rígido = 1,00)	Rígido A1	Flexible
Construcción	1,00	0,73
Conservación y reconstrucción, sin descontar	0,07	2,41
Conservación y reconstrucción, en valor presente	0,02	0,73
Vida remanente de la última reconstrucción, en valor presente	0,00	−0,07
Costo en el ciclo de vida, en valor presente	**1,02**	**1,40**

El flexible cuesta 27 % menos al construirse, pero sus intervenciones suman 2,41 veces el costo inicial del rígido en 25 años, frente a 0,07 del rígido. En valor presente, el rígido resulta 27 % más económico en el ciclo de vida. A esto se suman beneficios que el índice no cuantifica: menos cierres de la vía por obras de conservación, menos molestias a los vecinos y al comercio, y una superficie que conserva su regularidad con las lluvias y el calor de la región.

Por su comportamiento en el clima cálido y lluvioso de Sabana de Torres, su vida de servicio de 25 años y su conservación sencilla y poco frecuente, se ratifica el pavimento rígido como solución para la vía.

12. PROCESO CONSTRUCTIVO

Este capítulo resume el procedimiento constructivo sugerido por el diseñador. El constructor ejecutará la obra según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVÍAS 2022 (Res. 4561 de 2022) para el nivel de tránsito NT2, en los artículos y numerales que se citan en cada paso, que prevalecen sobre este resumen; la interventoría verificará su cumplimiento. Se sugiere iniciar con un tramo de prueba de al menos 100 m en dos carriles, en el que se ajusten la mezcla, el vibrado, el acabado y el momento óptimo de corte de las juntas (500.4.5).

12.1. SUBRASANTE Y BASE

1. Se sugiere instalar el sardinel prefabricado A-10 antes de la base, sobre un lecho de concreto pobre de 10 cm, alineado y nivelado, con juntas de máximo 1 cm rellenas con mortero 1:3 y la cara superior 15 cm por encima de la rasante de la calzada; las piezas cumplirán la NTC 4109.
2. Se retirarán los materiales blandos, arcillosos u orgánicos y se conformará la subrasante a las cotas del proyecto. Los sumideros y desagües de la calzada estarán terminados antes de colocar la base (330.4.2).
3. La base granular clase B (Art. 330) de 15 cm se extiende en capas uniformes, con la humedad óptima y sin segregación (330.4.5).
4. Se sugiere compactar en sentido longitudinal, de los bordes hacia el centro, traslapando cada pasada. El lote se aceptará con grado de compactación GC(90) $\geq$ 98 % (330.4.6 y 330.5).
5. No se extenderá material con lluvia ni sobre una capa cuya compactación y nivelación no hayan sido aprobadas por el interventor (330.4.8).

12.2. FORMALETAS, PASADORES Y BARRAS DE ANCLAJE

1. Se sugieren formaletas metálicas fijas, alineadas y niveladas a la cota de la losa, con los ejes de todas las juntas trazados sobre ellas (500.4.6.5 y 500.4.6.11).

2. En cada junta transversal se fija a la base una canasta con pasadores de Ø 1" × 40 cm cada 30 cm. Los pasadores son de acero redondo liso fy 420 MPa con película epoxi-zinc, van engrasados en toda su longitud, a media altura y paralelos al eje y a la superficie. La desviación máxima admitida es de 10 mm (500.2.2.1).
3. En la junta longitudinal se colocan barras de anclaje corrugadas fy 420 MPa de Ø 3/8" × 65 cm cada 65 cm, a media altura y con la mitad en cada losa. Si se pavimenta por franjas, se introducen por la formaleta; si la losa ya está endurecida, se perforan y anclan con resina (500.2.2.2).

12.3. VACIADO, ACABADO Y CURADO

1. El concreto se colocará, vibrará y acabará antes de 90 minutos desde su mezclado (500.4.6.4.2), con temperatura entre 10 y 35 °C, y no se vaciará con ambiente inferior a 4 °C (500.4.6.18).
2. Se sugiere vibrar con especial cuidado alrededor de los pasadores y las barras de anclaje, para que el concreto quede tan compacto allí como en el resto de la losa.
3. Acabado sugerido: enrasar y corregir la superficie con la regla; dar microtextura con tela de yute húmeda arrastrada y macrotextura con peine de dientes, en sentido transversal; y redondear los bordes de las losas con llana de 12 mm de radio y los de las juntas de construcción con llana de 6 mm. El constructor seguirá el numeral 500.4.6.8 de las Especificaciones INVÍAS 2022, en especial 500.4.6.8.1.3 y 500.4.6.8.1.4 para la textura, y la profundidad de textura que allí se exige.
4. Curado sugerido, con agua: apenas termine el texturizado, mantener la superficie húmeda con nebulización ligera y, cuando el concreto resista sin marcarse, cubrir la losa con tela de yute, costal o geotextil saturados, o con una capa de arena húmeda, que se conservarán empapados con riego continuo durante al menos 7 días, sin dejar que la superficie se seque entre riegos; los bordes se cubrirán igual al retirar las formaletas. Donde no pueda garantizarse el humedecimiento continuo, se usará compuesto de curado en dosis no menor de 250 g/m^2, sin películas de color negro. El constructor seguirá el numeral 500.4.6.9. Si la evaporación supera 0,5 kg/m^2/h se tomarán medidas de protección o se suspenderá el vaciado.
5. Las formaletas se retirarán después de 16 horas desde la colocación del concreto (500.4.6.10).

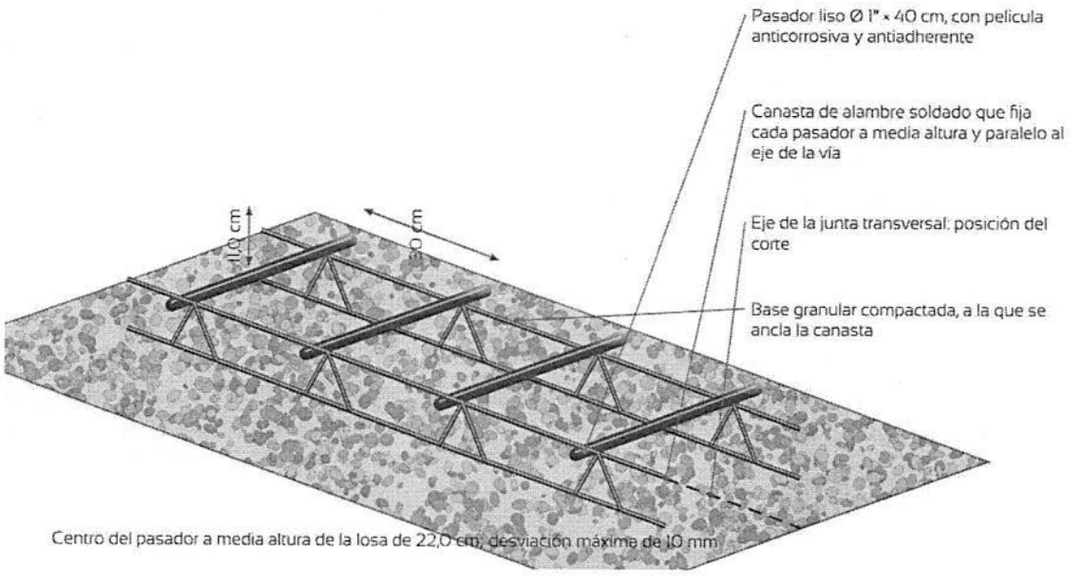


Ilustración 32. Canasta de pasadores sugerida para las juntas transversales de contracción (vista isométrica)

Fuente: elaboración propia

12.4. CONSTRUCCIÓN DE LAS JUNTAS

1. Corte inicial: tan pronto el concreto lo permita sin desportillarse, dentro de la ventana fijada en el tramo de prueba, se cortan con disco diamantado primero las juntas transversales y después las longitudinales. El corte es de 3 mm de ancho y 74 mm de profundidad, un tercio del espesor. Una vez iniciado, se continúa hasta terminar todas las juntas (500.4.6.11 y 500.4.6.12).
2. Bordes desportillados: se reparan con mortero de resina polimérica o mortero cementicio de alta especificación (500.4.6.11).
3. Cavidad de sellado: con un segundo corte, la junta transversal se ensancha a 6 mm hasta 19 mm de profundidad, y la longitudinal a 6 mm hasta 19 mm. Hasta el sellado, las juntas se protegen con perfiles en T apoyados sobre la losa (500.4.6.15). La Ilustración 15 muestra la junta terminada.
4. Limpieza: inmediatamente después del corte final se lava la cavidad con agua a 10 MPa y se sopla con aire comprimido libre de agua y aceite (500.4.6.15).
5. Sellado: se introduce el cordón de respaldo de Ø10 mm a la profundidad prevista y se aplica el sello elastomérico, 6 mm de espesor y 3 mm por debajo de la superficie. Se trabaja con temperatura ambiente superior a 5 °C, sin lluvia, y preferiblemente de día, con la junta en el punto medio de su movimiento. Antes del sellado masivo se aprueban dos tramos de prueba de 50 m (500.4.6.15).

6. Juntas de construcción: al terminar la jornada, el vaciado se suspende en el sitio de una junta prevista, contra una formaleta cabecera con orificios para los pasadores. Si la interrupción ocurre dentro de los dos primeros tercios de la losa, se colocan barras de anclaje en lugar de pasadores (500.4.6.13).
7. Juntas de aislamiento: alrededor de pozos y sumideros, en todo el espesor de la losa y sin barras, con material preformado de 19 mm, a no menos de 30 cm del elemento (500.4.6.14.1; ICPC-INVÍAS 6.2.1).
8. Empalmes y estructuras: se sugiere perforar la losa existente o la estructura con broca de diámetro indicado por la ficha técnica del adhesivo epóxico, limpiar la perforación con aire y cepillo, inyectar el adhesivo desde el fondo e introducir el pasador girándolo; el collar de concreto de pozos y sumideros se vaciará después de la losa, con la misma mezcla, nivelado con la tapa.

12.5. APERTURA AL TRÁNSITO Y CONTROL

1. El tránsito de obra se permite cuando el concreto alcanza el 85 % del módulo de rotura especificado. El tránsito público, con el 100 % y todas las juntas selladas o protegidas (500.4.6.16).
2. El espesor se controla con núcleos y la regularidad, con regla de 3 m (depresiones de 3 mm como máximo) e IRI de 2,4, 3,0 y 3,5 m/km en el 40, 80 y 100 % de los hectómetros (500.5.3).
3. La transferencia de carga se comprueba con deflectómetro de impacto en juntas representativas, transversales y longitudinales. El proyecto fija como mínimo admisible una eficiencia del 80 %, el mismo criterio del diseño. Las juntas que no lo alcancen se reparan según lo indique el interventor (500.5.3.7).

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13.1. CONCLUSIONES

1. La estructura de diseño de la Carrera 25 entre calles 15A y 16 es una losa de concreto de 22,0 cm con módulo de rotura de 4,1 MPa a 28 días (f'_c 28 MPa), sobre 15 cm de base granular clase B.
2. El espesor queda fijado por las tablas de diseño del manual ICPC-INVÍAS (T0, S4), que fijan el espesor mínimo. Con él los consumos de la PCA-84 son de 0,0 % por fatiga y 1,0 % por erosión, y la AASHTO-93 pide 19,5 cm.
3. Las losas son de 3,60 × 3,60 m, con pasadores Ø 1" × 40 cm cada 30 cm en las juntas transversales y barras de anclaje Ø 3/8" × 65 cm cada 65 cm en la longitudinal. Las juntas se cortan a 74 mm de profundidad y se sellan con 6 mm de ancho; los empalmes y las juntas en pozos, sumideros y alcantarillas siguen los detalles del capítulo de juntas.

4. El CBR de diseño de la subrasante es de 13,1 %, el menor de la exploración. El drenaje se apoya en el bombeo de 2 % hacia sardineles prefabricados A-10 y en el sellado de las juntas; la calzada no lleva subdrenes.
5. El modelo de elementos finitos confirma el diseño con los ejes máximos según la norma: la tracción máxima es de 2,16 MPa (53 % del MR) y la transferencia de carga en la junta transversal, de 84,4 %.
6. En 25 años, el costo del pavimento rígido en valor presente es 1,02 veces su costo inicial, frente a 1,40 del flexible equivalente con sus reconstrucciones.

13.2. RECOMENDACIONES

1. Construir la estructura A1 con los procedimientos del capítulo de proceso constructivo y las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVÍAS (2022).
2. Instalar el sardinel antes de la base.
3. Se recomienda sellar la junta entre la losa y el sardinel.
4. Curar el concreto con agua durante al menos 7 días.
5. Abrir al tránsito público cuando el concreto alcance el módulo de rotura especificado y las juntas estén selladas.

14. REFERENCIAS

AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

ACI Committee 330 (2008). ACI 330R-08, Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots. Farmington Hills: American Concrete Institute.

ASTM International (2018). ASTM D6951/D6951M-18, Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. West Conshohocken.

Black, W. P. M. y Lister, N. W. (1979). The Strength of Clay Fill Subgrades: Its Prediction in Relation to Road Performance. Laboratory Report LR 889. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.

DNP (2022). Resolución 1092 de 2022, por la cual se adopta la tasa social de descuento para la evaluación de proyectos de inversión. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.

FAA (2021). Advisory Circular AC 150/5320-6G, Airport Pavement Design and Evaluation. Washington, D. C.: Federal Aviation Administration.

ICPC e INVÍAS (2008). Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá: Instituto Colombiano de Productores de Cemento e Instituto Nacional de Vías.

INVÍAS (2007). Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.

INVÍAS (2022). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Resolución 4561 de 2022: Artículos 100, 231, 320, 330, 350, 500, 610 y 673. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.

Livneh, M. (1989). Validation of Correlations Between a Number of Penetration Tests and In Situ California Bearing Ratio Tests. Transportation Research Record 1219, 56 a 67.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010). NSR-10, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, Título C. Bogotá.

Ministerio de Transporte (2004). Resolución 4100 de 2004, límites de pesos y dimensiones de los vehículos de transporte terrestre automotor de carga, modificada por la Resolución 1782 de 2009. Bogotá.

Moulton, L. K. (1980). Highway Subdrainage Design, FHWA-TS-80-224. Washington, D. C.: Federal Highway Administration.

Portland Cement Association (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, incluido el Apéndice C. Skokie: PCA.

Westergaard, H. M. (1926). Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads, 7(2), 25 a 35.

15. ANEXOS

Anexo A. Registros de exploración: sondeos SPT y ensayos de penetración dinámica de cono (PDC).
Anexo B. Resultados de los ensayos de laboratorio.
Anexo C. Registro fotográfico.

ING. LEIDY JOHANNA ELJACH MONTES
CPS – APOYO A LA FORMULACIÓN

	Nombres y Apellidos	Firma	Fecha
Proyectó	ING. LEIDY JOHANNA ELJACH MONTES CPS – Apoyo a la Formulación		**2026/10/28**
Revisó y Aprobó	ING. OSCAR REY RODRÍGUEZ SECRETARIA DE PLANEACIÓN		**2026/10/28**
Los arriba Firmantes declaramos que hemos revisado el documento y lo encontramos ajustado a las normas y disposiciones legales vigentes y por lo tanto, bajo nuestra responsabilidad lo presentamos parafirma.			

ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA CON CONO PDC
INV E-172-13 / ASTM D6951
REGISTRO DE CAMPO

LUIS ALBERTO CERVERA
INGENIERÍA ESTRUCTURAL
GEOTECNIA Y SUELOS
CONSTRUCCION E INTERVENTORIA

PROYECTO:	PAVIMENTOS SABANA DE TORRES
UBICACIÓN:	CARRERA 25 CON CALLE 15A
CLIENTE:	
FECHA:	13/10/2026
ENSAYO N°:	PDC-03
NIVEL FREÁTICO:	No detectado

DATOS DEL ENSAYO			
Código del ensayo	PDC-03	Apique N°	
Abscisa / sector	Carrera 25 con Calle 15A	Coordenada N	
Municipio / departamento	Sabana de Torres, Santander	Coordenada E	
Martillo (kg)	8	Operador	
Lectura inicial en la regla (cm)	100	Revisó	
Lectura inicial acumulada (mm)	0	Clima / temperatura	
Profundidad del punto cero (mm)	600	Correlación CBR	USACE (Webster)
Condición de la superficie	Ensayo iniciado a 0.60 m de profundidad bajo la superficie		
Descripción del material			

LECTURAS DEL PENETRÓMETRO

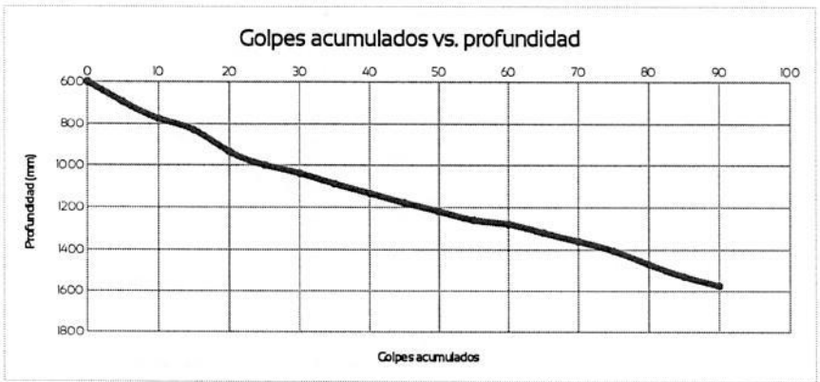
N°	Golpes	Golpes acum.	Lectura en la regla (cm)	Lectura acum. (mm)	Penetración (mm)	Penetración por golpe (mm/golpe)	Índice PDC, DN (mm/golpe)	Profundidad (mm)	Humedad (%)	Observaciones
0		0	100	0				600		Lectura inicial (punto cero)
1	5	5	90.5	95	95	19.0	19.0	695		
2	5	10	82.5	175	80	16.0	16.0	775		
3	5	15	77.0	230	55	11.0	11.0	830		
4	5	20	66.5	335	105	21.0	21.0	935		
5	5	25	60.0	400	65	13.0	13.0	1000		
6	5	30	56.0	440	40	8.0	8.0	1040		
7	5	35	51.0	490	50	10.0	10.0	1090		
8	5	40	46.5	535	45	9.0	9.0	1135		
9	5	45	42.0	580	45	9.0	9.0	1180		
10	5	50	38.0	620	40	8.0	8.0	1220		
11	5	55	34.0	660	40	8.0	8.0	1260		
12	5	60	32.0	680	20	4.0	4.0	1280		
13	5	65	28.0	720	40	8.0	8.0	1320		
14	5	70	24.0	760	40	8.0	8.0	1360		
15	5	75	19.5	805	45	9.0	9.0	1405		
16	5	80	13.0	870	65	13.0	13.0	1470		
17	5	85	7.0	930	60	12.0	12.0	1530		
18	5	90	2.5	975	45	9.0	9.0	1575		

CAPAS (CRITERIO DEL INGENIERO, PARA PDC MASTER)

Capa	Inicia en la lectura N°	SUCS	Subrasante (x)	Observaciones
1	1			
2				
3				
4				

El penetrómetro dinámico de cono (PDC) emplea un martillo de 8 kg con caída libre de 575 mm y un cono de 60° con 20 mm de diámetro. Las lecturas en la regla se toman cada 5 golpes; la lectura acumulada es la penetración medida desde el punto cero. El ensayo se suspende por rechazo cuando el avance es de 2 mm o menos en 5 golpes, o cuando el mango se desvía más de 75 mm de la vertical. Registro alineado con las normas INV E-172-13 y ASTM D6951.

FIRMA OPERADOR



LUIS ALBERTO CERVERA
INGENIERÍA ESTRUCTURAL
GEOTECNIA Y SUELOS
CONSTRUCCIÓN E INTERVENTORÍA

ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA DE CONO (PDC)

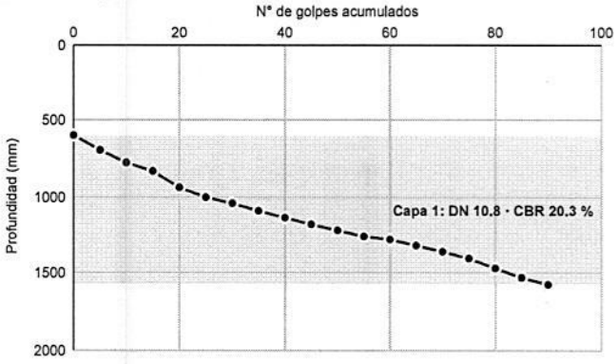
INV E-172-13 · ASTM D6951/D6951M-18(2023) · Hoja de datos y cálculo

Proyecto	PAVIMENTOS SABANA DE TORRES	**Apique N°**	—
Código / contrato	—	**Abscisa**	Carrera 25 con Calle 15A
Ubicación / sector	—	**Coordenadas N / E**	—
Municipio / Depto.	Sabana de Torres / Santander	**Fecha**	2026-10-13
Contratante	—	**Operador / Revisó**	—
Consultor / Interventoría	—	**Correlación CBR**	Cuerpo de Ingenieros de EE. UU. — Webster et al. (1992, 1994)
Martillo	8 kg (factor 1) · caída 575 mm · cono 60°, Ø 20 mm	**Lectura inicial / punto cero**	0.0 mm / 600 mm
Nivel freático	No detectado	**Clima**	—
Superficie / pavimento	Ensayo iniciado a 0.60 m de profundidad bajo la superficie	**Estado del ensayo**	ok
Material / sitio	—		

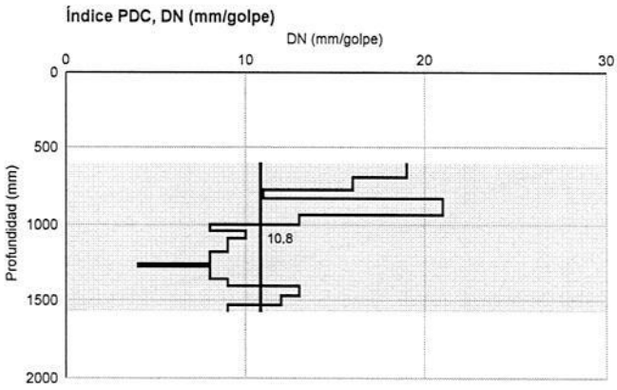
N°	Capa	Golpes	Golpes acum.	Lectura acum. (mm)	Penetr. entre lect. (mm)	Penetr. por golpe (mm/golpe)	DN (mm/golpe)	CBR (%)	Prof. (mm)	w (%)	Excl.
0		—	0	0.0	—	—	—	—	600		
1	1	5	5	95.0	95.0	19.00	19.00	10.8	695		
2	1	5	10	175.0	80.0	16.00	16.00	13.1	775		
3	1	5	15	230.0	55.0	11.00	11.00	19.9	830		
4	1	5	20	335.0	105.0	21.00	21.00	9.6	935		
5	1	5	25	400.0	65.0	13.00	13.00	16.5	1000		
6	1	5	30	440.0	40.0	8.00	8.00	28.4	1040		
7	1	5	35	490.0	50.0	10.00	10.00	22.2	1090		
8	1	5	40	535.0	45.0	9.00	9.00	24.9	1135		
9	1	5	45	580.0	45.0	9.00	9.00	24.9	1180		
10	1	5	50	620.0	40.0	8.00	8.00	28.4	1220		
11	1	5	55	660.0	40.0	8.00	8.00	28.4	1260		
12	1	5	60	680.0	20.0	4.00	4.00	61.8	1280		
13	1	5	65	720.0	40.0	8.00	8.00	28.4	1320		
14	1	5	70	760.0	40.0	8.00	8.00	28.4	1360		
15	1	5	75	805.0	45.0	9.00	9.00	24.9	1405		
16	1	5	80	870.0	65.0	13.00	13.00	16.5	1470		
17	1	5	85	930.0	60.0	12.00	12.00	18.1	1530		
18	1	5	90	975.0	45.0	9.00	9.00	24.9	1575		

Capa	Prof. (mm)	Espesor por lecturas (mm)	Espesor por intersección (mm)	SUCS	Golpes	Penetr. (mm)	DN medio (mm/golpe)	CBR in situ capa (%)	M_r MEPDG (MPa)	k PCA (MPa/m)
1 (subrasante)	600 – 1575	975	975	—	90	975.0	10.83	**20.3**	121	75

Golpes acumulados vs. profundidad



Índice PDC, DN (mm/golpe)



Cálculo: penetración entre lecturas = lectura acumulada menos la última lectura válida anterior; penetración por golpe = penetración / golpes; DN = penetración por golpe × factor de martillo. CBR por lectura con Cuerpo de Ingenieros de EE. UU. — Webster et al. (1992, 1994): $\mathrm{CBR} = 292 \cdot \mathrm{DN}^{-1.12}$ (Todos los suelos, excepto CL con CBR < 10 y CH); $\mathrm{CBR} = \frac{1}{(0.017019 \cdot \mathrm{DN})^2}$ (Suelos CL con CBR < 10); $\mathrm{CBR} = \frac{1}{0.002871 \cdot \mathrm{DN}}$ (Suelos CH). CBR de capa con la tasa media de penetración de la capa (ASTM D6951 7.2 / INV E-172-13); espesor por intersección de las rectas de pendiente promedio (7.2). Las lecturas marcadas en «Excl.» (retroceso, rechazo y posteriores) no entran en la capa. $M_r = 2555 \cdot \mathrm{CBR}^{0.64}$ psi (MEPDG); k según ajuste del ábaco PCA (MPa/m); † CBR > 30: solo de referencia. El CBR es in situ (no sumergido).

Responsable del ensayo	Revisó	Aprobó

ENSAYO DE PENETRACION ESTÁNDAR SPT
INV-111-13 / ASTM D1586
REGISTRO DE CAMPO

LUIS ALBERTO CERVERA
INGENIERÍA ESTRUCTURAL
GEOTECNIA Y SUELOS
CONSTRUCCIÓN E INTERVENTORIA

PROYECTO: PAVIMENTOS SABANA DE TORRES
UBICACIÓN: CARRERA 25 CON CALLE 15A
CLIENTE:
FECHA: 13/10/2026
SONDEO N°: 2
NIVEL FREÁTICO x SI NO

N.F	LECTURAS SPT					MUESTRA	RECUPERACIÓN [cm]	DESCRIPCIÓN VISUAL DE LA MUESTRA
	TRAMOS [m]		N1	N2	N3			
	INICIAL	FINAL						
	0.50	1.00	18	19	18	S2M1	45	Arena limosa de color café claro a naranja, compacta, con manchas rojizas de oxidación.
	1.00	1.50	17	13	14	S2M2	39	Arena limosa de color café oscuro a rojizo, compacta, con fisuras y manchas de oxidación.
	1.50	2.00	14	12	7	S2M3	41	Arena limosa de color café claro a naranja, compacta, con vetas de oxidación.
	2.00	2.50	9	5	6	S2M4	44	Arena limosa de color café claro, compacta; limo arenoso gris claro a blanco en la base.
2.60 m	2.50	3.00	10	18	29	S2M5	33	Arena limosa de color café claro, compacta; pasa a limo arenoso gris claro a blanco. Rechazo al terminar el tramo 2.50 a 3.00 m.

El ensayo de penetración estándar (SPT) con diámetro AW emplea un martillo de 63.5 kg, con una altura de caída de 76 cm.
El ensayo se interrumpe y se declara "rechazo" bajo las siguientes condiciones:
Si se requieren 50 golpes para avanzar cualquier tramo de 15 cm.
Si no se observa avance del muestreador tras 10 golpes consecutivos.
Si se acumulan 100 golpes en total durante los tres tramos de penetración.
Este protocolo está alineado con la norma ASTM D1586 y garantiza la obtención de datos confiables para la caracterización geotécnica del terreno.

FIRMA OPERADOR

INSPECCION & ENSAYOS INDUSTRIALES

EL CONOCIMIENTO CONSTRUYE FUTURO

INFORME DE LABORATORIO

SISTEMA UNIFICADO DE CLSIFICACION DE SUELOS PARA PROPOSITO DE INGENIERIA

INV E-181-13

DETERMINACION DE LA HUMEDAD NATURAL
INV E122-13
DETERMINACION DEL TAMNAÑO DE LAS PARTICULAS
INV E123-13
LIMITE LIQUIDO Y PLASTICO E INDICE DE PLATICIDAD
INV E-125-126-13

PROYECTO:	PAVIMENTACION VIA URBANA CARRERA 25 ENTRE CALLES 15 y 16 MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES - SANTANDER	
CLIENTE:	Fecha de Informe	Fecha de Ensayo
LUIS ALBERTO CERVERA	22/10/2026	21/10/2026
REALIZO:	CLASIFICACIÓN:	
Tnlgo. Edwin Alexander Rangel Ardila	ARENA BIEN GRADADA CON FINOS LIMOSOS	

Humedad natural	
Capsula	33
Pcap+suelo humedo	91,66
Pcap+suelo seco	88,09
peso capsula	8,44
Humedad	4,48

PESO MUESTRA SECA (g) P1:	609,77
PESO MUESTRA LAVADA POR TAMIZ Nº 200 (g) P2:	554,1

CARCTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)			
2	1_2	INICIAL:	0,0	FINAL:	1,5

DESCRIPCIÓN VISUAL:

SUELO ARENO GRAVOSO COLOR GRIS

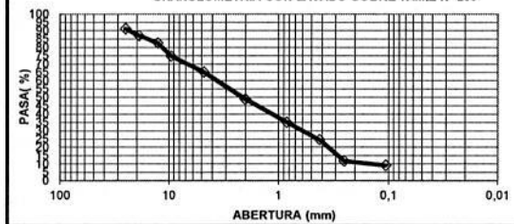
CLASIFICACIÓN SUCS	SW-SM	INDICE DE GRUPO	1	CLASIFICACIÓN AASTHO	A-1-b

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO			PASA (%)
		PARCIAL (g)	PARCIAL (%)	ACUMULADO (%)	REAL
1"	25,4	24,03	4%	4%	96%
3/4"	19,05	30,0	5%	5%	91%
1/2"	12,7	25,3	4%	9%	87%
3/8"	9,5	26,9	4%	13%	83%
Nº 4	4,76	47,8	8%	21%	75%
Nº 10	2,00	58,4	10%	31%	65%
Nº 20	0,84	99,2	16%	47%	49%
Nº 40	0,42	84,6	14%	61%	35%
Nº 60	0,25	63,8	10%	72%	25%
Nº 140	0,106	78,3	13%	84%	12%
Nº 200	0,074	15,7	3%	87%	9%
FONDO		55,6	9%	96%	0%

LIMITES DE PLASTICIDAD

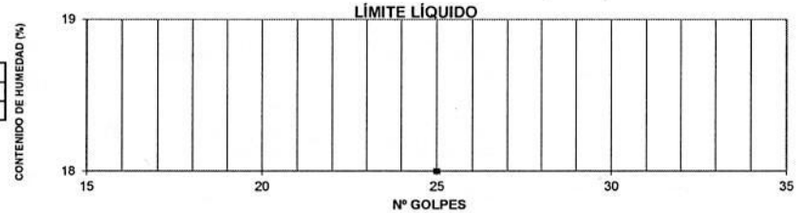
PRUEBA Nº	CAPSULA Nº	Nº DE GOLPES	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO (g)	PESO CAPSULA + SUELO SECO (g)	PESO CAPSULA (g)	PESO AGUA (g)	PESO SUELO SECO (g)	CONTENIDO DE AGUA (%)
LIMITE LIQUIDO								
1								
2								
3								
LIMITE PLASTICO								
1								
3								
						LIMITE PLASTICO		

GRANULOMETRÍA CON LAVADO SOBRE TAMIZ Nº 200



GRAVA	21%
ARENA	66%
FINO	9%

LÍMITE LÍQUIDO



L.L.(%)	N.L.	L.P (%)	N.P.	I.P (%)	-

Realizo

INSPECCION & ENSAYOS INDUSTRIALES
EL CONOCIMIENTO CONSTRUYE FUTURO

INFORME DE LABORATORIO

SISTEMA UNIFICADO DE CLSIFICACION DE SUELOS PARA PROPOSITO DE INGENIERIA

INV E-181-13

DETERMINACION DE LA HUMEDAD NATURAL
INV E122-13
DETERMINACION DEL TAMNAÑO DE LAS PARTICULAS
INV E123-13
LIMITE LIQUIDO Y PLASTICO E INDICE DE PLATICIDAD
INV E-125-126-13

PROYECTO:	PAVIMENTACION VIA URBANA CARRERA 25 ENTRE CALLES 15 y 16 MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES - SANTANDER	
CLIENTE:	Fecha de Informe	Fecha de Ensayo
LUIS ALBERTO CERVERA	22/10/2026	21/10/2026
REALIZO:	CLASIFICACIÓN:	
Tnlgo. Edwin Alexander Rangel Ardila	ARENA BIEN GRADADA CON FINOS LIMOSOS	

Humedad natural	
Capsula	75
Pcap+suelo humedo	90,71
Pcap+suelo seco	81,18
peso capsula	7,02
Humedad	12,85

PESO MUESTRA SECA (g) P1:	580,88
PESO MUESTRA LAVADA POR TAMIZ Nº 200 (g) P2:	535,3

CARCTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

SONDEO	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)			
2	3_4_5	INICIAL:	1,5	FINAL:	3,0

DESCRIPCIÓN VISUAL:

SUELO ARENO GRAVOSO COLOR AMARILLO

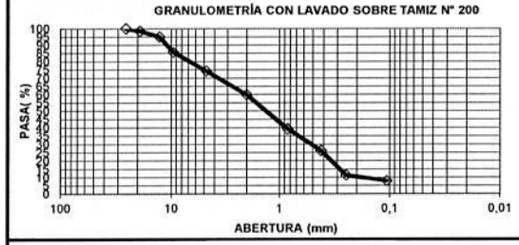
CLASIFICACIÓN SUCS	SW-SM	INDICE DE GRUPO	1	CLASIFICACIÓN AASTHO	A-1-b

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO			PASA (%)
		PARCIAL (g)	PARCIAL (%)	ACUMULADO (%)	REAL
1"	25,4	0	0%	0%	100%
3/4"	19,05	0,0	0%	0%	100%
1/2"	12,7	8,9	2%	2%	98%
3/8"	9,5	19,8	3%	5%	95%
Nº 4	4,76	55,3	10%	14%	86%
Nº 10	2,00	65,7	11%	26%	74%
Nº 20	0,84	83,2	14%	40%	60%
Nº 40	0,42	120,8	21%	61%	39%
Nº 60	0,25	75,9	13%	74%	26%
Nº 140	0,106	86,1	15%	89%	11%
Nº 200	0,074	19,9	3%	92%	8%
FONDO		45,5	8%	100%	0%

LIMITES DE PLASTICIDAD

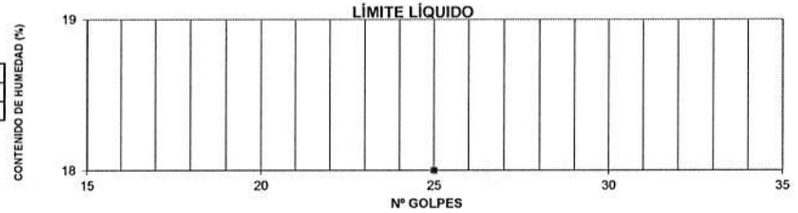
PRUEBA Nº	CAPSULA Nº	Nº DE GOLPES	PESO CAPSULA + SUELO HUMEDO (g)	PESO CAPSULA + SUELO SECO (g)	PESO CAPSULA (g)	PESO AGUA (g)	PESO SUELO SECO (g)	CONTENIDO DE AGUA (%)
LIMITE LIQUIDO								
1								
2								
3								
LIMITE PLASTICO								
1								
3								
						LIMITE PLASTICO		

GRANULOMETRÍA CON LAVADO SOBRE TAMIZ Nº 200



GRAVA	14%
ARENA	78%
FINO	8%

LÍMITE LÍQUIDO



L.L.(%)	N.L.	L.P (%)	N.P.	I.P (%)	-

Realizo

REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA EXPLORACIÓN

Proyecto	Pavimentos Sabana de Torres (Santander)
Objeto	Registro fotográfico de la exploración geotécnica para el diseño de pavimentos rígidos
Exploración	1 sondeo con ensayo de penetración estándar (SPT) y 1 ensayo con penetrómetro dinámico de cono (PDC)
Muestreo	SPT continuo en tramos de 0,50 m, entre 0,50 y 3,00 m; PDC desde 0,60 m bajo la superficie
Norma de referencia	INV E-111-13 / ASTM D1586 (SPT); INV E-172-13 / ASTM D6951 (PDC)
Fecha de exploración	13 de octubre de 2026

Las fotografías de ejecución muestran el equipo de SPT y el penetrómetro dinámico de cono (PDC) en cada punto, con los apiques de inicio excavados hasta 0,60 m. Las de muestras corresponden a lo recuperado con el muestreador de cuchara partida, identificado en el tablero de campo con el sondeo, la muestra, el intervalo de profundidad y los golpes por cada 15 cm de penetración; la cinta métrica dispuesta junto a la muestra sirve de escala.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sondeo S2, muestra M1; profundidad 0,50 a 1,00 m; N = 18-19-18 golpes/15 cm 2
Figura 2. Sondeo S2, muestra M2; profundidad 1,00 a 1,50 m; N = 17-13-14 golpes/15 cm 2
Figura 3. Sondeo S2, muestra M3; profundidad 1,50 a 2,00 m; N = 14-12-7 golpes/15 cm 2
Figura 4. Sondeo S2, muestra M4; profundidad 2,00 a 2,50 m; N = 9-5-6 golpes/15 cm 2
Figura 5. Sondeo S2, muestra M5; profundidad 2,50 a 3,00 m; N = 10-18-29 golpes/15 cm 3
Figura 6. PDC 3, Carrera 25 con Calle 15A: penetrómetro en posición de ensayo sobre la vía en afirmado 3
Figura 7. PDC 3, Carrera 25 con Calle 15A: ejecución del ensayo; vista hacia el costado de la vía 3
Figura 8. PDC 3, Carrera 25 con Calle 15A: hinca del cono; vista en sentido longitudinal de la vía 4

Carrera 25 con Calle 15A

Sondeo S2: muestras



Figura 1. Sondeo S2, muestra M1; profundidad 0,50 a 1,00 m; N = 18-19-18 golpes/15 cm.



Figura 2. Sondeo S2, muestra M2; profundidad 1,00 a 1,50 m; N = 17-13-14 golpes/15 cm.

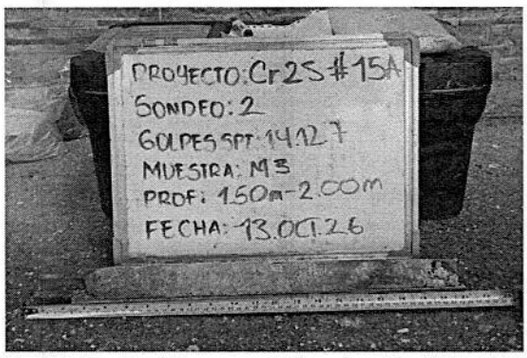


Figura 3. Sondeo S2, muestra M3; profundidad 1,50 a 2,00 m; N = 14-12-7 golpes/15 cm.



Figura 4. Sondeo S2, muestra M4; profundidad 2,00 a 2,50 m; N = 9-5-6 golpes/15 cm.



Figura 5. Sondeo S2, muestra M5; profundidad 2,50 a 3,00 m; N = 10-18-29 golpes/15 cm.

Ensayo PDC 3



Figura 6. PDC 3, Carrera 25 con Calle 15A: penetrómetro en posición de ensayo sobre la vía en afirmado.



Figura 7. PDC 3, Carrera 25 con Calle 15A: ejecución del ensayo; vista hacia el costado de la vía.



Figura 8. PDC 3, Carrera 25 con Calle 15A: hinca del cono; vista en sentido longitudinal de la vía.

MATRICULA PROFESIONAL

151037-0540133 STD

R2020041438

REPÚBLICA DE COLOMBIA

COPNIA

Consejo Profesional Nacional de Ingeniería

INGENIERIA CIVIL

LEIDY JOHANNA ELJACH MONTES

ID: 1098761772

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA



REPUBLICA DE COLOMBIA
IDENTIFICACION PERSONAL
CEDULA DE CIUDADANIA

NUMERO 1.098.761.772

ELJACH MONTES

APELLIDOS

LEIDY JOHANNA

NOMBRES

FIRMA



FECHA DE NACIMIENTO 25-OCT-1994

FLORIDABLANCA
(SANTANDER)

LUGAR DE NACIMIENTO

1 [redacted] ESTATURA

O+ G.S. RH

F SEXO

30-OCT-2012 BUCARAMANGA

FECHA Y LUGAR DE EXPEDICION

REGISTRADOR NACIONAL
CARLOS ARIEL SÁNCHEZ TORRES

INDICE DERECHO

P-2700100-00417084-F-1098761772-20121217 0031897473A 1 38761123

MATRICULA PROFESIONAL

151037-0540133 STD

R2020041438

REPÚBLICA DE COLOMBIA

COPNIA

Consejo Profesional Nacional de Ingeniería

INGENIERIA CIVIL

LEIDY JOHANNA ELJACH MONTES

ID: 1098761772

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

REPÚBLICA DE COLOMBIA

COPNIA

Consejo Profesional Nacional de Ingeniería

Certificado de vigencia y antecedentes disciplinarios

CVAD-2026-4732548

CONSEJO PROFESIONAL NACIONAL DE INGENIERÍA
COPNIA

EL DIRECTOR GENERAL

CERTIFICA:

1. Que LEIDY JOHANNA ELJACH MONTES, identificado(a) con CEDULA DE CIUDADANIA 1098761772, se encuentra inscrito(a) en el Registro Profesional Nacional que lleva esta entidad, en la profesión de INGENIERIA CIVIL con MATRICULA PROFESIONAL 151037-0540133 STD desde el 23 de Octubre de 2020, otorgado(a) mediante Resolución Nacional R2020041438.

2. Que el(la) MATRICULA PROFESIONAL es la autorización que expide el Estado para que el titular ejerza su profesión en todo el territorio de la República de Colombia, de conformidad con lo dispuesto en la Ley 842 de 2003.

3. Que el(la) referido(a) MATRICULA PROFESIONAL se encuentra **VIGENTE**

4. Que el profesional no tiene antecedentes disciplinarios ético-profesionales.

5. Que la presente certificación se expide en Bogotá, D.C., a los nueve (09) días del mes de Septiembre del año dos mil veintiseis (2026).

Rubén Dario Ochoa Arbeláez

Firmal del titular (*)

(*)Con el fin de verificar que el titular autoriza su participación en procesos estatales de selección de contratistas. La falta de firma del titular no invalida el Certificado

El presente es un documento público expedido electrónicamente con firma digital que garantiza su plena validez jurídica y probatoria según lo establecido en la Ley 527 de 1999. Para verificar la firma digital, consulte las propiedades del documento original en formato .pdf.

Para verificar la integridad e inalterabilidad del presente documento consulte en el sitio web https://tramites.copnia.gov.co/Copnia_Microsite/CertificateOfGoodStanding/CertificateOfGoodStandingStart indicado el número del certificado que se encuentra en la esquina superior derecha de este documento.