



**MEJORAMIENTO DE LA VÍA DABEIBA - CAMPARRUSIA  
EN LA SUBREGIÓN OCCIDENTE DEL DEPARTAMENTO  
DE ANTIOQUIA  
km 2+950 – km 11+090**

**VOLUMEN VI.  
ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL  
PAVIMENTO**

**INFORME TÉCNICO**

DOCUMENTO

GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1



Medellín, 12 de marzo de 2022

# LISTA DE DISTRIBUCIÓN


Copias de este documento han sido entregadas a dependencias de ARGOS Y BANCOLOMBIA según se indica a continuación. Las observaciones que resulten de su revisión y aplicación deben ser informadas a esta oficina para proceder a realizar sus modificaciones:

DEPENDENCIA	No. de Copias
ARGOS	1
BANCOLOMBIA	1
GICA S.A.S.	1

ARGOS Y BANCOLOMBIA son responsables de administrar las copias correspondientes a este documento dentro de sus grupos de trabajo.



Calle 42 A No. 63C-38 Conquistadores  
Teléfono (57) 604-2351092  
E-mail: proyectosgica@gicasas.com.co  
MEDELLÍN, COLOMBIA – SUDAMÉRICA

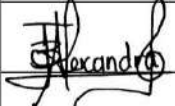
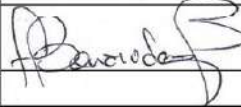

	VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO	
	INFORME	
	Documento: GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1	
	Medellín, Antioquia, 12 de marzo de 2022	Página i

## ÍNDICE DE MODIFICACIONES

REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
0	N/A	08/11/2021	Versión Original
1	3 (Desarrollo de los diseños de pavimentos)	12/03/2022	Adición de diseño de refuerzo de las losas de concreto. Modificación de tipologías de losas de acuerdo con el diseño geométrico de la vía. Se agregaron los detalles de juntas en el pavimento rígido.
	3 (Desarrollo de los diseños de pavimentos)	12/03/2022	Adición del apartado de material granular tratado con cemento
	4 (Conclusiones)	12/03/2022	Capítulo complementado.
	5 (Recomendaciones)	12/03/2022	Capítulo complementado.

# ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

TIPO DE DOCUMENTO	INFORME			
NOMBRE DEL DOCUMENTO	MEJORAMIENTO DE LA VÍA DABEIBA – CAMPARRUSIA EN LA SUBREGIÓN OCCIDENTE DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA – km 2+950 – km 11+090 VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO			
CÓDIGO DEL DOCUMENTO	GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1			
REVISIÓN N°	PROFESIONAL	0	1	2

ELABORÓ	Nombre	Ibeth Alexandra Siabato Orduz	X	X	
	Cédula de ciudadanía	1.054.121.479			
	Matrícula Profesional	151037-0548739 STD			
	Firma				
	Fecha	05/11/2021			
	Nombre	Jhonatan Steevens López Parra	X	X	
	Cédula de ciudadanía	1.098.773.084			
	Matrícula Profesional	151037-0576752 STD			
	Firma	Jhonatan López.			
	Fecha	05/11/2021			
REVISÓ	Nombre				
	Cédula de ciudadanía				
	Matrícula Profesional				
	Firma				
	Fecha				
APROBÓ Y PRESENTÓ GICA	Nombre	Franco Hernando Benavidez Bolaños	X	X	
	Cédula de ciudadanía	75.067.190			
	Matrícula Profesional	1720256347 CLD			
	Firma				
	Fecha	05/11/2021			
APROBÓ CLIENTE	Nombre	Luis Fernando Cano Gómez	X	X	
	Cédula de ciudadanía	7.525.194			
	Matrícula Profesional	1920201726 CAU			
	Firma				
	Fecha	08/11/2021			
	Nombre				
	Cédula de ciudadanía				
	Matrícula Profesional				
	Firma				
	Fecha				

# TABLA DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES .....	1
1.1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.2	OBJETIVO .....	1
1.3	alcances .....	2
1.4	LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	2
2	METODOLOGÍA .....	3
2.1	DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO .....	3
2.1.1	ESPECTRO DE CARGAS POR EJE – METODOLOGÍA PCA-84 .....	4
2.1.2	ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS .....	5
2.2	JUNTAS EN EL PAVIMENTO de concreto .....	9
2.2.1	TIPOS DE JUNTA .....	10
2.3	DISEÑO DEL PAVIMENTO DE PLACA HUELLA .....	10
2.3.1	MECANISMO DE FALLA .....	10
2.3.2	TRÁNSITO .....	10
2.3.3	LA SUBRASANTE Y LA SUBBASE GRANULAR .....	11
2.3.4	ESPESOR DE LA PLACA-HUELLA .....	11
2.3.5	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN TANGENTE .....	11
2.3.6	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN CURVAS .....	11
2.3.7	RESISTENCIA DEL CONCRETO .....	12
3	DESARROLLO DE LOS DISEÑOS DE PAVIMENTOS .....	12
3.1	EVALUACIÓN GEOTÉCNICA .....	12
3.1.1	MATERIAL GRANULAR EXISTENTE .....	12
3.1.2	MATERIAL GRANULAR TRATADO CON CEMENTO (MGTC) .....	22
3.2	PAVIMENTO DE CONCRETO .....	23
3.2.1	CAPACIDAD DE SOPORTE .....	23
3.2.2	CARACTERIZACIÓN DEL TRÁNSITO DE DISEÑO .....	23
3.2.3	ESPESOR DE DISEÑO .....	27
3.2.4	ESPESOR DE DISEÑO SELECCIONADO .....	32
3.2.5	JUNTAS EN EL PAVIMENTO RÍGIDO .....	33
3.2.6	DISEÑO DE JUNTAS .....	33
3.3	PAVIMENTO DE PLACA-HUELLA .....	45
3.3.1	PERIODO DE DISEÑO .....	45
3.3.2	VEHÍCULO DE DISEÑO .....	45
3.3.3	SUBRASANTE .....	45
3.3.4	SUBBASE .....	45
3.3.5	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES .....	45
3.3.6	PLACA-HUELLA .....	46
3.3.7	RIOSTRA .....	46
3.3.8	PIEDRA PEGADA .....	46
3.3.9	BERMA-CUNETA Y BORDILLO .....	47
3.3.10	DIMENSIONES Y REFUERZO DE PLACA-HUELLA EN CONCRETO REFORZADO .....	48
3.3.11	DIMENSIONES Y REFUERZO DE LA RIOSTRA .....	49
3.3.12	JUNTAS .....	52
4	CONCLUSIONES .....	54

5	RECOMENDACIONES .....	55
6	REFERENCIAS .....	56

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Tramos e intervenciones a realizar entre el km 2+950 – km 11+090.....	2
Tabla 2.	Cargas por Eje de acuerdo con los máximos autorizados por el Ministerio de Transporte .....	4
Tabla 3.	Resultados de CBR .....	13
Tabla 4.	Potencial expansivo y de compresivo a partir de propiedades índice en muestras de suelos .....	18
Tabla 5.	Composición y distribución vehicular de acuerdo con aforos 03.09.21 al 10.09.21 .....	23
Tabla 6.	Crecimiento anual del tráfico para el escenario base .....	25
Tabla 7.	Número de repeticiones acumuladas de los vehículos durante el periodo de servicio .....	25
Tabla 8.	Número de repeticiones para el periodo de diseño por espectro de carga para ejes sencillos y tándem .....	25
Tabla 9.	TPD Proyectado por estación.....	26
Tabla 10.	TPD Proyección de ejes equivalentes a ejes simples de 8.2 t en el carril de diseño .....	26
Tabla 11.	Número de ejes equivalentes.....	27
Tabla 12.	Tránsito km 2+950 a km 11+090 Dabeiba – Camparrusia.....	28
Tabla 13.	Resultados del análisis de sensibilidad – método de la PCA' 84 .....	30
Tabla 14.	Resultados del análisis de esfuerzos por alabeo .....	31
Tabla 15.	Resultados del análisis de esfuerzos por fricción.....	31
Tabla 16.	Resultados del análisis de esfuerzos por cargas de tránsito .....	31
Tabla 17.	Resumen de espesores de diseño y método de diseño considerado .....	32
Tabla 18.	Dimensiones consideradas para los anchos de banca .....	33
Tabla 19.	Barras de anclaje en juntas longitudinales .....	34
Tabla 20.	Dovelas o pasadores en juntas transversales .....	35
Tabla 21.	Longitud de canastilla y recubrimiento, por ancho de losa .....	35
Tabla 22.	Valores recomendados de coeficiente de contracción térmica en función del tipo de agregado [1] .....	36
Tabla 23.	Relación aproximada entre contracción y resistencia a la tracción indirecta [1] .....	37
Tabla 24.	Registro de temperaturas media máxima y mínima anual del municipio de Dabeiba .....	38
Tabla 25.	Determinación del ancho mínimo de juntas de contracción .....	39
Tabla 26.	Esfuerzo de trabajo permisible (en ksi) en las barras de refuerzo $f'y = 40.000 \text{ psi}$ [1] .....	42
Tabla 27.	Criterio de separación entre fisuras.....	43
Tabla 28.	Criterio de ancho de fisuras.....	43
Tabla 29.	Criterio de esfuerzo en el acero.....	43
Tabla 30.	Número mínimo y máximo de barras en la parrilla de acero para ancho 2 metros .....	44
Tabla 31.	Número de barras mínima y máxima, por ancho de losa .....	44
Tabla 32.	Número de barras y separación , por ancho de losa .....	45
Tabla 33.	Dimensiones consideradas para los anchos de banca .....	54
Tabla 34.	Dovelas o pasadores en juntas transversales .....	54
Tabla 35.	Barras de anclaje en juntas longitudinales .....	55

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación general del proyecto y del tramo en estudio .....	3
Figura 2. Efecto del alabeo en el día .....	5
Figura 3. Efecto del alabeo en la noche .....	6
Figura 4. Factor de corrección para la verificación de alabeo .....	6
Figura 5. Factores de fricción recomendados [1].....	7
Figura 6. Configuración rueda doble .....	9
Figura 7. Vehículo de diseño. Camión C-3 [3] .....	11
Figura 8. Vista en planta y sección transversal en tramo recto [3] .....	12
Figura 9. Perfil de suelos a partir de apiques y ensayos de clasificación, km 2+990 – km 6+970.....	14
Figura 10. Perfil de suelos a partir de apiques y ensayos de clasificación, km 7+230 – km 10+990.....	14
Figura 11. Límites de Atterberg de las muestras de suelos, km 2+990 – km 6+970 .....	15
Figura 12. Límites de Atterberg de las muestras de suelos, km 7+230 – km 10+990 .....	15
Figura 13. Gradación de las muestras de suelos, km 2+990 – km 6+970.....	16
Figura 14. Gradación de las muestras de suelos, km 7+230 – km 10+990.....	16
Figura 15. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada, km 2+990 – km 6+970 .....	17
Figura 16. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada, km 7+230 – km 10+990.....	17
Figura 17. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos [6] .....	23
Figura 18. Regresión para la Estación Maicao 1997-2017 (Logarítmica) .....	24
Figura 19. Regresión para la Estación Maicao 1997-2017 (Potencial) .....	24
Figura 20. Regresión para la Estación Maicao 1997-2017 (Exponencial) .....	24
Figura 21. Resumen de resultados de diseño mediante el método de la PCA'84 .....	29
Figura 22. Sección de la estructura de pavimento con los espesores de diseño .....	32
Figura 23. Cuadro de estimación de acero de refuerzo corrugado para barras de anclaje PCA – 84 [8] .....	34
Figura 24. Recomendación para la selección de los pasadores de carga [8] .....	35
Figura 25. Esquema canastillas de dovelas en juntas transversales de contracción.....	37
Figura 26. Mapa de temperatura media anual en la zona de estudio.....	38
Figura 27. Esquema del corte y sellado de juntas de contracción .....	39
Figura 28. Detalle junta de expansión.....	40
Figura 29. Detalle junta de aislamiento, losas con largo mayor a 2.00 m .....	40
Figura 30. Detalle junta de aislamiento, losas con largo igual o menor a 2.00 m .....	41
Figura 31. Ábaco para la estimación del esfuerzo de tracción debido a carga de rueda [1] .....	42
Figura 32. Planta de Berma-cuneta y bordillo [3] .....	47
Figura 33. Corte Berma-cuneta sección en la Cuneta [3] .....	48
Figura 34. Planta de Distribución del refuerzo [3] .....	49
Figura 35. Corte transversal con detalles de refuerzo [3] .....	50
Figura 36. Corte longitudinal con detalles de refuerzo [3] .....	50
Figura 37. Planta de Riostra [3] .....	50
Figura 38. Corte longitudinal [3] .....	51
Figura 39. Corte transversal sección en placa huella [3] .....	51
Figura 40. Corte transversal sección en piedra pegada [3] .....	52
Figura 41. Junta transversal de construcción en la Placa-huella [3] .....	52
Figura 42. Junta transversal de construcción en la Berma-cuneta [3] .....	53
Figura 43. Junta transversal de construcción en la Riostra [3] .....	53
Figura 44. Junta longitudinal entre Placa-huella o Berma-cuneta y la Piedra pegada [3] .....	53

# “MEJORAMIENTO DE LA VÍA DABEIBA - CAMPARRUSIA EN LA SUBREGIÓN OCCIDENTE DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA” ABSCISADO km 2+950 – km 11+090

## INFORME TÉCNICO

### VOLUMEN VI: ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO

GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1

## 1 GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN


GICA SAS está desarrollando para ARGOS SA y BANCOLOMBIA actividades como asesor técnico en los estudios y diseños para el mejoramiento de la vía Dabeiba – Camparrusia, en el departamento de Antioquia, la cual tiene una longitud total de 44.40 km aproximadamente. Se realizará el estudio en detalle por parte de esta consultoría, del tramo de la vía comprendido entre el km 2+950 y el km 11+090, abarcando 8.14 kilómetros. Sin embargo, del km 5+900 al km 6+000 por ser un sector especial, en donde la problemática está asociada a la socavación lateral del río, el estudio relacionado con el análisis de éste y el planteamiento de la solución no están incluidos en el alcance del estudio y deberá estar sujeto a evaluaciones y análisis futuros. Por lo anterior, este tramo no será objeto de estudios geotécnicos, estudios de pavimentación, sin embargo, se contempla el diseño de obras hidráulicas.

El proyecto tiene como objetivo fundamental mejorar la infraestructura vial para incrementar la competitividad, promover el crecimiento económico, disminuir significativamente los costos de operación vehicular, con el consecuente mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y de los usuarios de la vía objeto de revisión, aprovechando la sección transversal disponible. Puesto que el alcance principal de este proyecto es en esencia la pavimentación, no se contemplan ampliaciones, ni recuperaciones de banca, y tampoco intervenciones para la estabilización de taludes. Partiendo de estas consideraciones mencionadas, fueron desarrollados todos los estudios y diseños por parte de GICA SAS.

Por lo anterior, en este documento se presenta el estudio a nivel de Fase III del diseño de las estructuras de pavimento de concreto y de pavimento con placa huella, además se describe la metodología utilizada para dar cumplimiento de los objetivos, cabe resaltar que, los diseños propuestos buscan dar la solución óptima a las problemáticas detectadas y a las necesidades del proyecto desde el punto vista técnico, económico y constructivo.

### 1.2 OBJETIVO

Realizar los diseños de pavimento de concreto y pavimento con placa huella del km 2+950 al km 5+900 y del km 6+000 al km 11+090 de la vía que comienza desde el casco urbano del municipio de Dabeiba y finaliza en el corregimiento de Camparrusia, en el departamento de Antioquia. La capa de rodadura estará soportada por material granular existente tratado con cemento, material granular y roca a nivel de subrasante, además, la estructura diseñada deberá soportar  $1.85 \times 10^6$  ejes equivalentes, cabe aclarar que, este último dato es informativo, puesto que, el diseño de pavimento rígido se realiza teniendo en cuenta el espectro de carga.

	VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO	
	INFORME	
	Documento: GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1	
	Medellín, Antioquia, 12 de marzo de 2022	Página 1



### 1.3 ALCANCES

- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de subrasante en el sitio del proyecto, a partir de la identificación y caracterización de las muestras obtenidas en la exploración geotécnica y de los resultados de ensayos de laboratorio.
- Presentar la definición de sectores, en función de los resultados de la exploración geotécnica y del trazado geométrico.
- Caracterizar geotécnicamente los materiales de obra, que componen la estructura de pavimento, en especial materiales de rodadura y de capas granulares o estabilizadas, según el caso.
- Calcular las repeticiones esperadas para cada espectro de carga de acuerdo con la metodología de la Portland Cement Association (PCA)-1984.
- Estimar diferentes alternativas de pre-dimensionamiento de espesores para la losa de concreto hidráulico y la capa de material granular tratada con cemento, con el fin de seleccionar la estructura más eficiente, técnica y económicamente.
- Realizar el diseño de juntas y modulación de losas, presentando planos de obra con detalles constructivos.
- Proponer una serie de recomendaciones técnicas, en especial en el proceso constructivo que contribuyan a mitigar erróneas interpretaciones del diseño o inadecuadas prácticas de ingeniería que disminuyen la vida útil del pavimento.

### 1.4 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El municipio de Dabeiba está localizado en la subregión occidente del departamento de Antioquia, limita por el Norte con los municipios de Mutatá e Ituango, por el Este con los municipios de Ituango, Peque y Uramita, por el Sur con los municipios de Uramita y Frontino y por el Oeste con los municipios de Murindó y Mutatá. Su cabecera dista 183.00 km de la ciudad de Medellín, capital del departamento de Antioquia.

El proyecto se ubica en el municipio de Dabeiba y comprende la vía que va desde el casco urbano al corregimiento de Camparrusia, en cuyo recorrido la vía pasa por el corregimiento de Cruces, San José de Urama y se tiene la desviación al corregimiento de la Balsita, localidades que se encuentran localizados en la subregión de nororiental del municipio.

Los estudios y diseños para construcción se desarrollan con el objetivo de lograr la aprobación por parte de la Agencia para la Renovación del Territorio ART, previo visto bueno del Departamento Nacional de Planeación (DNP), para la inclusión en el banco de proyectos, del mejoramiento de la vía que comunica el corregimiento de Camparrusia con la cabecera de Dabeiba (Antioquia), municipio ubicado en una de las zonas más afectadas por el conflicto armado – ZOMAC.

El proyecto consta en la intervención de aproximadamente 8.14 kilómetros de vía, sin incluir los puentes, ampliaciones, recuperaciones de banca ni intervenciones para la estabilización de taludes.

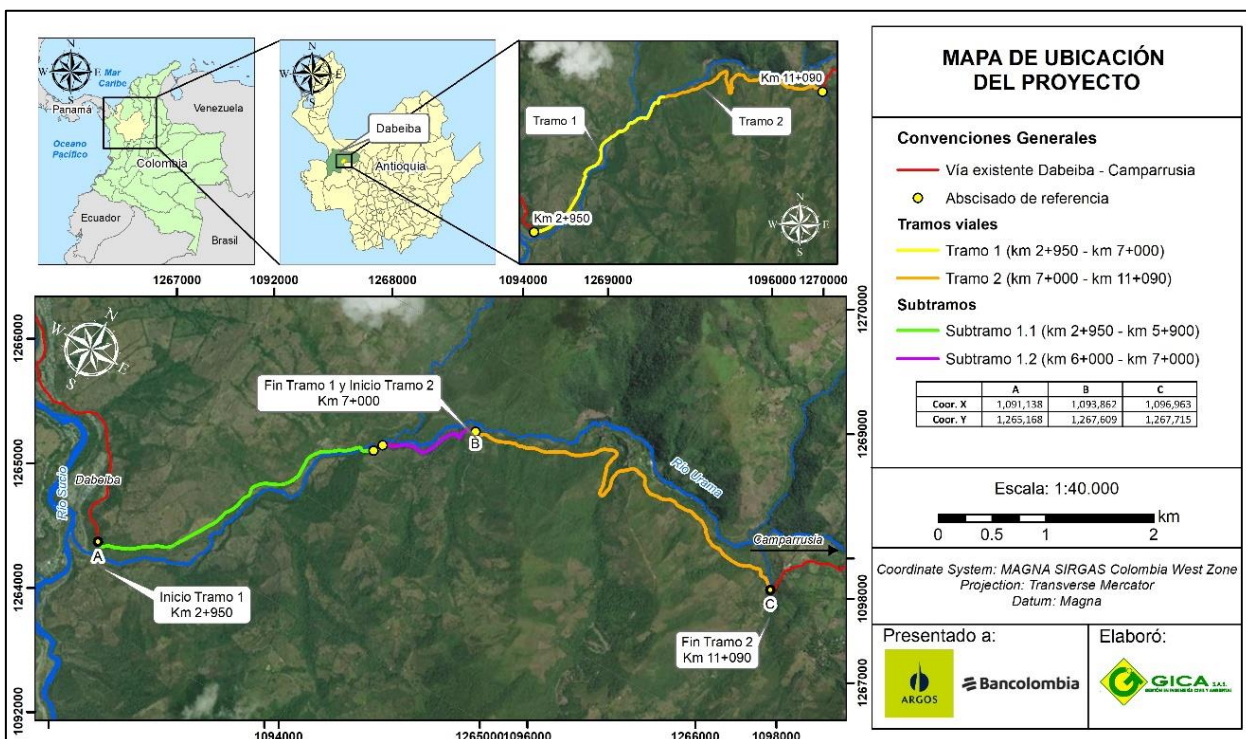
En la Tabla 1 se presentan los tramos y las intervenciones asociadas a cada uno teniendo en cuenta el alcance del proyecto.

**Tabla 1. Tramos e intervenciones a realizar entre el km 2+950 – km 11+090**

TRAMO	SUBTRAMO	ABSCISADO	LONGITUD (m)	INTERVENCIÓN
1	1.1	Km 2+950 – km 5+900	2950	Rehabilitación y mantenimiento: Obras hidráulicas, pavimentación
	-	Km 5+900 – km 6+000	100	Solo obras hidráulicas
	1.2	Km 6+000- km 7+000	1000	Rehabilitación y mantenimiento: Obras hidráulicas, pavimentación
2	-	Km 7+000 – km 11+090	4090	Rehabilitación y mantenimiento: Obras hidráulicas, pavimentación

(Elaborado por GICA SAS)

En la Figura 1 se presenta la localización general del proyecto y el tramo en estudio entre el km 2+950 al km 11+090.



**Figura 1. Ubicación general del proyecto y del tramo en estudio**  
(Elaborado por GICA S.A.S.)

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 DISEÑO DE PAVIMENTO DE CONCRETO

Para el diseño del pavimento rígido se emplearon los lineamientos sugeridos por el método de la *Portland Cement Association* (PCA) versión de 1984 (PCA 1984), el cual establece dos (2) criterios fundamentales<sup>1</sup>:

- **Análisis de fatiga:** para prevenir la fatiga por agrietamiento. Propende por mantener los esfuerzos del pavimento producidos por la acción repetida de las cargas, dentro de los límites de seguridad.
- **Análisis de erosión:** para limitar los efectos de la deflexión del pavimento en los bordes de las losas, juntas, esquinas y controlar así la erosión de la fundación y de los materiales de las bermas. Este criterio de erosión es necesario, puesto que algunas formas de falla del pavimento, tales como el bombeo, el desnivel entre losas y el deterioro de las bermas, son independientes de la fatiga.

Se empleó el software *BS-PCAA*, el cual permite dimensionar los espesores de la estructura del pavimento rígido y, a su vez, permite sensibilizar la incidencia de los parámetros de entrada en dicho dimensionamiento, mediante el análisis de fatiga y erosión.

A continuación, se enuncian los parámetros de diseño requeridos por el método *Portland Cement Association* (PCA):

- **Capacidad de soporte de la subrasante y la subbase:** se define como parámetro de resistencia, al valor del módulo de reacción de la capa subrasante cuando la losa va apoyada directamente sobre ella, o adopta el valor del módulo de reacción del conjunto subbase granular/subrasante cuando se usan los diferentes tipos de subbase granular previstos en el método.
- **Tránsito:** se determina estableciendo el espectro de cargas y el número de repeticiones de cada intervalo de cargas que se espera en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

<sup>1</sup> ICPC. Cipriano A. Londoño N Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto. 4.3.1.2. Consideraciones básicas. Instituto Colombiano de Cemento –Página 53.

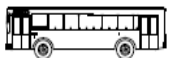















- Factor de seguridad de carga,  $F_{SC}$ : este método exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por unos factores de seguridad de carga ( $F_{SC}$ ), los cuales recomienda según la cantidad de carriles, importancia de la vía, el flujo vehicular, variaciones de los materiales, proceso constructivo, y el espesor de las capas.
- Factor de mayoración de repeticiones: factor de proyección basado en la tasa de crecimiento anual del tránsito y periodo de diseño. Se adopta el valor de 1,0 porque la proyección del tránsito empleada en el diseño ya incluye el empleo de factores de proyección que contemplen la inclusión de los componentes del tránsito proyectado: tránsito atraído, crecimiento normal, tránsito generado y tránsito desarrollado.
- Criterio de aporte de berma: En virtud de la geometría de la sección y, en particular, del hecho de que no se puede garantizar que la operación de los vehículos comerciales estará alejada de los bordes de las losas; se adopta la no existencia del efecto de aporte de una berma.
- Periodo de diseño: se toma un lapso de 20 años como periodo para el diseño de un pavimento rígido sin olvidar que, en determinados casos, puede resultar económicamente justificado el empleo de periodos menores o mayores.
- Resistencia del concreto a la flexión: esta resistencia se considera en el procedimiento de fatiga, el cual controla el agrietamiento del pavimento bajo la acción repetida de las cargas de los vehículos pesados. Para esto, se utiliza la resistencia a la flexión, medida por ensayos de módulo de rotura para un periodo de curado de 28 días.
- El mecanismo de transferencia de carga entre las losas de concreto a emplear es mediante pasadores de acero, con lo cual, la modelación para la obtención de los espesores se hizo bajo este escenario.

















El modelo de fatiga de la PCA, se encuentra basado en información originada en ensayos de fatiga en vigas, desarrollados durante la década de 1950 a 1960. La curva de verificación derivada y adoptada por el modelo corresponde a la envolvente del límite inferior de las repeticiones admisibles para cada relación de tensiones, incorporando mediante esta práctica un nivel alto de confiabilidad en la verificación de este parámetro.

### 2.1.1 ESPECTRO DE CARGAS POR EJE – METODOLOGÍA PCA-84

Para la adopción de los niveles de carga por eje, dado que no se cuenta con un estudio específico de pesajes o estimación de los niveles de carga para el corredor, se partió del supuesto de niveles de carga máxima legal permitida, esto es, lo estipulado por las Resoluciones 4100 de 2004 y 1782 de 2009 (que modifica el artículo 8 de la resolución 4100 de 2004) del Ministerio de Transporte, en las cuales, dicha entidad establece los límites de pesos y dimensiones para los vehículos de carga que pueden circular en el territorio nacional (ver Tabla 2).

**Tabla 2. Cargas por Eje de acuerdo con los máximos autorizados por el Ministerio de Transporte**

TIPO DE VEHÍCULO	ESQUEMA	EJE DIRECCIONAL (t)	EJE DEL TRACTO-CAMIÓN (t)	EJE DEL REMOLQUE O SEMIRREMOLQUE (t)
BUS		 5.0	 8.0	
C2-P		 5.0	 10.0	
C2-G		 6.0	 11.0	
C3		 6.0	 22.0	
C2-S1		 6.0	 10.0	 11.0

TIPO DE VEHÍCULO	ESQUEMA	EJE DIRECCIONAL (t)	EJE DEL TRACTO-CAMIÓN (t)	EJE DEL REMOLQUE O SEMIRREMOLQUE (t)
C2-S3		 5.5	 11.0	 24.0
C3-S1		 5.0	 14.0	 10.0
C3-S2		 6.0	 21.0	 21.0
C3-S3		 6.0	 22.0	 24.0

## 2.1.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

La estructura de pavimento está expuesta a diferentes tipos de esfuerzo durante su vida útil, por tanto, se deben chequear que dichos esfuerzos no superen el esfuerzo máximo a tensión permisible del concreto rígido. Los esfuerzos a los que están expuestos la estructura de pavimento, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Esfuerzo por temperatura:** Debido a la diferencia de temperatura entre la parte superior y parte inferior de la losa, generación de estado de tensión (similares a tensiones de flexión) se inducen en la parte inferior o superior de la losa.
- **Esfuerzo por fricción:** Debido a la contracción de la losa debido a la caída en la temperatura, se inducen tensiones de tracción en la parte media de la losa.
- **Esfuerzo debido a cargas de tránsito:** La losa está sometida a tensiones de flexión debido a las cargas de rueda de los vehículos.

### 2.1.2.1 Esfuerzos por temperatura

Con el cambio de la temperatura ambiente durante el día y la noche, se produce cambio en la temperatura del pavimento, este efecto crea un gradiente térmico en la losa de pavimento rígida, generando esfuerzos en la losa que se conoce como alabeo.

En el día, la temperatura en la parte superior de la losa es mayor que en la parte inferior, por lo que la parte superior de la losa tiende a expandirse, mientras que la parte inferior tiende a contraerse. Sin embargo, el peso propio de la losa restringe el movimiento, induciendo esfuerzos de tensión y compresión (Ver Figura 2).

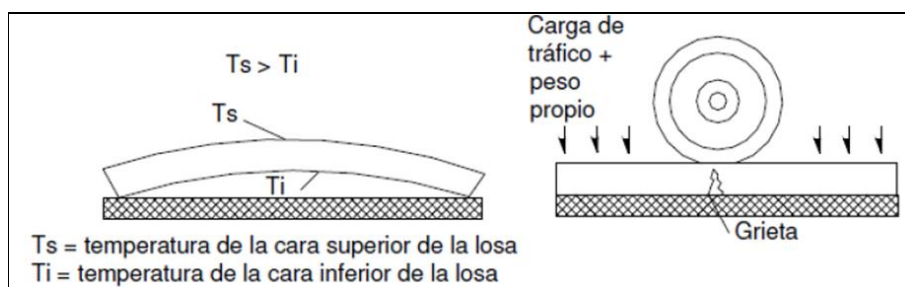
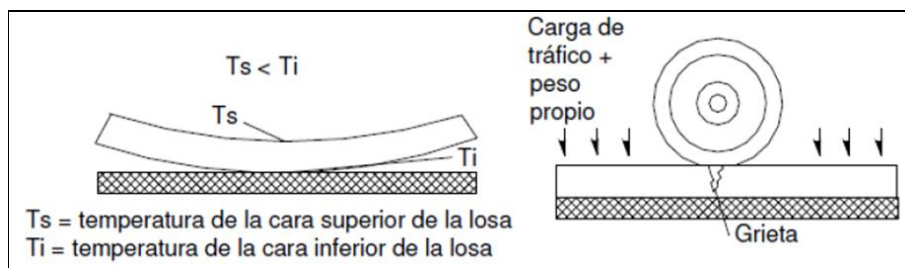


Figura 2. Efecto del alabeo en el día

(Fuente: Luis Ricardo Varela, Curso Actualizado de Pavimentos, Universidad Nacional de Manizales, 2008)

Por otro lado, en la noche, cuando la temperatura en la parte superior de la losa es inferior a la temperatura en la parte inferior, haciendo que la parte superior tiende a contraerse con respecto a la parte inferior (Ver Figura 3).



**Figura 3. Efecto del alabeo en la noche**

(Fuente: Luis Ricardo Varela, Curso Actualizado de Pavimentos, Universidad Nacional de Manizales, 2008)

Como se mencionó anteriormente, el alabeo induce esfuerzos de compresión y tensión en el concreto rígido, sin embargo, el concreto rígido tiene la propiedad de alta resistencia a esfuerzos de compresión, pero poca resistencia a esfuerzo a tensión, por lo tanto, el alabeo tiende a producir grietas en el pavimento rígido debido a los esfuerzos a tensión.

▪ **Esfuerzo en dirección longitudinal y transversal**

El esfuerzo en dirección longitudinal y transversal se puede calcular mediante las fórmulas (1) y (2).

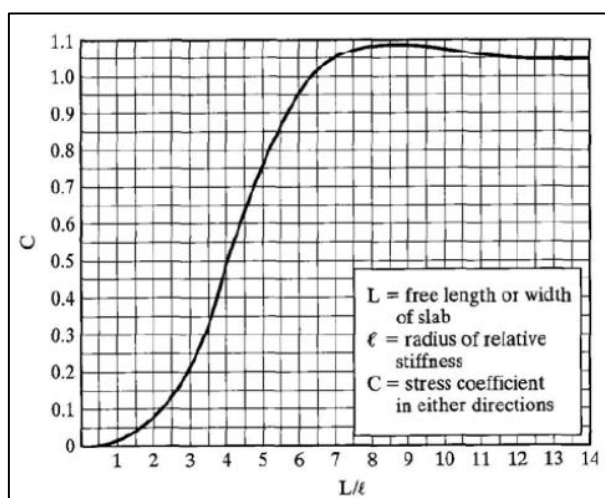
$$\sigma_x = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)} (C_x + \nu C_y) \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{E \alpha_t \Delta t}{2(1 - \nu^2)} (C_y + \nu C_x) \quad (2)$$

Donde:

- $\sigma_x$ : Esfuerzo total en dirección longitudinal de la losa
- $\sigma_y$ : Esfuerzo total en dirección transversal de la losa
- $C_x$ : Factor de corrección de esfuerzo en dirección longitudinal (0.65)
- $C_y$ : Factor de corrección de esfuerzo en dirección transversal (0.4)
- $\alpha_t$ : Coeficiente de expansión térmica del concreto ( $3.8 \times 10^{-6}$  pulg/pulg/°F)
- $\Delta t$ : Gradiente término, en °F. (En este caso se adopta un valor de gradiente de temperatura de 12.44 °F/pulg.)
- $\nu$ : Relación de Poisson (0.15)

El factor de corrección de esfuerzo se calcula mediante la siguiente gráfica (ver Figura 4):



**Figura 4. Factor de corrección para la verificación de alabeo**

(Fuente: Factor de corrección de esfuerzo para losas finitas - Teoría de Westergaard (Bradubury, 1938))



Donde:

- $\lambda$ : Radio de rigidez relativa de la losa, que se define como (3):

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (3)$$

- $E$ : Modulo elástico del concreto (psi) (4)

$$E = 57000\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

- $f'_c$ : Resistencia a la compresión (5076 psi)
- $h$ : Espesor de la losa (pulgadas)
- $k$ : Módulo de reacción de la subrasante (pci)

#### ▪ **Esfuerzo de borde**

El esfuerzo en el borde de la losa se calcula mediante la fórmula (5):

$$\sigma_e = \frac{CxEx_t\Delta t}{2} \quad (5)$$

#### ▪ **Esfuerzo de esquina**

El esfuerzo en la esquina de la losa se calcula mediante la expresión (6):

$$\sigma_c = \frac{E\alpha_t\Delta t}{3(1-\nu)} \sqrt{\frac{L_x}{L_y}} \quad (6)$$

### 2.1.2.2 Esfuerzos por fricción

Los esfuerzos por fricción en losas de pavimento rígido se dan debido a la expansión y contracción, la cual es una reacción normal del concreto al perder humedad debido al proceso de fraguado.

Este esfuerzo puede estimarse según la fórmula (7):

$$\sigma_c = \frac{\gamma_c L f_a}{2} \quad (7)$$

Donde:

- $L$ : Longitud de la losa (9.84 pies)
- $\gamma_c$ : Peso unitario del concreto (150 libras/pies<sup>3</sup>)
- $f_a$ : Coeficiente de fricción entre la losa y la subrasante (1.8 Cement stabilization. Figura 5)

Table 2.8. Recommended Friction Factors (7)	
Type of Material Beneath Slab	Friction Factor (F)
Surface treatment	2 2
Lime stabilization	1 8
Asphalt stabilization	1 8
Cement stabilization	1 8
River gravel	1 5
Crushed stone	1 5
Sandstone	1 2
Natural subgrade	0 9

Figura 5. Factores de fricción recomendados [1]

### 2.1.2.3 Esfuerzos debido a cargas de Tránsito

Los esfuerzos debido a cargas de tránsito son los generados debido a la transmisión de cargas de las llantas de los vehículos a las losas, de esta manera las losas quedan expuestas a tensiones de flexión que puede generar fatiga.

Para el cálculo de esfuerzo debido a cargas de tránsito, se tiene en cuenta las siguientes localizaciones críticas de carga:

1. **Esquina:** centro de la carga en la bisectriz del ángulo de la esquina (esfuerzo de tensión en la parte superior)
2. **Interior:** dentro de la placa, pero lejos de los bordes (esfuerzo de tensión en el fondo)
3. **Borde:** en el borde de la placa, pero lejos de las esquinas (esfuerzo de tensión en el fondo)

#### ▪ Esquina de la losa

Para la determinación del esfuerzo de esquina, fue utilizada la expresión propuesta por Kelley, Teller y Shuterland (8), que se encuentra principalmente en el texto "GUIDELINES FOR THE DESIGN OF RIGID PAVEMENTS FOR HIGHWAYS" publicado por "THE INDIAN ROADS CONGRESS". [2]

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\lambda} \right)^{1.2} \right] \quad (8)$$

La cual reconsidera y reemplaza la expresión planteada por Westergaard (9), obteniendo así mayores esfuerzos en la esquina de la losa.

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\lambda} \right)^{0.6} \right] \quad (9)$$

Donde:

- P: Carga aplicada (kg)
- h: Espesor de la losa (cm)
- a: Radio del área de contacto (cm)
- λ: Radio de rigidez relativa (cm)
- v: Módulo de Poisson del concreto

#### ▪ Interior de la losa

El esfuerzo presentado en el interior de la losa se obtiene mediante el uso de la expresión planteada por Westergaard en 1929 (10).

$$\sigma_i = \frac{3(1 + \nu) * P}{2\pi h^2} \left[ \ln \left( \frac{\lambda}{b} \right) + 0,6159 \right] \quad (10)$$

Cuando:

- $a \geq 1,724h$ ;  $a = b$ ;
- $a < 1,724h$ ,  $b = \sqrt{1,6a^2 + h^2} - 0,675h$


#### ▪ Borde de la losa

Según "GUIDELINES FOR THE DESIGN OF RIGID PAVEMENTS FOR HIGHWAYS" [2], la expresión formulada por Westergaard para el cálculo de los esfuerzos de borde, fue modificada por Teller y Shuterland evaluando el caso más crítico de borde, obteniendo la expresión (11).

$$\sigma_e = 0.529 * \frac{P}{h^2} (1 + 0.54\nu) (4 \log_{10} \left( \frac{\lambda}{b} \right) + \log_{10} b - 0.4048) \quad (11)$$

### 2.1.2.4 Análisis del radio del área de contacto

Para el cálculo del radio de área de contacto se hace necesario definir un área equivalente de contacto en el caso de una rueda doble, y por ello se considera la expresión (12), la cual está definida para la configuración mostrada en la Figura 6:

	VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO	
	INFORME	
	Documento: GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1	
	Medellín, Antioquia, 12 de marzo de 2022	Página 8

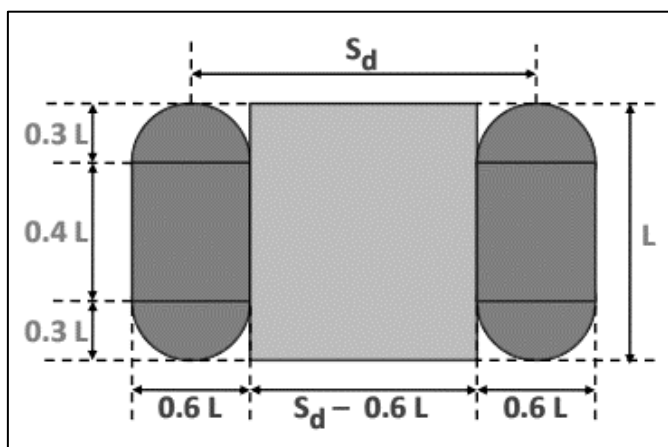
$$a = \sqrt{\frac{0,8521P_d}{q\pi} + \frac{S_d}{\pi} * \left(\frac{P_d}{0,5227q}\right)^{0,5}} \quad (12)$$

Donde:

- $S_d$ : Separación entre improntas
- $P_d$ : Carga
- $q$ : Esfuerzo aplicado por la rueda

### 2.1.2.5 Análisis de la carga aplicada

En el caso de la determinación de la carga  $P$ , se procede a escoger una carga característica en función del espectro de carga, por ende, se escogió dicho valor en base a la recomendación de la "GUIDELINES FOR THE DESIGN OF RIGID PAVEMENTS FOR HIGHWAYS", la cual menciona, el uso del percentil 98 como valor a adoptar para la carga de diseño [2], obteniendo así, para el presente proyecto un valor de  $P_{98}$ : 11 toneladas.



**Figura 6. Configuración rueda doble**

(Fuente: Airfield and Highway Pavements 2017)

### 2.1.2.6 Verificación de esfuerzo

#### o Esfuerzo máximo admisible

A partir de los esfuerzos calculados, se debe calcular el esfuerzo máximo admisible a tensión en el concreto, mediante la expresión (13):

$$f_t = 7.5 \sqrt{f'c} \quad (13)$$

Donde:

- $f_t$ : Esfuerzo máximo admisible a tensión (psi)
- $f'c$ : Resistencia a la compresión del concreto (psi)

De la fórmula presentada anteriormente, se obtiene el esfuerzo máximo admisible a tensión de la losa de concreto rígido y se compara con los esfuerzos generados en el interior, borde y esquina de la losa.

## 2.2 JUNTAS EN EL PAVIMENTO DE CONCRETO

De acuerdo con la Guía metodológica AASHTO-1993, las juntas se colocan en los pavimentos de concreto para permitir la expansión y contracción del pavimento, para así, aligerar los esfuerzos producidos por los cambios ambientales (i.e. temperatura y humedad) y la fricción, así como también, para facilitar la construcción. Hay tres (3) tipos generales de juntas: contracción, expansión y construcción. [1]



### 2.2.1 TIPOS DE JUNTA

- **Junta de Contracción:** El objetivo principal de estas juntas es alivianar los esfuerzos debidos a la temperatura, humedad y a la fricción, para así controlar el agrietamiento. De no colocarse las juntas de contracción, ocurrirían en la superficie del pavimento, agrietamientos localizados o aleatorios.
- **Junta de Expansión:** La función principal de una junta de expansión es justamente proveer espacio para la expansión del pavimento, para de esta manera, prevenir el desarrollo de esfuerzo de compresión, los cuales pueden causar ligeras ahuellamientos o deformaciones.
- **Junta de Construcción:** Las juntas de construcción se requieren para facilitar el proceso constructivo. El espaciamiento entre las juntas longitudinales es gobernado por el ancho del equipo de pavimentación y por el espesor del pavimento.

## 2.3 DISEÑO DEL PAVIMENTO DE PLACA HUELLA

El pavimento con Placa-huella constituye una solución para vías terciarias de carácter veredal que presentan un volumen de tránsito bajo con muy pocos buses y camiones al día siendo los automóviles, los camperos y las motocicletas el mayor componente del flujo vehicular. [3]

### 2.3.1 MECANISMO DE FALLA

La primicia de diseño en los pavimentos con placa-huella, que son estructuras de concreto reforzado similares a la estructura que falla por rotura asemejándose a una falla dúctil, se produce por la aplicación de una carga que produzca esfuerzos que superen la resistencia última de los elementos de concreto reforzado. Tal es el caso de un elemento estructural tipo viga en el que por exceso de cargas o por asentamientos diferenciales entre columnas se producen esfuerzos en un elemento estructural que superan su resistencia última y lo llevan al colapso.

Por eso se asemeja a que el diseño del pavimento con placa-huella se tuviese que hacer como una estructura de concreto reforzado totalmente apoyada sobre el suelo (en este caso el suelo es la subbase granular) constituida por placas-huella y riostras que trabajan monolíticamente y cuyo mecanismo de falla es por carga última.

La observación determina que si el eje de un vehículo que circule sobre el pavimento con placas-huella tiene un peso y configuración tales que se produzcan en las placas-huella esfuerzos que superen su resistencia última, una única pasada de ese vehículo produciría la falla estructural, es decir la ruptura de todas las placas-huella. [3]

### 2.3.2 TRÁNSITO

De lo ya expuesto respecto al mecanismo de falla del pavimento con placa-huella, que es por carga última, se puede concluir que la elaboración de un estudio de tránsito traducido en un espectro de cargas resulta no necesaria para este tipo de estructuras. El estudio del espectro de cargas es pertinente en el diseño de un pavimento que falle estructuralmente por acumulación de fatiga no siendo éste el caso del pavimento con placa-huella.

Para el tipo de vías en las que se construirían pavimentos con placa-huella lo mínimo razonable sería adoptar como vehículo de diseño el camión C-2 con un eje trasero sencillo de 11 toneladas, sin embargo, no es posible garantizar que en un periodo de servicio de 20 o más nunca circulará un camión C-3 y teniendo presente que en los pavimentos con placa-huella la falla se produce por carga última, el vehículo de diseño no puede ser inferior al camión C-3 ya que el paso de tan solo un vehículo de éste tipo podría destruir las placas-huella.

Por lo anterior, el eje de referencia para el diseño estructural del pavimento constituido por una sucesión de placas y riostras reforzadas utilizando la metodología de diseño por carga última debe ser el eje tándem de 22 toneladas de un camión C-3 (Ver Figura 7). El diseño debe ser tal que al desplazarse dicho eje sobre la superficie no se produzca en las placas-huella un nivel de esfuerzos que les genere la falla, es decir, su fractura. [3]

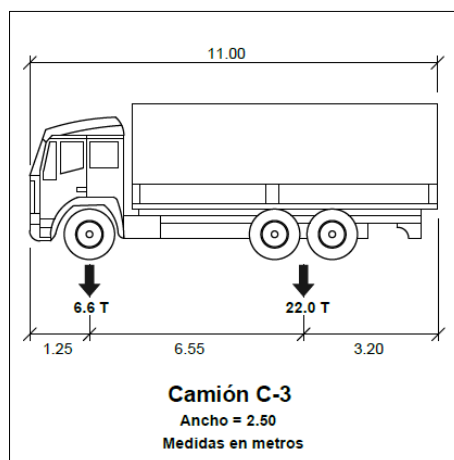


Figura 7. Vehículo de diseño. Camión C-3 [3]

### 2.3.3 LA SUBRASANTE Y LA SUBBASE GRANULAR

Del análisis de sensibilidad de algunas variables que pudiesen incidir en el comportamiento del pavimento con placa-huella se pudo concluir que la cuantía de acero y la longitud, ancho y espesor tanto de la placa-huella como de la riostra no son sensibles a la rigidez de la superficie de apoyo, en este caso del conjunto subrasante- subbase granular. Por esta razón se adoptó para la subbase granular un espesor único de 0.15 metros y la calidad exigida en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías - INVIAS.

Dicho espesor obedece a razones constructivas como son el contribuir a lograr la lisura de la superficie de apoyo de las placas, que es la subbase granular, a poder lograr la compactación requerida cuando los suelos de apoyo sean de precaria calidad y a disponer de una superficie de trabajo limpia.

El espesor adoptado es suficiente para subbases granulares colocadas sobre suelos con CBR mayor o igual a 3.00%. Suelos con valores de CBR menores a 3.00% son suelos de comportamiento complejo que requieren del concurso de un especialista para establecer los procedimientos de mejoramiento.

La evaluación de la subrasante se reduce a detectar sectores con subrasantes de comportamiento complejo como pueden ser los suelos expansivos, los suelos demasiado blandos, etc. [3]

### 2.3.4 ESPESOR DE LA PLACA-HUELLA

Como resultado de la modelación mediante elementos finitos del paso del eje tándem del camión C-3 (22 toneladas distribuidas en dos ejes simples de 11 toneladas cada uno separados 1.20 m centro a centro) se encontró que el espesor de la placa-huella no es sensible a la rigidez del apoyo, en este caso del conjunto subrasante-subbase granular.

El espesor requerido de concreto para soportar los esfuerzos producidos por el eje de diseño es menor de quince (15) centímetros, pero por facilidad constructiva y adecuado recubrimiento de la armadura de acero se adoptó un espesor único de 0.15 metros. [3]


### 2.3.5 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN TANGENTE

Para garantizar la durabilidad del pavimento la Guía recomienda una sección transversal en tangente de cinco (5) metros de ancho.

El motivo principal de la adopción de este ancho obedece a evitar, hasta donde sea posible, que los camiones y buses circulen sobre la piedra pegada dado que este es un material cuyo comportamiento ante la sollicitación de las cargas de los vehículos es totalmente incierto dada la dificultad de establecer un modelo que permita predecir en el largo plazo dicho comportamiento. [3]

### 2.3.6 CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL EN CURVAS

El criterio de diseño en los tramos en curva también es impedir que los camiones y buses realicen trayectorias sobre la piedra pegada. [3]

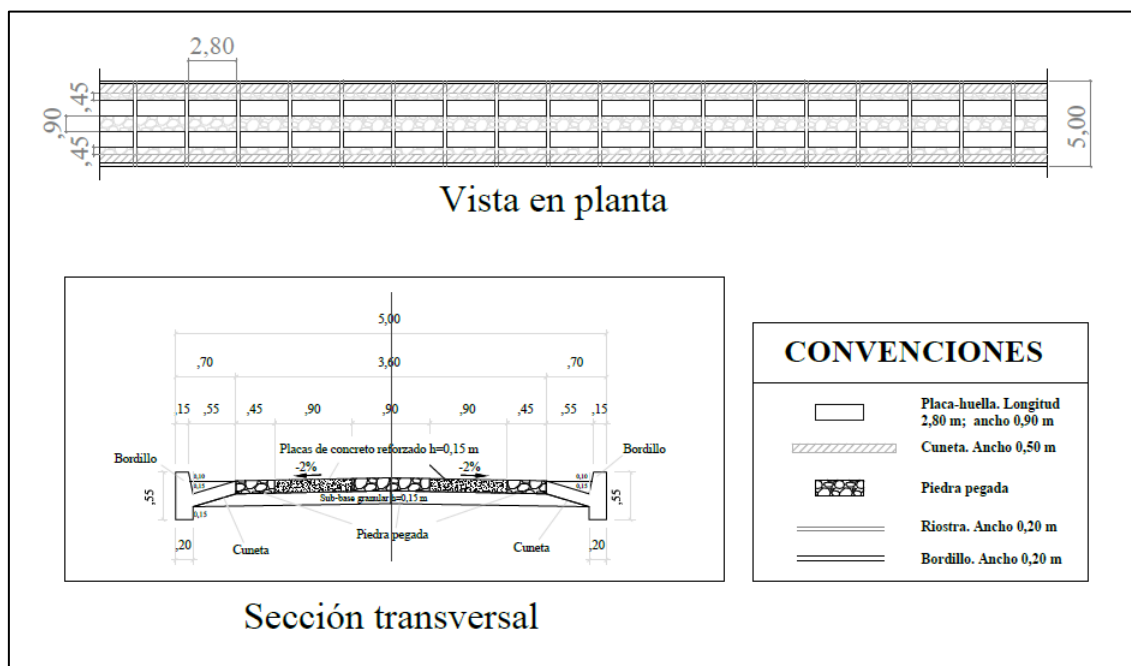
	VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO	
	INFORME	
	Documento: GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1	
	Medellín, Antioquia, 12 de marzo de 2022	Página 11

### 2.3.7 RESISTENCIA DEL CONCRETO

Los elementos estructurales del pavimento se deben realizar con concreto de calidad aceptable que en este caso se asimila a una resistencia a la compresión a los 28 días de  $f'c = 210.00 \text{ kg/cm}^2$ , al igual que el concreto incorporado en las franjas de piedra pegada.

Una vez identificada la fuente de agregados a utilizar en el proyecto es indispensable realizar, en laboratorio, el diseño de la mezcla de concreto incluyendo los ensayos de calidad a los agregados los cuales deben cumplir los requisitos para concreto estructural establecidos en las especificaciones vigentes del Instituto Nacional de Vías.

En cuanto al agregado pétreo a utilizar se recomienda que sea de canto rodado ya que este presenta una mayor resistencia al desgaste. [3]



**Figura 8. Vista en planta y sección transversal en tramo recto [3]**

## 3 DESARROLLO DE LOS DISEÑOS DE PAVIMENTOS

### 3.1 EVALUACIÓN GEOTÉCNICA

#### 3.1.1 MATERIAL GRANULAR EXISTENTE

Se cuenta con información de caracterización del suelo, al realizar una serie de apiques ejecutados cada 250.00 m, de los que fue posible extraer la información que se resume a continuación. En la carpeta S1.c.ESTUDIO GEOTÉCNICO Y PAVIMENTOS del presente proyecto se encuentra el resumen de registros de la evaluación geotécnica los resultados de ensayos de laboratorio.

A partir de la caracterización del suelo, se puede observar que la capa de rodadura está compuesta en algunos sectores por afirmado de cantera y en otros por material granular natural y la capa subyacente por material granular de cantera, aluvial o natural, en el cual prevalecen las gravas con contenidos de limos y arcillas (31 de 39 muestras tomadas). En cuanto al nivel de subrasante detectado en campo se concluye que está predominado por roca.

Salvo por los apiques 22, 29, 30 y 33 ubicados en el km 8+240, km 9+990, km 10+240 y km 10+990 respectivamente, los valores de IP son relativamente bajos (entre "NP" a 12%), sin embargo, el valor más alto corresponde a 15% en el km 10+990. En la totalidad de las muestras, la humedad natural se ubica por debajo del intervalo plástico de las muestras con comportamiento plástico.

De la Figura 9 a la Figura 16, se muestran los perfiles de suelo existente, así como sus límites de Atterberg, su gradación y CBR de las muestras tomadas. Por otra parte, los valores de propiedades índice evaluados determinan potenciales expansivos bajos, así como una baja compresibilidad (Tabla 4)

En la Tabla 3 se presenta la determinación inicial de la resistencia del material granular al 95% de compactación, teniendo en cuenta los resultados obtenidos de la exploración geotécnica.

**Tabla 3. Resultados de CBR**

ABSCISA	CBR (%)
km 2+990	94.0
Km3+990	105.0
km 4+990	86.0
km 5+740	86.0
km 6+970	65.0
km 7+990	82.0
km 8+990	163.0
km 9+740	65.0
km 10+240	39.0
Km 10+990	88.0

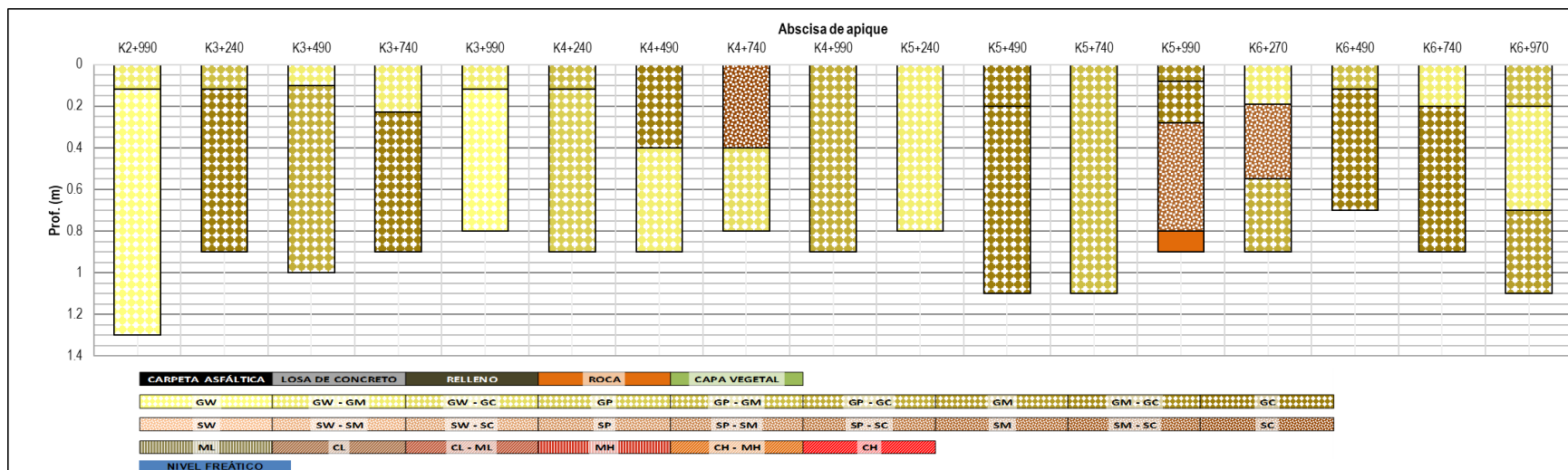


Figura 9. Perfil de suelos a partir de apiques y ensayos de clasificación, km 2+990 – km 6+970

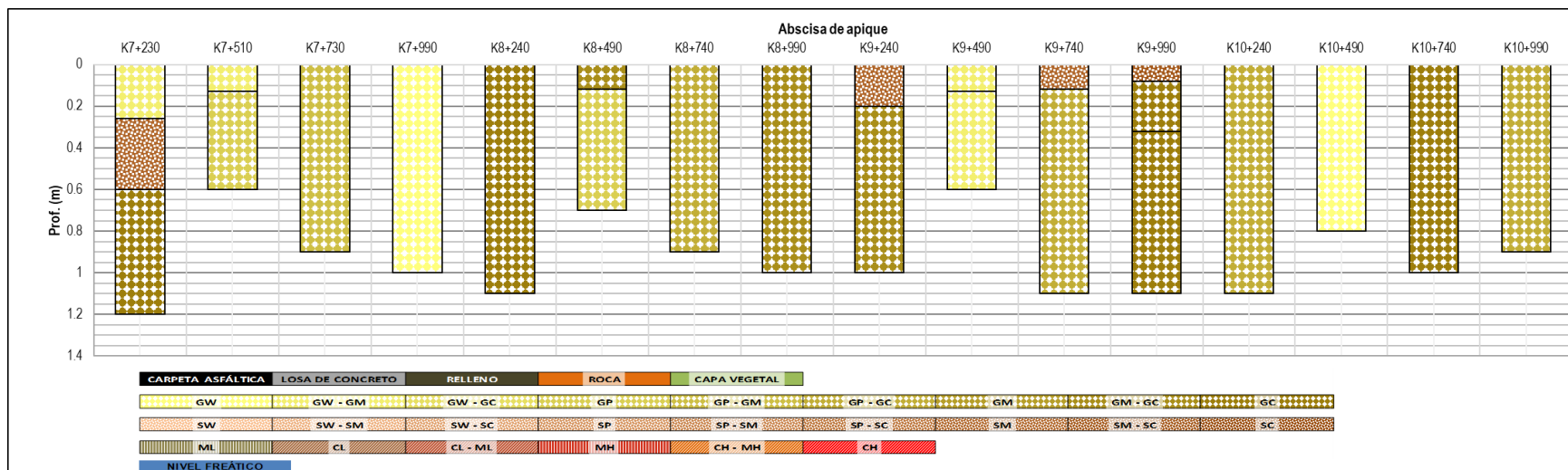


Figura 10. Perfil de suelos a partir de apiques y ensayos de clasificación, km 7+230 – km 10+990

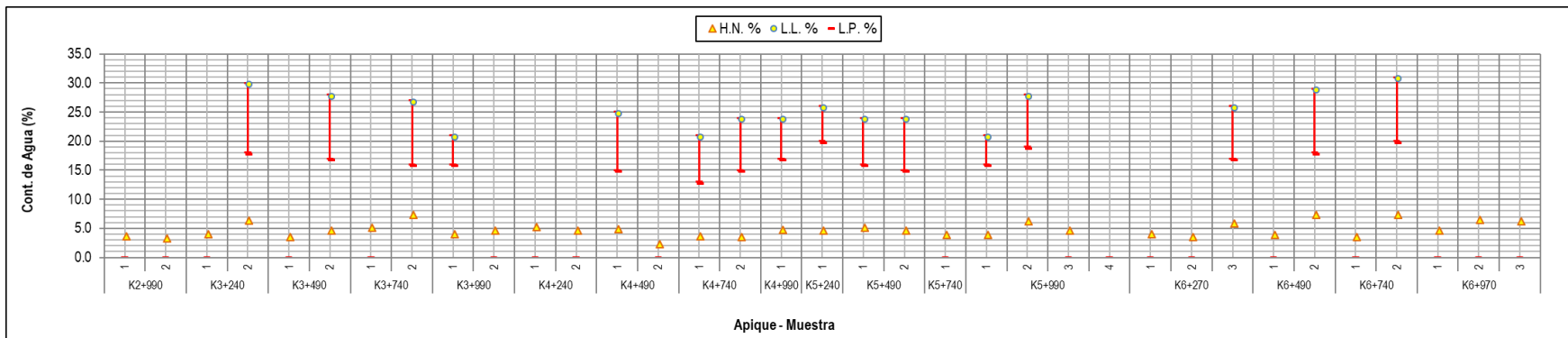


Figura 11. Límites de Atterberg de las muestras de suelos, km 2+990 – km 6+970

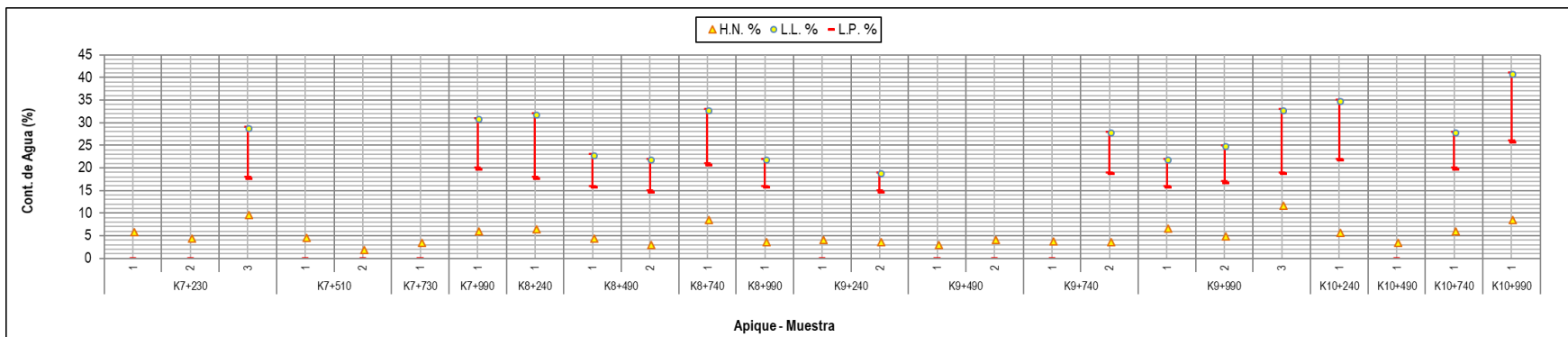


Figura 12. Límites de Atterberg de las muestras de suelos, km 7+230 – km 10+990

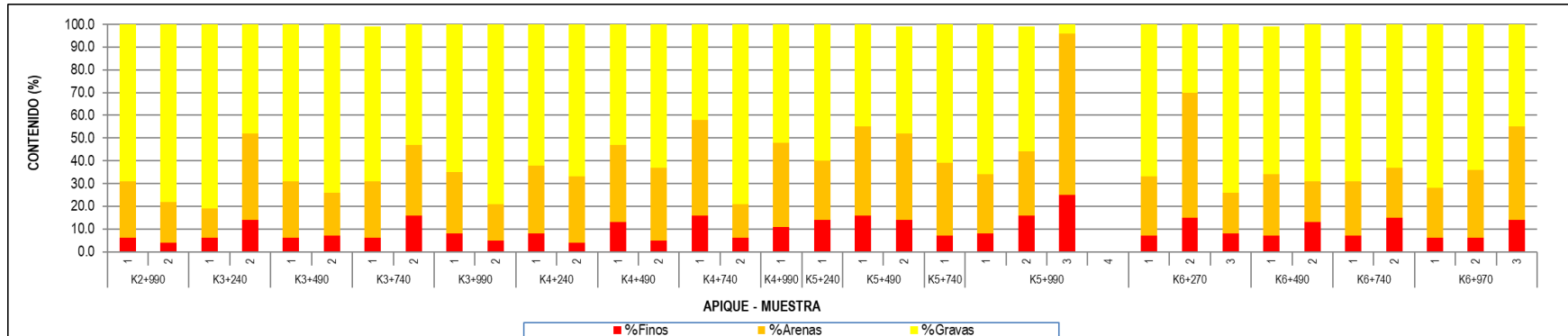


Figura 13. Gradación de las muestras de suelos, km 2+990 – km 6+970

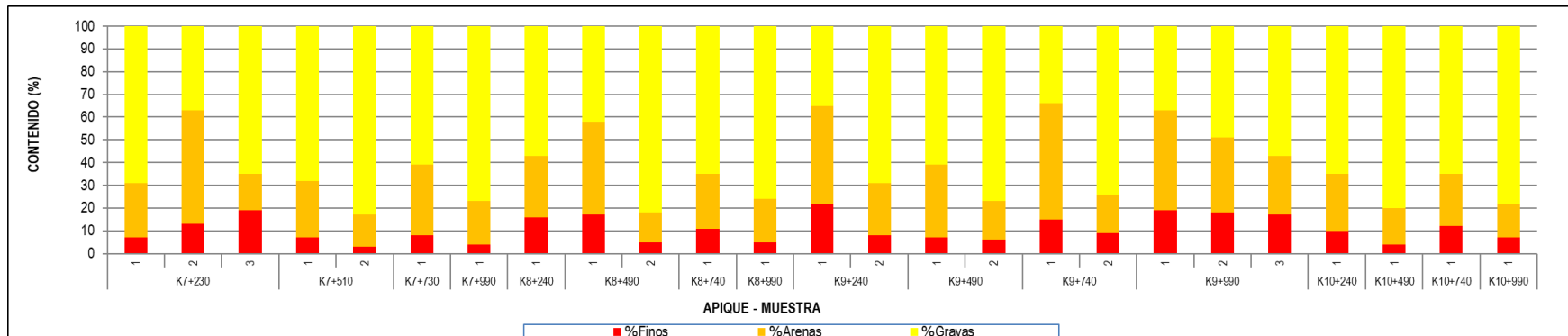


Figura 14. Gradación de las muestras de suelos, km 7+230 – km 10+990

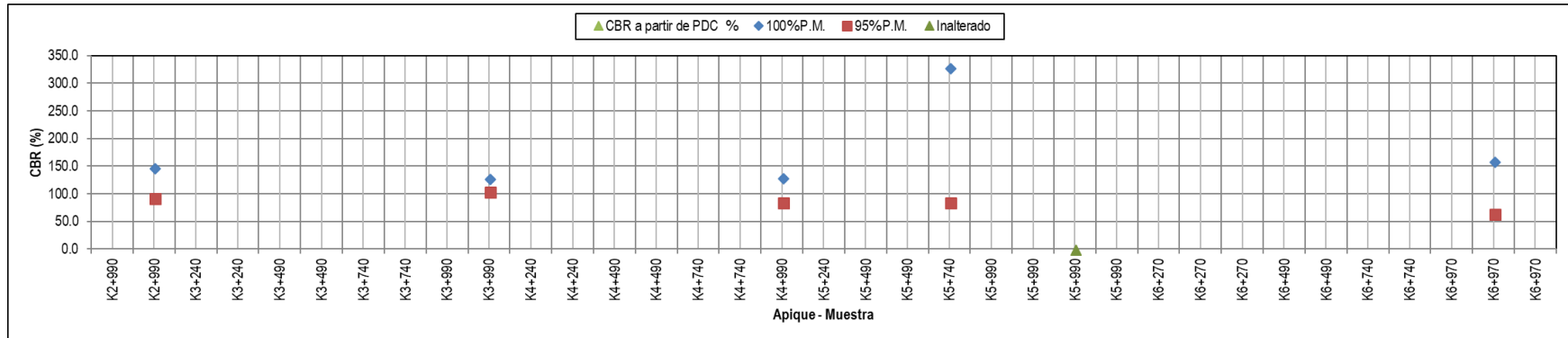


Figura 15. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada, km 2+990 – km 6+970

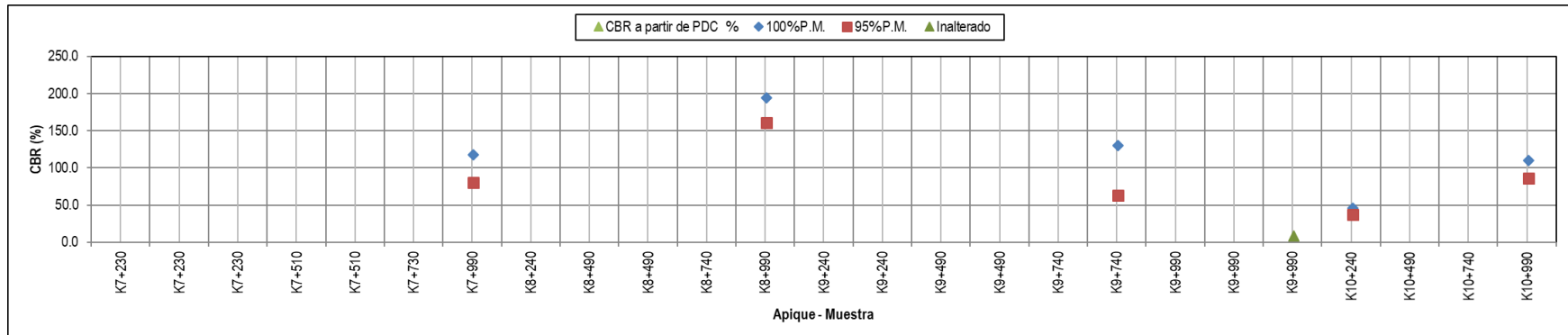


Figura 16. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada, km 7+230 – km 10+990



**Tabla 4. Potencial expansivo y de compresivo a partir de propiedades índice en muestras de suelos**

ABSCISA	APIQUE	MUESTRA	LL	LP	IP	LC	IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	VALOR DE AZUL DE METILENO (mg/g)	POTENCIAL EXPANSIVO - LL	POTENCIAL EXPANSIVO - IP	POTENCIAL DE CAMBIO VOLUMÉTRICO		IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	DESEMPEÑO ANTICIPADO
												IP	LC			
												(Zona Húmeda)				
km 2+990	1	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	1	2	NP	NP	NP	-	-	-	3.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 3+240	2	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	2	2	30.0	18.0	12.0	-	-	-	8.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 3+490	3	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	3	2	28.0	17.0	11.0	-	-	-	12.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 3+740	4	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	4	2	27.0	16.0	11.0	-	-	-	13.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Problemas/posible falla
km 3+990	5	1	21.0	16.0	5.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	5	2	NP	NP	NP	-	-	-	3.9	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 4+240	6	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	6	2	NP	NP	NP	-	-	-	2.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 4+490	7	1	25.0	15.0	10.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	7	2	NP	NP	NP	-	-	-	3.8	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 4+740	8	1	21.0	13.0	8.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	8	2	24.0	15.0	9.0	-	-	-	7.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 4+990	9	1	24.0	17.0	7.0	-	-	-	6.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 5+240	10	1	26.0	20.0	6.0	-	-	-	4.5	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente

ABSCISA	APIQUE	MUESTRA	LL	LP	IP	LC	IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	VALOR DE AZUL DE METILENO (mg/g)	POTENCIAL EXPANSIVO - LL	POTENCIAL EXPANSIVO - IP	POTENCIAL DE CAMBIO VOLUMÉTRICO		IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	DESEMPEÑO ANTICIPADO
												IP	LC			
												(Zona Húmeda)				
km 5+490	11	1	24.0	16.0	8.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	11	2	24.0	15.0	9.0	-	-	-	7.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 5+740	12	1	NP	NP	NP	-	-	-	4.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 5+990	13	1	21.0	16.0	5.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	13	2	28.0	19.0	9.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	13	3	NP	NP	NP	-	-	-	5.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 6+270	14	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	14	2	NP	NP	NP	-	-	-	3.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
	14	3	26.0	17.0	9.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
km 6+490	15	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	15	2	29.0	18.0	11.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
km 6+740	16	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	16	2	31.0	20.0	11.0	-	-	-	7.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 6+970	17	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	17	2	NP	NP	NP	-	-	-	3.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
	17	3	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
km 7+230	18	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	18	2	NP	NP	NP	-	-	-	2.5	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
	18	3	29.0	18.0	11.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
km 7+510	19	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	

ABSCISA	APIQUE	MUESTRA	LL	LP	IP	LC	IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	VALOR DE AZUL DE METILENO (mg/g)	POTENCIAL EXPANSIVO - LL	POTENCIAL EXPANSIVO - IP	POTENCIAL DE CAMBIO VOLUMÉTRICO		IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	DESEMPEÑO ANTICIPADO
												IP	LC			
												(Zona Húmeda)				
	19	2	NP	NP	NP	-	-	-	3.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 7+730	20	1	NP	NP	NP	-	-	-	4.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 7+990	21	1	31.0	20.0	11.0	-	-	-	6.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 8+240	22	1	32.0	18.0	14.0	-	-	-	14.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Problemas/posible falla
km 8+490	23	1	23.0	16.0	7.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	23	2	22.0	15.0	7.0	-	-	-	5.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 8+740	24	1	33.0	21.0	12.0	-	-	-	16.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Problemas/posible falla
km 8+990	25	1	22.0	16.0	6.0	-	-	-	4.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 9+240	26	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	26	2	19.0	15.0	4.0	-	-	-	4.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 9+490	27	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	27	2	NP	NP	NP	-	-	-	5.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente
km 9+740	28	1	NP	NP	NP	-	-	-		-	Bajo	Bajo	-	-	-	
	28	2	28.0	19.0	9.0	-	-	-	15.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Problemas/posible falla
km 9+990	29	1	22.0	16.0	6.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	29	2	25.0	17.0	8.0	-	-	-		Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	
	29	3	33.0	19.0	14.0	-	-	-	19.5	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Problemas/posible falla
km 10+240	30	1	35.0	22.0	13.0	-	-	-	20.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Falla

ABSCISA	APIQUE	MUESTRA	LL	LP	IP	LC	IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	VALOR DE AZUL DE METILENO (mg/g)	POTENCIAL EXPANSIVO - LL	POTENCIAL EXPANSIVO - IP	POTENCIAL DE CAMBIO VOLUMÉTRICO		IL	EXPANSIÓN LIBRE (%)	DESEMPEÑO ANTICIPADO
												IP	LC			
												(Zona Húmeda)				
km 10+490	31	1	NP	NP	NP	-	-	-	8.0	-	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 10+740	32	1	28.0	20.0	8.0	-	-	-	10.8	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Marginalmente aceptable
km 10+990	33	1	41.0	26.0	15.0	-	-	-	6.0	Bajo	Bajo	Bajo	-	-	-	Excelente

### 3.1.2 MATERIAL GRANULAR TRATADO CON CEMENTO (MGTC)

La losa en concreto hidráulico se encontrará soportada sobre una capa de 200 mm de material granular tratado con cemento y para ello se utilizará el material granular existente en la zona, pues, fundamentados en los resultados de la caracterización geotécnica, este material es apto para ser usado con dicho fin, lo anterior según el Artículo 351-13 Base tratada con cemento del INVIAS, donde se cumple la totalidad de sus parámetros para la clase de agregado B, aunque, el contenido de materia orgánica por el método de ignición INV E-121, supera el límite del requerimiento, razón por la que se realizó una especificación particular que deberá ser considerada (Ver en la carpeta F1.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, del presente proyecto).

Respecto a la especificación particular sobre el proceso de estabilización con material granular al 3,00% de peso en cemento, es importante destacar la nota 5, que indica: "Se puede determinar el contenido de materia orgánica por el método propuesto en la norma UNE, siempre que se considere que el método por ignición (según lo describe la norma de ensayo INV E-121) no es aplicable al material, debido a la naturaleza de la materia orgánica presente o a la presencia de minerales que pueden sufrir ignición y registrarse como materia orgánica erróneamente.", encontrando que efectivamente por medio de este ensayo el contenido de materia orgánica es casi nulo y corresponde al valor de 0.034%, cifra inferior al límite señalado en el Artículo 351-13.

Además, con base en los resultados y análisis de la caracterización geotécnica se establece que el material de afirmado de la vía en estudio se considera como el mismo, es decir un solo sector, para los estudios y la evaluación del material granular tratado con cemento.

En cuanto al tratamiento con cementantes, en primer lugar, se aplicará cal viva en 1.50% al material granular existente, con el fin de reducir la plasticidad en los tramos donde se presentan índices de plasticidad (IP)  $\geq 12\%$ , que para la longitud en estudio son pocos y no excede el 15%. Posteriormente se adicionará un contenido óptimo de cemento igual a 3.00% en pro de mejorar su resistencia, este porcentaje se determinó a partir del ensayo de resistencia a la compresión simple y con el que se buscó determinar la cantidad de cemento que garantice la obtención de un valor mínimo especificado de resistencia a la compresión inconfiada que para este caso es 13,00 kg/cm<sup>2</sup>, pues según la literatura técnica, en el documento "La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, página 507", se menciona que la resistencia mínima exigida es de 17.5 kg/cm<sup>2</sup> a los especímenes en compresión simple después de mantener constante el contenido de agua de las muestras en un periodo de curado de siete (7) días", así mismo se indica en el documento "Cement - Treated Pavements, Materials, Design and Construction, página 259" donde adicionalmente con relación a las carreteras secundarias, se menciona que con base en el criterio adecuado 1.7 MN/m<sup>2</sup> (17.33 kg/cm<sup>2</sup>) y que teniendo en cuenta que la resistencia de suelo-cemento en obras viales a una edad dada, rara vez ha sido superior al 50.00% de la resistencia de laboratorio, por lo que, se consideró que una intensidad de campo a los siete (7) días de 0.85 MN/m<sup>2</sup> (8.66 kg/cm<sup>2</sup>) resultó adecuada para un base de suelo-cemento cubierta solo con un revestimiento superficial". [4] [5]

## 3.2 PAVIMENTO DE CONCRETO

### 3.2.1 CAPACIDAD DE SOPORTE

Por otra parte, mediante la Figura 17 es posible determinar el Módulo de reacción de la subrasante (K) si se conoce el CBR del suelo de subrasante, en este caso el CBR supuesto es de 30.00%, puesto que se ha encontrado roca a profundidad de 0.90 metros, por lo cual se establece que el valor de K para el diseño del pavimento rígido del presente proyecto es de 96.00 MPa/m.

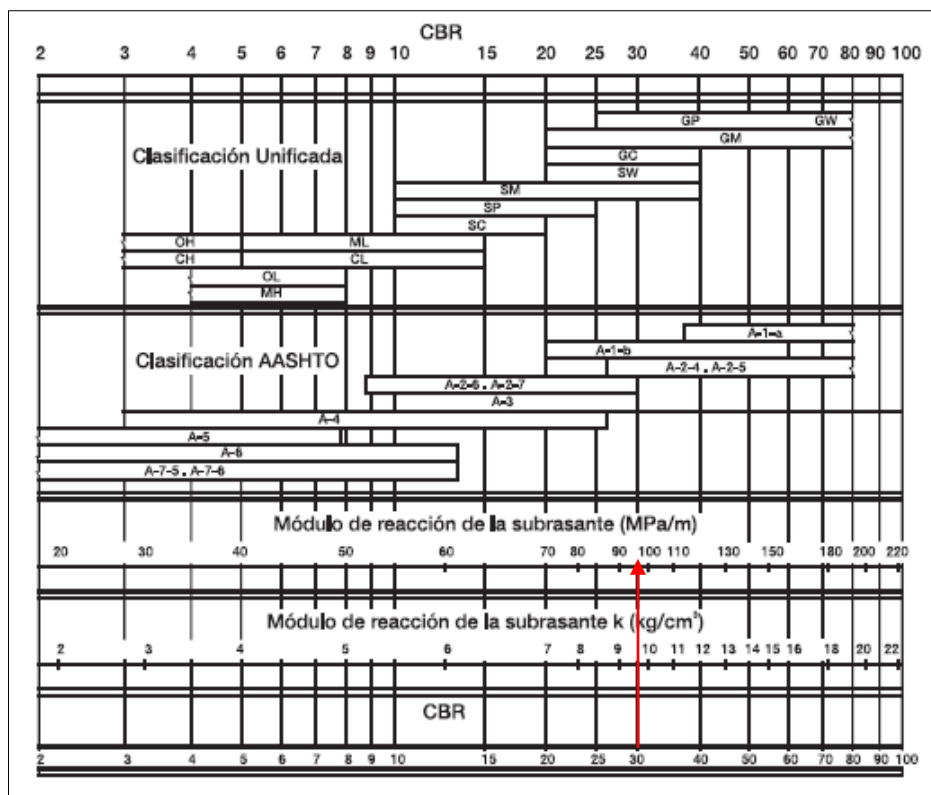


Figura 17. Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos [6]

### 3.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL TRÁNSITO DE DISEÑO

Para la evaluación adecuada de la variable tránsito, que incluye la estimación de parámetros tales como: TPD, crecimiento anual del tránsito y la composición vehicular para automóviles, buses y camiones; se consideró la información entregada por GICA en el informe de tránsito para el proyecto, a partir de la información suministrada por los aforos vehiculares realizados durante el periodo comprendido entre el 03 y el 10 de septiembre del año 2021. En este caso, se obtuvo la distribución para automóviles, buses y camiones que se ve en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición y distribución vehicular de acuerdo con aforos 03.09.21 al 10.09.21

TIPO DE VEHÍCULO	LIVIANOS	BUSES	C2P	C2G	C3 – C4	TOTAL
Cantidad	59	10	21	21	4	115
Porcentaje	51.10%	8.65%	18.18%	18.32%	3.75%	100%

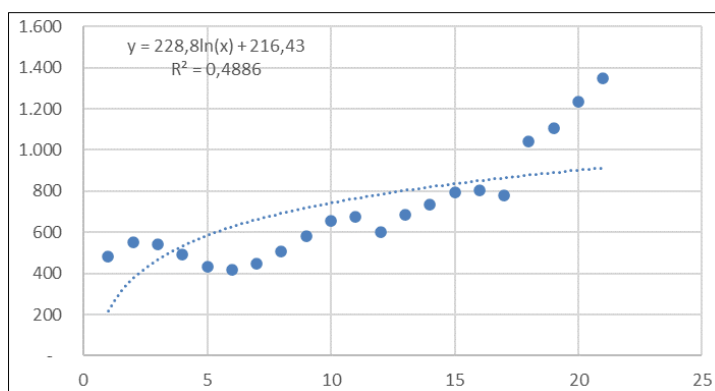
#### 3.2.2.1 Tasa de crecimiento

Para el cálculo de las proyecciones realizadas para cada uno de los tramos, se tomaron como referencia los datos de Volúmenes de Tránsito proporcionados por el INVIAS para las estaciones 472 (Dabeiba – Santa Fe de Antioquia) desde el año 1997 hasta el año 2017, con los cuales se desarrolla una regresión con el fin de determinar el modelo que mejor representa el comportamiento de los datos. Para la estación se evaluaron diferentes modelos (lineal, exponencial, polinómico, logarítmico y potencial) de manera que se obtuviera el que más se ajustaba a los datos

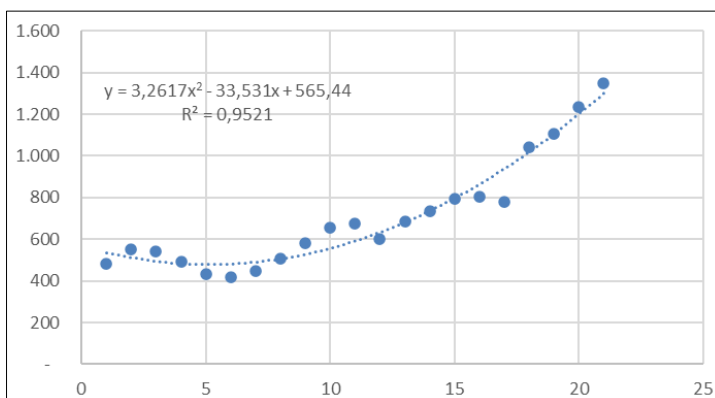
históricos, como resultado se obtuvo un modelo polinómico por ser el que presentaba el mejor parámetro  $R^2$ . Las funciones asociadas a cada estación de conteo se presentan en los numerales siguientes.

Los datos históricos obtenidos del INVIAS están comprendidos entre 1997 y 2017, para los años donde no se encontraron datos se realiza la proyección con la función polinómica. De esta misma forma se hallan los valores de TPD proyectados para los años de 2021 y hasta 2041. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

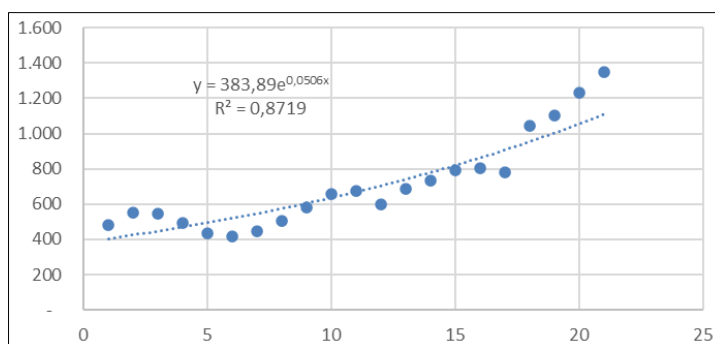
Para la estación del Barrio Santander, tomando como base los valores correspondientes a la estación INVIAS 472 (Dabeiba – Santa Fe de Antioquia), se establece que el modelo más ajustado al comportamiento de los datos desde el año 1997 hasta el 2017, es el modelo polinómico con la ecuación  $y = 3.2617x^2 - 33.531x + 565.44$ , con un valor de correlación de 0,95 y con el que se obtuvo el cálculo de las proyecciones a partir de 2022. Se presentan a continuación las gráficas de las regresiones.



**Figura 18. Regresión para la Estación Maicao 1997-2017 (Logarítmica)**  
(Elaborado por GICA SAS)



**Figura 19. Regresión para la Estación Maicao 1997-2017 (Potencial)**  
(Elaborado por GICA SAS)



**Figura 20. Regresión para la Estación Maicao 1997-2017 (Exponencial)**  
(Elaborado por GICA SAS)

En relación con las tasas de crecimiento para el cálculo del tránsito futuro y la determinación del TPD esperado, durante el periodo de servicio, se consideró el crecimiento del tráfico por rangos anuales, para el escenario base, propuesto por el especialista de tránsito, relacionadas en la Tabla 6.

**Tabla 6. Crecimiento anual del tráfico para el escenario base**

TIPO DE VEHÍCULO	RANGOS ANUALES PARA LA TASA DE CRECIMIENTO			
	2021-2022	2023-2027	2028-2034	2035-2042
Tasa de crecimiento	1.08%	1.07%	1.06%	1.05%

### 3.2.2.2 Repeticiones acumuladas durante el periodo de diseño

En la Tabla 7, se presenta los valores de TPDA para los diferentes años del periodo de servicio del pavimento.

**Tabla 7. Número de repeticiones acumuladas de los vehículos durante el periodo de servicio**

AÑO	TPDA	AUTOS	BUSES	C2-P	C2-G	C3
2022	124	63	11	23	23	5
2023	133	68	12	24	24	5
2024	143	73	12	26	26	5
2025	153	78	13	28	28	6
2026	164	84	14	30	30	6
2027	175	89	15	32	32	7
2028	187	95	16	34	34	7
2029	199	102	17	36	36	7
2030	211	108	18	38	39	8
2031	224	115	19	41	41	8
2032	238	121	21	43	44	9
2033	251	129	22	46	46	9
2034	266	136	23	48	49	10
2035	281	143	24	51	51	11
2036	296	151	26	54	54	11
2037	312	159	27	57	57	12
2038	328	168	28	60	60	12
2039	344	176	30	63	63	13
2040	362	185	31	66	66	14
2041	379	194	33	69	69	14

### 3.2.2.3 Espectro de carga

Con la distribución de las cargas por eje, de acuerdo con la carga máxima vehicular permitida en Colombia, se procede a asignar a cada eje por tipo de vehículo, el número de repeticiones esperadas y previamente calculadas, durante el periodo de diseño. Ver resumen del número de repeticiones para ejes sencillos y tándem en la Tabla 8.

**Tabla 8. Número de repeticiones para el periodo de diseño por espectro de carga para ejes sencillos y tándem**

	EJES SENCILLOS					EJES TÁNDEM
	5.0	6.0	8.0	10.0	11.0	22.0
Carga (t)	49.03	5.84	78.45	98.07	107.87	215.75
Carga (kN)	150518		150518			
BUSES	316367			316367		
C2-P		318912			318912	
C2-G		65219				65219
C3						
TOTAL	466885	384131	150518	316367	318912	65219



### 3.2.2.4 Número de ejes equivalentes

A continuación, se presenta el cálculo del número de ejes equivalentes, sin embargo, el diseño fue realizado con base a la premisa de la construcción en pavimento rígido, para el cual no aplica el término de ejes equivalentes, sino el espectro de carga para la cuantificación del tránsito proyectado.

**Tabla 9. TPD Proyectado por estación**

AÑO	BUSES	C2P	C2G	C3
2022	11	23	23	5
2023	12	24	24	5
2024	12	26	26	5
2025	13	28	28	6
2026	14	30	30	6
2027	15	32	32	7
2028	16	34	34	7
2029	17	36	36	7
2030	18	38	39	8
2031	19	41	41	8
2032	21	43	44	9
2033	22	46	46	9
2034	23	48	49	10
2035	24	51	51	11
2036	26	54	54	11
2037	27	57	57	12
2038	28	60	60	12
2039	30	63	63	13
2040	31	66	66	14
2041	33	69	69	14

**Tabla 10. TPD Proyección de ejes equivalentes a ejes simples de 8.2 t en el carril de diseño**

AÑO	BUSES	C2P	C2G	C3	W18/AÑO
2022	4.015	9.570	28.879	6.862	49.326
2023	4.380	9.986	30.134	6.862	51.363
2024	4.380	10.819	32.646	6.862	54.706
2025	4.745	11.651	35.157	8.234	59.787
2026	5.110	12.483	37.668	8.234	63.495
2027	5.475	13.315	40.179	9.607	68.576
2028	5.840	14.147	42.690	9.607	72.285
2029	6.205	14.980	45.202	9.607	75.993
2030	6.570	15.812	48.968	10.979	82.329
2031	6.935	17.060	51.480	10.979	86.454
2032	7.665	17.892	55.246	12.352	93.155
2033	8.030	19.141	57.758	12.352	97.280
2034	8.395	19.973	61.524	13.724	103.616
2035	8.760	21.221	64.036	15.096	109.113
2036	9.490	22.469	67.802	15.096	114.858
2037	9.855	23.718	71.569	16.469	121.611
2038	10.220	24.966	75.336	16.469	126.991

AÑO	BUSES	C2P	C2G	C3	W18/AÑO
2039	10.950	26.214	79.103	17.841	134.108
2040	11.315	27.463	82.870	19.214	140.861
2041	12.045	28.711	86.636	19.214	146.606

A partir de lo anterior, el tránsito de diseño, en términos de ejes equivalentes a ejes simples de 8.2 t en el carril de diseño son los indicados en la Tabla 11, correspondientes a la suma de los valores sombreados en la Tabla 10.

**Tabla 11. Número de ejes equivalentes**

TRAMO	W <sub>18</sub>
Tramo 3	1.85E+06

### 3.2.3 ESPESOR DE DISEÑO

Con base en la aplicación de los criterios mencionados en el apartado 2.1, a continuación, se presentan parámetros de diseño adoptados para realizar el dimensionamiento:

#### 3.2.3.1 Tránsito de diseño

El tránsito de diseño corresponde a las repeticiones esperadas por niveles de carga de eje, mostrado en la Tabla 2, Tabla 8.

#### 3.2.3.2 Resistencia del conjunto subrasante – material granular tratado con cemento (Kc)

El efecto del material granular tratado con cemento sobre el valor del módulo de reacción de subrasante (Kc) es 220.38 MPa/m. Este se determinó a partir del software BS-PCAA, teniendo en cuenta que para el diseño se optó por un material granular tratado con cemento de 200.00 mm de espesor y que anteriormente se estableció un valor de K para subrasante de 96.00 MPa/m.

#### 3.2.3.3 Resistencia a la flexión del concreto (módulo de rotura, Mr)

Se emplea un módulo de rotura (MR) igual a 4.20 MPa (609.16 psi).

#### 3.2.3.4 Factor de seguridad de carga, F<sub>sc</sub>

Se adopta un factor de seguridad de cargas (F<sub>sc</sub>) de 1.00 puesto que la vía en estudio soportará bajos volúmenes de tránsito de vehículos pesados. [6]

#### 3.2.3.5 Factor de mayoración de repeticiones

Se adopta el valor de 1.00. Con respecto a este parámetro se hace una consideración especial, pues el espectro de cargas seleccionado ya incluye los componentes del tránsito proyectado: tránsito atraído, crecimiento normal, tránsito generado y tránsito desarrollado durante el periodo de diseño.

A continuación, se enumeran los datos de entrada del programa:

- Período de diseño: 20 años
- Espesor de la losa: 170.00 mm
- Módulo de rotura del concreto (MR): 4.20 MPa
- Dovelas: Si
- Bermas: No
- Módulo de reacción de la subrasante (k): 60.00 MPa/m
- Espesor de base: 200.00 mm
- Base: Tratada con cemento (material granular tratado con cemento)
- Factor de seguridad de carga (FSC): 1.00
- Cargas y repeticiones: Ver Tabla 12

Tabla 12. Tránsito km 2+950 a km 11+090 Dabeiba – Camparrusia

EJES SIMPLES		EJES TÁNDEM		EJES TRIDEM	
CARGA (kN)	REPETICIONES	CARGA (kN)	REPETICIONES	CARGA (kN)	REPETICIONES
108	318912	216	65219	-	-
98	316367	-	-	-	-
79	150518	-	-	-	-
59	384131	-	-	-	-
49	466885	-	-	-	-

Con los parámetros de diseño establecidos, el dimensionamiento de la estructura de pavimento con un espesor de losa de concreto hidráulico de **170.00 mm**, cumple con los requerimientos de consumo de fatiga con el 25.58% y para el consumo de erosión con el 56.97% (ver Figura 21).

DISEÑO PAVIMENTOS RIGIDOS - METODO : PCA-84  
UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
Software : BS-PCAA

Proyecto: 630- Argos Dabeiba "Dabeiba - Camparrusia" km 2+950 - km 11+090

Datos :

Resistencia K del Apoyo : 220.38 Mpa/m  
Espesor Losa : 17 cm  
Modulo de Elasticidad : 28000 Mpa  
Densidad : 2.4 Tn/m<sup>3</sup>  
Relacion de Poisson : 0.15  
Modulo de Rotura : 4.2 Mpa  
Coeficiente de Variacion : 10%  
Ancho de Berma : 0 m  
Factor de Trabazon de Agregados : 0 Mpa  
Camiones al Borde : 50%  
Pasadores : SI  
Factor de Seguridad Cargas : 1  
Factor de Mayoración Repeticiones : 1

Resultados :

Carga Tn	Carga FS Tn	Repeticiones Esperadas	Esfuerzo Equival. psi	Repeticiones Admisib_Fatiga	Consumo Fatiga %	Repeticiones Admisi_Erosion	Consumo Erosion %
-------------	-------------------	---------------------------	-----------------------------	--------------------------------	------------------------	--------------------------------	-------------------------

EJES SIMPLES RUEDA SIMPLE

Esfuerzo Equivalente: 1.7 Factor Esfuerzo: 0.4071 Factor Erosion: 3.0000

5.00	5.00	150,518	142.5	Inf	0.00	Inf	0.00
5.00	5.00	316,367	142.5	Inf	0.00	Inf	0.00
6.00	6.00	318,912	169.2	Inf	0.00	107,099,688	0.30
6.00	6.00	65,219	169.2	Inf	0.00	107,099,688	0.06

EJES SIMPLES RUEDA DOBLE

Esfuerzo Equivalente: 1.7 Factor Esfuerzo: 0.4071 Factor Erosion: 3.0000

8.00	8.00	150,818	221.7	Inf	0.00	7,964,619	1.89
10.00	10.00	316,367	273.4	Inf	0.00	1,880,696	16.82
11.00	11.00	318,912	299.0	1,246,490	25.58	1,066,207	29.91

EJES TANDEM RUEDA DOBLE

Esfuerzo Equivalente: 1.4 Factor Esfuerzo: 0.3286 Factor Erosion: 3.0400

22.00	22.00	65,219	242.0	Inf	0.00	816,265	7.99
-------	-------	--------	-------	-----	------	---------	------

-----  
Total : 25.58 PCA-84: 56.97

Figura 21. Resumen de resultados de diseño mediante el método de la PCA'84 <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Software BS PCAA. Universidad del Cauca. Ingenieros Efraín Solano y Carlos Benavides. Popayán 2020.

### 3.2.3.6 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad, el cual consistió en asignar intervalos a los parámetros de diseño con el fin de poder determinar cuál es el mínimo valor que se puede obtener para el módulo de reacción (K) y espesor de losa, sin afectar el consumo de fatiga y erosión del pavimento. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 13.

**Tabla 13. Resultados del análisis de sensibilidad – método de la PCA' 84**

K <sub>CONJUNTO</sub> (MPa/m)	ESPESOR (mm)	MÓDULO DE ROTURA (MPa)	FACTOR DE MAY. CARGA	CONSUMO POR FATIGA (%)	CONSUMO POR EROSIÓN (%)
190	165	4.40	1	48.25	79.01
190	165	4.60	1	13.53	79.01
190	165	4.80	1	2.30	79.01
190	170	4.20	1	55.68	60.50
190	170	4.40	1	15.28	60.50
190	170	4.60	1	2.54	60.50
190	170	4.80	1	0.00	60.50
190	175	4.00	1	69.14	46.55
190	175	4.20	1	18.91	46.55
190	175	4.40	1	3.25	46.55
190	175	4.60	1	0.00	46.55
190	175	4.80	1	0.00	46.55
190	180	4.00	1	25.37	35.95
190	180	4.20	1	4.69	35.95
190	180	4.40	1	0.00	35.95
190	180	4.60	1	0.00	35.95
190	180	4.80	1	0.00	35.95
190	185	4.00	1	7.45	27.85
190	185	4.20	1	0.00	27.85
190	185	4.40	1	0.00	27.85
190	185	4.60	1	0.00	27.85
190	185	4.80	1	0.00	27.85
190	190	4.00	1	1.20	21.62
190	190	4.20	1	0.00	21.62
190	190	4.40	1	0.00	21.62
190	190	4.60	1	0.00	21.62
190	190	4.80	1	0.00	21.62
200	165	4.40	1	37.25	77.48
200	165	4.60	1	9.55	77.48
200	165	4.80	1	1.27	77.48
200	170	4.20	1	43.42	59.34
200	170	4.40	1	10.95	59.34
200	170	4.60	1	1.43	59.34
200	170	4.80	1	0.00	59.34
200	175	4.00	1	54.65	45.66
200	175	4.20	1	13.85	45.66
200	175	4.40	1	1.92	45.66
200	175	4.60	1	0.00	45.66
200	175	4.80	1	0.00	45.66
200	180	4.00	1	19.09	35.26
200	180	4.20	1	2.94	35.26
200	180	4.40	1	0.00	35.26
200	180	4.60	1	0.00	35.26
200	180	4.80	1	0.00	35.26
200	185	4.00	1	4.98	27.31
200	185	4.20	1	0.00	27.31
200	185	4.40	1	0.00	27.31
200	185	4.60	1	0.00	27.31
200	185	4.80	1	0.00	27.31
200	190	4.00	1	0.59	21.20
200	190	4.20	1	0.00	21.20
200	190	4.40	1	0.00	21.20
200	190	4.60	1	0.00	21.20
200	190	4.80	1	0.00	21.20
210	160	4.40	1	80.80	99.66
210	160	4.60	1	26.09	99.66
210	160	4.80	1	6.38	99.66
210	165	4.20	1	89.94	75.94

K <sub>CONJUNTO</sub> (MPa/m)	ESPESOR (mm)	MÓDULO DE ROTURA (MPa)	FACTOR DE MAY. CARGA	CONSUMO POR FATIGA (%)	CONSUMO POR EROSIÓN (%)
210	165	4.40	1	28.67	75.94
210	165	4.60	1	6.62	75.94
210	165	4.80	1	0.64	75.94
210	170	4.20	1	33.79	58.18
210	170	4.40	1	7.72	58.18
210	170	4.60	1	0.75	58.18
210	170	4.80	1	0.00	58.18
210	175	4.00	1	43.14	44.77
210	175	4.20	1	10.02	44.77
210	175	4.40	1	1.06	44.77
210	175	4.60	1	0.00	44.77
210	175	4.80	1	0.00	44.77
210	180	4.00	1	14.23	34.58
210	180	4.20	1	1.76	34.58
210	180	4.40	1	0.00	34.58
210	180	4.60	1	0.00	34.58
210	180	4.80	1	0.00	34.58
210	185	4.00	1	3.23	26.78
210	185	4.20	1	0.00	26.78
210	185	4.40	1	0.00	26.78
210	185	4.60	1	0.00	26.78
210	185	4.80	1	0.00	26.78
210	190	4.00	1	0.00	20.78
210	190	4.20	1	0.00	20.78
210	190	4.40	1	0.00	20.78
210	190	4.60	1	0.00	20.78
210	190	4.80	1	0.00	20.78
220	160	4.40	1	65.35	97.60
220	160	4.60	1	20.02	97.60
220	160	4.80	1	4.28	97.60
220	165	4.20	1	73.24	74.40
220	165	4.40	1	21.77	74.40
220	165	4.60	1	4.48	74.40
220	165	4.80	1	0.00	74.40
220	170	4.00	1	88.18	57.02
220	170	4.20	1	25.83	57.02
220	170	4.40	1	5.33	57.02
220	170	4.60	1	0.00	57.02
220	170	4.80	1	0.00	57.02
220	175	4.00	1	33.99	43.89
220	175	4.20	1	7.13	43.89
220	175	4.40	1	0.54	43.89
220	175	4.60	1	0.00	43.89
220	175	4.80	1	0.00	43.89
220	180	4.00	1	10.49	33.90
220	180	4.20	1	0.99	33.90
220	180	4.40	1	0.00	33.90
220	180	4.60	1	0.00	33.90
220	180	4.80	1	0.00	33.90
220	185	4.00	1	2.01	26.25
220	185	4.20	1	0.00	26.25
220	185	4.40	1	0.00	26.25
220	185	4.60	1	0.00	26.25
220	185	4.80	1	0.00	26.25
220	190	4.00	1	0.00	20.37
220	190	4.20	1	0.00	20.37
220	190	4.40	1	0.00	20.37
220	190	4.60	1	0.00	20.37

K <sub>CONJUNTO</sub> (MPa/m)	ESPESOR (mm)	MÓDULO DE ROTURA (MPa)	FACTOR DE MAY. CARGA	CONSUMO POR FATIGA (%)	CONSUMO POR EROSIÓN (%)
220	190	4.80	1	0.00	20.37
230	160	4.40	1	52.80	95.51
230	160	4.60	1	15.22	95.51
230	160	4.80	1	2.78	95.51
230	165	4.20	1	59.60	72.85
230	165	4.40	1	16.70	72.85
230	165	4.60	1	2.94	72.85
230	165	4.80	1	0.00	72.85
230	170	4.00	1	72.48	55.85
230	170	4.20	1	20.11	55.85
230	170	4.40	1	3.59	55.85
230	170	4.60	1	0.00	55.85
230	170	4.80	1	0.00	55.85
230	175	4.00	1	26.30	43.00
230	175	4.20	1	4.97	43.00
230	175	4.40	1	0.00	43.00
230	175	4.60	1	0.00	43.00
230	175	4.80	1	0.00	43.00
230	180	4.00	1	7.62	33.22
230	180	4.20	1	0.52	33.22
230	180	4.40	1	0.00	33.22
230	180	4.60	1	0.00	33.22
230	180	4.80	1	0.00	33.22
230	185	4.00	1	1.20	25.72
230	185	4.20	1	0.00	25.72
230	185	4.40	1	0.00	25.72
230	185	4.60	1	0.00	25.72
230	185	4.80	1	0.00	25.72
230	190	4.00	1	0.00	19.96
230	190	4.20	1	0.00	19.96
230	190	4.40	1	0.00	19.96
230	190	4.60	1	0.00	19.96
230	190	4.80	1	0.00	19.96
240	160	4.40	1	42.59	93.41
240	160	4.60	1	11.46	93.41

K <sub>CONJUNTO</sub> (MPa/m)	ESPESOR (mm)	MÓDULO DE ROTURA (MPa)	FACTOR DE MAY. CARGA	CONSUMO POR FATIGA (%)	CONSUMO POR EROSIÓN (%)
240	160	4.80	1	1.74	93.41
240	165	4.20	1	48.44	71.29
240	165	4.40	1	12.70	71.29
240	165	4.60	1	1.86	71.29
240	165	4.80	1	0.00	71.29
240	170	4.00	1	59.53	54.68
240	170	4.20	1	15.54	54.68
240	170	4.40	1	2.34	54.68
240	170	4.60	1	0.00	54.68
240	170	4.80	1	0.00	54.68
240	175	4.00	1	20.74	42.11
240	175	4.20	1	3.38	42.11
240	175	4.40	1	0.00	42.11
240	175	4.60	1	0.00	42.11
240	175	4.80	1	0.00	42.11
240	180	4.00	1	5.45	32.54
240	180	4.20	1	0.00	32.54
240	180	4.40	1	0.00	32.54
240	180	4.60	1	0.00	32.54
240	180	4.80	1	0.00	32.54
240	185	4.00	1	0.66	25.20
240	185	4.20	1	0.00	25.20
240	185	4.40	1	0.00	25.20
240	185	4.60	1	0.00	25.20
240	185	4.80	1	0.00	25.20
240	190	4.00	1	0.00	19.56
240	190	4.20	1	0.00	19.56
240	190	4.40	1	0.00	19.56
240	190	4.60	1	0.00	19.56
240	190	4.80	1	0.00	19.56

### 3.2.3.7 Análisis de esfuerzos

Partiendo de lo consignado en el apartado 2.1.2 del presente informe y el espesor de losa definido anteriormente (170 mm), se realizó el respectivo análisis de esfuerzos, mediante las formulaciones descritas, las cuales evalúan la condición de esfuerzos en el borde, esquina e interior de la losa (Ver de la Tabla 14 a la Tabla 16). De acuerdo con lo anterior, se puede observar que, para un espesor de losa de 170 mm, ningún caso de esfuerzos está por encima del umbral máximo admisible ( $f_t$ ) 534.345 psi, el cual se obtuvo mediante la expresión (13), asignando un valor de  $f'c$  igual a 5076 psi, lo cual indica que, el espesor de diseño cumple las condiciones tanto de fatiga y erosión como de esfuerzos. También, es posible notar que el mayor esfuerzo se presenta en la esquina de la losa.

**Tabla 14. Resultados del análisis de esfuerzos por alabeo**

ESFUERZOS POR ALABEO (psi)		
Esfuerzo en dirección longitudinal ( $\sigma_x$ )	67.755	Cumple
Esfuerzo en dirección transversal ( $\sigma_y$ )	48.557	Cumple
Esfuerzo de borde ( $\sigma_e$ )	60.471	Cumple
Esfuerzo de esquina ( $\sigma_c$ )	47.958	Cumple

**Tabla 15. Resultados del análisis de esfuerzos por fricción**

ESFUERZOS POR FRICCIÓN (psi)		
Esfuerzo por fricción ( $\sigma$ )	9.227	Cumple

**Tabla 16. Resultados del análisis de esfuerzos por cargas de tránsito**

ESFUERZOS POR CARGAS DE TRÁNSITO (psi)		
Esfuerzo en el borde de la losa ( $\sigma_e$ )	339.023	Cumple

ESFUERZOS POR CARGAS DE TRÁNSITO (psi)		
Esfuerzo en el interior de la losa ( $\sigma_i$ )	197.021	Cumple
Esfuerzo en la esquina de la losa ( $\sigma_c$ )	267.368	Cumple

La suma total de los esfuerzos anteriores en los puntos de interés son los siguientes:

- Borde: 399.494 psi
- Interior: 264.776 psi
- Esquina: 315.326 psi
- Fricción: 9.227 psi

### 3.2.4 ESPESOR DE DISEÑO SELECCIONADO

En la Tabla 17 se resumen los espesores calculados de losa de concreto hidráulico, obtenidos por el método de la PCA-84. Se puede notar que la estructura establecida cumple consumos de esfuerzo y de erosión admisibles, es decir, consumos inferiores al 100%.

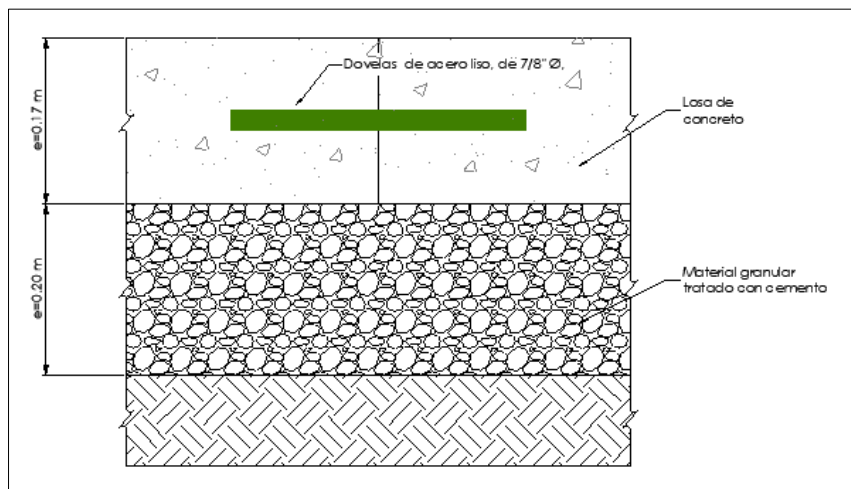
Se sugiere aquí la consideración de los siguientes elementos:

- El análisis de tránsito (espectro de cargas) fue realizado a partir de las cargas máximas por eje permitidas en Colombia, incluyendo las sobrecargas por eje que pueden ser transportadas por cada vehículo de acuerdo con un estudio relacionado anteriormente.
- El espesor de la losa de concreto obtenido por la metodología empleada, satisface las solicitudes de tránsito durante el periodo de diseño (ver la Tabla 17).

**Tabla 17. Resumen de espesores de diseño y método de diseño considerado**

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	MÉTODO PCA'84
Losa de concreto hidráulico (mm)	170
Material granular tratado con cemento (mm)	200
K conjunto subrasante + Material granular tratado con cemento (MPa/m)	220.38

Por tanto, la sección de estructura de pavimento es la que se muestra en la Figura 22.



**Figura 22. Sección de la estructura de pavimento con los espesores de diseño**

### 3.2.5 JUNTAS EN EL PAVIMENTO RÍGIDO

La losa cuadrada presenta mejor comportamiento por distribuir de mejor forma los esfuerzos. Considerando el criterio de una máxima relación de esbeltez de la losa de 1.25 veces<sup>3</sup>, por ejemplo, para un ancho de carril de 2.50 m, la longitud máxima permisible, sin que se requiera refuerzo de la losa, es de aproximadamente 3.00 m.

Por otra parte, la longitud de la losa de concreto hidráulico del pavimento rígido debe ser 20 a 24 veces el espesor de esta misma, y a su vez la relación largo – ancho, no debe exceder el valor de 1.25, además, se debe realizar el chequeo de la relación con el radio de rigidez relativa teniendo en cuenta que “La longitud de espaciamiento de las juntas transversales está relacionada con un término característico conocido como el radio de rigidez relativa (I), el cual es definido como una función del valor k (módulo de reacción de conjunto) y espesor de la losa. El radio de rigidez relativa es un término definido por Westergaard para cuantificar la relación entre la rigidez de la fundación del pavimento y la rigidez a flexión de la losa”, asimismo, “Experiencias indican que hay un aumento en la fisuración transversal cuando la relación L/I supera 4.44. Usar el criterio de relación máxima de L/I en 4.44 para el espaciamiento permitido de la junta aumentaría con un incremento en el espesor de la losa, pero disminuiría con un aumento en las condiciones de soporte de la fundación (rigidez).” [7]

La modulación de las losas principalmente se establece secciones mostradas en la Tabla 18 y los planos GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL-VI-TIP.LOSAS-PAV-PL-Rev1, esto en función a que el proyecto se desarrolla con anchos variables.

**Tabla 18. Dimensiones consideradas para los anchos de banca**

ANCHO DE LOSA (m)	LONGITUD MÁXIMA DE LOSA (m)
1.60	2.00
1.80	2.10
2.00	2.10
2.25	2.80
2.50	3.10
2.75	3.40
3.00	3.60
3.25	3.60
3.50	4.40

### 3.2.6 DISEÑO DE JUNTAS

#### 3.2.6.1 Diseño de juntas longitudinales y transversales

##### ▪ Juntas longitudinales

En la construcción del pavimento, la junta debe ser marcada con una ranura que separe los carriles y proporcione alojamiento para el sellado, unidas por barras de anclaje.

##### ▪ Barras de anclaje

Las barras de anclaje (en acero corrugado) se diseñan para resistir el esfuerzo de tracción generado por la fricción entre losa y su apoyo. El espaciamiento de las barras de acero varía con el espesor de la losa y la distancia a la junta más cercana al borde libre.

Dado el espesor seleccionado de la losa de diseño (170 mm) y un ancho de carril que va desde los dos (2) metros a 3.5 metros, con base en la tabla sugerida por la PCA – 84<sup>3</sup> se deberán emplear barras corrugadas con las siguientes características:

- $f_y$ : 2800 kg/cm<sup>2</sup> (40000 psi)
- Diámetro: 12.7 mm (1/2")
- Longitud de la barra: 0.60 m
- Separación: 1.20 m para las losas de ancho menor o igual a tres (3) metros.
- Separación: 1.10 m para las losas de ancho mayor a tres (3) metros.

<sup>3</sup> 4.3.1.2 Tipos de Juntas. AQUINO ZARATE, Manuel. Pavimentos de Concreto para Carreteras, pág. 1 – 88.



En los casos en que, debido a la colocación de los pasadores de las juntas transversales, la barra de anclaje quede traslapada con éstas, se deberá desplazar la barra de anclaje en la menor longitud posible, de tal forma que se evite el contacto entre barras de éstas y los pasadores. La separación mínima entre la primera barra de anclaje y el extremo del pasador más cercano debe ser de 0.10 m.

Adicionalmente, aquellas losas que, por su configuración en curva horizontal, tengan una geometría no rectangular, la disposición para la colocación de las barras de anclaje queda especificada en los planos de detalle.

Espesor de losa (mm)	Barras de $\phi$ 9,5 mm (3/8")				Barras de $\phi$ 12,7 mm (1/2")				Barras de $\phi$ 15,9 mm (5/8")			
	Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)			Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)		
		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)		3,05 (m)	3,35 (m)	3,65 (m)
Acero de $f_y = 187,5$ MPa (40.000 psi)												
150	0,45	0,80	0,75	0,65	0,60	1,20	1,20	1,20	0,70	1,20	1,20	1,20
175		0,70	0,60	0,55		1,20	1,10	1,00		1,20	1,20	1,20
200		0,60	0,55	0,50		1,05	1,00	0,90		1,20	1,20	1,20
225		0,55	0,50	0,45		0,85	0,85	0,80		1,20	1,20	1,20
250		0,45	0,45	0,40		0,85	0,80	0,70		1,20	1,20	1,10
Acero de $f_y = 280$ MPa (60.000 psi)												
150	0,65	1,20	1,10	1,00	0,85	1,20	1,20	1,20	1,00	1,20	1,20	1,20
175		1,05	0,95	0,85		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
200		0,90	0,80	0,75		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
225		0,80	0,75	0,65		1,20	1,20	1,20		1,20	1,20	1,20
250		0,70	0,65	0,60		1,20	1,15	1,10		1,20	1,20	1,20

**Figura 23. Cuadro de estimación de acero de refuerzo corrugado para barras de anclaje PCA – 84 [8]**

**Tabla 19. Barras de anclaje en juntas longitudinales**

ANCHO DE LOSA (m)							ESPESOR LOSA (mm)	DIÁMETRO BARRA DE ANCLAJE (Pulg.)	LONGITUD TOTAL (mm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS (mm)
1.60	1.80	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	170	1/2"	600	120
3.25			3.50							110

#### ▪ Juntas transversales

Las juntas transversales o juntas de contracción tienen como función principal controlar la fisuración natural del pavimento provocada por los esfuerzos que se generan en la losa de concreto por la retracción de fraguado del concreto hidráulico y por las acciones climáticas (temperatura y humedad).

#### ▪ Pasadores de carga o dovelas

Para alcanzar una buena transferencia de carga y darle así al pavimento un buen comportamiento a largo plazo, en este caso se emplearán pasadores de carga (dovelas), para aumentar mecánicamente la transferencia de carga.

Los pasadores o dovelas transmiten tanto fuerzas de cizalladura como momento flector, permitiendo el libre movimiento horizontal de las losas, por lo cual, al menos una mitad del pasador debe engrasarse, a fin de evitar su adherencia con el concreto que lo rodea. Asimismo, esta libertad de movimiento horizontal exige que los pasadores de una junta sean todos paralelos al eje de la calzada.

A continuación, se detalla en la Figura 24 la recomendación de la PCA-84, en función del espesor de la losa.

Espesor del pavimento	Diámetro del pasador		Longitud	Separación entre centros
	mm	Pulgada	mm	mm
0 - 100	13	1/2	250	300
110 - 130	16	5/8	300	300
140 - 150	19	3/4	350	300
160 - 180	22	7/8	350	300
190 - 200	25	1	350	300
210 - 230	29	1 1/8	400	300
240 - 250	32	1 1/4	450	300
260 - 280	35	1 3/8	450	300
290 - 300	38	1 1/2	500	300

Figura 24. Recomendación para la selección de los pasadores de carga [8]

Tabla 20. Dovelas o pasadores en juntas transversales

ANCHO DE LOSA (m)					ESPESOR LOSA (mm)	DIÁMETRO DEL PASADOR (Pulg.)	LONGITUD TOTAL (mm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS (mm)
1.60	1.80	2.00	2.25		170	7/8"	350	250
2.50	2.75	3.00	3.25	3.50				300

#### Canastilla para la instalación de las dovelas

Las canastillas son los elementos rigidizadores figurados en acero que permiten la instalación de las dovelas, garantizando la longitud de espaciamiento entre ellas, su ubicación en la mitad del espesor de la losa y su disposición en la junta transversal tal que, la longitud de la dovela se distribuya por mitades en las losas adyacentes. (Ver Figura 25). Por lo anterior, en función a la modulación de losas que se presenta en los planos GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL-VI-MOD.LOSAS-PAV-PL-Rev0 y de las losas tipo mencionadas en la Tabla 18, se realizó la discriminación de longitud de canastilla y recubrimiento para los diferentes anchos de losa que se presentan en la longitud del proyecto. (Ver Tabla 21).

Tabla 21. Longitud de canastilla y recubrimiento, por ancho de losa

ANCHO DE LOSA (m)	LONGITUD DE CANASTILLA (m)	RECUBRIMIENTO /CADA LADO (m)	ANCHO DE LOSA (m)	LONGITUD DE CANASTILLA (m)	RECUBRIMIENTO /CADA LADO (m)
1.60	1.28	0.16	2.55	2.12	0.21
1.69	1.28	0.21	2.56	2.43	0.07
1.70	1.52	0.09	2.75	2.43	0.16
1.80	1.52	0.14	2.85	2.43	0.21
1.95	1.52	0.21	2.86	2.72	0.07
1.96	1.78	0.09	3.00	2.72	0.14
2.00	1.78	0.11	3.15	2.72	0.21
2.17	1.78	0.20	3.16	3.03	0.07
2.18	2.03	0.08	3.25	3.03	0.11
2.25	2.03	0.11	3.45	3.03	0.21
2.40	2.03	0.19	3.46	3.32	0.07
2.41	2.12	0.14	3.50	3.32	0.09
2.50	2.12	0.19	3.75	3.32	0.22

#### 3.2.6.2 Sellado de juntas

Las aberturas de las juntas cambian a causa de los cambios de temperatura, alterando las condiciones de transferencia de carga. Las características de contracción controlan la abertura de las juntas transversales del pavimento. Además, el material que se coloque para sellar las juntas deberá ser capaz de soportar, sin despegarse, los movimientos del concreto cuando ocurra la máxima contracción.

El sellante propuesto debe corresponder a una masilla plástica de poliuretano mono-componente de bajo módulo de elasticidad y capacidad de elongación del 50% al 100%.

La expresión (14) definida por el método AASHTO [1], para la estimación del incremento de la abertura de la junta se muestra a continuación:

$$\Delta L = \frac{C \times L(\alpha_c \times DT_D + Z)}{S} \times 100 \quad (14)$$

Donde:

- $\Delta L$ : Abertura de la junta producida por la contracción térmica de las losas de concreto (pulg) valor que, por tanto, corresponde al ancho mínimo de la junta.
- $S$ : Elongación permisible del material de sello (%)
- $\alpha_c$ : Coeficiente de contracción térmica del concreto hidráulico ( $^{\circ}\text{F}^{-1}$ )
- $Z$ : Coeficiente de contracción por secado de la losa de concreto (pulg/pulg)
- $L$ : Longitud de la losa (pulg)
- $DT_D$ : Rango de temperaturas, diferencia entre la máxima temperatura que alcanza el concreto en la colocación y la mínima del año.
- $C$ : Factor de ajuste debido a la fricción losa / soporte: para el caso de base granular = 0.80; base tratada = 0.65.

Los valores adoptados para cada factor son los siguientes:

- $S$ : Como se mencionó, la elongación admisible del sellante es del 100 % a tracción y 50 % a compresión.
- $\alpha_c$ : Basado en la tabla 2.10 del numeral 2.5.2, parte II de la Guía AASHTO 1993, que se reproduce en la Tabla 22.
- $Z$ : Basado Tabla 2.9 del numeral 2.5.2, parte II de la Guía AASHTO (ver Tabla 23).

**Tabla 22. Valores recomendados de coeficiente de contracción térmica en función del tipo de agregado [1]**

TIPO DE AGREGADO	COEFICIENTE TÉRMICO ( $10^{-6}$ / $^{\circ}\text{F}$ )
Cuarzo	6.6
Arenisca	6.5
Grava	6.0
Granito	5.3
Basalto	4.8
Caliza	3.8

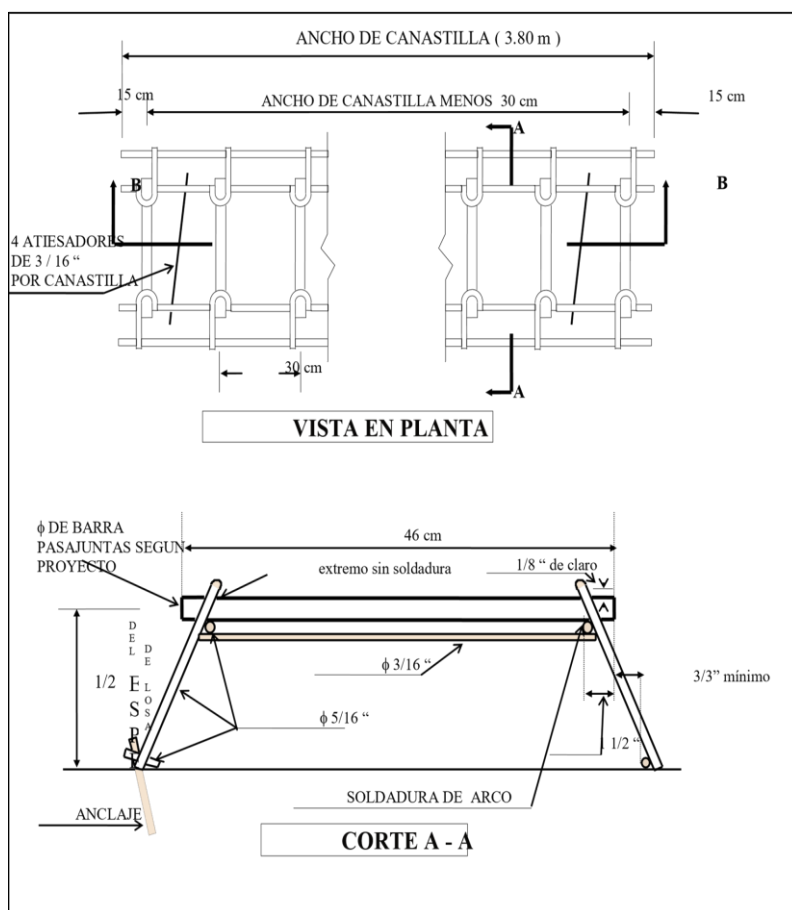


Figura 25. Esquema canastillas de dovelas en juntas transversales de contracción

Aplicando estos valores, se adopta un valor de  $3.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ , que se relaciona con un tipo de agregado denominado como caliza, partiendo de que en la zona es la roca más común.

Tabla 23. Relación aproximada entre contracción y resistencia a la tracción indirecta [1]

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA (psi)	COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN (Pulg/Pulg)
300 (o menor)	0.0008
400	0.0006
500	0.00045
600	0.0003
700 (o mayor)	0.0002

De acuerdo con el valor del módulo de rotura, se determinó que, la resistencia a la tracción se puede estimar mediante la expresión (15):

$$MR = 1.28 \times RT \quad (15)$$

De acuerdo con esto, se tiene que, para un MR de 4.20 MPa el valor a adoptar será de:

$$RT = 476 \text{ psi}$$

- Para los valores anteriores, la Tabla 23 indica adoptar un coeficiente de contracción intermedio entre 0.0006 y 0.00045, por lo que se adopta un valor de 0.000486.
- L: Se empleará como valor crítico una longitud de 4.70 m. (185.04 pulg)
- DT<sub>D</sub>: Se considera la máxima temperatura que alcanza el concreto en la colocación es de 82.4 °F (28°C) y la temperatura media mínima del municipio de Dabeiba – Antioquia es de 67.21°F (19.56°C) (ver Tabla 24).

La variabilidad espacial de la temperatura puede ser obtenida a partir de estimaciones indirectas, mediante la ecuación propuesta por Cenicafe (Chávez y Jaramillo, 1996). En esta metodología se regionaliza esta variable a partir de registros de temperatura media mensual en superficie para diferentes regiones geográficas del país.

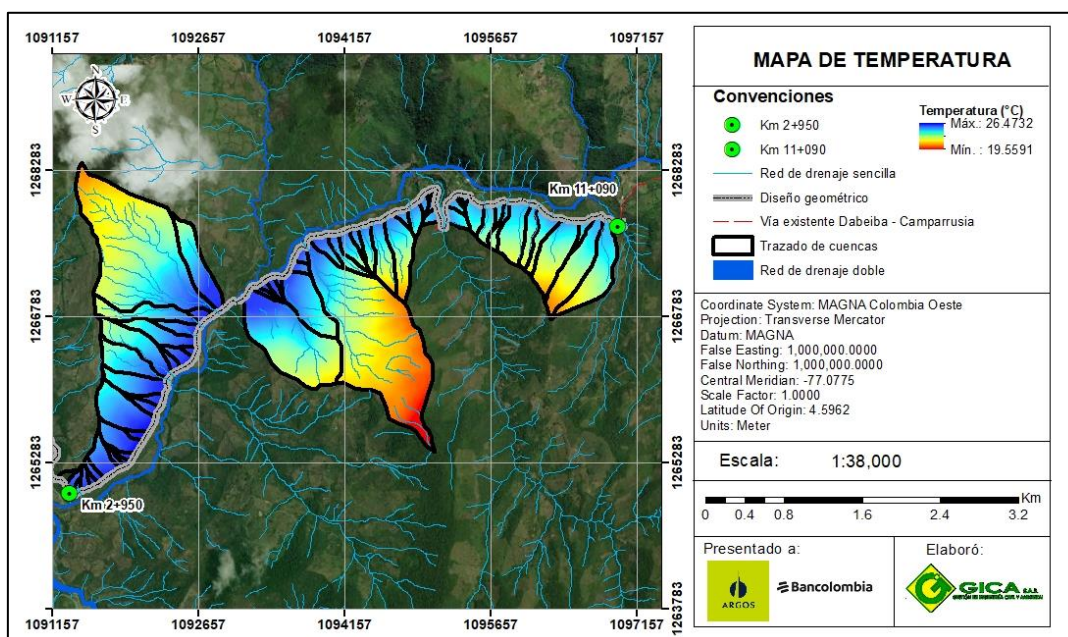
La ecuación utilizada, pertenece a la región Andina y es de la forma (16):

$$T_{media} = 29.42 - 0.0061H \quad (16)$$

Donde:

- $T_{media}$ : Temperatura media anual en (°C)
- $H$ : Altura sobre el nivel del mar en m.s.n.m.

En la Figura 26 se presenta la distribución espacial de la temperatura en la zona de estudio, de la cual se concluye que en la zona en estudio se presenta una variación de la temperatura media anual en la parte baja de 19.56°C, hasta alcanzar un valor cercano a los 26.47°C en la parte alta, con un valor promedio de 23.02°C.



**Figura 26. Mapa de temperatura media anual en la zona de estudio**  
(Elaborado por GICA S.A.S.)

**Tabla 24. Registro de temperaturas media máxima y mínima anual del municipio de Dabeiba**

MUNICIPIO	TEMPERATURA MEDIA MÁXIMA ANUAL (°C)	TEMPERATURA MEDIA MÍNIMA ANUAL (°C)
Dabeiba	26.47	19.56

Empleando la ecuación (14) y reemplazando los valores correspondientes, relacionados a continuación; es posible obtener el análisis considerando la losa sobre una base tratada con cemento (material granular tratado con cemento) ( $C = 0.65$ ), para las condiciones a tracción y compresión.

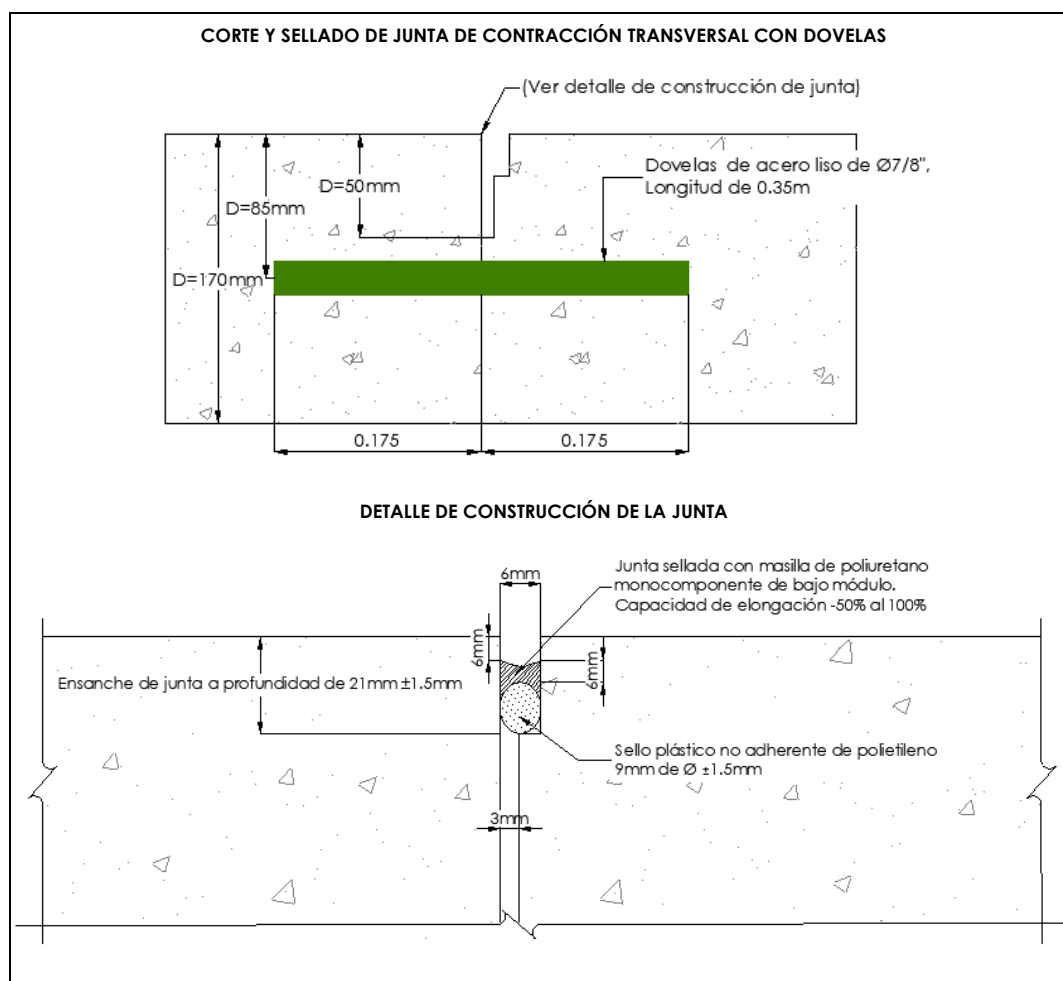
- $S$ : La elongación admisible del sellante es del 100 % a tracción y 50 % a compresión.
- $\alpha_c$ : 0.0000038 (°F<sup>-1</sup>)
- $Z$ : 0.000486 (pulg/pulg)
- $L$ : 4.40 m (173.23 pulg)
- $DT_D$ : 82.40°F – 67.21°F = 15.19 °F

**Tabla 25. Determinación del ancho mínimo de juntas de contracción**

CONDICIÓN	$\Delta T$		$\Delta L$	
	°C	°F	(pulg)	(mm)
Compresión (50%)	19.56	67.21	0.1388	3.53
	28.00	82.40		
Tracción (100%)	19.56	67.21	0.0694	1.76
	28.00	82.40		

De la Tabla 25 se desprende que el ancho mínimo de junta deberá ser de 3.53 mm, valor derivado de una deformación a compresión de la masilla de sello del 50%, esto es, una elongación de aproximadamente 1.76 mm. Dado que los equipos de corte obtienen un ancho de 6 mm, éste es el valor recomendado.

La disposición de la ranura es la mostrada en la Figura 27 basada en el análisis del cálculo de la contracción de las losas. Es indispensable para una adecuada durabilidad del sello de la junta que éste tenga en cuenta el menisco o espacio libre entre el tope de la junta y el sello, dado que un exceso en el material ocasionará desgarres del sello por acción del tránsito (El sellador de juntas se instala encima del relleno reformado. El sellador inhibe la infiltración de material incompresible y mantiene el relleno en su lugar. Es fundamental rebajar el sellador 6 mm para protegerlo de los efectos dañinos del tráfico [7]).



**Figura 27. Esquema del corte y sellado de juntas de contracción**

### 3.2.6.3 Diseño de juntas de expansión y juntas de aislamiento

Las juntas de aislamiento y expansión permiten que se produzcan movimientos diferenciales horizontales y verticales anticipados (si no se utilizan dovelas) entre un pavimento y otra estructura. Debido a que el desempeño del pavimento



puede verse afectado significativamente por el uso planificado y la ubicación de estas juntas, se debe tener mucho cuidado en el proceso de diseño. Aunque los términos a menudo se usan indistintamente, las juntas de aislamiento no son lo mismo que las juntas de expansión. Sin embargo, es importante anotar que ambas juntas utilizan material de relleno para juntas de profundidad total. [7]

#### ▪ Juntas de expansión

Las juntas de expansión en este proyecto se presentan entre losa y losa, se diseñan con el fin de que los pavimentos se adapten a la posible expansión o movimiento excesivo de la losa sin desarrollar fuerzas de compresión altas en el pavimento que de otra manera podrían resultar en roturas y roturas de juntas en el pavimento o daños a estructuras adyacentes. Estas juntas incluyen dovelas u otros dispositivos de transferencia de carga y permiten el movimiento independiente solo en la dirección de expansión (Ver Figura 28). [9]

**Nota:** La separación de las dovelas en las juntas de expansión dependerán de la losa en la que se presente este tipo de junta.

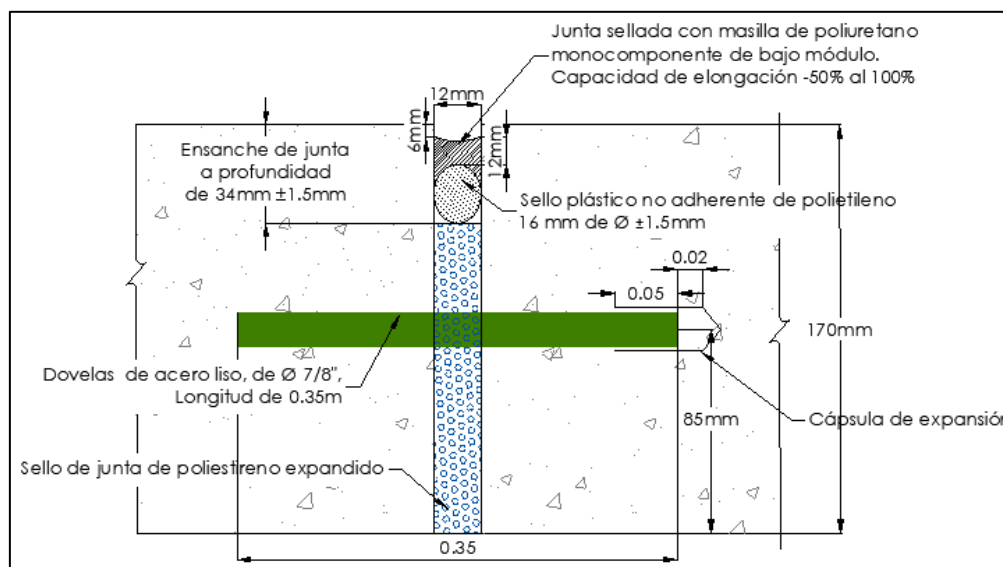


Figura 28. Detalle junta de expansión

#### ▪ Juntas de aislamiento

Se diseñan para aislar el pavimento de otras estructuras fijas, en el caso de este proyecto, del box culvert, estas juntas permiten el movimiento completamente independiente de las estructuras adyacentes e incluyen un material comprimible de profundidad completa y no contienen dispositivos de transferencia de carga, barras de unión u otras conexiones (Ver Figura 29 y Figura 30). [9]

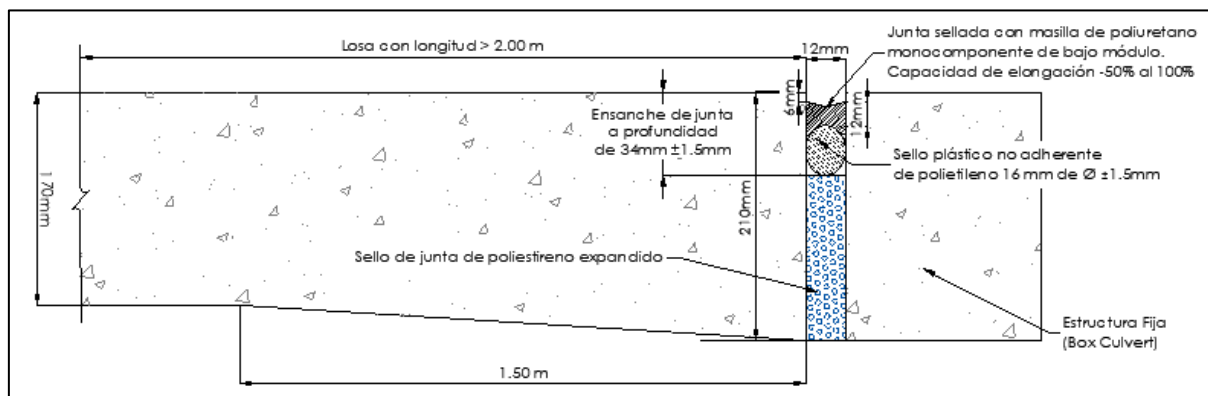


Figura 29. Detalle junta de aislamiento, losas con largo mayor a 2.00 m



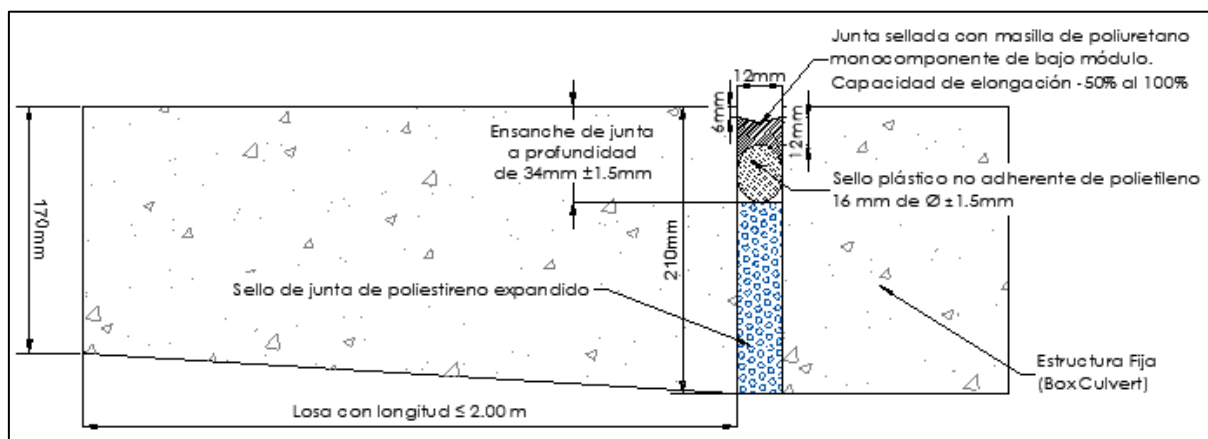


Figura 30. Detalle junta de aislamiento, losas con largo igual o menor a 2.00 m

### 3.2.6.4 Juntas de construcción

Las juntas longitudinales de construcción se presentan cuando el ancho del equipo sólo permite construir el pavimento carril por carril. Esta junta coincide con la longitudinal de alabeo.

Las juntas transversales de construcción se proyectan para que coincidan con las de contracción. La transferencia de carga debe hacerse con pasadores de acero liso, de la misma manera como se han recomendado. Cuando la interrupción es imprevista, se presenta la necesidad de colocar una junta de construcción no proyectada en los planos.

### 3.2.6.5 Losas reforzadas

En los casos en que las losas sean de dimensiones irregulares (en intersecciones, por ejemplo), zonas de curva o donde la relación -largo/ancho- supere el valor especificado, con el fin que la concentración de los esfuerzos no produzca fisuraciones abiertas, se prevé el empleo de acero de refuerzo.

Para el diseño del refuerzo de las losas se empleó el procedimiento definido en la Guía de Diseño de la AASHTO'93 [1]. Los parámetros de diseño requeridos para el procedimiento son los siguientes:

- Resistencia a la tracción indirecta del concreto ( $f_t$ ): 476 psi.
- Coefficiente de contracción del concreto a los 28 días ( $\epsilon$ ): 0.000486.
- Coefficiente térmico del concreto ( $\alpha_c$ ):  $3.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ .
- Diámetro de las barras de refuerzo ( $\phi$ ): Se emplearán barras de  $\frac{1}{2}$ ".
- Coefficiente térmico del acero ( $\alpha_s$ ): De acuerdo con la recomendación de la Guía AASHTO, se asumirá un valor de  $5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ . [1]
- Caída térmica ( $\Delta T_D$ ): Se considera la máxima temperatura que alcanza el concreto en la colocación es de 82.4 °F (28°C) y la temperatura media mínima del municipio de Dabeiba – Antioquia es de 67.21°F (19.56°C), entonces, 82.40°F – 67.21°F = 15.19 °F
- Esfuerzo de tensión en la losa debido a carga de rueda ( $\sigma_w$ ): Para su determinación se emplea el ábaco de la Figura 31, a partir de la carga de rueda crítica, el espesor de la losa y el módulo de reacción del soporte. Se adopta la carga crítica de rueda de 5.50 ton (12125 lb). El espesor de losa asumido es de 0.170 m (6.69") y el módulo de reacción del soporte 96 MPa/m (350.40 pci). El resultado es un valor de  $\sigma_w$  igual a 238.00 psi (ver Figura 31).

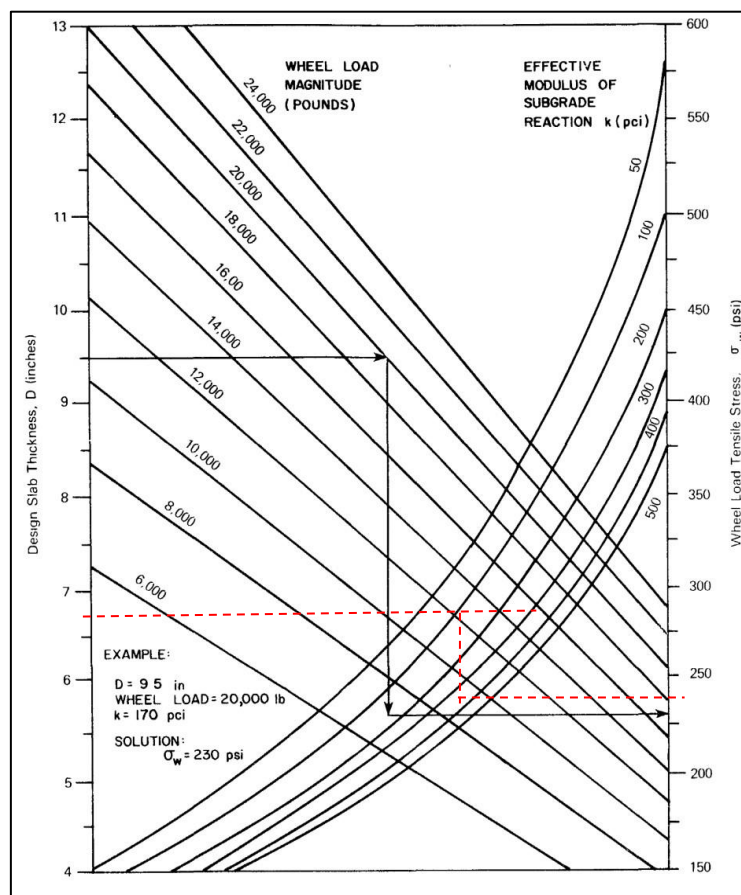


Figura 31. Ábaco para la estimación del esfuerzo de tracción debido a carga de rueda [1]

Los criterios límites establecidos por la metodología son los siguientes:

- Espaciamiento entre fisuras ( $\bar{x}$ ): Éstos son debidos a consideraciones de limitación de desportillamientos y descascaramientos. A fin de minimizar la incidencia de desportillamientos, el máximo espaciamiento entre fisuras consecutivas es de 2.44 m (8.00 pies). Para la minimización del potencial de descascaramientos, el mínimo espaciamiento entre fisuras es de 1.07 m (3.50 pies).
- Ancho de Fisura (CW): Este criterio se basa en la minimización de desportillamientos y del ingreso de agua. El ancho permisible de fisura no puede exceder 1.0 mm (0.04").
- Esfuerzo en el acero ( $\sigma_s$ ): Este valor límite pretende prevenir la fractura de losa o la aparición de deformaciones permanentes. Para la determinación del esfuerzo máximo permisible se emplean los valores de la Tabla 26, a partir de la resistencia a la tracción indirecta del concreto y del diámetro de las barras.

Tabla 26. Esfuerzo de trabajo permisible (en ksi) en las barras de refuerzo  $f_y = 40.000$  psi [1]

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA DEL CONCRETO (PSI)	DIÁMETRO DE LAS BARRAS		
	No. 4	No. 5	No. 6
300	65	57	54
400	67	60	55
500	67	61	56
600	67	63	58
700	67	65	59
800	67	67	60

El procedimiento de diseño es el siguiente:

- Se determina la cuantía de acero requerida para el cumplimiento de cada uno de los criterios definidos anteriormente. Las expresiones correspondientes son:

- Porcentaje de refuerzo para satisfacer el criterio de separación entre fisuras (X):

**Tabla 27. Criterio de separación entre fisuras**

$P = \left\{ \frac{1.32 \times \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{6.7} \times \left(1 + \frac{\alpha_s}{\alpha_c}\right)^{1.15} \times (1 + \varphi)^{2.19}}{\left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{5.2} \times X \times (1 + 1000Z)^{1.79}} \right\}^{\frac{1}{4.6}} - 1$		
DABEIBA	UNIDADES	
ft	476	psi
Coef. Térmico acero (as)	0.000005	/°F
Coef. Térmico concreto (ac)	0.0000038	/°F
σw	238	psi
Z	0.000486	pulg/pulg
φ	0.5	pulg
X (desportillamientos) (8 pies)	8	ft
X (descascamientos) (3.5 pies)	3.5	ft
P (8.0 pies), mínimo permisible	20.07%	
P (3.5 pies), máximo permisible	43.70%	

- Porcentaje mínimo de refuerzo longitudinal, para satisfacer el criterio de ancho de fisura (CW):

**Tabla 28. Criterio de ancho de fisuras**

$P = \left\{ \frac{0.00932 \times \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{6.52} \times (1 + \varphi)^{2.2}}{\left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{4.91} \times CW} \right\}^{\frac{1}{4.55}} - 1$		
DABEIBA	UNIDADES	
ft	476	psi
Coef. Térmico acero (as)	0.000005	/°F
Coef. Térmico concreto (ac)	0.0000038	/°F
σw	2.38	psi
CW (mínimo 0.04")	0.04	pulg
φ	0.5	pulg
P (mín) requerido	22.66%	

- Porcentaje mínimo de refuerzo para satisfacer criterio de esfuerzo en el acero (σs):

**Tabla 29. Criterio de esfuerzo en el acero**

$P = \left\{ \frac{47300 \times \left(1 + \frac{DT_D}{100}\right)^{0.425} \times \left(1 + \frac{f_t}{1000}\right)^{4.09}}{\left(1 + \frac{\sigma_w}{1000}\right)^{3.14} \times (1 + 1000Z)^{0.494} \times \sigma_s} \right\}^{\frac{1}{2.74}} - 1$		
DABEIBA	UNIDADES	
ft	476	psi
Esfuerzo en el acero (σs)	67000	psi
Caída térmica (DT <sub>D</sub> )	15.19	°F
σw	238	psi
Z	0.000486	pulg/pulg
P (mín) requerido	17.34%	

Si el porcentaje de acero máximo es superior o igual al mínimo, se continua con el cálculo del acero requerido, en caso contrario, deben revisarse los parámetros de entrada.

Dado lo anterior:

- % Acero mínimo requerido: 17.34%
- % Acero máximo permisible: 43.70%

El rango del número o de barras de refuerzo requeridas, está determinada por la siguiente expresión:

$$N_{\min} = 0,01273 \times P_{\min} \times W_s \times \frac{D}{\phi^2} \quad (17)$$

$$N_{\max} = 0,01273 \times P_{\max} \times W_s \times \frac{D}{\phi^2} \quad (18)$$

Dónde:

- $N_{\min}$ : Cantidad mínima de barras requerida.
- $N_{\max}$ : Cantidad máxima de barras requerida.
- $P_{\min}$ : Porcentaje mínimo de acero requerido.
- $P_{\max}$ : Porcentaje máximo de acero requerido.
- $W_s$ : Ancho de la sección de losa (pulg.).
- $D$ : Espesor de la capa de concreto hidráulico (pulg.), para el presente proyecto se estableció un espesor de 0.17 metros.
- $\phi$ : Diámetro de la barra de refuerzo (pulg.), que para este caso y de acuerdo con lo sugerido por la literatura técnica se realizó con acero de ½".

**Tabla 30. Número mínimo y máximo de barras en la parrilla de acero para ancho 2 metros**

<b>P (3.5 pies), máximo permisible</b>	43.70%
<b>Ancho 1 de la sección de la losa (plg)</b>	78.74
<b>P (mín) requerido</b>	22.66%
<b>Espesor de la losa, plg</b>	6.69
<b>Diámetro de la barra de refuerzo, plg</b>	0.5
$N_{\max} = 0,01273 \times P_{\max} \times W_s \times \frac{D}{\phi^2}$ ancho (2.0 m)	<b>12</b> barras
$N_{\min} = 0,01273 \times P_{\min} \times W_s \times \frac{D}{\phi^2}$ ancho (2.0 m)	<b>6</b> barras

Aplicando las expresiones (17) y (18) el número de barras mínima y máxima será la siguiente:

**Tabla 31. Número de barras mínima y máxima, por ancho de losa**

ANCHO LOSA(m)	N mín.	N máx.
1.60	5	9
1.80	5	11
2.00	6	12
2.25	7	13
2.50	8	15
2.75	8	16
3.00	9	18
3.25	10	19
3.50	11	21
3.75	11	22

Teniendo en cuenta los valores anteriores, se muestra en la Tabla 32 el número de barras de refuerzo y la separación de acuerdo con el ancho de losa, sin embargo, debido a la variación que se presenta en estas, se adopta 0.33 metros de espaciamiento entre barras para cumplir con el requerimiento de acero de refuerzo en todos los casos, recalcando

que, las losas que requieren refuerzo según la modulación de losas son en su mayoría de ancho 2.50 metros y 3.50 metros, lo que además facilita el tema constructivo.

**Tabla 32. Número de barras y separación , por ancho de losa**

ANCHO DE LOSA (m)	BARRAS DE REFUERZO	SEPARACIÓN BARRAS (m)
1.60	5	0.36
1.80	5	0.41
2.00	6	0.37
2.25	7	0.35
2.50	8	0.33
2.75	8	0.37
3.00	9	0.35
3.25	10	0.34
3.50	11	0.33
3.75	11	0.36

Por tanto, las losas de dimensión irregular (en intersecciones, zonas de curva) o donde la relación largo - ancho supere el valor especificado, se deben reforzar con una parrilla de 12.70 mm (½") de diámetro, separadas cada 0.33 metros, considerando un recubrimiento de 0.07 m en los bordes de la losa y 0.12 m desde las dovelas.

El acero de refuerzo se debe ubicar a partir de la superficie superior de la losa a 1/3 de su espesor (0.06 m), para que no interfiera con las dovelas de las juntas de contracción, ni con las barras de anclaje de las juntas longitudinales.

### 3.3 PAVIMENTO DE PLACA-HUELLA

Los criterios de diseño y las recomendaciones técnicas y constructivas que se desarrollan a continuación obedecen a los lineamientos preestablecidos en la Guía de Diseño para Pavimentos con Placa – Huella del Instituto Nacional de Vías – INVÍAS en su versión 2015. [3]

#### 3.3.1 PERIODO DE DISEÑO

Se adopta un periodo de diseño de 20 años para el diseño de pavimento con placa huella en este proyecto.

#### 3.3.2 VEHÍCULO DE DISEÑO

El sistema de placa-huella deberá soportar el paso de un camión tipo C-3.

#### 3.3.3 SUBRASANTE

Generalmente está constituida por el suelo natural con una capa de material de armado de espesor variable.

La subrasante que se evalúa para calificar su capacidad de soporte es el estrato subyacente al armado existente. El aporte estructural de la capa de armado que pueda existir no se toma en cuenta y se considera como un factor de seguridad.


#### 3.3.4 SUBBASE

La subbase deberá tener mínimo 0.15 metros de espesor en todo el ancho de la sección transversal. Si la conformación de la superficie existente no permite configurar el bombeo en las tangentes (-2.00%) y el peralte y su transición en las curvas (2.00%) esta tarea se deberá efectuar al momento de construir la subbase. Lo anterior implica que la subbase tendría en la zona central de la calzada y en la parte externa de las curvas horizontales un espesor superior al mínimo de 0.15 metros.

#### 3.3.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

##### 3.3.5.1 Mezcla de concreto

Los parámetros de la mezcla deben ser:

	VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO	
	INFORME	
	Documento: GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1	
	Medellín, Antioquia, 12 de marzo de 2022	Página 45

- Resistencia a la compresión a los 28 días  $f'c = 210.00 \text{ kg/cm}^2$ .
- Tamaño máximo del agregado grueso  $T_{\text{máx.}} =$  Treinta y ocho milímetros (38.00 mm).
- Asentamiento = 0.05 metros.

### 3.3.5.2 Resistencia del acero de refuerzo

El acero se define por su resistencia y se contempla mínimo de  $f_y$ :

$$4200 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \leq f_y \leq 5200 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \text{ (CCP – 14)}$$

Independiente del diámetro o varilla a usar en los elementos estructurales. Según las barras de refuerzo corrugado deben ser de acero de baja aleación que cumplan con las Normas NTC-2289 – (ASTM A706M). No se permite el uso de acero corrugado de refuerzo fabricado bajo la Norma NTC 245, ni aceros trabajados en frío o trefilado. Seguir lo indicado en el capítulo C-7 de la norma NSR-2010.

Cuando sea necesaria la ductilidad o soldadura, deben especificarse aceros que cumplan con las exigencias de la norma ASTM A 706 "Low Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement".

El módulo de Elasticidad del acero se define  $E_s = 200.000 \text{ MPa}$ .

### 3.3.6 PLACA-HUELLA

De acuerdo con la Guía para Placa – huella del INVÍAS:

- La longitud máxima de la placa-huella es de 2.80 metros. Como el ancho de la riostra siempre es de 0.20 metros, la longitud máxima de un módulo es de tres (3.00) metros y corresponde a la longitud del módulo en tangente.
- En las curvas horizontales la longitud de la placa-huella puede fluctuar entre un (1.00) metro y dos metros con ochenta centímetros (2.80 m).
- El ancho de la placa-huella en tangente es de 0.90 metros.
- Dependiendo de su deflexión y radio de curvatura las curvas horizontales pueden requerir placas-huella de anchos mayores. En la presente Guía se han establecido para las placas-huella en curva tres valores de ancho: 0.90 metros, un metro con treinta y cinco centímetros (1.35 m) y un metro con ochenta centímetros (1.80 m).
- El espesor de la placas-huella es de 0.15 metros.

### 3.3.7 RIOSTRA

En este caso:


- El ancho de la riostra es de 0.20 metros.
- El peralte de la riostra es de 0.30 metros. Dicha riostra se apoya totalmente sobre la superficie existente, es decir en la superficie sobre la que se construye la subbase, previa la colocación de un solado de limpieza de 0.03 metros de espesor.
- La longitud de la riostra es variable y se ajusta al ancho de la sección transversal sea ésta en tangente, en curva, en transición del sobreancho o en zona de cruce.

### 3.3.8 PIEDRA PEGADA

Ésta no tiene capacidad estructural y por lo tanto no requiere mecanismo de transmisión de esfuerzos con los otros elementos del pavimento con placa-huella.

La piedra pegada es una capa de concreto ciclópeo con espesor de 0.15 metros, conformada por un concreto ciclópeo, compuesto por 60.00% de concreto simple y 40.00% de agregado ciclópeo, con las siguientes características:

- Concreto simple:
  - Resistencia a la compresión a los 28 días  $f'c = 210.00 \text{ kg/cm}^2$ .
  - Tamaño máximo del agregado grueso  $T_{\text{máx.}} =$  Treinta y ocho milímetros (38.00 mm).
  - Asentamiento = 0.05 metros.

	VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO	
	INFORME	
	Documento: GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VI-INF-001-Rev1	
	Medellín, Antioquia, 12 de marzo de 2022	Página 46

- Agregado Ciclópeo:
  - Tamaño máximo del agregado  $T_{m\acute{a}x.}$  = entre 0.08 metros y 0.12 metros.
  - Deben ser cantos rodados.

Las demás características de los materiales deben cumplir con la Especificación 630 – 13 del Instituto Nacional de Vías.

### 3.3.9 BERMA-CUNETA Y BORDILLO

La berma-cuneta y el bordillo son elementos de drenaje superficial, los cuales serán construidos en concreto reforzado, vaciados monolíticamente y articulados estructuralmente con la riostra.

Aunque la solicitud sea eventual la berma-cuneta debe poder soportar los esfuerzos producidos por el vehículo de diseño y, por ende, el espesor, el refuerzo requerido y las características de los materiales deben ser similares a los utilizados en la placa-huella.

#### 3.3.9.1 Diseño estructural de la berma-cuneta y el bordillo

El manejo de drenaje se puede llevar a cabo mediante una o dos cunetas, según sea el caso, ubicadas cada una de estas en los extremos laterales. Para el presente proyecto, se implementará una sola cuneta.

**Nota:** Aunque la Guía de Diseño para Pavimentos con Placa – Huella del Instituto Nacional de Vías recomienda una cuneta, esta consultoría elaboró un estudio específico para esta, los diseños respectivos se presentan en los informes de Hidrología, Hidráulica y Socavación, Volumen VII (GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VII-INF-001-Rev0), y de Estructuras, Volumen VIII. (GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL VIII-INF-001-Rev0).

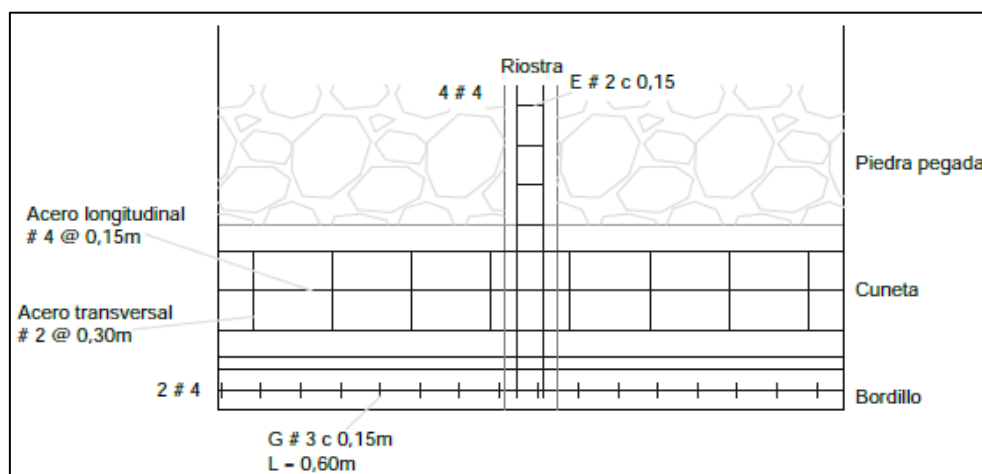


Figura 32. Planta de Berma-cuneta y bordillo [3]

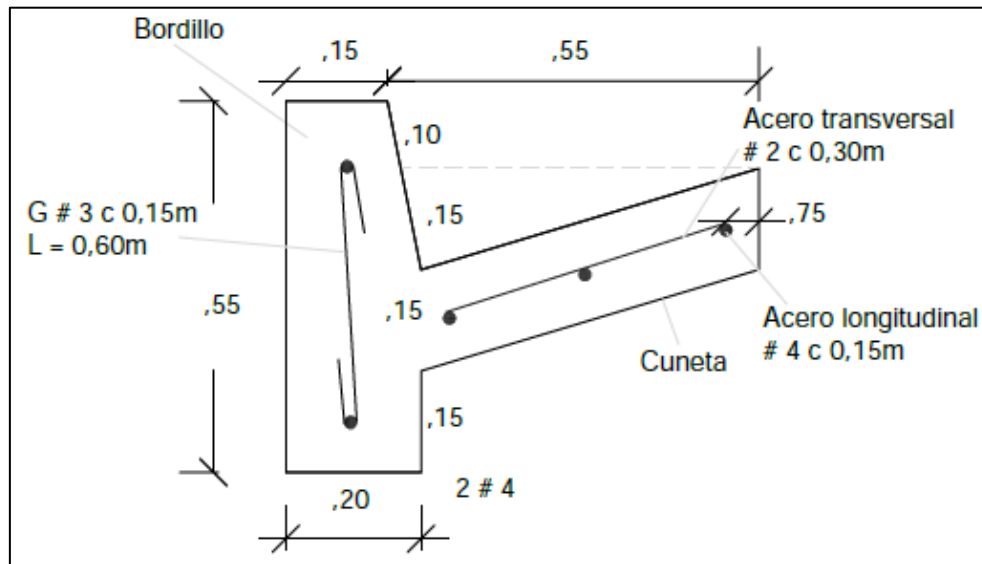


Figura 33. Corte Berma-cuneta sección en la Cuneta [3]

### 3.3.10 DIMENSIONES Y REFUERZO DE PLACA-HUELLA EN CONCRETO REFORZADO

La placa- huella tendrá las siguientes características:

- **Longitud**

La longitud puede fluctuar entre un valor mínimo de un metro (1.00 m) y un valor máximo de dos metros con ochenta centímetros (2.80 m).

- **Ancho**

Las placas-huella pueden ser de tres anchos:

- 0.90 metros.
- Un metro con treinta y cinco centímetros (1.35 m).
- Un metro con ochenta centímetros (1.80 m).

- **Espesor**

El espesor es igual para todos los tamaños de placa-huella (0.15 metros).

- **Refuerzo longitudinal**

Una varilla número 4 cada 0.15 metros (1 #4 @ 0.15).

La longitud de traslape de las varillas longitudinales #4 es de mínimo 0.60 metros.

- **Refuerzo transversal**

Una varilla número 2 cada 0.30 metros (1 #2 @ 0.30).

El acero de refuerzo se debe colocar en la mitad del espesor de la placa-huella, lo que implica un recubrimiento de 0.075 metros tanto en la cara superior como en la inferior.



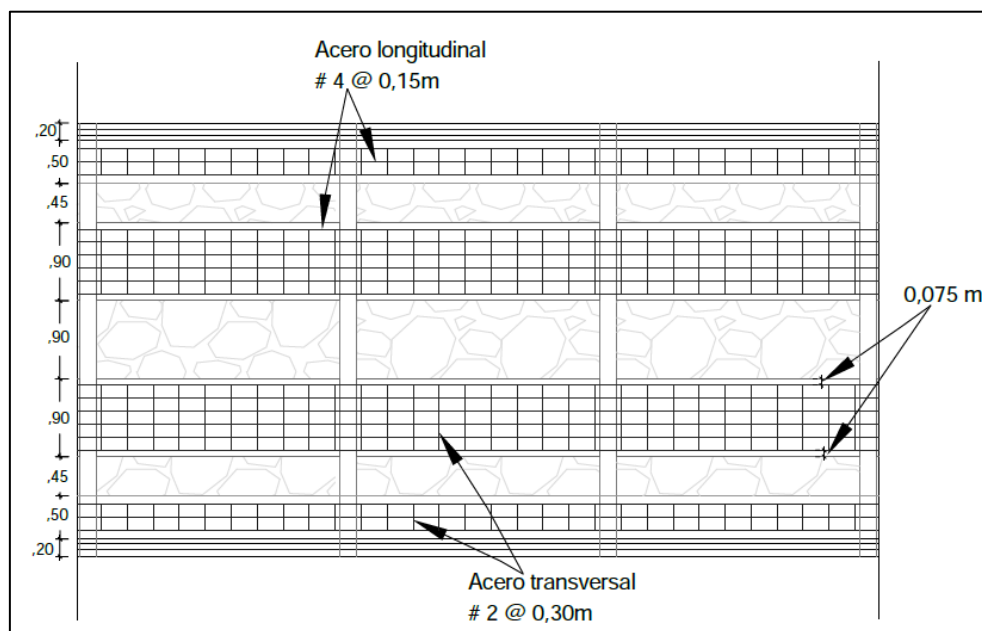


Figura 34. Planta de Distribución del refuerzo [3]

#### ▪ Textura superficial de la Placa-huella

La superficie de la Placa-huella debe tener una textura transversal homogénea en forma de estriado, que cumpla con lo indicado en el numeral 500.4.15 del Artículo 500 de las especificaciones INVIAS-2013.

### 3.3.11 DIMENSIONES Y REFUERZO DE LA RIOSTRA

El diseño estructural de la riostra tiene las siguientes características:

- **Longitud máxima:** 6.80 metros.
- **Ancho de la riostra:** 0.20 metros.
- **Peralte de la riostra:** 0.30 metros.
- **Refuerzo longitudinal:** Cuatro (4) carillas número 4 (4#4)

La longitud de traslape de las varillas longitudinales No. 4 es de mínimo 0.60 metros.

El recubrimiento de las varillas longitudinales #4 es de 0.075 metros en la parte inferior y de 0.04 metros en la parte superior.

- **Estribos:** Una varilla número 2 cada 0.15 metros (1#2 @ 0.15)

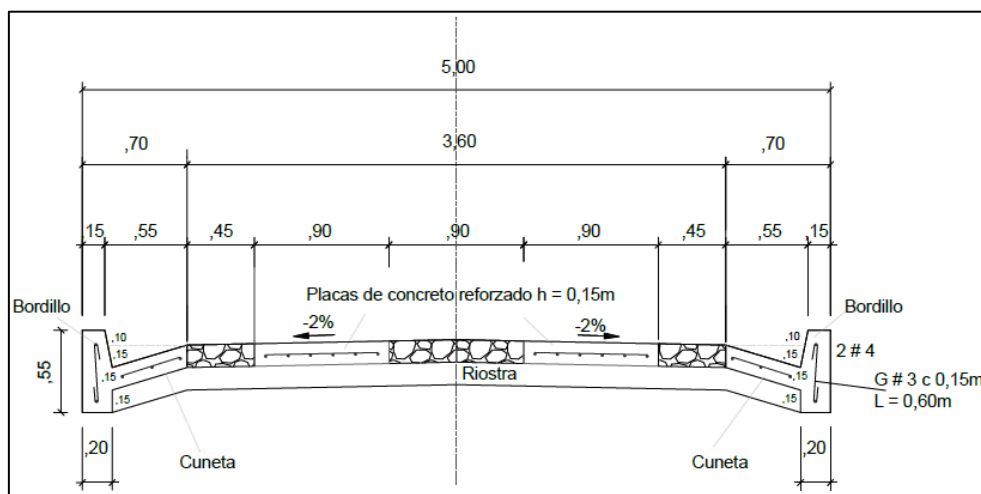


Figura 35. Corte transversal con detalles de refuerzo [3]

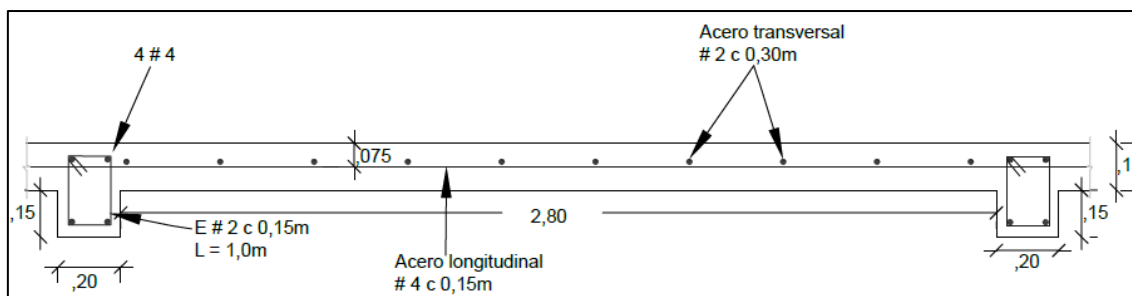


Figura 36. Corte longitudinal con detalles de refuerzo [3]

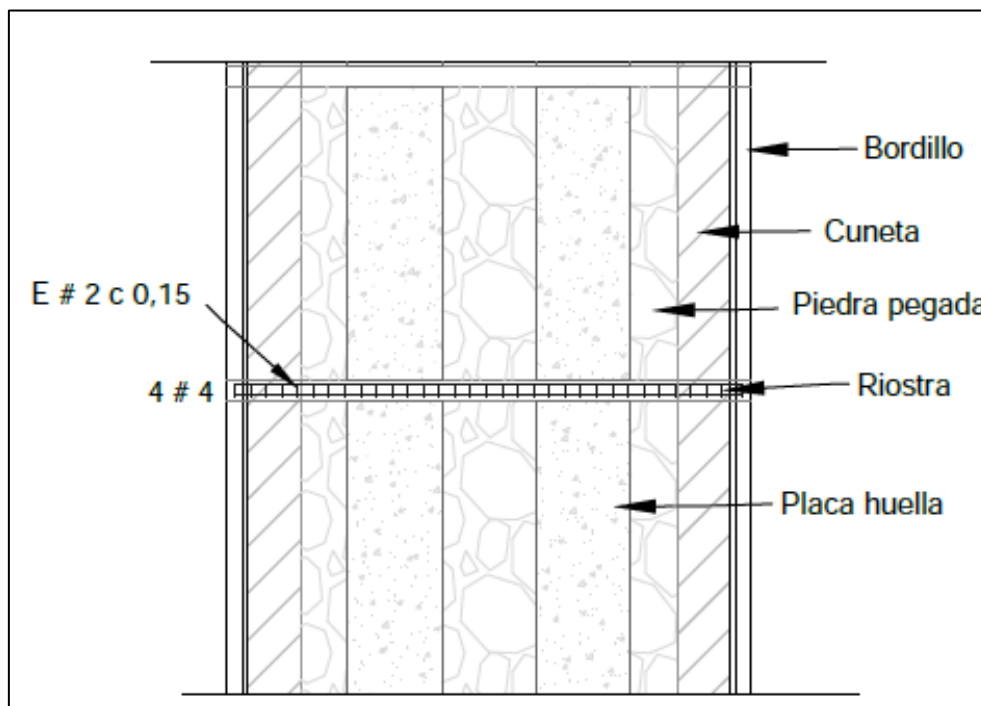


Figura 37. Planta de Riostra [3]

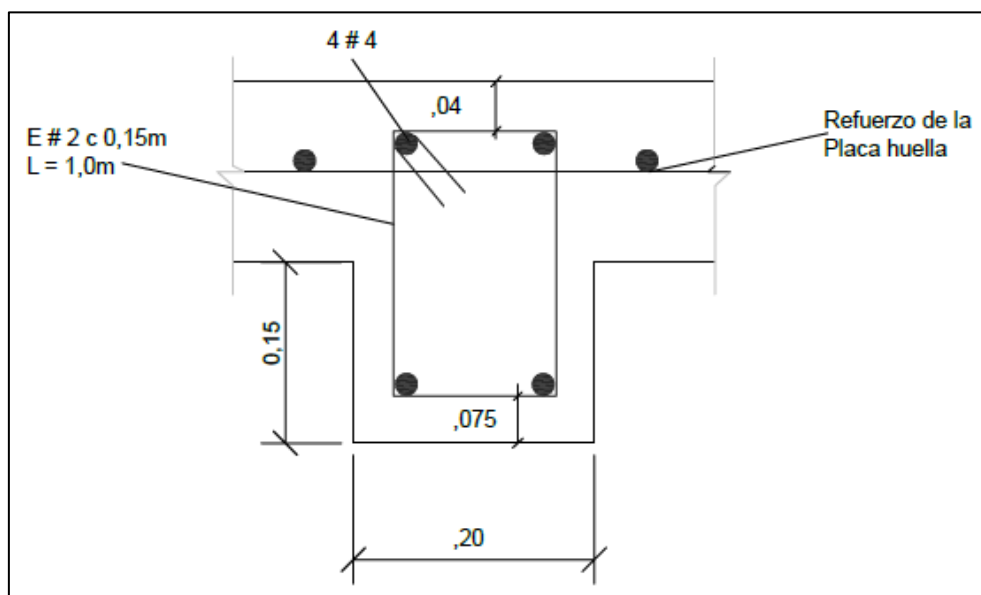
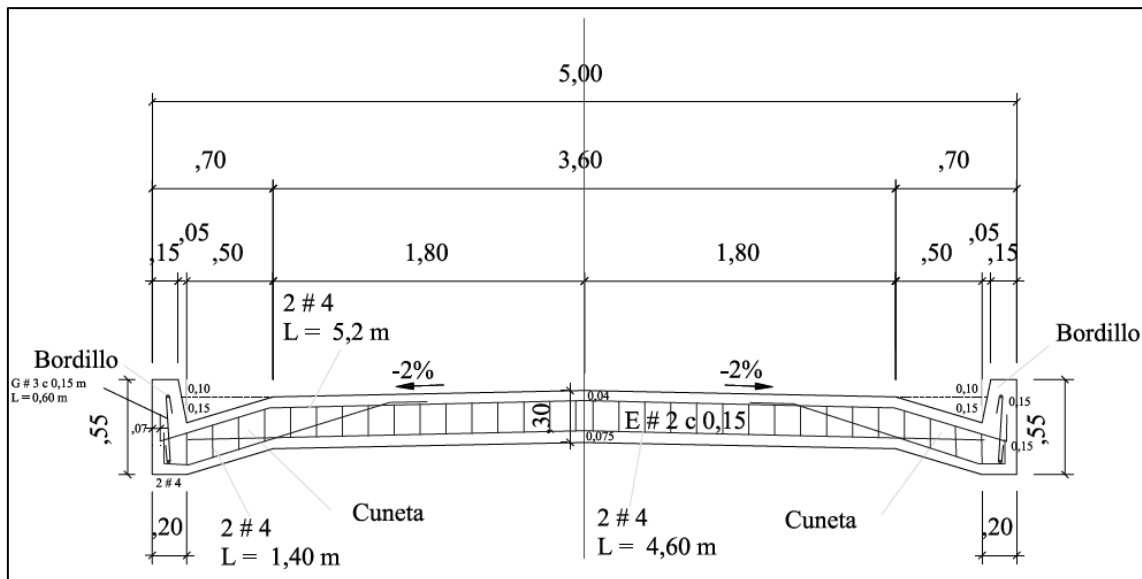


Figura 39. Corte transversal sección en placa huella [3]

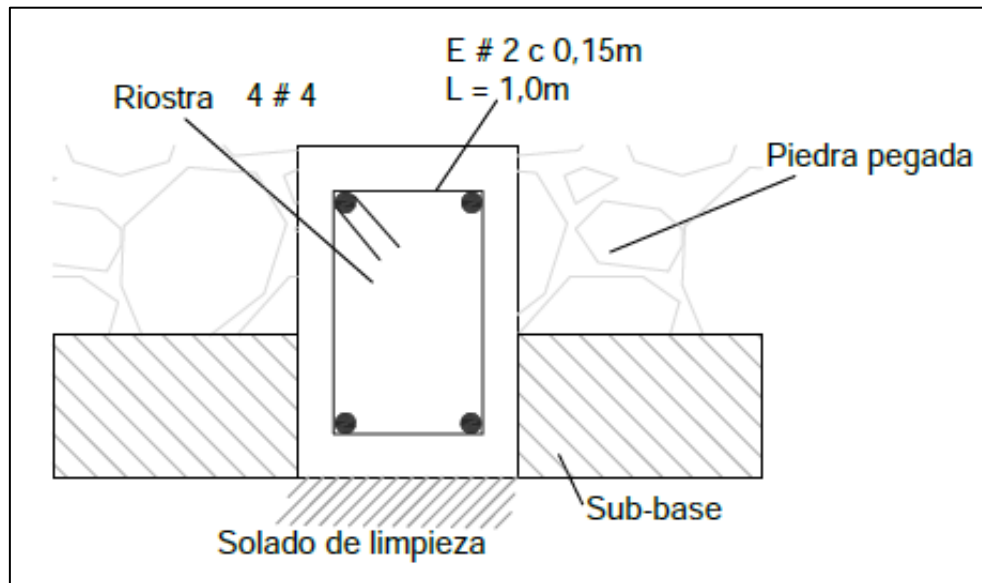


Figura 40. Corte transversal sección en piedra pegada [3]

### 3.3.12 JUNTAS

El proceso constructivo del pavimento en Placa-huella debe garantizar la adecuada transmisión de los esfuerzos y deformaciones a lo largo y ancho los elementos estructurales, con el fin de garantizar esto, se muestran a continuación los detalles de las diferentes juntas de construcción.

#### 3.3.12.1 Junta transversal de construcción

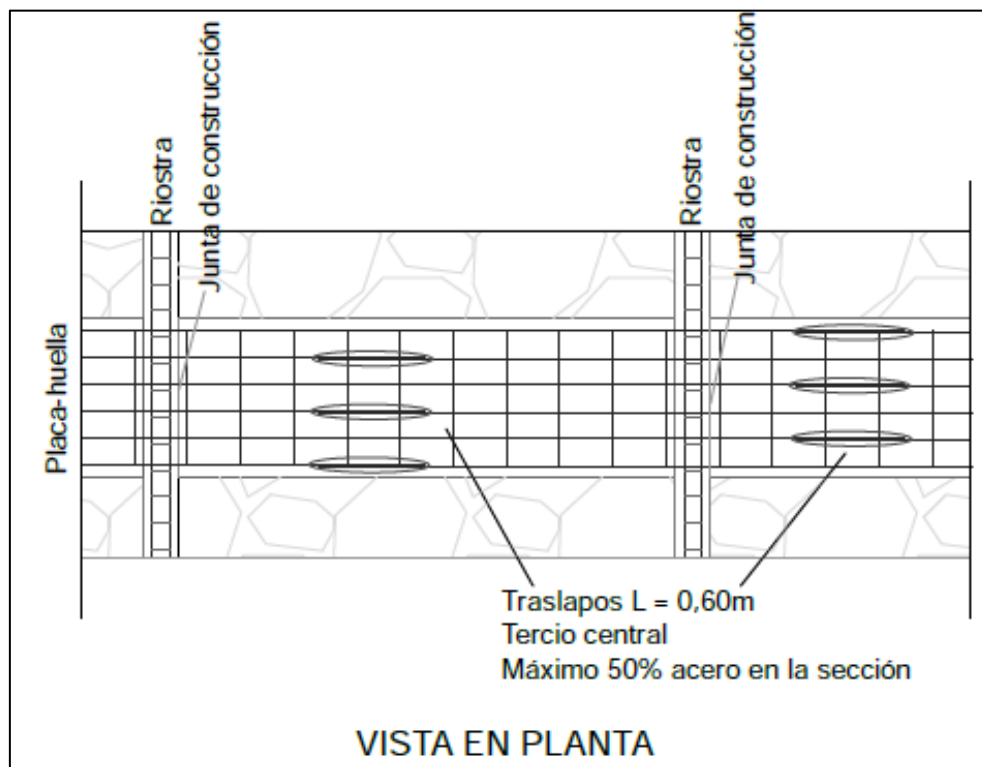


Figura 41. Junta transversal de construcción en la Placa-huella [3]

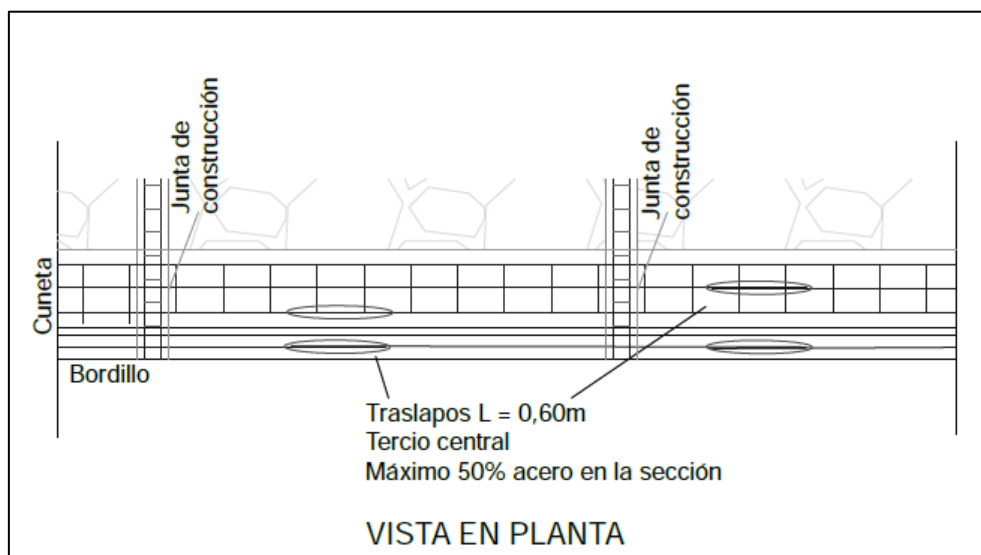


Figura 42. Junta transversal de construcción en la Berma-cuneta [3]

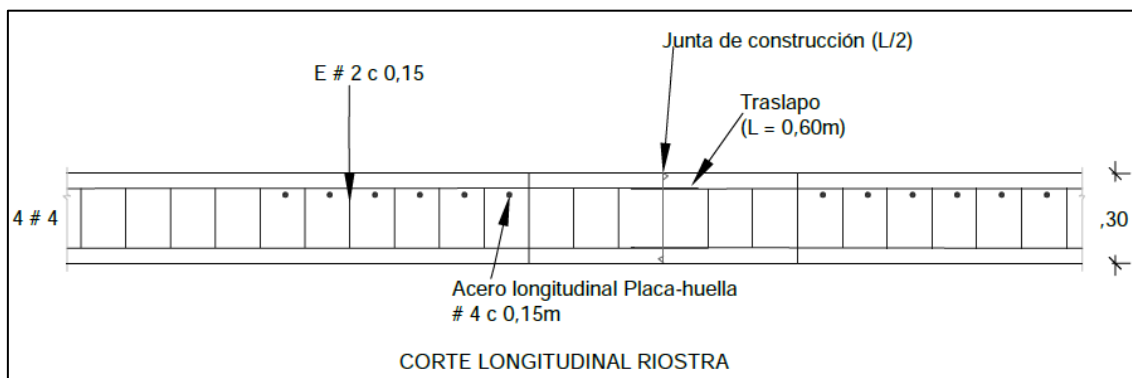


Figura 43. Junta transversal de construcción en la Riostra [3]

### 3.3.12.2 Junta longitudinal de construcción

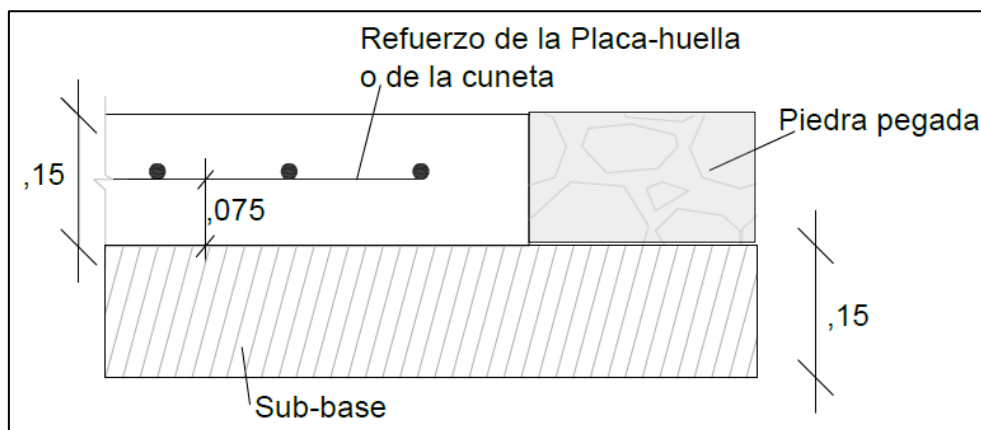


Figura 44. Junta longitudinal entre Placa-huella o Berma-cuneta y la Piedra pegada [3]

## 4 CONCLUSIONES

Terminado este trabajo de diseño de pavimentos de la vía que conduce de Dabeiba a Camparrusia en el departamento de Antioquia, exactamente del km 2+950 al km 5+900 y del km 6+000 al km 11+090, se concluye que:

- El valor de módulo de reacción de la subrasante (K) es 96.00 MPa/m, se estableció con base en un CBR de 30% puesto que a los 0.90 metros de profundidad se presenta roca. Lo anterior permitió determinar un valor de 220.38 MPa/m como la resistencia del conjunto subrasante – material granular tratado con cemento (Kc), teniendo como fundamentos los datos de la PCA-84 y que se espera estabilizar 200 mm del material de afirmado existente.
- Se determinó adicionar cal viva en 1.50% al material granular existente, con el fin de reducir la plasticidad en los tramos donde se presentan índices de plasticidad (IP)  $\geq 12\%$  y un contenido óptimo de cemento igual a 3.00%, este porcentaje se determinó a partir del ensayo de resistencia a la compresión simple para garantizar un valor mínimo de 13,00 kg/cm<sup>2</sup>.
- Se establecieron diferentes secciones de banca de ancho que van entre 2.50 metros hasta los 5.70 metros, para las cuales se determinaron diferentes longitudes máximas de las losas, teniendo como base los distintos criterios técnicos que respecto al tema se tienen para ello (ver apartado 3.2.5), así:

**Tabla 33. Dimensiones consideradas para los anchos de banca**

ANCHO DE LOSA (m)	LONGITUD MÁXIMA DE LOSA (m)
1.60	2.00
1.80	2.10
2.00	2.10
2.25	2.80
2.50	3.10
2.75	3.40
3.00	3.60
3.25	3.60
3.50	4.40

- En virtud de la geometría de la sección y, en particular, del hecho de que no se puede garantizar que la operación de los vehículos comerciales estará alejada de los bordes de las losas; se adoptó la no existencia del efecto de aporte de una berma.
- El espesor de la losa de concreto hidráulico, mediante el método de diseño de la PCA-84, arrojó unos porcentajes de erosión y fatiga de 56.97% y 25.58%, respectivamente. Se hizo posteriormente su verificación con el análisis de esfuerzos, encontrando que el espesor seleccionado, no supera el esfuerzo máximo admisible.
- El espesor para la estructura de pavimento rígido del tramo en estudio se determinó en **170 mm**, para un módulo de rotura de 4.20 MPa, apoyada en una capa de material granular tratado con cemento de espesor **200 mm**.
- El mecanismo de transferencia de carga entre las losas de concreto se establece con pasadores de carga (dovelas), de diámetro 7/8" y longitud de 0.35 m, separadas cada 0.25 m o 0.30 m, según el ancho de la losa.

**Tabla 34. Dovelas o pasadores en juntas transversales**

ANCHO DE LOSA (m)					ESPESOR LOSA (mm)	DIÁMETRO DEL PASADOR (Pulg.)	LONGITUD TOTAL (mm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS (mm)
1.60	1.80	2.00	2.25		170	7/8"	350	250
2.50	2.75	3.00	3.25	3.50				300

- Las barras de anclaje (en acero corrugado) son de una resistencia a la fluencia 2800 kg/cm<sup>2</sup> (40000 psi), con un diámetro de 1/2" y longitud 0.60 m, separadas cada 1.20 metros para las losas de ancho menor o igual a tres (3) metros y 1.10 m para las losas de ancho mayor a tres (3) metros.

**Tabla 35. Barras de anclaje en juntas longitudinales**

ANCHO DE LOSA (m)							ESPESOR LOSA (mm)	DIÁMETRO BARRA DE ANCLAJE (Pulg.)	LONGITUD TOTAL (mm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS (mm)
1.60	1.80	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	170	1/2"	600	120
3.25			3.50							110

- Las losas de dimensión irregular (en intersecciones, zonas de curva) o donde la relación largo - ancho supere el valor especificado, se deben reforzar con una parrilla de 12.70 mm (½") de diámetro ubicada a partir de la superficie superior de la losa a 1/3 de su espesor (0.06 m), considerando una separación de las barras de 0.33 m, y un recubrimiento de 0.07 m en los bordes de la losa y 0.12 m desde las dovelas, lo que se podrá apreciar en los planos GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL-VI-MOD.LOSAS-PAV-PL-32 y GICA-630-DAB.-CAMP.-VOL-VI-MOD.LOSAS-PAV-PL-33.
- Debido a que las cunetas soportarán carga vehicular, estas deben ser construidas considerando el mismo tipo de concreto que el establecido para el pavimento rígido.
- La construcción de pavimento en concreto hidráulico (rígido) requiere menor cantidad de acero en comparación a la construcción de pavimento en placa-huella, por lo cual, es la alternativa de menor costo.

## 5 RECOMENDACIONES

- Dado que, la resistencia de los materiales que conforman la estructura de pavimento se ve influida en un alto grado por la condición de humedad de los mismos, éstos deberán protegerse de manera efectiva mediante un buen sistema de drenaje que reciba, capte y evacúe de manera rápida las aguas superficiales y subterráneas en la zona de influencia del pavimento, de modo que, debido a los cambios de humedad que se puedan presentar por los períodos de lluvia y sequía de la zona, no se presenten altas variaciones en la resistencia de los materiales.
- Es necesario llevar a cabo una política permanente de mantenimiento periódico y rutinario de la vía, dado que, sin esto, las curvas de deterioro del proyecto tendrían forma exponencial.
- Para la aplicación del diseño consignado en este documento, deberá cumplirse a cabalidad en obra con las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías, vigentes al momento de cerrar el respectivo proceso de contratación del proyecto objeto del presente documento.
- En los casos en que las losas sean de dimensiones irregulares (en intersecciones, por ejemplo), zonas de curva o donde la relación largo - ancho supere el valor especificado se debe emplear el acero de refuerzo.
- GICA SAS presenta el documento denominado Proceso Constructivo, allí se encuentra una serie de recomendaciones para la construcción del pavimento de concreto hidráulico, con miras a que sean tenidas en cuenta, a fin de garantizar la calidad de la obra.
- Se recomienda que durante la construcción de la estructura de pavimento se realicen ensayos de placa para verificar el valor de módulo de reacción del conjunto establecido en el diseño.

## 6 REFERENCIAS

- [1] American Association of State and Highway Transportation Officials, AASHTO guide for Design of Pavement Structures, Washington D.C., 1993.
- [2] The Indian Roads Congress, GUIDELINES FOR THE DESIGN OF RIGID PAVEMENTS FOR HIGHWAYS, 2002.
- [3] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella, 2015.
- [4] A. R. y. H. d. Castillo, La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres, México: Limusa, 1978.
- [5] R. Williams, Cement - Treated Pavements: Materials, Design and Construction, Inglaterra: ELSEVIER, 1986.
- [6] C. A. Londoño Naranjo, Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos de Concreto, Medellín, 2001.
- [7] American Concrete Institute - ACI, Guide to Curing Concrete, 2002.
- [8] Instituto Nacional de Vías - INVÍAS, Instituto Colombiano de Productores de Cemento - ICPC, Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, Medellín, 2008.
- [9] Federal Highway Administration, Technical Advisory - Concrete Pavement Joints, 2019.