DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO



SEPTIEMBRE DE 2024

CONTROL DE REVISIONES		
REV	**FECHA**	**DESCRIPCIÓN**
1	(SEPTIEMBRE–2024)	PRIMERA ENTREGA DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

CONTROL DE COPIAS	
No. Copias	Física/Digital
1	Digital

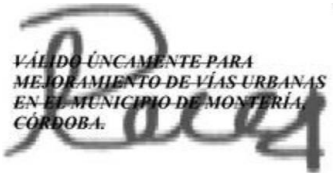
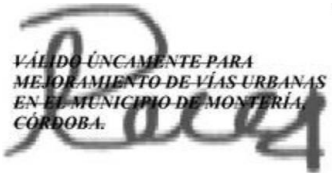
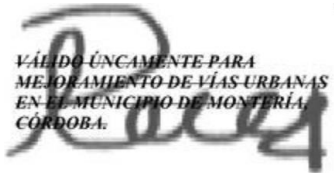
Elaboró:	Revisó:	Aprobó:
		
ERWIN LUDWIG POLO OSORIO	ERWIN LUDWIG POLO OSORIO	ERWIN LUDWIG POLO OSORIO
INGENIERO CIVIL M.P. 091037-0559420 CND	INGENIERO CIVIL M.P. 091037-0559420 CND	INGENIERO CIVIL M.P. 091037-0559420 CND

TABLA DE CONTENIDO

1 RESUMEN EJECUTIVO 8
2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 9
3 RESULTADOS DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO 12
3.1 Clasificación primaria 12
3.2 CBR de laboratorio 12
3.3 Resultados de exploración y caracterización del subsuelo 13
4 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS 14
4.1 Clasificación del suelo. 14
4.2 Determinación del grado de expansión: 14
4.3 Presencia de nivel freático: 16
4.4 CBR de diseño 16
5 DESCRIPCIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE 16
5.1 Condiciones de la subrasante: 17
5.2 Metodología de Ivanov para selección de espesor mínimo de mejoramiento 17
5.3 Metodología por separación de subrasante en vías, capitulo 4 manuales de diseño PAVCO. 20
5.4 Modelo seleccionado 26
6 DETERMINACIÓN DEL MODULO DEL CONJUNTO Y ESPESOR DE SUBBASE 27
6.1 Determinación del módulo de reacción de la subrasante 27
6.2 Determinación del módulo del conjunto y espesor de la subbase 28
7 ANÁLISIS DEL TRANSITO 29
8 DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ROTURA 31
9 DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO 31
9.1 Parámetros de entrada software BS-PCAA 31
9.2 Pre-dimensionamiento de la losa de concreto por el método de la AASHTO 34
9.3 Dimensionamiento de la losa de concreto por el método de la PCA 40
9.4 Variables para el dimensionamiento de la losa de concreto 40
9.5 Análisis de fatiga 42
9.6 Análisis de Erosión 45
10 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 50
11 DISEÑO DE JUNTAS 51
11.1 Juntas Longitudinales y barras de anclaje 52

11.2 Juntas de Expansión o aislamiento 54
11.3 Juntas Transversales y pasadores (Transferencia de cargas). 54
11.4 Sellado de Juntas..... 57
12 MODULACIÓN DE LOSAS DE CONCRETO..... 58
12.1 Control esfuerzos por cambio uniforme de temperatura..... 58
12.2 Control esfuerzos internos por gradientes térmicos (alabeo)..... 59
12.3 Control geométrico 64
13 RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS 66
14 CONCLUSIONES 71

GRAFICAS

Grafica 1 Selección del módulo de reacción en función del CBR equivalente.. 27
Grafica 2 Grafica para hallas factor de ajuste por efecto de ubicación del camión. 44
Grafica 3 Carta de Bradbury para hallar los coeficientes de alabeo Cx y Cy. 61

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Localización general del proyecto..... 10
Ilustración 2 Localización especifica del proyecto. 10
Ilustración 3 Localización de los apiques..... 13
Ilustración 4 Modelo estructural de mejoramiento de la subrasante metodología IVANOV. 19
Ilustración 5 Estructura de pavimento con geotextil de separación. 21
Ilustración 6 Geotextil resistencia al estallido..... 22
Ilustración 7 Geotextil resistencia a la tensión..... 23
Ilustración 8 Punzonamiento causado por una partícula al g**e**otextil. 23
Ilustración 9 Propiedades mecánicas del geotextil a seleccionar. 26
Ilustración 10 Modelo estructural de mejoramiento y separación de la subrasante. 26
Ilustración 11 Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K..... 28
Ilustración 12 Distribución de esfuerzos sobre una estructura de pavimento rígido..... 29
Ilustración 13 Expresiones para hallar el Ec en función del tipo de agregado..... 37
Ilustración 14 Carta para corregir el módulo de reacción efectivo de la subrasante por pérdida potencial de soporte de la subbase. 39

Ilustración 15 Pre-dimensionamiento espesor losa de concreto método de la AASHTO SBG 15 cm para el barrio Monteverde. 40

Ilustración 16 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 19 cm para el barrio Monteverde. 48

Ilustración 17 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 20 cm para el barrio Monteverde. 49

Ilustración 18 Modelo seleccionado en dimensionamiento. 50

Ilustración 19 Ubicación de los tipos de juntas. 52

Ilustración 20 Esquema para construcción de juntas longitudinales. 52

Ilustración 21 Ubicación de juntas longitudinales. 53

Ilustración 22 Sección típica para la ubicación de las barras de anclaje y construcción de junta. 54

Ilustración 23 Posición de las juntas de expansión. 54

Ilustración 24 Sección típica ubicación de las barras de transferencia y construcción de junta. 56

Ilustración 25 Posición de las juntas transversales. 56

Ilustración 26 Isométrico colocación de barras de transferencia. 57

Ilustración 27 Isométrico losas de concreto y juntas. 57

Ilustración 28 Detalle construcción de juntas 58

Ilustración 29 Comportamiento de alabeo teórico diurno y nocturno. 60

Ilustración 30 Losa con esfuerzos. 60

Ilustración 31 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección centrados. 64

Ilustración 32 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre una losa. 65

Ilustración 33 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre más de una losa. 65

Ilustración 34 Representación gráfica de la construcción de varios pozos de inspección sobre una losa. 66

Ilustración 35 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares. 66

Ilustración 36 Representación gráfica de una óptima modulación de losas de concreto. 68

Ilustración 37 Representación gráfica de fisuras por alabeo. 68

Ilustración 38 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares. 69

Ilustración 39 Losas de pavimento existente. 70

TABLAS

Tabla 1 Nomenclatura de las vías a intervenir. 11
Tabla 2 Localización de los apiques. 12
Tabla 3 Resultados de la exploración del subsuelo en el apique ubicado en el punto. 14
Tabla 4 Predicción de la expansividad a partir del límite líquido. 15
Tabla 5 Predicción de la expansividad a partir del IP. 15
Tabla 6 Verificación del grado de expansión de las muestras. 16
Tabla 7 Selección del CBR de diseño. 16
Tabla 8 Definición de la subrasante en función del % que pasa el tamiz No 200. 17
Tabla 9 Clasificación del suelo según el CBR de la subrasante. 18
Tabla 10 Capacidad de soporte equivalente metodología IVANOV. 19
Tabla 11 Espesores recomendados de sustitución de subrasante. 20
Tabla 12 Valores de ε en función de la elongación. 22
Tabla 13 Factor de forma de la partícula del material a utilizar. 24
Tabla 14 Requisito de materiales de terraplén (mejoramiento) 24
Tabla 15 Parámetros para chequeo mecánico. 24
Tabla 16 Propiedades hidráulicas requeridas. 25
Tabla 17 Parámetros calculados. 25
Tabla 18 Geotextiles recomendados. 25
Tabla 19 Propiedades del geotextil de separación Articulo 231 INVIAS. 25
Tabla 20 Selección del módulo del conjunto en función del espesor de la subbase y módulo de la subrasante. 28
Tabla 21 Módulo de reacción y modulo del conjunto de los diferentes tramos viales 29
Tabla 22 Calculo del número de ejes equivalentes Estación de Conteo 3. 30
Tabla 23 Información para el cálculo de espectro de carga Estación de Conteo 3. 31
Tabla 24 Resistencia que debe alcanzar el concreto. 31
Tabla 25 Calculo del radio de carga en función del radio de la llanta. 32
Tabla 26 Selección separación de las llantas 32
Tabla 27 Selección ancho de ejes. 33
Tabla 28 Selección separación de ejes. 33
Tabla 29 Cargas patrón y exponenciales para el cálculo del Factor de equivalencia. 33

Tabla 30 Factor de seguridad de carga. 34
Tabla 31 Niveles de confiabilidad. 35
Tabla 32 Valores de Zr en función de la confiabilidad. 35
Tabla 33 Capacidad del drenaje para remover el agua. 36
Tabla 34 Valores de coeficiente de drenaje 36
Tabla 35 Coeficiente de transmisión de cargas. 37
Tabla 36 Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. 37
Tabla 37 Calculo del módulo de elasticidad del concreto. 38
Tabla 38 valores del factor de perdida de soporte Ls en función del tipo de base o subbase. 38
Tabla 39 Valores del coeficiente de expansión térmica del concreto. 42
Tabla 40 Intervalos para el Análisis de Sensibilización. 50
Tabla 41 Análisis de Sensibilización. 51
Tabla 42 Tabla para la selección de las barras de anclaje. 53
Tabla 43 Espaciamiento de juntas transversales, según el tipo de agregado del concreto. 55
Tabla 44 Recomendaciones para la selección de barras de transferencia de carga. 56
Tabla 45 Valores del factor de fricción. 59
Tabla 46 Variables para el cálculo de esfuerzos de bordes e internos. 62
Tabla 47 Línea de tendencia para cálculo de CX y CY 62
Tabla 48 Calculo y verificación de esfuerzos de borde 63
Tabla 49 Calculo y verificación de esfuerzos internos 63
Tabla 50 Uso típico de las diferentes subbases granulares. 67
Tabla 51 Categoría de tránsito de acuerdo con INVIAS 2013. 68
Tabla 52 Estructura pre-dimensionada pavimentos rígido. 71
Tabla 53 Estructura dimensionada pavimentos rígido. 71

ANEXOS

ANEXO 1 PLANOS DE DETALLES CONSTRUCTIVOS.
ANEXO 2 PLANO MODULACIÓN DE LOSAS.
ANEXO 3 MEMORIAS DE CALCULO ACERO PARA LOSAS REFORZADAS.

1 RESUMEN EJECUTIVO

Para el desarrollo y mejoramiento de un municipio desde la infraestructura vial, es necesario diseñar tanto geométrica como estructuralmente las vías de un proyecto y sus alrededores. Este informe se centra en calcular y dimensionar la estructura de pavimento. A continuación, se hace un breve resumen que describe en términos generales el contenido y los parámetros de diseño empleados. Es necesario aclarar que el insumo principal para el diseño del pavimento rígido en proyectos urbanísticos es el estudio de suelos, el cual fue realizado por la entidad INGELABCON S.A.S, en calidad de subcontratista de esta consultoría. A continuación, se hace un breve resumen que describe en términos generales el contenido y los parámetros de diseño empleados.

En el **numeral 2** se realiza una descripción de la zona de influencia del proyecto, donde se describe la localización geográfica del proyecto ilustrando con imágenes satelitales de Google Earth la ubicación espacial de las vías a intervenir. Adicional en este apartado se realiza una descripción con la nomenclatura de la vía de estudio con su ancho y longitud por tramo.

En el **numeral 3 y 4** se describen los diferentes resultados y parámetros geotécnicos (CBR) considerados para el diseño de la estructura del pavimento rígido. Como primera medida se describe la exploración de campo como resultado de ***4 PDC*** a lo largo de todo el proyecto**.** Por último, se realiza una descripción de los parámetros geotécnicos a considerar durante el diseño de la estructura de pavimento, el cual es el CBR de la subrasante.

En el **numeral 5** se realiza la descripción y mejoramiento de la subrasante para lo cual se utiliza metodologías que permiten dimensionar el espesor de la capa de mejoramiento y la protección más acorde al tipo de suelo y carga esperada, que permite determinar en función del módulo de la subrasante y el módulo del material de mejoramiento el espesor de la subrasante a mejorar.

En el **numeral 6** se realiza la determinación del módulo de reacción de la subrasante y del conjunto con el fin de definir el espesor de la subbase granular.

En el **numeral 7** se realiza el análisis de tránsito para el cálculo del número de ejes equivalentes. Con la información obtenida se realiza la determinación del tránsito promedio diario TPD, adicional se realiza una mayoración para aumentar la confiabilidad y se selecciona el periodo de diseño.

En el **numeral 8** se realiza la selección del módulo de rotura, el cual será seleccionado en función del número de camiones diarios que pasarán en la vía para los años de serviciabilidad y la funcionabilidad definida en el diseño geométrico.

Para el pre-dimensionamiento del espesor de la losa de concreto se utilizará la metodología de la AASHTO. Con el pre-dimensionamiento del espesor de la losa de concreto se procede a verificar los esfuerzos por fatiga y la deflexión por erosión para posteriormente verificar el porcentaje de consumo; este chequeo se realizará por la metodología de la PCA, si es necesario se cambiará el espesor de la losa de concreto para garantizar que el porcentaje de consumo sea inferior al 85%. Ver **numeral 9.**

Una vez dimensionada la losa de concreto se procede a realizar un análisis de sensibilidad cuya finalidad es presentar diferentes alternativas de diseño relacionando diferentes variables y así

presentarle al contratante variables en función de los cambios constructivos que se puedan presentar. Ver **numeral 10.**

En el **numeral 11** se realiza el diseño de juntas longitudinales, transversales y de expansión, adicional se presentan los diferentes tipos de aceros a utilizar para la fundación de las losas de concreto.

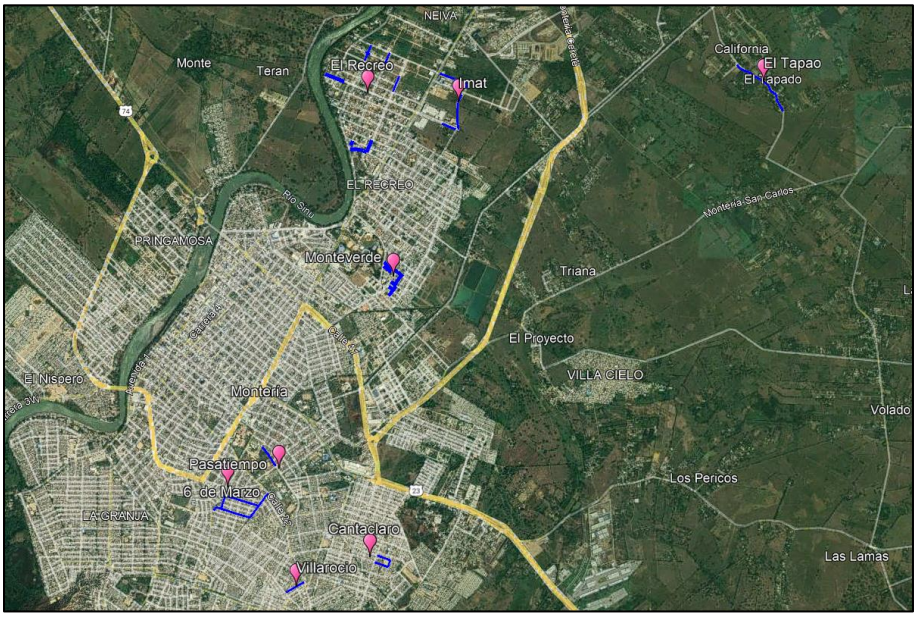
En el **numeral 12** se puede evidenciar los chequeos para la modulación de las losas de concreto y las dimensiones seleccionadas para controlar los cambios uniformes de temperatura (esfuerzo por tracción admisible) y los esfuerzos que se generen por gradiente térmico (esfuerzos por alabeo).

Por último, en el **numeral 13 y 14** se consignan una serie de recomendaciones constructivas las cuales se recomienda respetar con el fin de garantizar un buen desarrollo de la estructura de diseño y una alta precisión de las cantidades de obra durante la ejecución del proyecto. También se consignan las conclusiones relacionadas con el tipo de estructura a emplear.

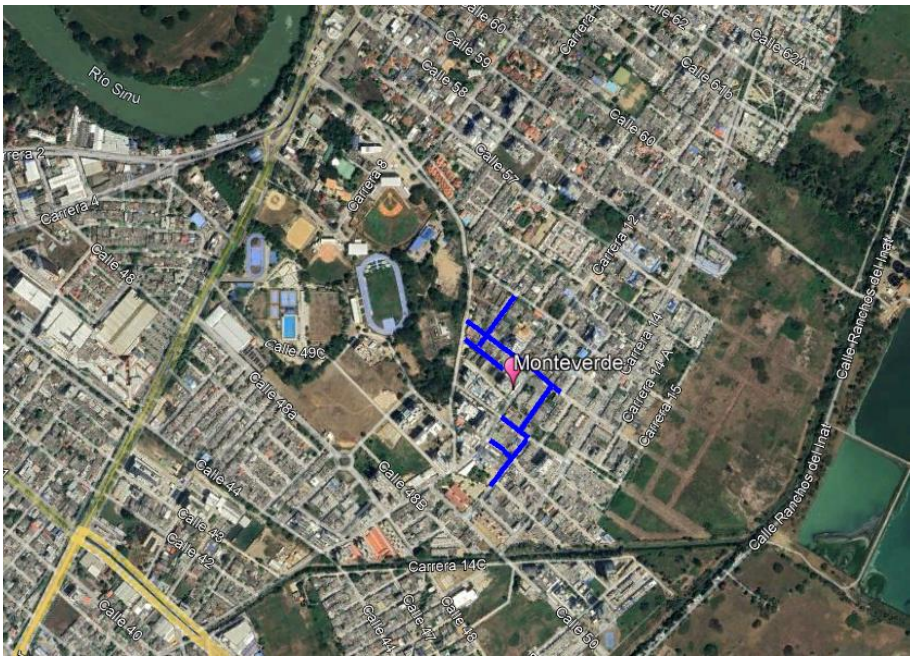
2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

Montería es un municipio colombiano, capital del departamento de Córdoba. Está ubicado al noroccidente del país en la región Caribe Colombiana, se encuentra a orillas del río Sinú, por lo que es conocida como la "Perla del Sinú". Es considerada la capital ganadera de Colombia; anualmente celebra la feria de la Ganadería durante el mes de junio. Es además, un importante centro comercial y universitario, reconocida como una de las ciudades colombianas con mayor crecimiento y desarrollo en los últimos años y por impulsar el desarrollo sostenible.

El proyecto en estudio se localiza en zona urbana del municipio de Montería. En la **Ilustración 1** y la **Ilustración 2** se observa la localización general y especifica de la vía objeto de estudio respectivamente, de igual forma, la **Tabla 1** se muestran las vías con sus características de ancho, longitud y nomenclatura.



Fuente: Google Earth.
Ilustración 1 Localización general del proyecto.



Fuente: Google Earth.
Ilustración 2 Localización especifica del proyecto.

Barrio	Nomenclatura Catastral	Ancho de calzada (m)	Ancho de Bordillo (m)	Ancho de Anden (m)	Longitud del tramo (m)	Funcionalidad	Tipo de terreno
MONTEVERDE	A-1 CALLE 54 ENTRE CRA 13 Y CRA 11	6.00	0.20	1.00	129.72	Locales y Paisajísticas	Plano con pendientes entre 0% a 3.0%
	A-2 CALLE 54 ENTRE CRA 11 Y CRA 12	3.50	0.20	1.00	21.191		
	A-3 CALLE 54 ENTRE CRA 12 Y CRA 13	7.00	0.20	1.00	73.861		
	A-4 CALLE 53A DESDE CARRERA 11	6.00	0.20	1.00	109.747		
	A-5 CARRERA 11A ENTRE CALLE 55 Y 53A	6.00	0.20	1.00	138.364		
	A-6 CRA 12A ENTRE CALLE 53 Y 54	6.00	0.20	1.00	116.768		
	A-7 CALLE 53 ENTRE CRA 12 Y 14D	6.50	0.20	1.00	72.944		
	A-8 CALLE 52 ENTRE CRA 12 Y 14D	7.00	0.20	1.00	68.8		
	A-9 CRA 14D ENTRE CALLE 52 Y 53	3.50	0.20	1.00	37.253		
	A-10 CRA 14D ENTRE CALLE 51 Y 52	3.50	0.20	1.00	89.369		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1 Nomenclatura de las vías a intervenir.

3 RESULTADOS DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO

La firma consultora "INGELABCON S.A.S". La cual realiza el estudio de suelos del cual se tomará como referencia los resultados encontrados los cuales serán de suma importancia para el análisis y diseño de pavimento.

3.1 Clasificación primaria

Con la finalidad de caracterizar el suelo de soporte fue necesario realizar ***4 pdc*** tomando diferentes muestras por cada apique. En el estudio geotécnico se puede observar los resultados de la clasificación primaria, la cual es de gran importancia para el diseño de pavimento. De esta clasificación serán de gran importancia algunas características geotécnicas que serán mencionadas y descritas más adelante.

3.2 CBR de laboratorio

Para el diseño de un pavimento rígido, la condición de la subrasante juega un papel fundamental para poder desarrollar un diseño óptimo, por tal motivo es necesario conocer su potencial expansivo y su capacidad portante la cual es expresada por medio de la resistencia al corte o rigidez bajo carga cíclica. Para este diseño se utiliza el ensayo desarrollado por Stanton y Porter en 1929 "CBR Californian Bearing Ratio". En Colombia este ensayo se realiza bajo los lineamientos que se especifican por INVIAS (INV. E-148-13), basado en AASHTO 193-72. En este ensayo el CBR se determina como parámetro mecánico y puede ser realizado in situ o en laboratorio. Cabe resaltar que, para caracterizar la subrasante en laboratorio, se debe realizar sobre muestras inalteradas, dicho de otra forma, no se puede cuantificar de manera directa este parámetro mecánico sobre suelos friccionantes o gruesos (gravas y arenas).

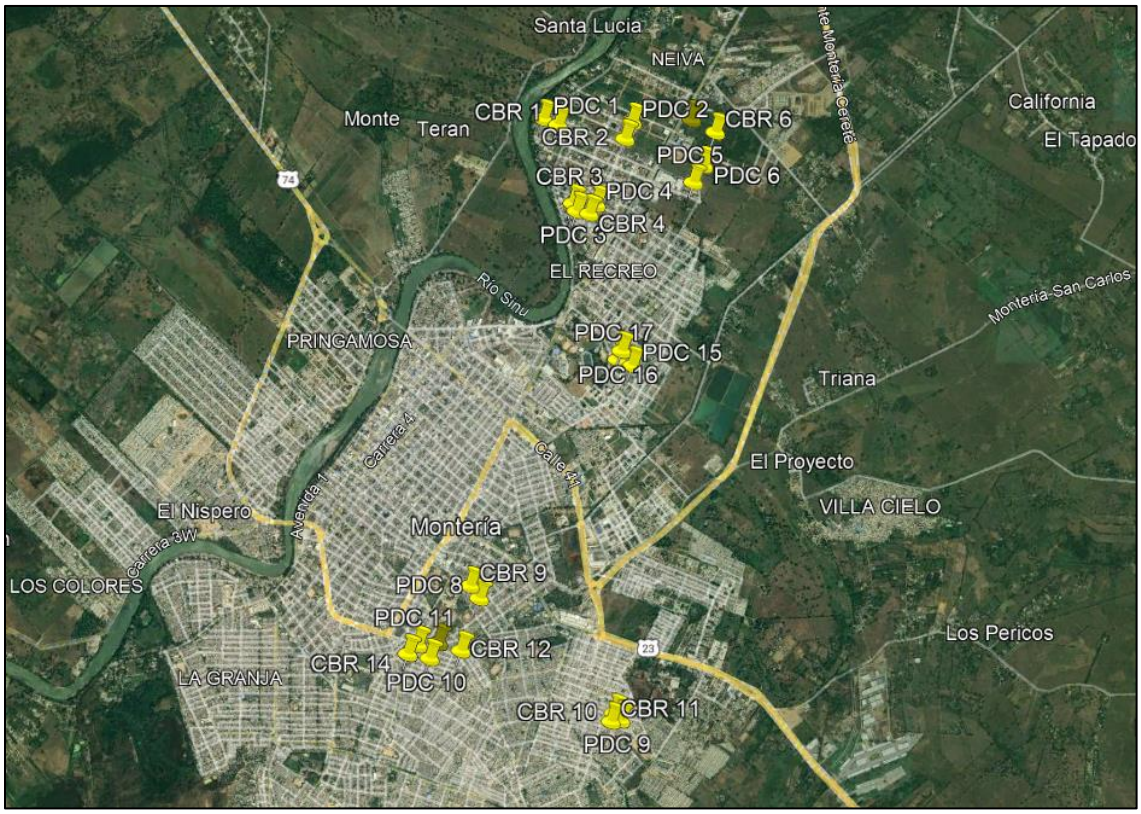
De los ***4 pdc*** realizados en campo, se obtuvieron ***4 CBR*** distribuidos espacialmente a lo largo de las vías, los cuales se tomaron para el cálculo del CBR de diseño, así se logró valorar el comportamiento de la subrasante a la compresión en función del módulo resiliente.

En la **Tabla 2 e Ilustración 3** se visualizan las localizaciones de los apiques y las unidades de diseño contempladas para los tramos viales estudiados.

Barrio	Apique N°	Muestra	Norte	Este	CBR (%)
MONTEVERDE	PDC 14	1	1461023.90	1133320.75	1.20
	PDC 15	1	1461076.42	1133312.94	1.40
	PDC 16	1	1460972.70	1133452.67	1.20
	PDC 17	1	1461102.68	1133356.26	1.20

Fuente: Estudio de suelos realizado por INGELABCON S.A.S.

Tabla 2 Localización de los apiques.



Fuente: Google Earth.
Ilustración 3 Localización de los apiques.

3.3 Resultados de exploración y caracterización del subsuelo

La exploración de campo permite identificar comportamientos y características de los suelos que se encuentran en la zona de influencia del proyecto, tales como los niveles freáticos que se presentan en la zona de estudio, características de los materiales a diferentes profundidades y estratos, contenido de humedad, límites de consistencia, granulometría y clasificación de los suelos. Los resultados de la exploración de cada apique se pueden observar en el estudio geotécnico. En la **Tabla 3** se cita un ejemplo típico de los resultados de los apiques.

CODIGO: EL-F-S002-1	PERFIL DE EXPLORACIÓN DE MUESTRAS IN SITU- INV E – 148 – 13	INGELABCON S.A.S. Confiabilidad en nuestros resultados
FECHA: 6-12-2022		
VERSION: 02		
PAGINA 1 DE 3		

					CONVENCIONES		
Cliente:	SERTET S.A.S				ENSAYOS CONVENCIONALES		SIMBOLO MATERIAL DE ESTRATOS
Proyecto:	ESTUDIO DE SUELOS-GEOTÉCNICO PARA CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTO EN DIFERENTES TRAMOS EN ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE MONTERÍA, CÓRDOBA				HN	Humedad natural	ARCILLAS
Ubicación:	ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE MONTERÍA, CÓRDOBA				%P. #4	Pasa tamiz # 4	LIMOS
N° orden:	264-24				%P. #200	Pasa tamiz # 200	GRAVAS
APIQUE 1	Coordenada Norte:	8°46'56.46"	Fecha inicio	28/05/2024	LL	limite Liquido	ARENAS
	Coordenada Este:	75°52'19.00"	Fecha fin	28/05/2024	IP	Indice de Plasticidad	OTROS MATERIALES

Profundidad [m]	Simbolo Geologia	Nivel Freatico	Descripción Material Campo	Muestra [#]	Tipo de Muestra	Clasificación SUCS		Clasificación AASHTO	ENSAYO REALIZADO					
									HN	%P. #4	%P. #200	LL	IP	MO
0.5			MATERIAL TIPO RELLENO DE COLOR MARRÓN OSCURO CON ESPESOR DE 0.00m - 0.5m	1	SUELTA	SM	ARENA LIMOSA	A-1-b (0)	9%	72.94	18.61	NL	NP	
1.50			MATERIAL COHESIVO DE COLOR ROJEO CON UN ESPESOR DE 1.00m - 1.50m	2	CBR	CL	ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD CON PRESENCIA DE ARENA	A-2-4 (6)	16%	96.17	80.52	27%	10%	

Resúmen Nivel Freático: En la exploración realizada NO se encontro nivel freático a una profundidad de 1.50m	Observaciones:	LABORATORISTA JEFE
		COORDINADOR ENSAYOS DE LABORATORIO

Fuente: Estudio de suelos realizado por INGELABCON S.A.S.
Tabla 3 Resultados de la exploración del subsuelo en el apique ubicado en el punto.

4 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS

Es necesario resaltar que la subrasante corresponde al suelo de soporte de la estructura de pavimento para lo cual se debe tener en cuenta y evaluar los parámetros geotécnicos que serán descritos en este numeral. Cabe resaltar que la evaluación de los parámetros geotécnicos se realizara en las muestras más relevantes de cada apique en función de la profundidad, ya que estas muestras serán de evaluación para soporte de la subrasante; las muestras más superficiales no serán de gran importancia ya que generalmente estas capas serán retiradas y reemplazadas.

4.1 Clasificación del suelo.

La clasificación del suelo se debe realizar según las especificaciones de la norma INV E-180-13 "sistema AASHTO" para mezclas de suelos y agregados de construcción y la norma INV E-181-13 "sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)" para clasificación de suelos con base en determinar en laboratorio la distribución granulométrica, límites y índice de plasticidad.

Se puede evidenciar en los resultados de los apiques que el suelo está compuesto por un material fino compuestos por limos o arcillas de mediana plasticidad en la parte superior de la subrasante.

Del estudio de suelo se puede deducir que el subsuelo entre **1.20 m y 1.50 m** de profundidad está compuesto también por *suelo tipo arcilla y arena limosa* por lo cual la interpenetración de partículas se debe considerar como variable fundamental.

4.2 Determinación del grado de expansión:

Una vez realizada la clasificación del suelo por el método de la AASHTO y el método unificado USC, se evalúa el potencial de expansión de la subrasante, ya que en función de esta variable se puede decidir si se realiza mejoramiento de la subrasante para controlar los cambios volumétricos. Generalmente la expansión se presenta en suelos limo-arcillosos donde se debe controlar la estabilidad volumétrica ya que tienden a ser colapsables.

La metodología planteada en la norma INV E-132-07, presenta la importancia de tratar suelos que se expanden y contraen a medida que pasan del estado seco a húmedo o viceversa, generando cambios volumétricos creando movimientos diferenciales en las estructuras del pavimento que se ven transformadas en agrietamiento de placas.

El potencial de expansión se puede controlar desde el límite líquido y el índice de plasticidad como se muestra en la **Tabla 4 y Tabla 5** respectivamente. Los parámetros presentados en las tablas mencionadas sirven de referencia para el análisis de los resultados de los apiques existentes y de los cuales se puede deducir según el estudio de suelos que el suelo de la subrasante presenta un grado de expansión Medio y Alto en función del índice de plasticidad y un grado de expansión Medio y Alto en función del límite líquido, ver **Tabla 6.**

Dicho lo anterior, se considera que el suelo de estudio de la subrasante presenta un material altamente expansivo con riesgo de colapso. Sin embargo, se debe prever el potencial de cambio volumétrico.

GRADO DE EXPANSIÓN	LÍMITE LÍQUIDO	
	CHEN	NORMA IS 1498
Bajo	< 30	20 – 35
Medio	30 – 40	35 – 50
Alto	40 – 60	50 – 70
Muy alto	> 60	70 - 90

Fuente: Tabla 132-1 norma INV E-132-13 INVIAS.
Tabla 4 Predicción de la expansividad a partir del límite líquido.

GRADO DE EXPANSIÓN	ÍNDICE DE PLASTICIDAD		
	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498
Bajo	< 20	0 – 15	< 12
Medio	12 – 34	10 – 35	12 – 23
Alto	23 – 45	20 – 55	23 – 32
Muy alto	> 32	> 35	> 32

Fuente: Tabla 132-2 norma INV E-132-13 INVIAS.
Tabla 5 Predicción de la expansividad a partir del IP.

Barrio	Unidad de diseño	Apique N°	Muestra	Profundidad (m)	IP (%)	Grado de Expansión	LL (%)	Grado de Expansión
MONTEVERDE	V	PDC 14	1	0.00 - 1.00	12	BAJO	34	BAJO

Barrio	Unidad de diseño	Apique N°	Muestra	Profundidad (m)	IP (%)	Grado de Expansión	LL (%)	Grado de Expansión
		PDC 15	1	0.00 - 1.00	-	-	-	-
		PDC 16	1	0.00 - 1.00	-	-	-	-
		PDC 17	1	0.00 - 1.00	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 6 Verificación del grado de expansión de las muestras.

4.3 Presencia de nivel freático:

Las exploraciones realizadas demuestran que en la zona de estudio las vías no se encuentran en presencia del nivel freático, pero a la hora de determinar la capacidad de soporte de la subrasante, es necesario considerar condiciones sumergidas ya que en época de invierno se puede generar una ascensión del nivel freático.

4.4 CBR de diseño

Con el fin de determinar la capacidad portante del suelo de subrasante se realizaron ***4 pdc***, a los cuales se les pudo realizar la inmersión de 4 días para determinar el CBR de diseño

La necesidad de utilizar el CBR sumergido obedece a que los niveles freáticos son superficiales en épocas de invierno, adicional a esto se busca contemplar el escenario más desfavorable al cual puede llegar a ser sometida la estructura. En la **Tabla 2** se puede observar los resultados obtenidos por cada apique.

Para el cálculo del CBR de diseño fue necesario sectorizar los apiques por unidades de diseño, para esta sectorización se tuvieron en cuenta factores como la capacidad portante, límites de consistencia y pasa tamiz #200. En la **Tabla 7** se obtienen los valores del CBR de diseño para la vía en estudio, este se calculó el promedio de los valores encontrados del CBR después de inmersión ya que se contó con menos de 5 datos en estas unidades.

Barrio	Apique N°	Muestra	Profundidad (m)	CBR (%)	CBR (%) Seleccionado
MONTEVERDE	PDC 14	1	0.00 - 1.00	1.20	1.12
	PDC 15	1	0.00 - 1.00	1.40	
	PDC 16	1	0.00 - 1.00	1.20	
	PDC 17	1	0.00 - 1.00	1.20	

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 7 Selección del CBR de diseño.

5 DESCRIPCIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE

Según el estudio geotécnico y lo descrito en el numeral anterior, el suelo de la vía de estudio presenta problemas de capacidad de soporte por baja resistencia al corte, un grado de expansión medio a muy alto, por lo cual es necesario realizar un reemplazo de la subrasante. Ya que la composición geotécnica de la subrasante está dada por suelos arenosos de grano fino y gruesos presentando baja resistencia y afectando la capacidad portante.

Como se puede observar en los resultados que se obtuvieron en los estudios de suelo, el suelo de soporte no cumple, con el valor mínimo requerido de una subrasante (CBR = 5%) ya que el CBR de diseño hallado es de **1.12%** ≈ Mr= 191.40 Kg/cm2, correlación obtenida de la ecuación Mr=2555*($CBR^{0.64}$) *0.0703), presentada por Lister y Powell (1987), la cual es la utilizada en la metodología mecánico - empírica para el método de diseño INVIAS 2013.

5.1 Condiciones de la subrasante:

Este parámetro es de gran importancia a la hora de evaluar condiciones de mejoramiento o reemplazo de la subrasante, definir si son suelos granulares de los cuales nos interesa conocer la resistencia o si son suelos finos de los cuales nos interesa la estabilidad volumétrica. Adicional se puede evaluar la alternativa de la instalación de un geotextil, ya sea tejido o no tejido en función del CBR de diseño y la granulometría.

Generalmente los suelos de subrasante son suelos arcillosos, limosos o materiales finos con alta plasticidad, los cuales tienden a ser colapsables. Los resultados geotécnicos, permiten observar dentro del análisis granulométrico de las muestras estudiadas en función del porcentaje que pasa el tamiz No 200 que tipo de material es: una arcilla arenosa de alta plasticidad. Ver **Tabla 8.**

Barrio	Apique N°	Muestra	Profundidad (m)	% Que Pasa Tamiz No 200 (%)	Tipo de Suelo
MONTEVERDE	PDC 14	1	0.00 - 1.00	26.00	Arena arcillosa (SC).
	PDC 15	1	0.00 - 1.00	26.00	Arena limosa (SM).
	PDC 16	1	0.00 - 1.00	36.00	Arena limosa (SM).
	PDC 17	1	0.00 - 1.00	24.00	Arena limosa (SM).

Fuente**:** Elaboración propia.

Tabla 8 Definición de la subrasante en función del % que pasa el tamiz No 200.

Como la subrasante está conformada en su gran mayoría por suelos fino tipo Arcilla y limo se considera un potencial de cambio volumétrico, motivo por el cual es necesario realizar un reemplazo de la subrasante por un material granular que cumpla las especificaciones técnicas de INVIAS, A continuación, se emplean metodologías que permiten considerar mejoramientos de la subrasante, considerando espesores de mejoramiento de suelos mejorados y el uso de ser necesario de geotextiles.

A continuación, se presenta una metodología para calcular el espesor de mejoramiento de la subrasante en función del CBR del suelo de reemplazo que permite encontrar un CBR equivalente.

5.2 Metodología de Ivanov para selección de espesor mínimo de mejoramiento

Esta metodología permite calcular el espesor del refuerzo de mejoramiento de la subrasante, el cual plantea una ecuación en función del espesor del material de mejoramiento y su módulo, el módulo de resiliencia de las condiciones actuales de la subrasante y el radio del área cargada.

Como se mencionó anteriormente es necesario realizar un mejoramiento en la subrasante ya que el suelo de soporte no cumple con el valor mínimo requerido para una subrasante de buenas condiciones. El material de mejoramiento a emplear debe cumplir con los requerimientos de la **Tabla 9,** debe tener un valor de CBR mínimo de 5% para afirmados y subbase y además debe cumplir con las especificaciones del artículo **230-22** de la norma INVIAS.

CBR [%]	Clasificación general	Usos
0 – 3	Muy pobre	Subrasante
3 – 7	Pobre a regular	Subrasante
7 – 20	Regular	Afirmados y subbase
20 – 50	Bueno	Subbase y base
> 50	Excelente	Base

Fuente: Tabla 8.12 Pavimentos (Materiales, Construcción y Diseño), Hugo Rondón y Freddy Reyes.
Tabla 9 Clasificación del suelo según el CBR de la subrasante.

Para determinar el módulo resiliente de la subrasante y del material de mejoramiento se utilizó la correlación con el valor de CBR cuya expresión es $Mr=2555*(CBR^{0.64})*0.0703$, adicional a esto para obtener el CBR de diseño equivalente se plantea el cálculo del modelo resiliente equivalente, mediante la formulación propuesta por IVANOV:

$$E_e = \frac{E_0}{1 - \frac{2}{\pi}\left(1 - \frac{1}{n^{3.5}}\right)\arctan\left(\frac{ns}{2a}\right)}$$

$$n = \sqrt[2.5]{\frac{E_1}{E_0}}$$

EC 1

Donde:
Ee: Modulo resiliente equivalente (kg/cm2)
E0: Modulo resiliente del material de la subrasante (kg/cm2)
E1: Modulo resiliente del material de mejoramiento (kg/cm2)
n: Modulo ponderado de las capas
s: Espesor del material de mejoramiento (cm)
a: Radio del área cargada (cm)

La **ecuación 1** permite encontrar una equivalencia del módulo de resiliencia y CBR de diseño, el cual según especificaciones y experiencia debe estar limitado a 5.0%, para lo cual se considera que el CBR del material de reemplazo equivale a 10%, de esta forma podemos conservar la relación a la compresión entre el módulo del material de reemplazo y el módulo equivalente. En nuestro caso el CBR equivalente es igual a **5.0%**. En la **Tabla 10** se reportan los resultados de la modelación utilizando la teoría de Ivanov para los diferentes sectores viales.

Metodología Ivanov		
CBR Subrasante (%)	1.12	CBR suministrado estudio geotécnico
CBR Material de mejoramiento (%)	**10**	CBR del material de remplazo
MR subrasante (Kg/cm2)	193.42	Módulos resilientes por correlación (MR=2555*CBR^0.64) *0.070307. Lister y Powell (1987)
MR Mejoramiento (Kg/cm2)	**784.13**	
n	1.75	Modulo ponderado de las Capas
2a (cm)	30.14	Radio del área cargada (15.07)
s (cm)	40	Espesor del material de mejoramiento
MR Equivalente (Kg/cm2)	**532.51**	Modulo resiliente equivalente (Ivanov)

Metodología Ivanov		
MR Equivalente (PSI)	**7574.10**	
CBR de Diseño Equivalente (%)	5.50	CBR de diseño

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 10 Capacidad de soporte equivalente metodología IVANOV.

Reemplazo con afirmado espesor de 40 cm para mejoramiento de la subrasante, CBR: 10%
Material existente en campo según estudio geotécnico

Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 4 Modelo estructural de mejoramiento de la subrasante metodología IVANOV.

De lo anterior se infiere que el mejoramiento que debe tener la estructura de pavimento es de **40 cm** a lo largo de todos sus tramos viales, además de presentar un **CBR de 10%** cumpliendo la especificación técnica dada en el artículo 230-22 del INVIAS.

Esta consultoría, recomienda implementar un material de rajón con espesor de 40 cm en las zonas críticas donde se presenten problemas geotécnicos asociados con las características mecánicas de la subrasante (suelos blandos, alto potencial de expansión y bajas capacidad portante), con esto proporcionamos un terreno de fundación apto para soportar las cargas del tránsito en la etapa de construcción. Adicional reducimos la posibilidad de asentamientos diferenciales y mitigamos la presencia de problemas geotécnicos asociados con las características del subsuelo.

El material de rajón debe cumplir con los siguientes requisitos de granulometría:

- El tamaño máximo estará controlado por el valor menor que se obtenga al comparar los dos tercios (2/3) del espesor de la capa compactada.
- El porcentaje en peso de partículas menores al tamiz de 25,0 mm (1”), será inferior al treinta por ciento (30%).
- El porcentaje en peso de partículas que pasen el tamiz de 75 µm (No.200), será inferior al quince por ciento (15%).
- Sección 321-11 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público.

Una vez realizada la acomodación del material dentro de la estructura, este deberá someterse a un sello mediante material granular (15 cm de espesor), con el fin de rellenar los vacíos que se encuentren debido al gran tamaño de las partículas, permitiendo así una compactación uniforme de la capa.

De lo mencionado anteriormente, y teniendo presente las recomendaciones de las distintas literaturas técnicas se infiere que el mejoramiento en los posibles puntos críticos que se encuentren al momento

de la construcción de la vía dada las condiciones de plasticidad y expansividad del terreno es de 40 cm en material de pedraplén y debe ser sellado con material granular con un espesor de 15cm.

CBR de subrasante (%)	Espesor de sustitución (cm)
<1	Mínimo 60
1	55
2	35
3	25
4	15

Fuente: Tabla 13.1 Pavimentos (Materiales, Construcción y Diseño), Hugo Rondon y Freddy Reyes.
Tabla 11 Espesores recomendados de sustitución de subrasante.

A continuación, se evaluará metodología propuesta por PAVCO de separación de subrasante en su capítulo 4 de su manual de diseño.

5.3 Metodología por separación de subrasante en vías, capitulo 4 manuales de diseño PAVCO.

En el manual de diseño de geosintéticos de PAVCO, específicamente en el capítulo 4, se puede observar la metodología por medio de la cual se puede seleccionar el geotextil para la separación de la subrasante con las capas granulares.

La finalidad de esta metodología es encontrar un geotextil que cumpla con la función de separación, para lo cual el CBR de diseño debe estar entre el 3% y 10%. Dentro de este rango la deformación del suelo de la subrasante generada por las cargas no se considera relevante para generar esfuerzos de tensión en el geotextil, por tal motivo el diseño o selección del geotextil se realiza para separación y no para refuerzo y estabilización.

La selección del geotextil se debe realizar para evitar la migración entre dos suelos, pero también se puede seleccionar para mejorar la calidad de drenaje permitiendo el paso del agua sin que se presente un lavado de partículas. Adicional debe tener la capacidad de resistir fuerzas de punzonamiento o estallido por concentración de esfuerzos locales generados por una mala adecuación de la subrasante o la colocación de un material de mejoramiento con una granulometría bastante irregular. En la **Ilustración 5** se puede observar la ventaja técnica del uso de geotextil.

En el **capítulo 4** del manual de diseño de geosintéticos de PAVCO se puede observar el proceso para la obtención de los factores de seguridad que serán mencionados a continuación; adicional se puede observar el control de otros criterios como el de retención y supervivencia.

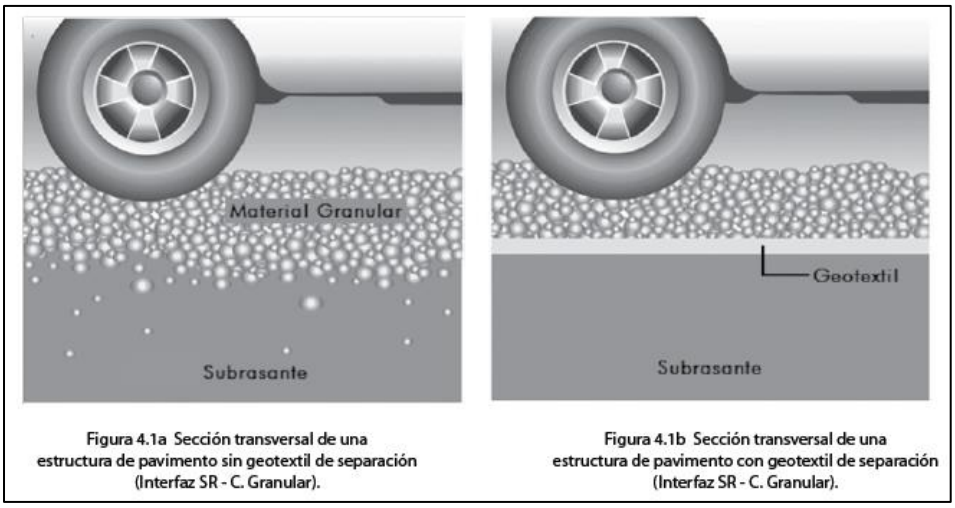


Figura 4.1a Sección transversal de una estructura de pavimento sin geotextil de separación (Interfaz SR - C. Granular).

Figura 4.1b Sección transversal de una estructura de pavimento con geotextil de separación (Interfaz SR - C. Granular).

Fuente: Capitulo 4 Separación de subrasante en vías Geosoft PAVCO.
Ilustración 5 Estructura de pavimento con geotextil de separación.

La finalidad de esta metodología, es encontrar unos factores de seguridad que sean mayores 1, donde se relacionan las resistencias admisibles con las resistencias requeridas como se muestra en la **ecuación 4.** Los principales factores que se controlan son:

$$FS_g = \frac{R_A}{R_R} \approx FS_g > 1 \quad EC\ 4$$

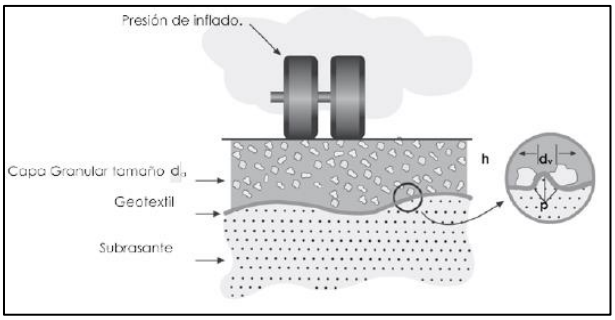
Donde:
FS_g = Factor de seguridad global.
R_R = Resistencia requerida.
R_A = Resistencia admisible.

- **Resistencia al estallido (Mullen Burst)**

$$FS_p = \frac{61.6 * P_{test}}{P' * d_a} \quad Para\ FS_p = 1.50$$

$$FS_g = \frac{46.2 * P_{test}}{P' * d_a} \quad Para\ FS_g = 2.00$$

Donde
FS_g = Factor de seguridad global.
FS_p = Factor de seguridad parcial.
P_{tes} = Presión del ensayo Mullen Burst (kpa).
P' = Esfuerzo en la superficie del geotextil $P' < P$ (kpa).
.d_a = Diámetro máximo de la partícula de agregados (mm).



Fuente: Figura 4.2 capitulo 4 manuales de diseño de geosintéticos PAVCO.
Ilustración 6 Geotextil resistencia al estallido.

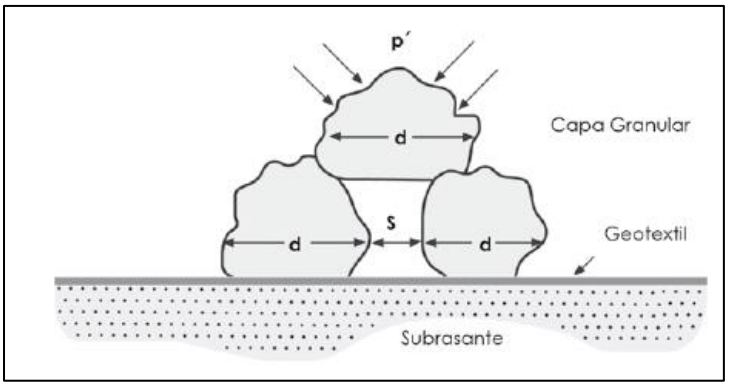
- **Resistencia a la tensión (GRAB)**

$$FS_g = \frac{T_{ult}}{FS_p * P' 10^{-3} * (0.33 d_a)^2 * [f(\epsilon)]} \quad Para\ FS_g > 1.00$$

Donde
FS_g = Factor de seguridad global.
FS_p = Factor de seguridad parcial.
T_{ult} = Resistencia última del geotextil (kpa).
P' = Esfuerzo en la superficie del geotextil P' < P (kpa).
P = Presión de inflado (kpa).
.d_a = Diámetro máximo de la partícula de agregados (mm).
.f(ε)= Función de deformación (elongación) depende del tipo de geotextil ***(Tabla 12)****.*

ε (%)	f(ε)	ε (%)	f(ε)
0	∞	25	0.55
2	1.47	30	0.53
4	1.23	35	0.52
6	1.08	40	0.51
8	0.97	45 - 70	0.5
10	0.9	75	0.51
12	0.8	90	0.52
14	0.73	100	0.53
16	0.69	110	0.54
18	0.64	120	0.55
20	0.58	130	0.56

Fuente: Tabla 4.1 capitulo 4 manuales de diseño de geosintéticos PAVCO.
Tabla 12 Valores de ε en función de la elongación.

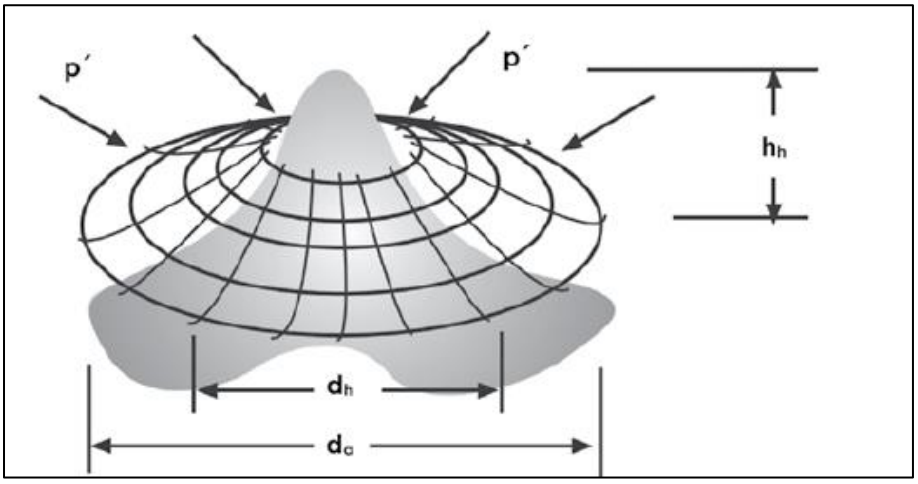


Fuente: Figura 4.5 capitulo 4 manuales de diseño de geosintéticos PAVCO.
Ilustración 7 Geotextil resistencia a la tensión.

- **Resistencia al punzonamiento**

$$FS_g = \frac{T_{ult}}{FS_p * T_{req}} \approx T_{ult} = FS_g * FS_P * (1.3x10^3 * P' * d_a) * F_f \quad \text{EC 5}$$

Donde
FS_g = Factor de seguridad global.
FS_p = Factor de seguridad parcial.
T_{ult} = Resistencia última del geotextil (kpa).
T_{req} = Fuerza vertical que el geotextil debe resistir (N).
P' = Esfuerzo en la superficie del geotextil P' < P (kpa).
.d_a = Diámetro máximo de la partícula de agregados (mm).
*F_f = Factor de forma de la partícula del material a utilizar (**Tabla 13**).*



Fuente: Figura 4.6 capitulo 4 manuales de diseño de geosintéticos PAVCO.
Ilustración 8 Punzonamiento causado por una partícula al g**e**otextil.

Tipo de partícula	F_f
Angular	1.5
Semiredondeada	1.3
Redondeada	1.1

Fuente: Tabla 4.3 capitulo 4 manuales de diseño de geosintéticos PAVCO.
Tabla 13 Factor de forma de la partícula del material a utilizar.

El proceso de cálculo y selección del geotextil se realiza con el software Geosoft Pavco v3.0; posteriormente se verifican los factores de seguridad, los cuales deben ser mayores a 1.

Para el uso del software, se debe conocer 3 variables de entrada:

- ✓ *Factor de seguridad parcial = 1.5*
- ✓ *Presión de inflado = 758 kpa*
- ✓ *Diámetro máximo de partícula de agregados = 2.50" (***Tabla 14***).*

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	SUELOS SELECCIONADOS	SUELOS ADECUADOS	SUELOS TOLERABLES
Partes del terraplén a las que se aplican		Todas	Todas	Cimiento y Núcleo
Tamaño máximo, mm	E-123	75	100	150
Porcentaje que pasa el tamiz de 2 mm (No. 10) en masa, máximo	E-123	80	80	-
Porcentaje que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) en masa, máximo	E-123	25	35	35
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	0	1.0	1.0
Límite líquido, máximo (%)	E-125	30	40	40
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-126	10	15	-
CBR de laboratorio, mínimo (%) *(Nota 1)*	E-148	10	5	3
Expansión en prueba CBR, máximo (%)	E-148	0.0	2.0	2.0
Índice de colapso, máximo (%) *(Nota 2)*	E-157	2.0	2.0	2.0
Contenido de sales Solubles, máximo (%)	E-158	0.2	0.2	-

NORMAS Y ESPECIFICACIONES 2012 INV.

Fuente: Tabla 220.1 articulo 220 – 13 INVIAS.
Tabla 14 Requisito de materiales de terraplén (mejoramiento).

A continuación, se presentan los valores obtenidos durante el proceso de cálculo.

Factor de Seguridad Global:	2
Factor de Seguridad Parcial:	1.5
Presión de Inflado:	758,42 kpa
Diámetro de Partículas de Agregado:	2.5 pulgadas
Tipo de suelo:	Suelos finos (más de 50% pasa tamiz #200)

Fuente: Software Geosoft Pavco v3.0.
Tabla 15 Parámetros para chequeo mecánico.

Permeabilidad Suelo Fundación:	0.0 cm/s
TAA <=	0.6
TAA Geotextil Tejido	0.3
TAA Geotextil No Tejido	0.15

Fuente: Software Geosoft Pavco v3.0.
Tabla 16 Propiedades hidráulicas requeridas.

Resistencia al Punzonamiento Requerida:	187,3 N
Resistencia al Estallido Requerida:	1.563,5 N
¿Se revisó criterio de supervivencia?:	SI
Factor de Seguridad Global Calculado Geotextil Tejido:	3,6
Factor de Seguridad Global Calculado Geotextil no Tejido:	2,8

Fuente: Software Geosoft Pavco v3.0.
Tabla 17 Parámetros calculados.

Geotextil Tejido:	T 2100
Geotextil No Tejido:	NT2500

Fuente: Software Geosoft Pavco v3.0.
Tabla 18 Geotextiles recomendados.

Esta consultoría recomienda utilizar un geotextil no tejido T2100, ya que estos cumplen funciones de separación y refuerzo. El geotextil seleccionado debe cumplir con las especificaciones de la **Tabla 19**. Cabe aclarar que la elongación ≥ 50% hace referencia a los geotextiles no tejidos y la elongación ≤ 50% hace referencia a geotextiles tejidos. Las propiedades del geotextil seleccionado se pueden observar en la **ilustración 15**.

Propieda	Elongación medida	Resistencia a la tensión (Grab)	Resistencia a la penetración con pistón 50mm de diámetro	Resistencia al rasgado trapezoidal
Norma de ensayo	INV E - 901	INV E - 901	INV E - 913	INV E - 903
Valor mínimo	≥ 50%(1)	700 N	1375 N	250 N
Promedio por rollo	< 50%(2)	1100 N	2200 N	400 N

Fuente: Tabla 4.4 capitulo 4 manuales de diseño de geosintéticos PAVCO.
Tabla 19 Propiedades del geotextil de separación Articulo 231 INVIAS.

Especificaciones Técnicas

PROPIEDADES MECÁNICAS	NORMA	UNIDAD	T1400	T1700	T2100	T2400	TR3000	TR4000	TR5000	TR6000	TR10000
Método Grab											
Resistencia a la Tensión	ASTM D4632	N (lb)	790 (178)	800 (180)	1140 (257)	1410 (317)	1870 (421)	2400 (540)	2600 (585)	2900 (653)	3920 (882)
Elongación		%	13	16	15	15	19	16	19	22	19
Método Tira Ancha											
Sentido Longitudinal	ASTM D4595	kN/ m (lb/ft)	20 (1370)	21 (1439)	34 (2329)	40 (2740)	52 (3563)	67 (4591)	80 (5480)	110 (7537)	200 (13703)
Elongación		%	10	10	11	11	11	12	12	11	11
Sentido Transversal	ASTM D4595	kN/ m (lb/ft)	20 (1370)	21 (1439)	34 (2329)	40 (2740)	52 (3563)	60 (4111)	75 (5137)	110 (7537)	200 (13703)
Elongación		%	10	9	9	10	10	10	10	10	10
Método CBR											
Resistencia al Punzonamiento	ASTM D6241	kN (lb)	3.0 (676)	3.2 (721)	4.8 (1079)	5.3 (1191)	7.5 (1686)	8.4 (1888)	9.4 (2113)	11.0 (2473)	12.1 (2724)
Resistencia al	ASTM D4533	N (lb)	280 (63)	300 (68)	400 (90)	500 (113)	610 (137)	690 (156)	800 (180)	1700 (382)	2082 (468)
Rasgado Trapezoidal											
PROPIEDADES HIDRÁULICAS	**NORMA**	**UNIDAD**	**T1400**	**T1700**	**T2100**	**T2400**	**TR3000**	**TR4000**	**TR5000**	**TR6000**	**TR10000**
Tamaño de Abertura Aparente	ASTM D4751	mm(Tamiz)	0.425 (40)	0.600 (30)	0.425 (40)	0.425 (40)	0.425 (40)	0.425 (40)	0.600 (30)	0.180 (80)	0.180 (80)
Permeabilidad	ASTM D4491	cm/s	0.7×10^{-2}	1.5×10^{-2}	4.6×10^{-2}	4.8×10^{-2}	4.2×10^{-2}	3.7×10^{-2}	2.5×10^{-2}	1.4×10^{-2}	0.7×10^{-2}
Permitividad	ASTM D4491	s^{-1}	0.15	0.26	0.57	0.50	0.39	0.34	0.19	0.29	0.12
Tasa de flujo	ASTM D4491	l/min/m^2	430	600	1665	1343	1050	981	350	430	260
PROPIEDADES FÍSICAS	**NORMA**	**UNIDAD**	**T1400**	**T1700**	**T2100**	**T2400**	**TR3000**	**TR4000**	**TR5000**	**TR6000**	**TR10000**
Espesor	ASTM D5199	mm	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.1	1.3	0.5	1.0
Resistencia UV @ 500 hr	ASTM D4355	%	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70	>70
Rollo Ancho	Medido	m	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.85	3.75	3.75
Rollo Largo	Medido	m	160	160	140	120	100	100	80	100	100
Rollo Área	Calculado	m^2	616	616	539	462	385	385	308	308	375
FUNCIÓN DEL GEOTEXTIL			**T1400**	**T1700**	**T2100**	**T2400**	**TR3000**	**TR4000**	**TR5000**	**TR6000**	**TR10000**
Refuerzo			V	V	V	V	V	V	V	V	V
Separación					V	V	V	V	V	V	V
Estabilización						V	V	V	V	V	V

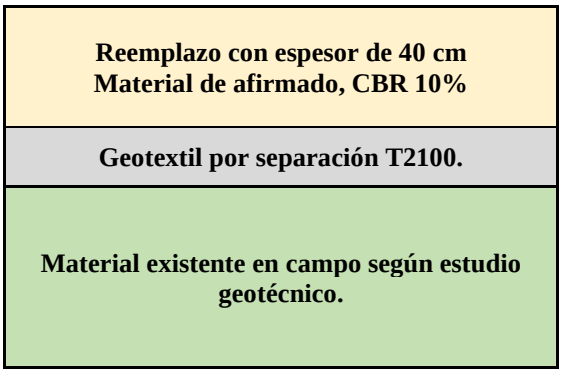
Fuente: Geotextiles PAVCO.

Ilustración 9 Propiedades mecánicas del geotextil a seleccionar.

5.4 Modelo seleccionado

Una vez evaluado el espesor de mejoramiento de la subrasante por la metodología de IVANOV y el geotextil mediante PAVCO en su capítulo 4, se selecciona el modelo más acorde a las circunstancias actuales. Esta consultoría considera unidades de diseño por tramos homogéneos para los cuales selecciona:

Se selecciona el mejoramiento con material de afirmado recomendado por la metodología de IVANOV y el geotextil T2100 recomendado por PAVCO en su capítulo 4 ya que cumple con la condición de separación y adicional refuerzo. Ver **Ilustración 10.**



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 10 Modelo estructural de mejoramiento y separación de la subrasante.

6 DETERMINACIÓN DEL MODULO DEL CONJUNTO Y ESPESOR DE SUBBASE

6.1 Determinación del módulo de reacción de la subrasante

Dada la dificultad de realizar el ensayo de placa para determinar el módulo de reacción de la subrasante, y teniendo en cuenta que para el diseño de los pavimentos de concreto se admiten aproximaciones en la determinación de la capacidad de soporte del suelo, se puede recurrir a correlaciones entre el valor K con el del CBR.

Con base en el CBR equivalente se determina el valor del módulo de reacción (K) de la subrasante según correlaciones representadas en la **gráfica 5.** La ecuación que más se ajustó a la serie de datos fue la polinómica cuya forma es:

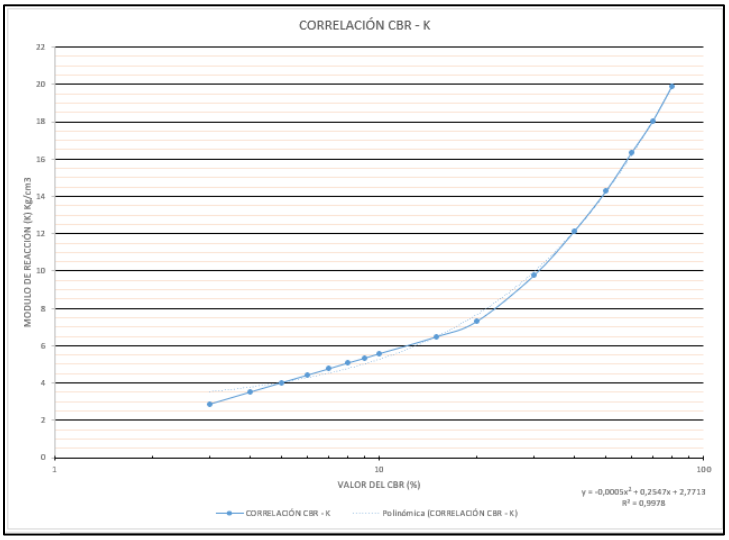
$$K = -0.0005CBR^2 + 0.2547CBR + 2.7713 \qquad EC\ 4$$

Donde:

- ✓ *CBR corresponde al CBR de diseño.*
- ✓ *K corresponde al módulo de reacción de la subrasante.*

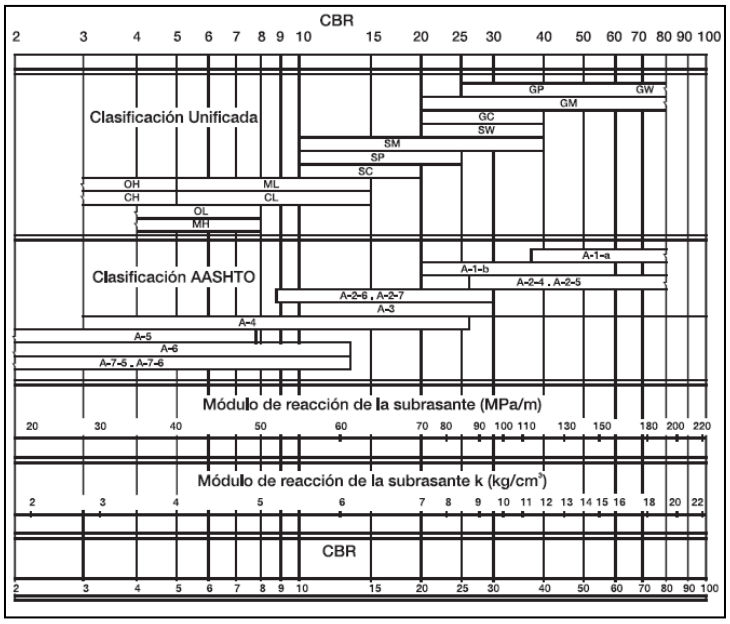
Los valores representados en la **gráfica 2,** corresponden a los correlacionados en la **Ilustración 11**, los cuales fueron graficados para hallar un modelo que permita calcular el valor del módulo de reacción de la subrasante de forma analítica y más precisa por medio de la **ecuación 4**.

El valor calculado del módulo de reacción K de la subrasante para un CBR equivalente de **5.50%** es igual a (K= 4.156 Kg/cm3 ≈ 41.56 Mpa/m)



Fuente: Elaboración propia.

Grafica 1 Selección del módulo de reacción en función del CBR equivalente.



Fuente: Tabla 2.12 M.D.C INVIAS.

Ilustración 11 Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K.

6.2 Determinación del módulo del conjunto y espesor de la subbase

Una vez calculado los módulos de reacción de la subrasante, se calcula los módulos de reacción del conjunto para el cual se debe seleccionar el espesor de la subbase granular. Para este caso será seleccionado un espesor de subbase granular de 15 cm para verificar los esfuerzos y deflexiones equivalentes de la losa de concreto en función del consumo vehicular. El espesor seleccionado de subbase granular es de 15 cm. El cálculo se realiza con base en la tabla **2.15** del M.D.C en cada tramo vial. Ver **Tabla 20.**

En la **Tabla 21** se observa el resumen del módulo del conjunto para cada espesor de subbase y para cada tramo de vía.

Modulo K Subrasante		**Modulo K de Subbase/Subrasante**									
		100		150		200		**250**		300	
Mpa/m	**pci**	**Mpa/m**	**pci**	**Mpa/m**	**pci**	**Mpa/m**	**pci**	**Mpa/m**	**pci**	**Mpa/m**	**pci**
20.00	73.00	23.0	85.0	26.0	96.0	30.0	110.0	34.0	124.7	38.0	140.0
30.00	109.50	34.0	124.5	37.5	137.4	42.2	154.4	47.0	172.5	52.0	191.8
40.00	147.00	45.0	165.0	49.0	180.0	54.3	200.0	60.0	221.7	66.0	245.0
41.57	151.73	46.5	169.5	50.3	184.2	55.8	204.4	61.6	226.5	67.9	250.5
60.00	220.00	64.0	235.0	66.0	245.0	72.7	268.3	80.7	296.7	90.0	330.0
80.00	295.00	87.0	320.0	90.0	330.0	96.7	356.7	105.7	390.0	117.0	430.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Selección del módulo del conjunto en función del espesor de la subbase y módulo de la subrasante.

Módulo de Reacción (K)						Espesor de Subbase (cm)
Subrasante Mejorada (K) (Kg/cm3)	Subrasante Mejorada(K) (Mpa/m)	Subrasante Mejorada(K) (pci)	Conjunto (Kg/cm3)	Conjunto (Mpa/m)	Conjunto (pci)	
4.157	41.571	151.733	5.034	50.34	184.21	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21 Módulo de reacción y modulo del conjunto de los diferentes tramos viales.

El proceso de compactación y colocación de la subbase granular debe realizarse según las especificaciones del artículo **INV 320 – 22** (Subbase granular) de la norma INVIAS. La finalidad de la construcción de la capa en subbase granular, es que funcione como suelo de soporte para la losa de concreto rígido, ya que en el proceso de distribución de cargas la losa de concreto absorbe más del 97 % de las solicitaciones.

A continuación, se puede observar el comportamiento de distribución de cargas en la estructura del pavimento, donde se observa como el espesor de la placa de pavimento en función del módulo de elasticidad del concreto E=250000 Kg/cm2 y el coeficiente de Poisson = 0.15, absorbe la mayoría de los esfuerzos verticales con relación a la carga y el radio de la llanta, garantizando que los esfuerzos que llegaran a la subrasante son mínimos (< 3%).

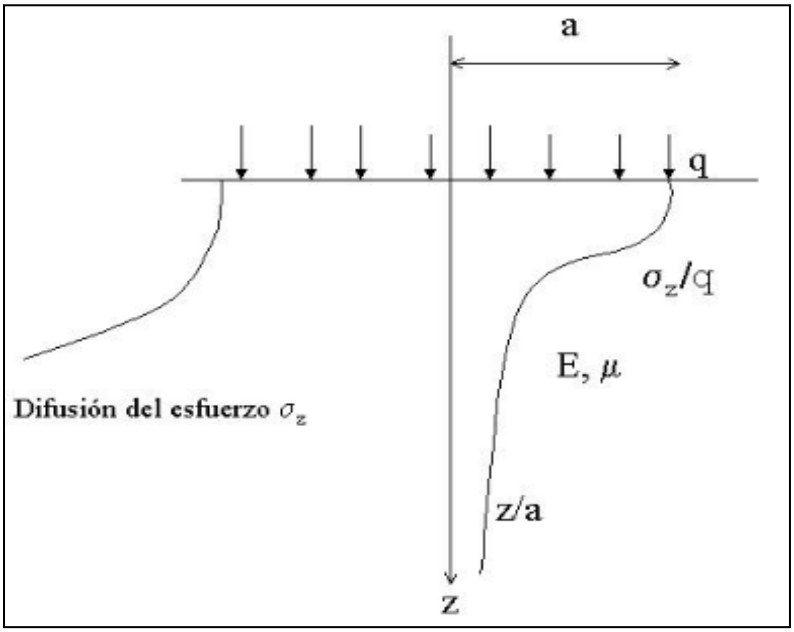


Ilustración 12 Distribución de esfuerzos sobre una estructura de pavimento rígido.

7 ANÁLISIS DEL TRANSITO

Durante la etapa de diseño es necesario conocer la cantidad de vehículos que pasan actualmente por la vía (TPD), de igual forma se debe conocer el tránsito o número de ejes que pasaran durante el periodo de diseño, sin dejar a un lado que esta variable genera mucha incertidumbre ya que no se

conoce a ciencia cierta el número de ejes exactos que pasaran por la vía en el periodo de diseño; la proyección permite hallar un acercamiento.

El análisis de transito se debe realizar por medio de conteos vehiculares que permitan calcular el número de ejes equivalentes asociados al periodo de diseño, por lo tanto es necesario realizar un estudio de tránsito el cual fue hecho por la presente consultoría.

A continuación, se presentan los cálculos obtenidos de transito equivalente diario asociado al periodo de diseño de la estación de aforo contempladas para la planificación del tránsito, que no es más que el número acumulado de ejes equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño durante el periodo de diseño, adicional se presenta el espectro de carga ver **Tabla 22 y Tabla 23**

Calculo Transito Equivalente Diario y Total				
TPD	243	**Tasa de Crecimiento**		3
Factor Sentido	0.5	**Factor Carril**		1
		Periodo de Diseño (Años)		20
CONTEO 3				
Vehiculos	**Porcentaje (%)**	**Numero de Vehiculos Diarios**	**Factor Daño**	**Transito Equivalente Diario**
Vehiculos		243		
Autos	86	208	0.00	0
Buses	0	1	0.42	0
Camiones	14	34		
C2P	56	19	0.31	6
C2G	29	10	3.92	39
C3	9	3	5.31	16
C3S2	6	2	8.37	17
C3S3	0	0	6.50	0
Transito Equivalente Diario				**78**
Transito Equivalente Total Acumulado				**383382**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22 Calculo del número de ejes equivalentes Estación de Conteo 3.

Información por Calculo Espectro de Carga (CONTEO 3)											
Vehiculos	**Numero de Vehiculos Acumulados**	**Simples de Rueda Simple (Tn)**				**Simple de Rueda Doble (Tn)**		**Tandem (Tn)**			**Tridem**
		2.5	**4**	**6**	**7**	**6**	**11**	**20**	**21**	**22**	**24**
Vehiculos											
Autos	1019999										
Buses	4904		4904			4904					
Camiones											
C2P	93173	93173				93173					
C2G	49038			49038			49038				
C3	14712			14712						14712	
C3S2	9808			9808					19615		
C3S3	0			0						0	0
TOTAL	**1191634**	**93173**	**4904**	**73558**	**0**	**98077**	**49038**	**0**	**19615**	**14712**	**0**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23 Información para el cálculo de espectro de carga Estación de Conteo 3.

Según la **Tabla 22** el número de ejes equivalentes de 8.2 Ton de la vía en estudio es de **383,382**.

8 DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ROTURA

La resistencia a la flexión o módulo de rotura es utilizada en pavimentos rígidos ya que los esfuerzos a la compresión generados por las diferentes cargas en la superficie del pavimento son equivalentes a la presión de inflado, por lo cual la resistencia a la compresión se considera muy baja. De lo mencionado anteriormente se deduce que el parámetro de control en un pavimento rígido es la resistencia a la flexión influenciada por la temperatura, la geometría de las losas y principalmente el paso de los vehículos. Sin embargo, existen correlaciones que permiten calcular el módulo de rotura en función de la resistencia a la compresión, siendo la más utilizada la presentada en la **ecuación 7.**

$$MR = k\sqrt{Fc} \qquad EC\ 7$$

Donde:
MR = Modulo de rotura (Kg/cm2)
.k = Coeficiente que varía entre 2.0 y 2.7, siendo 2.67 el más aproximado
Fc = Resistencia a la compresión (Kg/cm2)

Para la determinación del módulo de rotura se tendrán en cuenta para el diseño cuatro niveles de resistencia a la flexión de acuerdo con el nivel de tránsito, según lo indica la **Tabla 22** Una vez calculado el TPD se debe conocer el número de camiones que pasan por día sobre la vía en estudio, con base en este valor se determina el módulo de rotura del concreto.

Calidad del Concreto	Número de camiones por día			
	> 300	150 –300	25 – 150	< 25
A flexión (MPa)	4.5	4.2	4.0	3.8

Fuente: Tabla 3.1 M.D.C.
Tabla 24 Resistencia que debe alcanzar el concreto.

Una vez calculado el TPD y apoyado en la **Tabla 24**, se puede determinar el módulo de rotura de la losa de concreto: número de **camiones = 34, MR = 4.0 Mpa.**

9 DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO

Una vez determinadas los parámetros de control; se procedió a diseñar la estructura de pavimento correspondiente a las vías estudiadas, para el diseño de la estructura de pavimento se utilizó el software BS-PCA Diseño de pavimentos rígidos.

9.1 Parámetros de entrada software BS-PCAA

Como primera medida es necesario definir una serie de parámetros para hacer uso efectivo del software, la primera ventana solicita la variable transito donde se debe definir el tránsito por eje, radio

de carga, separación de las llantas, ancho de eje, separación de ejes, carga de referencia y exponente, factor de seguridad de carga y factor mayoración de repeticiones.

- ✓ **Tránsito por eje**

El tránsito por eje se selecciona de la **Tabla 22 y Tabla 23 ,** donde se visualiza el espectro de carga por cada eje.

- ✓ **Radio de carga (cm)**

El radio de carga se determina como la relación de la presión de inflado y el peso de la llanta como se muestra en la **Tabla 25.**

Tipo de Eje	SRS	SRS	SRD	SRD	Tandem
# De Llantas	2	2	4	4	8
Peso por Eje (Tn)	4	6	6	11	22
Peso por Llanta (P) (Tn)	2	3	1.50	2.75	2.75
Peso por Llanta (P) (Kn)	19.6	29.4	14.72	26.98	26.98
Presión de inflado por Llanta (Q) Kg/cm2	7.73	7.73	7.73	7.73	7.73
Radio de la Llanta (a) cm	9.07	11.11	7.86	10.64	10.64

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 25 Calculo del radio de carga en función del radio de la llanta.

- ✓ **Separación de las llantas (cm)**

La separación de las llantas se determina según los vehículos que circulan por las carreteras colombianas como se muestra en la **Tabla 26.** Este valor obedece a 3 veces el radio de la llanta.

Tipo de Eje	Separación de las Llantas (cm)
Eje Simple de Rueda Simple	28
Eje Simple de Rueda Doble	24
Eje Tandem Rueda Simple	34
Eje Tandem Rueda Doble	32
Eje Tridem	32

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 26 Selección separación de las llantas.

- ✓ **Ancho de eje (cm)**

El ancho de eje se determina según los vehículos que circulan por las carreteras colombianas como se muestra en la **Tabla 27.**

Tipo de Eje	Ancho de Eje (cm)
Eje Simple de Rueda Simple	170
Eje Simple de Rueda Doble	141
Eje Tandem Rueda Simple	182.8
Eje Tandem Rueda Doble	182.8
Eje Tridem	182.8

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 27 Selección ancho de ejes.

- ✓ **Separación de ejes (cm)**

La separación de ejes se determina según los vehículos que circulan por las carreteras colombianas como se muestra en la **Tabla 28.**

Tipo de Eje	Separacion de Eje (cm)
Eje Simple de Rueda Simple	0
Eje Simple de Rueda Doble	0
Eje Tandem Rueda Simple	127
Eje Tandem Rueda Doble	127
Eje Tridem	127

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 28 Selección separación de ejes.

- ✓ **Carga de referencia y exponente**

Eje	Direccional	Sencillo de llanta doble	Tándem	Trídem
Carga patrón (kN)	60.00	81.81	132.14	184.00
Exponencial	4	4.5	4.2	4.3

Fuente: Manual de diseño de concreto INVIAS.
Tabla 29 Cargas patrón y exponenciales para el cálculo del Factor de equivalencia.

- ✓ **Factor de seguridad de carga**

Tipo de Vía y Condiciones de Transito	Factor de Seguridad de Carga
Vías de Tránsito Pesado (Autopistas de Varios Carriles)	1.20

Tipo de Vía y Condiciones de Transito	Factor de Seguridad de Carga
Carreteras y Arterias Urbanas con Transito Medio	1.10
Carreteras Secundarias, Calles Residenciales y Otras Vías con Transito Liviano	1.00

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 30 Factor de seguridad de carga.

- ✓ **Factor de mayoración**

El factor de mayoración se considera como 1 ya que durante el cálculo del tránsito equivalente implícitamente se mayoran las cargas.

9.2 Pre-dimensionamiento de la losa de concreto por el método de la AASHTO

Este método fue desarrollado por la AASHTO en 1986 y tiene como esencia la determinación del espesor de un pavimento de concreto rígido que pueda soportar el número de ejes equivalentes sin producir una disminución en la capacidad de servicio. El espesor de la losa de concreto se determina por medio de la **ecuación 8.**

$$log_{10}(E18) = \left\{ \begin{array}{l} Zr \times So + 7.35 \times log_{10}(D+1) - 0.006 + \dfrac{log_{10}\left[\dfrac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right]}{1+\dfrac{1.624\times 10^{7}}{(D+1)^{8.46}}} \\ +(4.22 - 0.32 \times Pt) \times log_{10}\left[\dfrac{S'c \times Cd \times (D^{0.75}-1.132)}{215.63 \times J\left[D^{0.75} - \dfrac{18.42}{(\frac{Ec}{k})^{0.25}}\right]}\right] \end{array} \right\}$$

EC 8

Donde:
E18=W82=Numero de ejes equivalentes de 8.2Tn
Zr = Desviación normal estándar
So = Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento
D = Espesor del pavimento de concreto
ΔPSI = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final
Pt = índice de servicio final
S'c = MR = Resistencia a la flexión a los 28 días (Modulo de rotura)
Cd = Coeficiente de drenaje
J = Coeficiente de transmisión de cargas
Ec = Modulo de elasticidad del concreto en (Mpa)
K = Modulo de reacción del conjunto en (Mpa/m)

A continuación, se define el valor de las diferentes variables mencionadas para luego ser ingresadas al software BS-PCAA (diseño de pavimentos rígidos).

✓ **Numero de ejes equivalentes (E18).**

El número de ejes equivalentes de 8.2 ton en el carril de diseño durante el periodo de diseño es igual a **383,382** = E18. **Ver Tabla 22.**

✓ **Desviación normal estándar (Zr)**

La desviación normal estándar se define en función de la confiabilidad y considerando una serie de variables como espesor de las capas, características de los materiales, condiciones de drenaje y el transito que pueda soportar. Todo lo mencionado en función de la serviciabilidad de la vía. Ver **Tabla 31 y Tabla 32.** El nivel de confianza seleccionado es **80%** para un valor de **Zr = -0.841**.

Tipo de Carretera	Niveles de Confiabilidad	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: Software BS – PCAA.
Tabla 31 Niveles de confiabilidad.

Confiabilidad	Z_R	Confiabilidad	Z_R
50	0	92	-1,405
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327

Fuente: Tabla 8.32 Ingeniería de Pavimentos. Alfonso Montejo Fonseca.
Tabla 32 Valores de Zr en función de la confiabilidad.

✓ **Error estándar combinado (So**)

Este parámetro se define como el error de la predicción del tránsito y la predicción del comportamiento estructural, este valor varía de 0.30 a 0.40 para pavimentos rígidos, específicamente 0.35 para una construcción nueva y 0.40 para construcción sobre capas existentes. Adicional a esto tiene en cuenta los errores o desviaciones de diseño debido a:

- *Variaciones en propiedades de los materiales.*
- *Variaciones en las propiedades de la subrasante.*
- *Variaciones en la estimación del tránsito.*
- *Variaciones en las condiciones climáticas.*
- *Variaciones en la calidad de la construcción.*

Para efectos de este diseño se tomará un valor de **So=0.35**.

✓ **Diferencia entre la serviciabilidad inicial y final (ΔPSI)**

Para conocer la diferencia de serviciabilidad se debe conocer inicialmente el índice de serviciablidad inicial el cual depende de la calidad de la construcción; el valor obtenido en los ensayos realizados por la AASHTO es de 4.5 en pavimentos de concreto rígido. El valor del índice de serviciabilidad final se considera como el índice más bajo antes que la vía deba ser intervenida para algún tipo de rehabilitación o refuerzo estructural; para este tipo de vía la cual cuenta con un tránsito bajo por ser de carácter urbano se considera un valor 2.0. Por último, el diferencial de la serviciabilidad final con la inicial es igual a **2.5 = (ΔPSI).**

✓ **Módulo de rotura (MR)**

El módulo de rotura se definió en el **numeral 8** en función del número de camiones que pasan por la vía en un día el cual es equivalente a **4.0 Mpa = MR.**

✓ **Coeficiente de drenaje (Cd)**

Los valores de los coeficientes de drenaje dependen de la calidad de drenaje la cual está en función del tiempo en que demora el agua infiltrada en ser evacuada del pavimento y del porcentaje del tiempo a lo largo del año en que está expuesto el pavimento a la humedad o a niveles cercanos de saturación; este último parámetro depende de la ubicación del proyecto y de la presencia o niveles freáticos. A continuación, se relaciona la calidad del drenaje con el tiempo para remover el agua. Ver **Tabla 33.**

Calidad de drenaje	Término para remocion del agua
Excelente	2 horas
Buena	1 día
Aceptable	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	(el agua no drena)

Fuente: AASHTO guide for design of pavement structures.
Tabla 33 Capacidad del drenaje para remover el agua.

CALIDAD DE DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO EN QUE EL PAVIMENTO ESTA EXPUESTO A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS ALA SATURACION			
	< 1 %	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
EXCELENTE	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
BUENO	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
REGULAR	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
POBRE	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
MUY POBRE	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: AASHTO guide for design of pavement structures.
Tabla 34 Valores de coeficiente de drenaje.

De acuerdo con lo anterior, tenemos que el valor del coeficiente de drenaje es **Cd = 1**. Se espera que el tiempo al cual está expuesta la estructura del pavimento a niveles de humedad próximos a la saturación es mayor al 25%.

✓ **Coeficiente de transmisión de cargas (J)**

Este parámetro se considera para tener en cuenta la capacidad del concreto para transmitir las cargas a través de las discontinuidades, dicho de otra forma, la capacidad de transmitir cargas según la modulación de las losas de concreto. Para este proyecto se considera un tipo de pavimento no reforzado con juntas en concreto para un valor de **3.9 = J**.

Berma :	De Asfalto		De Concreto	
Dispositivos de transmisión de cargas :	Si	No	Si	No
Pavimento No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 - 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Reforzado continuo	2.9 - 3.2	-	2.3 - 2.9	-

Fuente: Software PCA.

Tabla 35 Coeficiente de transmisión de cargas.

✓ **Módulo de elasticidad del concreto (Ec)**

El módulo de elasticidad se recomienda determinarlo en función del tipo de agregado como lo menciona la Norma ASTM C49. A continuación se presenta en la **Tabla 36** unas expresiones que correlacionan el módulo de elasticidad en función del tipo de agregado.

De igual forma en la Norma Técnica Colombiana NSR – C (CR8.5 — Módulo de elasticidad) presentan unas ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad cuando no se dispone valor de masa unitaria. **Ilustración 13.**

Tabla 8.38 Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad	
Tipo de agregado y origen	Módulo de elasticidad Ec (MPa - kg/cm²)
Grueso - ígneo	$Ec = 5.500\sqrt{fc'} - 17.500\sqrt{fc'}$
Grueso - Metamórfico	$Ec = 4.700\sqrt{fc'} - 15.000\sqrt{fc'}$
Grueso - Sedimentario	$Ec = 3.600\sqrt{fc'} - 11.500\sqrt{fc'}$
Sin información	$Ec = 3.900\sqrt{fc'} - 12.500\sqrt{fc'}$

Fuente: Tabla 8.38 Ingeniería de Pavimentos. Alfonso Montejo Fonseca.

Tabla 36 Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

Para agregado grueso de origen ígneo:

$$E_c = 5\,500\sqrt{f'_c} \text{ en MPa}$$

Para agregado grueso de origen metamórfico:

$$E_c = 4\,700\sqrt{f'_c} \text{ en MPa}$$

Para agregado grueso de origen sedimentario:

$$E_c = 3\,600\sqrt{f'_c} \text{ en MPa}$$

Fuente: Titulo C NSR 10 CR8.5.1.

Ilustración 13 Expresiones para hallar el Ec en función del tipo de agregado.

En el **numeral 8** se determinó el módulo de rotura con un valor de 4.0 Mpa = 40 Kg/cm2, despejando la **ecuación 7** se obtiene el valor de la resistencia a la compresión (Fc). Ver **ecuación 9.** El valor obtenido de la resistencia a la compresión y el valor seleccionado del módulo de elasticidad **(Ec)** se observa en la **Tabla 37.**

$$Fc = \left(\frac{MR}{2.67}\right)^2 \qquad EC\ 9$$

(MR) Modulo de Rotura (Mpa)	(MR) Modulo de Rotura (Kg/cm2)	(Fc) Resistencia a la Compresión (Mpa)	(Ec) Modulo de Elasticidad (Kg/cm2)	(Ec) Seleccionado (Kg/cm2)	Tipo de Agregado Seleccionado
4.0	40	22	260562	260000	Agregado Grueso de Origen Ígneo

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37 Calculo del módulo de elasticidad del concreto.

- ✓ **Factor de Perdida (LS)**

Según el libro "Ingeniería de pavimentos, Alfonso Montejo Fonseca". Este parámetro viene a indicar la pérdida de apoyo potencial de las losas debido bien a la erosionabilidad de la subbase o bien a asentamientos diferentes de la subrasante; y aunque no aparece de forma explícita en la fórmula de diseño para la obtención del espesor, sí interviene de forma directa a través de una reducción del módulo de reacción efectivo de la superficie en la que se apoyan las losas. En la **Tabla 38** se indica los valores de Ls recomendados para distintos tipos de bases y subbases.

Tipo de base o subbase	Factor de perdida de Soporte Ls
Bases granulares tratadas con cemento (E:7 000 a 14000 Mpa)	0.0 a 1.0
Subbases tratadas con cemento (E: 3500 a 7000 Mpa)	0.0 a 1.0
Bases estabilizadas (E: 2500 - 7000 Mpa)	0.0 a 1.0
Subbases estabilizadas con asfaltos (E: 300 - 2000 Mpa)	0.0 a 1.0
Estabilización con cal (E: 150 - 1000 Mpa)	1.0 a 3.0
Materiales granulares sin tratar (E: 100 - 300 Mpa)	1.0 a 3.0
Suelos finos y subrasante naturales (E: 20 - 300 Mpa)	2.0 a 3.0
En esta tabla, E es el módulo elástico o el de resiliencia del material (Mpa = 10.1971 kgf/cm2)	

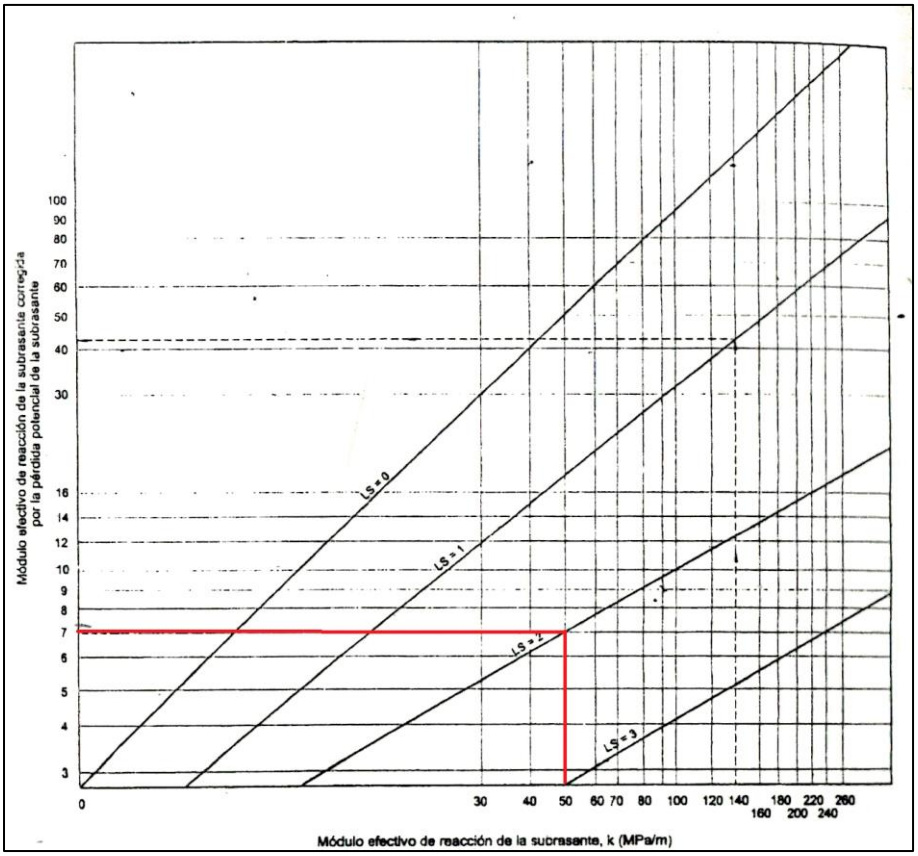
Fuente: Ingeniería de Pavimentos Alfonso Montejo Fonseca.

Tabla 38 valores del factor de perdida de soporte Ls en función del tipo de base o subbase.

El valor seleccionado por la presente consultoría es: Ls=2

- ✓ **Módulo de reacción del conjunto (K)**

El módulo de reacción del conjunto fue calculado previamente en el numeral 6.2, su resultado se puede observar en las **Tabla 20**. Para 15 cm de SBG K = 50.3, con este valor se entra al nomograma para encontrar el valor corregido.



Fuente: Ingeniería de Pavimentos Alfonso Montejo Fonseca.

Ilustración 14 Carta para corregir el módulo de reacción efectivo de la subrasante por pérdida potencial de soporte de la subbase.

Por tal motivo realizado el respectivo castigo de la perdida por capacidad de soporte de soporte (LS) este valor da como resultado= 7.0 Mpa/m.

Una vez determinados los diferentes parámetros, se procede a calcular el espesor de la losa de concreto haciendo uso del software BS-PCAA por la metodología de la AASHTO. Los valores obtenidos se presentan en la **Ilustración 15.**

Una vez realizado el pre-dimensionamiento de la losa de concreto por el método de la AASHTO, se deduce que el espesor mínimo de la losa de concreto debe ser igual a 19 cm.

```
                DISENO PAVIMENTOS RIGIDOS - METODO AASHTO
                        UNIVERSIDAD DEL CAUCA
                    FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
                        Software : BS-PCAA

Proyecto: [6.1 Verificacion Estructural 15 cm SBG Monteverde]
Diseño Pavimento rigido Vias Montería Monteverde

Datos :
        Ejes Equivalentes 8.2 Tn Carril de Diseño [W82]: 383,382
                          Resistencia K del Apoyo [k]: 7 Mpa/m
                           Modulo de Elasticidad [Ec]: 260000 kg/cm2
                               Modulo de Rotura [Mr] : 4 Mpa
                                       Confiabilidad : 80%   Zr : -0.8416
                         Error Estandar Transito [So]: 0.35
                       Indice de Servicio Inicial [Po]: 4.5
                       Delta Indice de Servicio [dPSI]: 2.5
                          Coeficiente de Drenaje [Cd] : 1
             Coeficiente Transmision Cargas Juntas [J] : 3.9

                                    Espesor Losa [D] : 18.0955 cm
```

Fuente: Calculo Software BS – PCAA.

Ilustración 15 Pre-dimensionamiento espesor losa de concreto método de la AASHTO SBG 15 cm para el barrio Monteverde.

9.3 Dimensionamiento de la losa de concreto por el método de la PCA

Esta metodología es aplicable para el dimensionamiento de la losa de concreto, ya sea concreto simple, concreto simple con pasadores o concreto reforzado. La finalidad del método es realizar un análisis de fatiga donde se determina el esfuerzo de borde por cada carga, esfuerzo de tracción en la fibra inferior de la losa y un análisis de erosión para controlar la deflexión en las esquinas de la losa. Para el dimensionamiento de la losa de concreto, es necesario considerar los siguientes parámetros:

9.4 Variables para el dimensionamiento de la losa de concreto

- ✓ **Módulo de rotura:** Valor previamente hallado en el **numeral 8,** donde se seleccionó un valor de **4.0 Mpa (40 Kg/cm2).**
- ✓ **Módulo de reacción del conjunto:** Como se mencionó en el **numeral 6.2,** se obtuvo el siguiente valor: **49.4 Mpa/m** para un espesor de subbase de **15 cm.**
- ✓ **Espectro de carga**: Esta variable se obtuvo en el análisis de tránsito específicamente en el **numeral 7.7.**
- ✓ **Periodo de diseño**: Esta variable se obtuvo en el análisis de tránsito específicamente en el **numeral 7.3,** obteniéndose un periodo de diseño de **20 años.**
- ✓ **Factor seguridad de carga**: Valor obtenido del **numeral 9.1,** factor seleccionado **1**.
- ✓ **Densidad del concreto**: Variable que depende de las propiedades físicas del concreto **2.4 Tn/m3.**

- ✓ **Relación de Poisson**: Comúnmente el valor más utilizado para una losa de concreto hidráulico es **0.15.**
- ✓ **Dimensiones de la losa:** Para este caso las vías tienen un ancho de **3.00 m** y una longitud de **3.60 m**. Las dimensiones seleccionadas se pueden observar en el **numeral 12.**
- ✓ **Coeficiente de variación (CV):** Variable que está relacionada directamente con una reducción de la resistencia del concreto para el análisis de fatiga. Se busca considerar una variación en la resistencia a la flexión del material y se logra por medio del **CV=15%. "**PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Desing Vol 4, 2001".
- ✓ **Factor de trabazón de agregados (AGG):** Está relacionado directamente con la resistencia al corte entre las partículas del agregado y las caras de las juntas, el valor seleccionado es de **25000 PSI (1758 Kg/cm2). "**PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Desing Vol 4, 2001".
- ✓ **% de camiones al borde**: Valor relacionado directamente con el análisis de fatiga, el cual genera esfuerzos en los bordes. **"**PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Desing Vol 4, 2001". Recomienda un valor de **6%.**
- ✓ **Diferencial de temperaturas (Δt):** Este valor hace parte de las variables para el control de los esfuerzos por gradiente térmico y se halla mediante la **ecuación 10. Δt = 12.54°C.**

$$\Delta T = \delta t * H \qquad EC\ 10$$

Donde
ΔT = Diferencial de temperaturas °C.
δt = Gradiente de temperatura durante el día 0.055 a 0.077 °C/mm (0.066).
H = Espesor de la losa pre-dimensionamiento en mm (190).

- ✓ **Coeficiente térmico (α)**: Valor que depende del tipo de agregado de la subbase granular. En este caso se utiliza grava para un coeficiente de expansión térmica del concreto de **1.08x10^{-5}/°C.** Ver **Tabla 39.**

Tipo de Agregado Grueso	Coeficiente de Dilatación	
	X 10^{-6}/°C	x 10^{-6}/°F
Cuarzo	11,9	(6,6)
Arenisca	11,7	(6,5)
Grava	10,8	(6,0)
Granito	9,5	(5,3)
Basalto	8,6	(4,8)
Caliza	6,8	(3,8)

Fuente: Guide for Desing of Pavement Structures, AASHTO, 1993.

Tabla 39 Valores del coeficiente de expansión térmica del concreto.

En esta metodología no se considera la resistencia a la compresión ya que el valor generado por las cargas a la placa de concreto rígido generalmente es equivalente a la presión de inflado (**7.73 Kg/cm2**), de lo cual se deduce que el pavimento no falla por resistencia la compresión y se controla por la resistencia a la flexión. Para el diseño del pavimento se consideraron bordillos ya que la vía se encuentra en un área urbanizada, adicional el confinamiento se realizará con bordillos y andenes.

En el diseño de espesores de los sectores o tramos viales estudiados se determinó la misma carga de tránsito (T), se consideró el uso de dovelas para el mecanismo de transferencia de carga. Con relación al módulo de rotura a flexión (MR) de la mezcla de concreto se recomienda que sea de **4.0 Mpa (40 Kg/cm2),** esto debido a que los pavimentos rígidos para bajos volúmenes de tránsito el diseño está controlado por el criterio de fatiga y el número de camiones.

9.5 Análisis de fatiga

Para el dimensionamiento de la losa de concreto se tiene como primer parámetro de diseño el análisis por fatiga, el cual se realiza para proteger el pavimento contra la acción de los esfuerzos para la acción repetida de las cargas. En el análisis de fatiga se analiza el comportamiento del esfuerzo de borde y esfuerzo interno contra el módulo de rotura del concreto y se determina el esfuerzo de borde e interno por cada carga (σb) por tracción en la fibra inferior de la losa de concreto. La falla por fatiga en una losa de concreto rígido se representa por medio de una fisura transversal.

- ✓ **Esfuerzo equivalente (σe):**

Como primera medida se calcula el esfuerzo equivalente, el cual se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_e = \frac{6Me}{h^2}\, f1 * f2 * f3 * f4 \qquad EC\ 11$$

Donde:
.σ_e = Esfuerzo equivalente (Kg/cm2)
M_e = Factor de carga.
.h = Espesor de la losa pre-dimensionamiento.
.f1 = Factor de ajuste debido al efecto de las cargas del eje y áreas de contacto.
.f2 = Factor de ajuste para condiciones de borde (Borde protegido = 1)
.f3 = Factor de ajuste por efecto de ubicación del camión en los esfuerzos de borde.
.f4= Factor de ajuste incremento en la resistencia del concreto a través del tiempo, y afectar la resistencia por el CV.

Como se mencionó anteriormente se consideran bordillos en la vía por ser de carácter urbano – residencial, por tal motivo las vías son con borde protegido. A continuación, se expresan las ecuaciones para hallar el factor de carga para los diferentes ejes.

- ➢ **Factor de carga (Me)**

El cálculo del factor de carga está en función del radio de rigidez relativa y del módulo de reacción del conjunto.

$$M_{e=}(1202.6 * Log(\rho) + 53.587 * \rho - 970.4) * (0.8742 + 0.01088K_k^{0.447})\ \ EJE\ SENCILLO\ \ EC\ 12$$

$$M_{e=}(2005.4 - 1980.9 * Log(\rho) + 99.008 * \rho) * (0.8742 + 0.01088K_k^{0.447})\ \ TANDEM\ \ \ \ EC\ 13$$

En las **expresiones 12 y 13** se observa la dependencia en las ecuaciones del radio de rigidez relativa de la losa (ρ), el cual se calcula por medio de la **ecuación 14.**

$$\rho = \sqrt[4]{\frac{Ec * h^3}{12(1-u^2) * K_{eff}}} \qquad EC\ 14$$

Donde
ρ = Radio de rigidez relativa Westergaard (pul)
Ec = Modulo del concreto (PSI)
.h = Espesor de la losa (pul)
μ = Relación de Poisson
K_{eff} = Módulo de Reacción del Apoyo de la losa (pci)

- **Factor de ajuste debido al efecto de las cargas del eje y áreas de contacto (f1)**

Las expresiones para calcular los diferentes factores de ajustes son las siguientes.

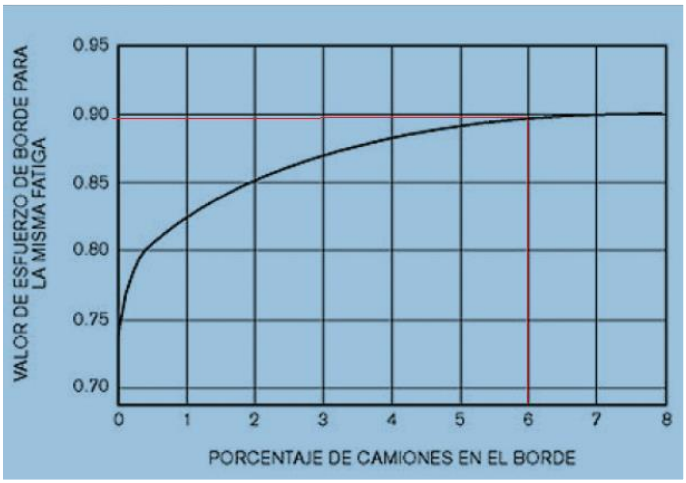
$$f1 = \left(\frac{24}{CES}\right)^{0.06} * \left(\frac{CES}{18}\right)\ \ EJE\ SENCILLO\ \ \ \ EC\ 15$$

$$f1 = \left(\frac{48}{CET}\right)^{0.06} * \left(\frac{CET}{18}\right)\ \ EJE\ TANDEM\ \ \ \ EC\ 16$$

Donde:
CES = Carga eje sencillo según espectro de carga en (Kips)
CET =Carga eje tándem según espectro de carga en (Kips)

- **Factor de ajuste por efecto de ubicación del camión en los esfuerzos de borde (f3).**

El factor de ajuste para efecto de ubicación del camión en los esfuerzos de borde es equivalente al porcentaje de camiones al borde equivalente al 6% y su factor se extrae de la **gráfica 3.** El valor de ***f3 = 0.894.***



Fuente: Elaboración propia.
Grafica 2 Grafica para hallas factor de ajuste por efecto de ubicación del camión.

- **Factor de ajuste incremento en la resistencia del concreto a través del tiempo, y afectar la resistencia por el CV (f4).**

El factor de ajuste incremento en la resistencia del concreto a través del tiempo después de los 28 días, además de una reducción de la resistencia por un coeficiente de variación se calcula mediante la **ecuación 17.**

$$f4 = \frac{1}{[1.235 * (1 - CV)]} \qquad EC\ 17$$

- ✓ **Relación de esfuerzos (Rσ):**

Una vez calculado el esfuerzo equivalente, se calcula la relación de esfuerzos por medio de la **ecuación 18.**

$$R\sigma = \frac{\sigma_e}{MR} \qquad EC\ 18$$

Donde
Rσ = Relación de esfuerzos
.σe = Esfuerzo equivalente (PSI)
MR = Modulo de rotura en (PSI)

- ✓ **Numero de repeticiones admisibles bajo criterio de fatiga (*Ni*):**

Conociendo la relación de esfuerzos se calcula el número de repeticiones admisibles bajo criterios de fatiga (*Ni*). Para lo cual se tienen las siguientes consideraciones:

- Cuando la relación de esfuerzos es menor igual a 0.45 Ni tiende al infinito.
- Cuando la relación de esfuerzos es 0.4325<Rσ<0.55 se utiliza la **ecuación 19**.

$$Ni = \left(\frac{4.2577}{R\sigma - 0.4325}\right)^{3.268} \qquad EC\ 19$$

- Cuando la relación de esfuerzos es mayor a 0.55 se utiliza la **ecuación 20.**

$$Ni = 10^{(11.737 - 12.077 R\sigma)} \qquad EC\ 20$$

✓ **Cálculo de consumo de fatiga parcial ($D_{r(i)}$):**

El cálculo de consumo de fatiga parcial se calcula para cada eje, en este caso se consideran los ejes simples y ejes tándem. El cálculo se realiza mediante la **ecuación 21.**

$$D_{r(i)} = \frac{ni}{Ni} * 100 \qquad EC\ 21$$

Donde:
$D_{r(i)}$ = Efecto de fatiga generado por cada carga o eje
.ni = Número de repeticiones esperadas por cada carga o espectro de carga.
Ni = Numero de repeticiones admisibles por cada carga o espectro de carga.

✓ **Cálculo de consumo de fatiga total acumulada ($D_{r)}$):**

Conociendo el cálculo de fatiga parcial por cada carga, se procede a calcular el cálculo de fatiga total acumulada, la cual debe ser inferior al 100%. El cálculo se realiza mediante la **ecuación 22.**

$$D_r = \sum_{i=1}^{m} D_{r(i)} \qquad EC\ 22$$

Donde:
$D_{r)i)}$ = Efecto de fatiga que genera cada grupo de cargas.
D_r = Daño acumulado total por fatiga.
.m= Numero de grupo de carga de diseño.

9.6 Análisis de Erosión

El segundo criterio para el dimensionamiento de la losa de concreto es el análisis por erosión que se presenta en el soporte de la losa de concreto, en este caso la subbase granular. En este análisis se busca limitar los efectos de deflexión del pavimento en los bordes de la losa, juntas y esquinas. A continuación, se expresan las variables para el análisis de erosión.

✓ **Cálculo de la deflexión equivalente (δ_{eq}):**

El cálculo de deflexión equivalente se considera en la esquina de la losa y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\delta_{eq} = \frac{Pc * f5 * f6 * f7}{K_{eff}} \qquad EC\ 23$$

Donde
δ_{eq} = Deflexión equivalente

Pc = Factor de presión
.f6 = Factor de transferencia de carga
.f5 = Factor de carga
.f7 = Factor de perdida de soporte.
K_{eff} = Modulo de reacción del conjunto.

- **Factor de presión (Pc):**

Para el cálculo de este factor se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Pc para pavimentos sin barras de trasferencia de carga y sin borde protegido*
- *Pc para pavimentos sin barras de trasferencia de carga y con borde protegido*
- *Pc para pavimentos con barras de trasferencia de carga y sin borde protegido*
- *Pc para pavimentos con barras de trasferencia de carga y con borde protegido*

Para el caso de este estudio el factor de presión se calcula para pavimentos con barras de trasferencia de carga y borde protegido. El cálculo se realiza para cada eje por medio de la **ecuación 24 y 25.**

$$Pc = 0.018 + \frac{72.99}{\rho} + \frac{323.1}{\rho^2} + \frac{1620}{\rho^3} \qquad EJE\ SENCILLO \qquad EC\ 24$$

$$Pc = 0.0345 + \frac{7146.25}{\rho} + \frac{2385.6}{\rho^2} + \frac{23848}{\rho^3} \qquad TANDEM\ O\ TRIDEM \qquad EC\ 25$$

Donde
Pc = Factor de presión.
ρ = Radio de rigidez relativa (pul).

- **Factor de transferencia de carga (*f6*):**

El factor de ajuste de transferencia de carga se considera con barras de trasferencia de carga. El factor de transferencia para esta consideración es ***f6 = 1***.

- **Factor de perdida de soporte (*f7*):**

El factor de perdida de soporte se considera con borde protegido. El factor de perdida para esta consideración es ***f6 = 1***.

- **Factor de carga (*f5*):**

El factor de carga se calcula en función del tipo de eje como se expresa en las siguientes expresiones:

$$f5 = \frac{Qeje}{18} \quad EJE\ SENCILLO \qquad EC\ 26$$

$$f5 = \frac{Qeje}{36} \quad EJE\ TANDEM \qquad EC\ 27$$

$$f5 = \frac{Qeje}{54} \quad EJE\ TRIDEM \qquad EC\ 28$$

- ✓ **Cálculo del factor de erosión (FE):**

El cálculo del factor de erosión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$FE = \log\left(\frac{11111 * (0.896 * P)^2 * C_1}{h * K_{eff}^{0.73}}\right) \qquad EC\ 29$$

Donde
P = Factor de potencia del suelo
.h = Espesor de la losa (pul)
K_{eff} = Modulo de reacción del conjunto (pci)

- **Factor de ajuste por erosionabilidad de la base de apoyo (C_1):**

Este factor está relacionado al módulo de reacción de la base de apoyo la cual en este caso es la subbase granular. El factor de ajuste se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_1 = 1 - \left[\left(\frac{K_{eff}}{2000}\right) * \left(\frac{4}{h}\right)\right]^2 \qquad EC\ 30$$

Donde
K_{eff} = Modulo de reacción de la subrasante (pci)
H = Espesor de diseño de la losa de concreto (pul)

- **Factor de potencia del suelo (P):**

Factor que depende directamente de la deflexión equivalente la cual se halla con la **ecuación 31.** La expresión para hallar P es la siguiente:

$$P = 268.7\left(\frac{(K_{eff})^{1.27} * (\delta_{eq})^2}{h}\right) \qquad EC\ 31$$

- ✓ **Numero de repeticiones admisibles bajo criterio de erosión ($N_{i(e)}$):**

A continuación, se calcula el número de repeticiones admisibles bajo el criterio de erosión para cada carga o espectro de carga. El cálculo se realiza mediante la **ecuación 32** teniendo en cuenta dos consideraciones:

- Si C1 * P > 9 se utiliza la **ecuación 32.**

$$Log(N_{i(e)} = 14.524 - 6.777 * (C1 * P - 9)^{0.103} - Log(C2) \qquad EC\ 32$$

- Si C1 * P < = 9 $N_{i(e)} = \infty$

Donde
C2 = 0.06 (Sin borde protegido)
C2 = 0.94 (Con borde protegido) Valor seleccionado

- ✓ **Determinación de la erosión total ($D_{k(i)}$):**

Se realiza la suma de las repeticiones admisibles por erosión para cada espectro de cargas mediante la **ecuación 33.** La sumatoria del consumo por erosión debe ser inferior al 100%.

$$D_{k(i)} = \sum \frac{ni}{N_{i(e)}} \qquad EC\ 33$$

Donde
$D_{k(i)}$ = Efecto de daño por erosión acumulado del espectro de cargas.
.ni = Numero de repeticiones esperadas por cada grupo de cargas.
N_i = Numero de repeticiones admisibles de cada grupo de cargas.

Una vez analizadas las diferentes variables y descrito las expresiones necesarias para el cálculo del consumo por **esfuerzos (fatiga)** y el cálculo del consumo por **erosión (deflexión)**, se asume un espesor igual al obtenido en la metodología de la AASHTO de la losa de concreto de **19 cm**, se realiza nuevamente el análisis con el software BS-PCAA para un espesor de subbase de **15 cm (K = 50.3 Mpa/m**) Ver **Ilustración 16.**

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

Proyecto: [6.1 Verificacion Estructural 15 cm SBG Monteverde]
Diseño Pavimento rigido Vias Montería Monteverde

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: 1.9 Factor Esfuerzo: 0.4686 Factor Erosion: 2.8906							
2.50	2.50	93,173	87.6	Inf	0.00	Inf	0.00
4.00	4.00	4,904	136.2	Inf	0.00	Inf	0.00
6.00	6.00	73,558	199.5	Inf	0.00	390,123,716	0.02
EJES SIMPLES RUEDA DOBLE							
Esfuerzo Equivalente: 1.9 Factor Esfuerzo: 0.4686 Factor Erosion: 2.8906							
6.00	6.00	98,077	199.5	Inf	0.00	390,123,716	0.03
11.00	11.00	49,038	352.6	25,222	194.43	1,704,999	2.88
EJES TANDEM RUEDA DOBLE							
Esfuerzo Equivalente: 1.6 Factor Esfuerzo: 0.3987 Factor Erosion: 3.0112							
21.00	21.00	19,615	286.0	1,115,209	1.76	1,004,831	1.95
22.00	22.00	14,712	298.7	401,963	3.66	766,759	1.92
				Total :	199.85	PCA-84:	6.79

Fuente: Calculo Software BS – PCAA.
Ilustración 16 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 19 cm para el barrio Monteverde.

Se concluye que el espesor de la losa de concreto de **19 cm** para un espesor de subbase granular de **15 cm** y un módulo de rotura de **4.0 Mpa**, Genera un porcentaje de consumo por fatiga (**Esfuerzo 199)** y un porcentaje de consumo por erosión (**Deflexión 6.79)**. Los valores obtenidos no son tolerables ya que el porcentaje de consumo por fatiga es superior al **85%** valores que se obtienen de

la relación del número de repeticiones esperadas con el número de repeticiones admisibles por cada eje de carga.

Como el espesor de la losa de concreto de **19 cm** no cumple con las condiciones de consumo por esfuerzos (fatiga), procedemos a aumentarlo a **20 cm**, realizando nuevamente el análisis son el software BS-PCAA. En la **Ilustración 17** se puede observar que, para una losa de concreto de **20 cm**, el consumo es inferior al 85 % por lo cual, tal espesor es adecuado a las condiciones de diseño.

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

Proyecto: [6.1 Verificacion Estructural 15 cm SBG Monteverde]
Diseño Pavimento rigido Vias Montería Monteverde

Datos :
           Resistencia K del Apoyo : 49.4 Mpa/m
                     Espesor Losa : 20 cm
                    Longitud Losa : 3.6 m
                       Ancho Losa : 3 m
             Modulo de Elasticidad : 260000 kg/cm2
                         Densidad : 2.4 Tn/m3
              Relacion de Poisson : 0.15
                 Modulo de Rotura : 4 Mpa
          Coeficiente de Variacion : 15%
                 Ancho de Berma : 0 cm
   Factor de Trabazon de Agregados : 1758 kg/cm2
               Camiones al Borde : 6%
                        Pasadores : SI
       Diferencial de Temperaturas : 11.22 oC
              Coeficiente Termico : 1.08E-05 1/oC
              Trafico para Alabeo : 0%
        Factor de Seguridad Cargas : 1
  Factor de Mayoración Repeticiones : 1

Resultados :

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

EJES SIMPLES RUEDA SIMPLE

Esfuerzo Equivalente: 1.7  Factor Esfuerzo: 0.4347  Factor Erosion: 2.8253

   2.50    2.50        93,173     81.5           Inf    0.00           Inf    0.00
   4.00    4.00         4,904    126.8           Inf    0.00           Inf    0.00
   6.00    6.00        73,558    185.6           Inf    0.00 12,559,258,532    0.00

EJES SIMPLES RUEDA DOBLE

Esfuerzo Equivalente: 1.7  Factor Esfuerzo: 0.4347  Factor Erosion: 2.8253

   6.00    6.00        98,077    185.6           Inf    0.00 12,559,258,532    0.00
  11.00   11.00        49,038    328.1        81,729   60.00      2,728,888    1.80

EJES TANDEM RUEDA DOBLE

Esfuerzo Equivalente: 1.5  Factor Esfuerzo: 0.3762  Factor Erosion: 2.9559

  21.00   21.00        19,615    268.9      [illegible]                      1.32
  22.00   22.00        14,712    280.9      1,854,990    0.79      1,129,781    1.30

                                                -------                 -------
                                          Total :   60.99         PCA-84:   4.42
```

Fuente: Calculo Software BS – PCAA.

Ilustración 17 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 20 cm para el barrio Monteverde.

Por último, en la **Ilustración 18** se obtienen los modelos estructurales del pavimento rígido, el cual se puede integrar al diseño geométrico y con el cual se puede calcular las cantidades de obra.

Losa de Concreto Hidráulico e = 20 cm MR = 4.0 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm K = 49.4 Mpa/m
Reemplazo con material tipo afirmado CBR: 10%, e= 40 cm
Geotextil T2100 para separación
Material existente en campo según estudio geotécnico.

Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 18 Modelo seleccionado en dimensionamiento.

10 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Durante el proceso de diseño se realiza un análisis de sensibilidad de la estructura seleccionada, con el fin de garantizar que cualquier cambio que se genere durante el proceso constructivo, la preparación e instalación de la subbase granular, algún cambio en las propiedades de la mezcla de concreto que alteren o disminuyan el módulo de rotura y cambios que se puedan presentar en el espesor de la losa de concreto no terminen afectando el desarrollo del proyecto. El análisis de sensibilidad permite manejar unos intervalos de confianza.

Dicho de otra forma, si durante la etapa de construcción se presentan cambios en los parámetros presentados en la **Tabla 40,** se puede verificar la combinación de estos en la **Tabla 41** y verificar si cumple los factores de esfuerzos y erosión.

K Conjunto (Mpa/m)	Espesor (mm)	Módulo de Rotura (Mpa)
49.4 – 54.8	180 - 220	4.0 - 4.4

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 40 Intervalos para el Análisis de Sensibilización.

Analisis de Sensibilidad.							
K Conjunto (Mpa/m)	Espesor (mm)	Modulo de Rotura (Mpa)	Factor de Mayoración Repeticion	Consumo de Esfuerzo	Consumo de Erosión	Verificación de Consumo de Esfuerzo	Verificación de Consumo de Erosion
49.4	180	4.00	1	756.98	10.65	NO CUMPLE	OK
49.4	180	4.20	1	317.60	10.65	NO CUMPLE	OK
49.4	180	4.40	1	143.37	10.65	NO CUMPLE	OK
49.4	190	4.00	1	199.85	6.79	NO CUMPLE	OK
49.4	190	4.20	1	88.49	6.79	NO CUMPLE	OK
49.4	190	4.40	1	42.10	6.79	OK	OK
49.4	200	4.00	1	60.99	4.42	OK	OK

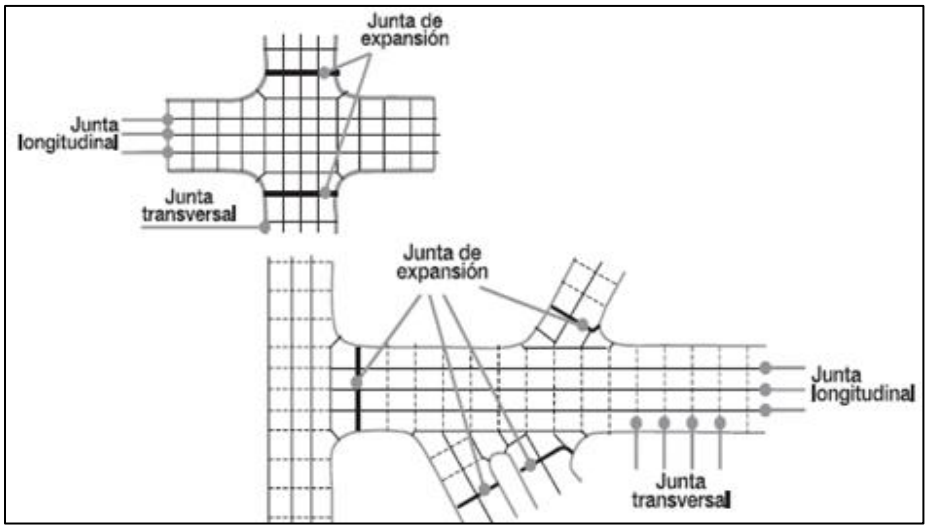
Analisis de Sensibilidad.							
K Conjunto (Mpa/m)	Espesor (mm)	Modulo de Rotura (Mpa)	Factor de Mayoración Repeticion	Consumo de Esfuerzo	Consumo de Erosión	Verificación de Consumo de Esfuerzo	Verificación de Consumo de Erosion
49.4	200	4.20	1	27.96	4.42	OK	OK
49.4	200	4.40	1	11.78	4.42	OK	OK
49.4	210	4.00	1	19.79	2.93	OK	OK
49.4	210	4.20	1	7.24	2.93	OK	OK
49.4	210	4.40	1	1.99	2.93	OK	OK
49.4	220	4.00	1	4.79	1.96	OK	OK
49.4	220	4.20	1	0.99	1.96	OK	OK
49.4	220	4.40	1	0.00	1.96	OK	OK
54.8	180	4.00	1	537.68	10.24	NO CUMPLE	OK
54.8	180	4.20	1	228.65	10.24	NO CUMPLE	OK
54.8	180	4.40	1	104.60	10.24	NO CUMPLE	OK
54.8	190	4.00	1	144.98	6.51	NO CUMPLE	OK
54.8	190	4.20	1	65.14	6.51	OK	OK
54.8	190	4.40	1	31.24	6.51	OK	OK
54.8	200	4.00	1	45.20	4.22	OK	OK
54.8	200	4.20	1	20.14	4.22	OK	OK
54.8	200	4.40	1	7.84	4.22	OK	OK
54.8	210	4.00	1	13.85	2.79	OK	OK
54.8	210	4.20	1	4.54	2.79	OK	OK
54.8	210	4.40	1	1.01	2.79	OK	OK
54.8	220	4.00	1	2.83	1.86	OK	OK
54.8	220	4.20	1	0.43	1.86	OK	OK
54.8	220	4.40	1	0.00	1.86	OK	OK

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 41 Análisis de Sensibilización.

11 DISEÑO DE JUNTAS

En las losas que conforman un pavimento rígido se presentan diferentes clases de esfuerzos generados por el paso de vehículos a lo largo del periodo de diseño, adicional se presentan esfuerzos de contracción y expansión del concreto causados por el movimiento de este, estos esfuerzos se controlan con la modulación o dimensionamiento de las losas por medio de juntas.

Los esfuerzos que se generan en los bordes y esquinas de las losas son mayores a los esfuerzos analizados en otras coordenadas de las losas, para lo cual las juntas ayudan a contrarrestar el riesgo a la fractura de las losas de pavimento, adicional en losas irregulares se recomienda usar refuerzo para mejorar la calidad integral de la losa y garantizar el número de repeticiones para el cual se calculó en el periodo de diseño seleccionado.



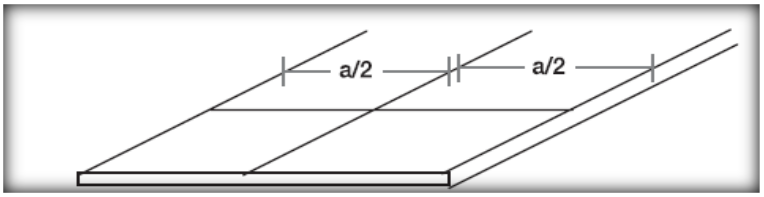
Fuente: Figura 6.4 y 6.5 M.D.C.
Ilustración 19 Ubicación de los tipos de juntas.

11.1 Juntas Longitudinales y barras de anclaje

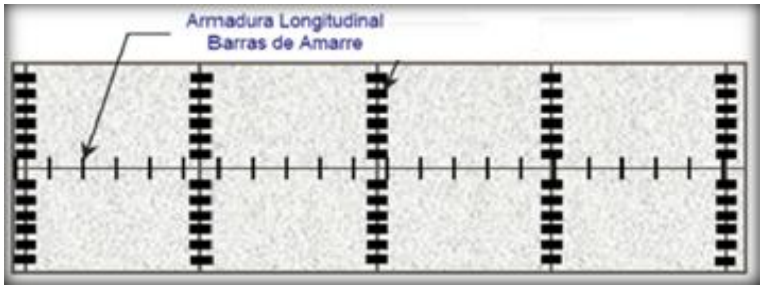
Las juntas longitudinales se definen teniendo en cuenta la dimensión de los equipos de construcción, el ancho de la vía a pavimentar y las restricciones constructivas, se deben evitar siempre que la separación entre dos juntas longitudinales (ancho de las losas), sea mayor que cuatro metros.

- ✓ Si durante el proceso constructivo el ancho de la losa supera los 4.5m, las juntas longitudinales permiten controlar el fenómeno del alabeo.
- ✓ Si se conserva una relación de losa con una geometría largo = ancho, las juntas longitudinales se convierten en juntas de construcción.

Para la vía en estudio, que es una vía de doble sentido vehicular y el ancho del pavimento es de 6.00 m, se debe construir una junta longitudinal para dividir el pavimento en dos franjas o carriles, recomendando que el ancho de las dos franjas sea igual.



Fuente: Figura 6.4 y 6.5 M.D.C.
Ilustración 20 Esquema para construcción de juntas longitudinales.



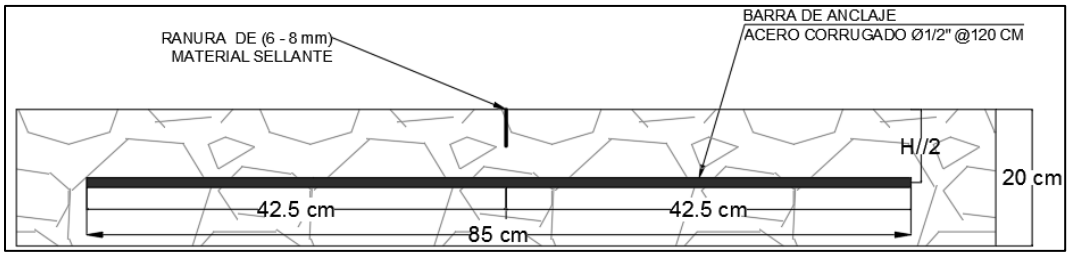
Fuente: Elaboración Propia.
Ilustración 21 Ubicación de juntas longitudinales.

Para la vía en estudio donde se realizará confinamiento lateral con bordillos, el Artículo INV 500-22 se especifica el mecanismo a utilizar para emplear las barras de amarre en este tipo de juntas. Las barras por emplear deben ser en acero corrugado con límite de fluencia (fy) de 280 Mpa (60000 PSI). El diámetro de 1/2", espaciamiento cada 120 cm y en longitudes de 85 cm para una losa de 20 cm de espesor. **Ver Tabla 42.**

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

Fuente: M.D.C Tabla 6.1.
Tabla 42 Tabla para la selección de las barras de anclaje.

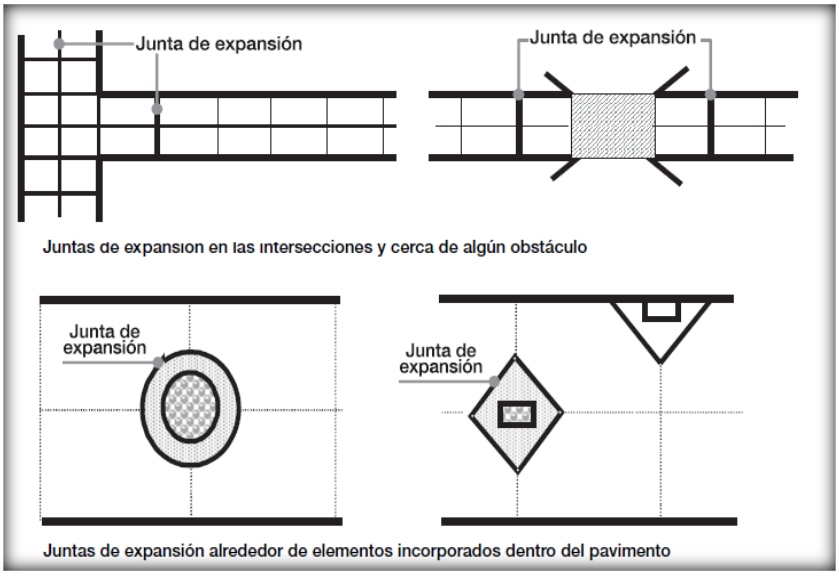
Independiente el largo de la losa se recomienda como mínimo 3 barras. Adicional durante el proceso constructivo es recomendable que la posición de las barras de anclaje y la construcción de la junta se haga según la **Ilustración 22**. Las barras de acero corrugado no deben ser instaladas a menos de 40 cm de la junta transversal para evitar que interfieran con el movimiento de las juntas.



Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 22 Sección típica para la ubicación de las barras de anclaje y construcción de junta.

11.2 Juntas de Expansión o aislamiento

Las juntas de expansión se deben construir para aislar pavimentos existentes del pavimento nuevo, adicional cuando se presentar cambios fuertes de dirección como en intersecciones viales; para la construcción de pozos de inspección ya sean de geometría circular o en forma de rombo se recomienda utilizar estas juntas. Las juntas de expansión se deben diseñar con un ancho de 10 a 15 mm y transversales en las losas lo cual permite con las dos condiciones mencionadas anteriormente el movimiento longitudinal de las losas. En la **Ilustración 23** se puede observar posibles casos de construcción de juntas de aislamiento.



Fuente: Figura 6.1 y 6.2 M.D.C.
Ilustración 23 Posición de las juntas de expansión.

11.3 Juntas Transversales y pasadores (Transferencia de cargas).

Estas juntas de contracción son juntas que permiten controlar la fisuración del concreto por contracción y alabeo, adicional permite controlar los efectos climáticos de temperatura y humedad cumpliendo una función mecánica de transferencia de carga por lo cual son denominadas juntas de alabeo. La separación entre juntas transversales como primera medida está en función del tipo de agregado como lo muestra la **Tabla 43.** Según la tabla mencionada, el espaciamiento entre las juntas

transversales no debe ser mayor a 4.5m, permitiendo controlar todas las fisuras considerando como agregados grava.

Es necesario mejorar la eficiencia de la trabazón de agregados haciendo uso de varillas de transferencia de carga conocidas como pasadores de carga o dovelas que son barras de acero cortas y lisas con un límite de fluencia (fy) mínimo de 280 Mpa (280 kg/cm2 o 60000 psi), incrustadas dentro del concreto fresco. Los pasadores se instalan en las juntas de tal manera que les permitan a las losas separarse y unirse entre sí, pero no desplazarse verticalmente y su función es absorber los esfuerzos de cortante generados por las cargas del tránsito al cruzar las juntas y transmitir a la losa adyacente entre el 40 y 45% de la carga de diseño cuando esta se coloca cerca de la junta. Artículo INV 500-22.

Para el buen funcionamiento de las barras de transferencia, estas deben ser lisas y se recomienda que toda la barra este recubierta de un material antiadherente para permitir los desplazamientos o movimientos horizontales de las losas; tal recomendación se hace ya que la vía a construir tiene flujo vehicular en ambos sentidos y es muy probable que se presente adelantamiento vehicular. En la **Tabla 44** se puede observar las diferentes barras de transferencia según el espesor de la losa.

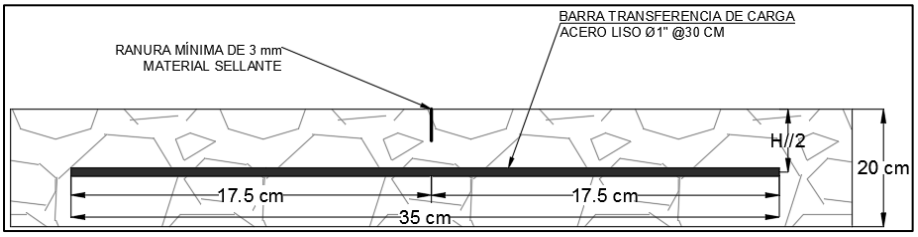
Tipo de agregado grueso	Separación máxima entre juntas (m.)
Granito triturado	7.5
Caliza triturada	6.0
Grava calcárea	6.0
Grava silícea	4.5
Grava menor de 19 mm (3/4")	4.5
Escorias	4.5

Fuente: Tabla 8.42 Ingeniería de Pavimentos Alfonso Montejo.
Tabla 43 Espaciamiento de juntas transversales, según el tipo de agregado del concreto.

Se seleccionan barras de transferencia de fluencia mínima de 280 Mpa (60000 PSI), diámetro de 1-1/8", espaciamiento cada 30 cm y en longitudes de 40 cm. Los pasadores se deben colocar en la mitad del espesor de las losas, paralelos entre sí, al eje longitudinal de la vía y a la superficie del pavimento, con una tolerancia medida en el extremo del pasador que no sobrepase los 10 mm respecto a la posición teórica. La manera más eficiente de lograr esto, es la de colocar los pasadores sobre unos soportes hechos con varillas, que quedan embebidos en el concreto. El concreto alrededor de los pasadores debe tener la misma compactación que en el resto del pavimento, para evitar la creación de zonas en las cuales la resistencia a la tracción sea más baja y por ende se convierta en un área que se puede fisurar. Durante el proceso constructivo se recomienda que la posición de las barras de transferencia de carga y la construcción de la junta se haga según la **Ilustración 24.**

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

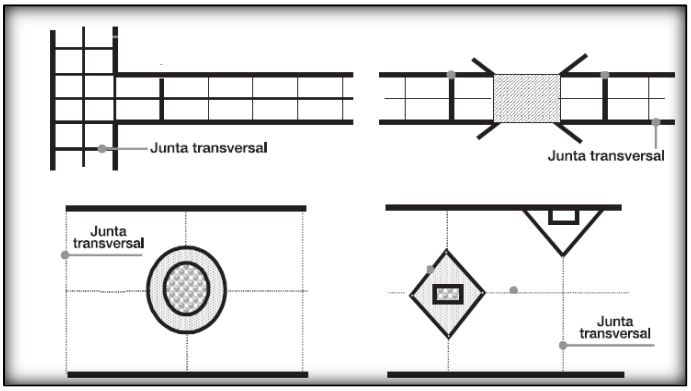
Fuente: M.D.C Tabla 6.2.
Tabla 44 Recomendaciones para la selección de barras de transferencia de carga.



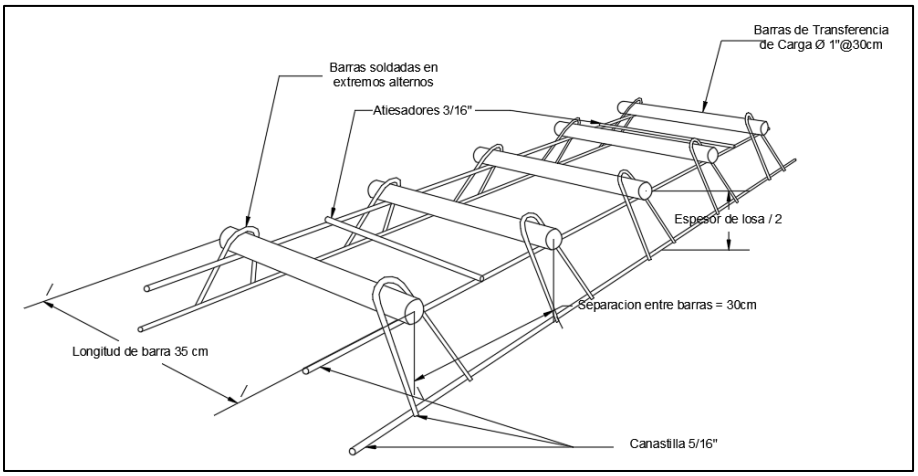
Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 24 Sección típica ubicación de las barras de transferencia y construcción de junta.

En la **Ilustración 25** se puede observar posibles casos de construcción de juntas transversales.

Por último, en la **Ilustración 26** se pueden observar las diferentes juntas mencionadas anteriormente, las cuales deben cumplir con las especificaciones expuestas para garantizar el buen funcionamiento de la losa de concreto y así garantizar su durabilidad.



Fuente: Figura 6.1 y 6.2 M.D.C
Ilustración 25 Posición de las juntas transversales.



Fuente: Elaboración Propia.
Ilustración 26 Isométrico colocación de barras de transferencia.

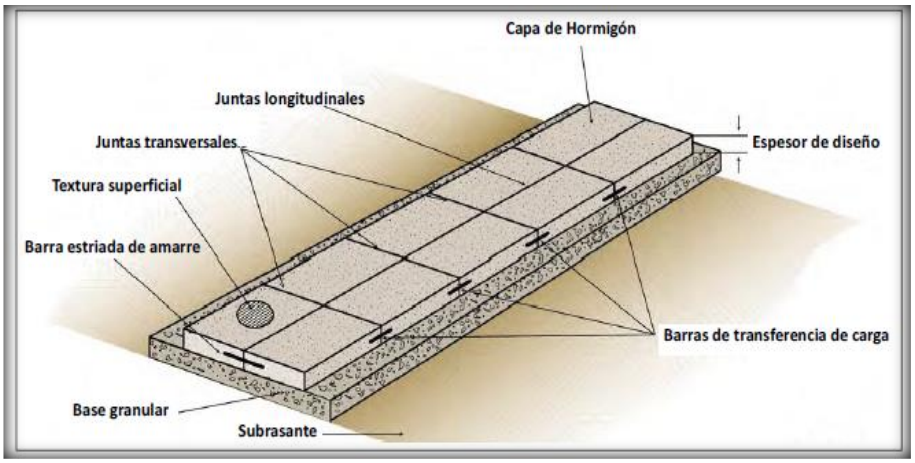


Ilustración 27 Isométrico losas de concreto y juntas.

11.4 Sellado de Juntas

Las juntas transversales se deben cortar con un equipo autopropulsor de disco diamantado cumpliendo con las siguientes dimensiones:

Corte inicial de 1/3 del espesor de la losa desde la superficie de esta con un ancho mínimo de 3 mm. Adicional un corte de ensanche de 3mm de ancho y profundidad de 30mm también medido desde la superficie de la losa. El ancho total de la junta será aproximadamente de 9mm. Para la construcción de la junta se debe seguir el siguiente esquema.

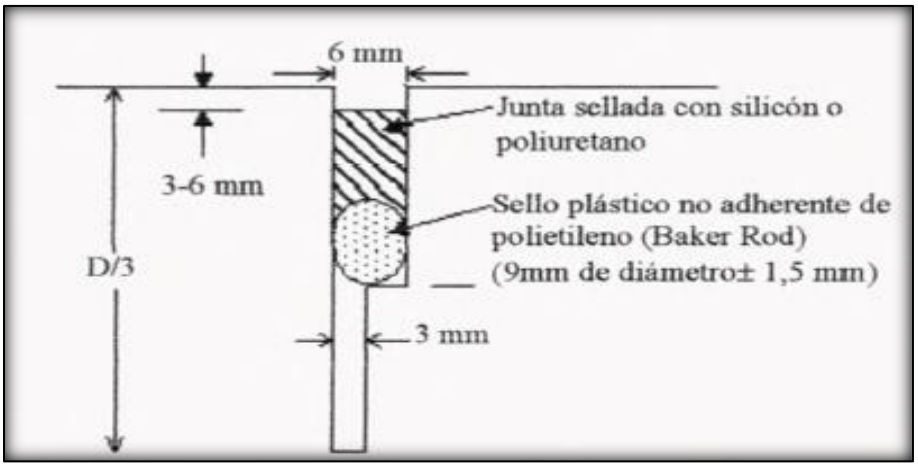


Ilustración 28 Detalle construcción de juntas.

12 MODULACIÓN DE LOSAS DE CONCRETO

La modulación de las losas de concreto juega un papel muy importante en la durabilidad y eficiencia de las placas, por tal motivo se debe conservar una relación entre el ancho y el largo de la placa para lo cual se plantean las siguientes alternativas de control:

12.1 Control esfuerzos por cambio uniforme de temperatura

Con este método se debe controlar el agrietamiento por fraguado y el esfuerzo por tracción admisible del concreto en las primeras horas de colocado en obra, tal esfuerzo debe ser inferior a 0.8 Kg/cm2 o 8000 Kg/m2.

En el **numeral 11.3** se definido la longitud máxima de la losa de concreto en función del tipo del agregado del concreto, el valor seleccionado fue 4.5 m. Con la **ecuación 34** se verifica el valor máximo de la losa de concreto en función del cambio uniforme de temperatura.

$$\sigma_{ta}\ x\ H\ x\ B = B\ x\ H\ x \frac{L}{2}\ x\ \mu_{cto}\ x\ f \qquad EC\ 34$$

Donde
L = Longitud de la losa
H = Altura de la losa = 20 cm
A = Ancho de la losa = 2.00, 2.50, 3.00 y 3.25 m
σ_{ta} = Esfuerzo máximo de tracción admisible del concreto a las primeras horas de colocado en obra = 8000 kg/m2
μ_{cto} = Peso unitario del concreto = 2400 Kg/m2.
f = Valor de factor de fricción = 1.5

Despejando **ecuación 34** tenemos la **ecuación 35.**

$$L \leq \frac{2\ x\ (\sigma_{ta})}{(\mu_{cto}) x\ f} \qquad L \leq \frac{2\ x\ \left(8000 \frac{Kg}{m2}\right)}{\left(2400 \frac{Kg}{m3}\right) x\ 1.5} = \ L = 4.44\ m \leq 4.50\ m\ \ OK \qquad EC\ 35$$

Por otra parte, se puede verificar el esfuerzo máximo de tracción admisible del concreto para una longitud de 3.00 m, dimensión con el cual se verifico el porcentaje de consumo por fatiga y erosión. El cálculo se realiza con la **ecuación 36.**

$$(\sigma_{ta}) = \frac{(\mu_{cto}) * L * f}{2} = \frac{2400 * 4.44 * 1.5}{2} = 7992\ \frac{Kg}{m2} < 8000\frac{Kg}{m2} \quad OK \qquad EC\ 36$$

Se puede concluir que por este método de control para una losa de 4.44 m de longitud el esfuerzo máximo de tracción admisible será inferior al máximo.

VALORES DEL FACTOR DE FRICCION (f)	
TIPO DE MATERIAL BAJO LA LOSA	FACTOR DE FRICCION (f)
TRATAMIENTO SUPERFICIAL	2.2
ESTABILIZACION CON CAL	1.8
ESTABILIZACION CON ASFALTO	1.8
ESTABILIZACION CON CEMENTO	1.8
GRAVA DE RIO	1.5
PIEDRA PARTIDA	1.5
ARENISCA	1.2
SUBRASANTE NATURAL	0.9

Tabla 45 Valores del factor de fricción.

12.2 Control esfuerzos internos por gradientes térmicos (alabeo)

Con esta metodología se busca controlar los esfuerzos internos por gradiente térmico en función de la longitud de la losa ya que al cambiar la temperatura ambiente durante el día y la noche también cambia la temperatura del pavimento lo que genera el fenómeno del alabeo en la losa de concreto. También se debe considerar que el peso propio de la losa soportada en la superficie de apoyo sobre el área de contacto genera esfuerzos en los bordes de la losa y en la parte interior de la misma. En la **Ilustración 29** se puede observar el comportamiento de la losa tanto en el día como la noche.

En la **Ilustración 30** se pueden observar los diferentes esfuerzos que se deben hallar en la losa de concreto.

Donde
σbx = Esfuerzo de borde en x lado ancho (A)
σby = Esfuerzo de borde en y lado largo (L)
σi = Esfuerzo interno

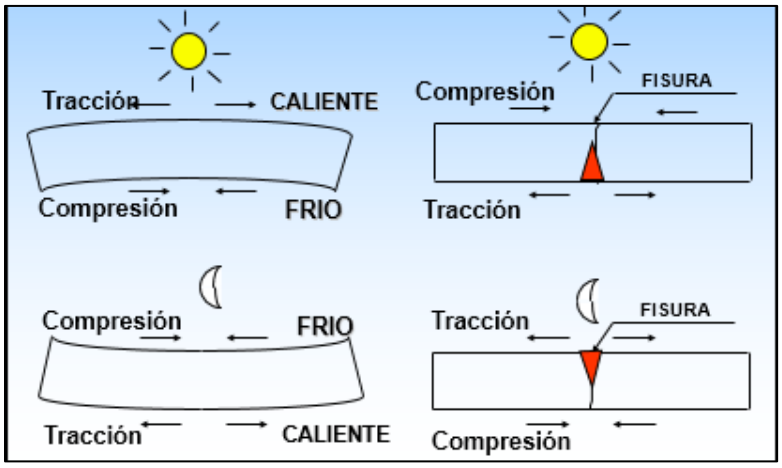
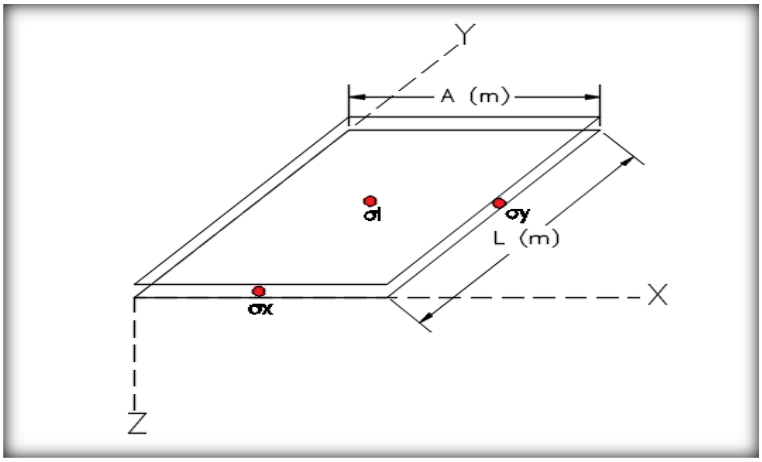


Ilustración 29 Comportamiento de alabeo teórico diurno y nocturno.



Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 30 Losa con esfuerzos.

- ✓ **Cálculo de los esfuerzos de borde en X *(σx)* y en Y *(σy).***

$$\sigma_{bx} = \left[\frac{E * \alpha * \Delta t}{2}\right] * Cx \qquad \left(\frac{Kg}{cm2}\right) \qquad EC\ 37$$

$$\sigma_{by} = \left[\frac{E * \alpha * \Delta t}{2}\right] * Cy \qquad \left(\frac{Kg}{cm2}\right) \qquad EC\ 38$$

Donde:
σ_{bx} *= Esfuerzo de borde en la losa sobre el eje x.*
σ_{by} *= Esfuerzo de borde en la losa sobre el eje y.*
Δt *= Diferencia temperatura.*
$\propto$ *= Coeficiente térmico (α).*
Ec *= Módulo del concreto (Ec) en función norma* ***ASTM C49***
Coeficiente de Bradbury

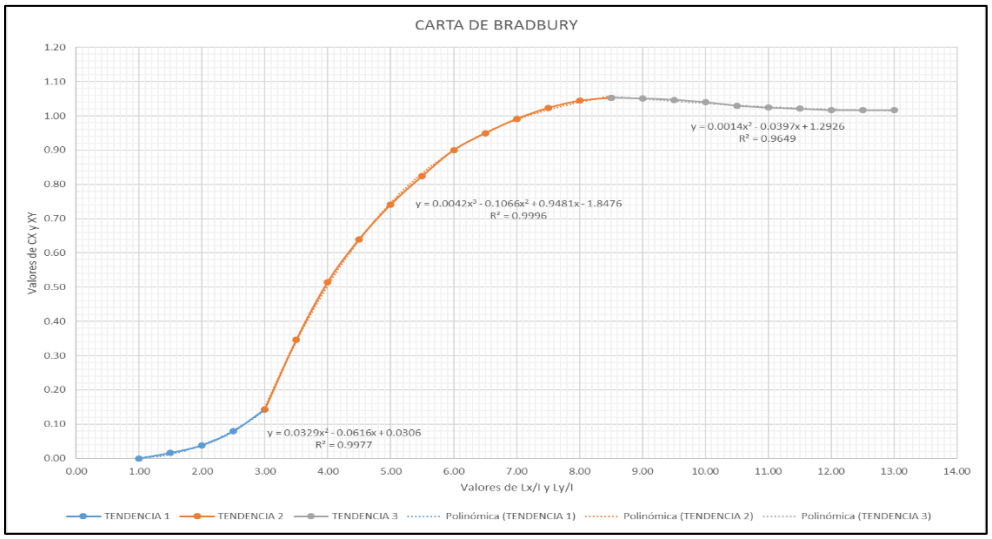
$$Cx = \frac{Lx}{\rho} \quad y \quad Cy = \frac{Ly}{\rho}$$

Donde:
Cx = Coeficiente de Bradbury en x.
Cy = Coeficiente de Bradbury en y.
Lx = Ancho de la losa
Ly = Longitud de la losa
$\rho = I$ = Radio de rigidez relativa Westergaard (m).

$$\rho = \sqrt[4]{\frac{Ec * H^3}{12(1-u^2) * K_{eff}}}$$

Donde:
ρ= Radio de rigidez relativa.
H = Espesor de la losa
K_{eff} = Modulo de reacción del conjunto
μ = Relación de Poisson.

Para hallar los coeficientes de Bradbury (CX y CY), esta consultoría grafico la carta de Bradbury encontrando tres líneas de tendencia. Una vez calculado el valor de (***Lx/I y Ly/I),*** se pueden ingresar estos valores a una de las tres líneas de tendencia encontradas como se observa en la **gráfica 6.**



Fuente: Elaboración propia.
Grafica 3 Carta de Bradbury para hallar los coeficientes de alabeo Cx y Cy.

En la **Tabla 46** se pueden observar los valores de las diferentes variables mencionadas anteriormente. Igualmente, en la **Tabla 47,** se pueden observar los valores calculados de ***Cx*** y ***Cy*** después de remplazar los valores de ***Lx/I y Ly/I*** en la ecuación polinómica de grado 3 encontrada por la línea de tendencia que más se ajustó a los datos de la carta de Bradbury. Los valores encontrados se remplazan en la **Tabla 48** para poder encontrar los esfuerzos de borde en la placa de concreto rígido.

E = Modulo de Elasticidad del concreto	260000	Kg/cm2
H = Espesor de la Losa	0.20	m
μ = Relación de Poisson	0.15	
Keff = Modulo del Conjunto	4.94	Kg/cm3
I = Radio de Rigidez Relativa	77.39	cm
α = Coeficiente de Exp Term	1.08E-05	°C
Δt = Diferencia de Temperatura	13.20	°C
MR = Modulo de Rotura del Concreto	4.00	Mpa

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46 Variables para el cálculo de esfuerzos de bordes e internos.

Linea de Tendencia 1 Valores de Lx/I y Ly/I de 0 a 3 Losa de 2.39 m x 2.39 m.							
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K2**	**LX/I / LY/I**	**K3**	
CY	0.07	0.03	2.39	-0.06	2.39	0.03	
CX	0.07		2.39		2.39		
Linea de Tendencia 2 Valores de Lx/I y Ly/I de 3 a 9 Losa de 3.00 m x 3.60 m							
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^3**	**K2**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K3**	**LX/I / LY/I**	**K4**
CY	0.68	0.0042	4.65	-0.1066	4.65	0.9481	4.65	-1.8476
CX	0.47		3.88		3.88		3.88	
Linea de Tendencia 2 Valores de Lx/I y Ly/I de 3 a 9 Losa de 3.40 m x 4.0 m							
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^3**	**K2**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K3**	**LX/I / LY/I**	**K4**
CY	0.78	0.0042	5.17	-0.1066	5.17	0.9481	5.17	-1.8476
CX	0.62		4.39		4.39		4.39	
Linea de Tendencia 2 Valores de Lx/I y Ly/I de 3 a 9 Losa de 3.50 m x 4.0 m							
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^3**	**K2**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K3**	**LX/I / LY/I**	**K4**
CY	0.78	0.0042	5.17	-0.1066	5.17	0.9481	5.17	-1.8476
CX	0.65		4.52		4.52		4.52	
Linea de Tendencia 2 Valores de Lx/I y Ly/I de 3 a 9 Losa de 3.50 m x 3.50 m							
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^3**	**K2**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K3**	**LX/I / LY/I**	**K4**
CY	0.65	0.0042	4.52	-0.1066	4.52	0.9481	4.52	-1.8476
CX	0.65		4.52		4.52		4.52	
Linea de Tendencia 2 Valores de Lx/I y Ly/I de 3 a 9 Losa de 4.00 m x 4.00 m							
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^3**	**K2**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K3**	**LX/I / LY/I**	**K4**
CY	0.78	0.0042	5.17	-0.1066	5.17	0.9481	5.17	-1.8476
CX	0.78		5.17		5.17		5.17	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47 Línea de tendencia para cálculo de CX y CY

Posteriormente con las **ecuaciones 37 y 38** se calculan los esfuerzos de borde en ***X*** y en ***Y***. Por último, se debe realizar una verificación de esfuerzos donde se debe garantizar que los esfuerzos de borde deben ser inferiores a **0.45MR**. Ver **Tabla 48.**

Cálculo de Esfuerzos de Borde en X y Y								
Dirección	**Geometría de la Losa (m)**		**Lx/I**	**Ly/I**	**Por Grafica**		**Calculo de Esfuerzo**	
	Ly	**Lx**			**CX**	**CY**	**σb Y**	**σb X**
Vías Montería	1.85	1.85	2.39	2.39	0.07	0.07	1.32	1.32
	3.60	3.00	3.88	4.65	0.47	0.68	12.58	8.72
	4.00	3.40	4.39	5.17	0.62	0.78	14.55	11.42
	4.00	3.50	4.52	5.17	0.65	0.78	14.55	12.02
	3.50	3.50	4.52	4.52	0.65	0.65	12.02	12.02
	4.00	4.00	5.17	5.17	0.78	0.78	14.55	14.55

Cálculo de Esfuerzos de Borde en X y Y								
Dirección	Geometría de la Losa (m)		Lx/I	Ly/I	Por Grafica		Calculo de Esfuerzo	
	Ly	Lx			CX	CY	σb Y	σb X
Dirección	σC (Kg/cm2) = 0.45MR		σb Y	σb X	Chequeo en Y		Chequeo X	
Vías Montería	18.00		1.32	1.32	OK		OK	
			12.58	8.72	OK		OK	
			14.55	11.42	OK		OK	
			14.55	12.02	OK		OK	
			12.02	12.02	OK		OK	
			14.55	14.55	OK		OK	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 48 Calculo y verificación de esfuerzos de borde.

✓ **Cálculo de los esfuerzos internos (σi) en X y en Y.**

Para el cálculo de los esfuerzos internos en la losa de concreto, se utiliza la misma metodología que para el cálculo de los esfuerzos de borde, pero cambian las ecuaciones; en este caso se utilizan las **ecuaciones 39 y 40.** Los resultados se pueden observar en la **Tabla 49.**

$$\sigma_{ix} = \left[\frac{E\ x\ \alpha\ x\ \Delta t}{2}\ x\ \frac{CX + \mu CY}{1 - \mu^2}\right] Kg/cm2 \qquad EC\ 39$$

$$\sigma_{iy} = \left[\frac{E\ x\ \alpha\ x\ \Delta t}{2}\ x\ \frac{CY + \mu CX}{1 - \mu^2}\right] Kg/cm2 \qquad EC\ 40$$

Donde:

σ_i x= Esfuerzo interno de la losa en la mitad de la placa por el lado ancho.

σ_i y= Esfuerzo interno de la losa en la mitad de la placa por el lado largo.

Cálculos de Esfuerzo Internos en X y Y								
Dirección	Geometría de la Losa (m)		Lx/I	Ly/I	Por Grafica		Calculo de Esfuerzo	
	Ly	Lx			CX	CY	σi Y	σi X
Vías Montería	1.85	1.85	2.39	2.39	0.07	0.07	1.56	1.56
	3.60	3.00	3.88	4.65	0.47	0.68	14.21	10.85
	4.00	3.40	4.39	5.17	0.62	0.78	16.63	13.92
	4.00	3.50	4.52	5.17	0.65	0.78	16.72	14.52
	3.50	3.50	4.52	4.52	0.65	0.65	14.14	14.14
	4.00	4.00	5.17	5.17	0.78	0.78	17.11	17.11
Dirección	σC (Kg/cm2) = 0.45MR		σi Y	σi X	Chequeo en Y		Chequeo X	
Vías Montería	18.00		1.56	1.56	OK		OK	
			14.21	10.85	OK		OK	
			16.63	13.92	OK		OK	
			16.72	14.52	OK		OK	
			14.14	14.14	OK		OK	
			17.11	17.11	OK		OK	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49 Calculo y verificación de esfuerzos internos.

De lo anterior se concluye que las dimensiones seleccionadas garantizan que las losas de concreto no sufrirán agrietamiento por alabeo, por lo cual se recomienda se respeten las dimensiones dadas, en el **Anexo 2** del presente informe de pavimento se puede ver el plano con las modulaciones de la vía en estudio, con sus respectivas dimensiones tanto en los tramos rectos como en los tramos curvos, también se enumeraron las placas y se identificaron las juntas longitudinales, transversales y de expansión las cuales tienen características y funciones diferentes, adicional a eso se proyectaron las losas que deberán ser reforzadas debido a su geometría o cualquier otro parámetro que justifique el refuerzo.

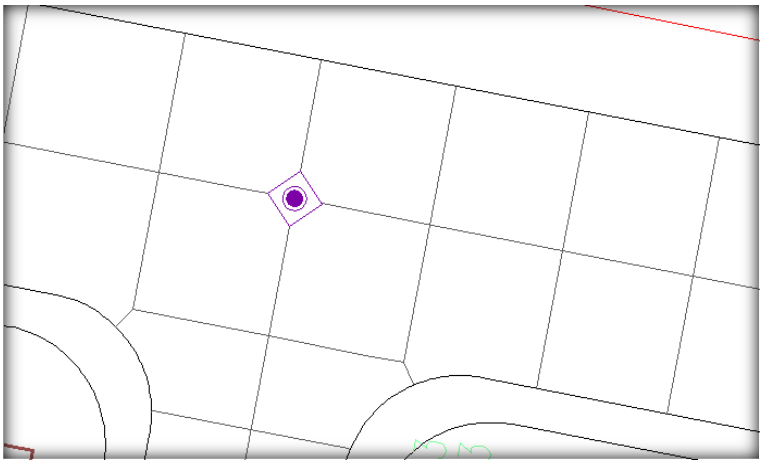
12.3 Control geométrico

- ✓ **Losas de concreto:**

Este método permite garantizar la durabilidad y funcionalidad de las placas de concreto ya que abarca los dos métodos mencionados anteriormente donde la longitud máxima por geometría debe estar entre $0.8 \leq L/B \leq 1.2$, lo más recomendable es utilizar losas con geometría cuadrada, pero también se puede conservar una longitud de losas donde L = 1.2(A). Donde L= Longitud y A = Ancho de la losa.

- ✓ **Pozos de inspección céntricos**

Para los pozos de inspección céntricos se debe ajustar la modulación de las losas manteniendo la relación de esbeltez, con el fin que la intersección de la Junta transversal y la junta longitudinal coincidan con el centro del pozo, adicional en lo posible utilizar estructuras en forma de rombo para aislar la estructura del pozo a la losa de concreto mediante una junta de expansión y así prevenir las fisuras que aparecerán por retracción del concreto, de esta forma no es necesario reforzar las placas involucradas, solo si son placas irregulares. Cuando la junta de expansión alrededor de las tapas de los pozos coincide con la junta transversal y la junta longitudinal se construye como se describe en la **Ilustración 31.**



Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 31 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección centrados.

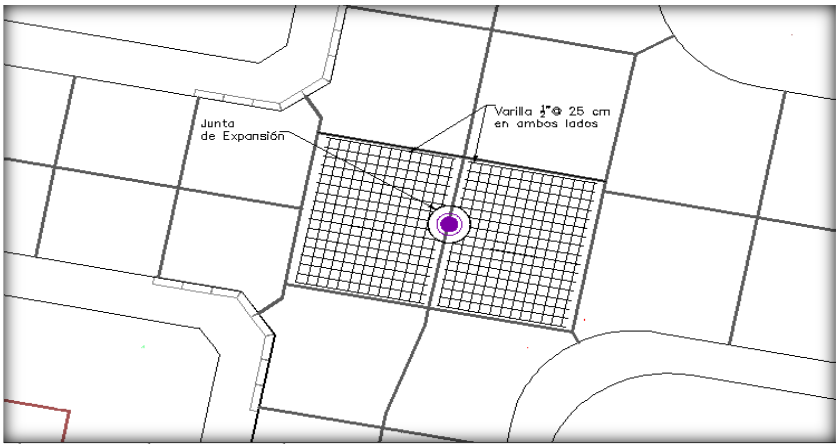
- ✓ **Pozos de inspección excéntricos**

Cuando los pozos de inspección son excéntricos o la junta de expansión alrededor de las tapas de los pozos no coincide con la junta longitudinal, se puede emplear una estructura circular para aislar el pozo de la losa y dilatar con una junta de expansión, adicional es necesario reforzar la losa o las losas involucradas como lo muestra la siguiente **Ilustración 32**. En caso de que el pozo de inspección involucre dos o más placas, es necesario reforzarlas. **Ilustración 33,** adicional las losas que se ven intervenidas por los pozos de inspección deben ser reforzadas por su irregularidad, utilizando una sola parrilla con varilla de ½", cuando la losa se ve involucrada en un 50% se debe colocar doble parilla con las mismas especificaciones. **Ilustración 34.**



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 32 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre una losa.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 33 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre más de una losa.

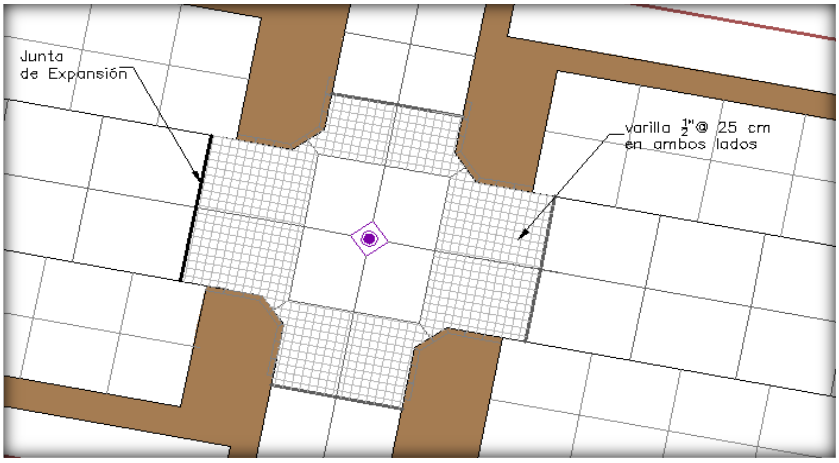


Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 34 Representación gráfica de la construcción de varios pozos de inspección sobre una losa.

- ✓ **Losas irregulares y localizadas en intersección**

Para el caso cuando las losas son irregulares y no cuentan con una geometría definida, se debe reforzar y en lo posible dilatar con juntas de expansión, adicional en las intersecciones viales es necesario reforzar las losas para evitar agrietamiento por el fenómeno del frenado vehicular. **Ver Ilustración 35.**



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 35 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares.

13 RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

- ✓ Se recomienda durante el proceso constructivo en la instalación del geotextil, conservar las especificaciones técnicas del **artículo INV 232-22** "estabilización de suelos de subrasante y capas granulares con geotextil". Si durante el proceso constructivo el contratista determina cambiar las especificaciones mecánicas del geotextil, se debe consultar al diseñador de la estructura de pavimento para realizar el respectivo chequeo de refuerzo, separación y estabilidad de la subrasante con el uso de geotextil, de lo contrario esta empresa consultora no se hará responsable.

- ✓ Durante el proceso constructivo de la subrasante mejorada se recomienda utilizar un material de afirmado que cumpla con CBR mínimo del 10 %, el cual corresponde al CBR equivalente entre dos capas y con las especificaciones según el **artículo 220-22** INV (Terraplenes) y **artículo 230-22** INV (Mejoramiento de la subrasante con adición de materiales). De igual forma el contratista debe garantizar que durante el proceso de excavación, si se identifica material orgánico, este deberá ser retirado y remplazado para garantizar la calidad del suelo.

- ✓ Esta consultoría, recomienda implementar un material de rajón con espesor de 40 cm en las zonas críticas donde se presenten problemas geotécnicos asociados con las características mecánicas de la subrasante (suelos blandos, alto potencial de expansión y bajas capacidad portante), con esto proporcionamos un terreno de fundación apto para soportar las cargas del tránsito en la etapa de construcción. Adicional reducimos la posibilidad de asentamientos diferenciales y mitigamos la presencia de problemas geotécnicos asociados con las características del subsuelo.

- ✓ Se recomienda que el mejoramiento con piedra rajón en los tramos críticos que presenten problemas de estabilidad se realice en aproximadamente el 30% de la longitud total de la vía. Esta sugerencia se basa en experiencias previas, las cuales han demostrado que, en general, los suelos de Montería suelen requerir este porcentaje de intervención para lograr una mejora efectiva.

- ✓ El contenido de materia orgánica no debe superar el estandarizado según la especificación técnica de la **norma INV E-121** "contenido de materia orgánica máximo (%)".

- ✓ Se recomienda durante el proceso de céreo y durante el proceso de colocación de cada capa de mejoramiento pasar una volqueta sobre la vía a construir con la finalidad de identificar fallos para ser retirados y remplazados por piedra rajón. De igual forma el contratista debe garantizar que durante el proceso de excavación, si se identifica material orgánico, este deberá ser retirado y remplazado para garantizar la calidad del suelo.

- ✓ Durante el proceso constructivo de la subbase granular se recomienda compactar subcapas no mayores a 15 cm hasta alcanzar una densidad seca del 95 % según el proctor modificado, adicional el material de subbase debe cumplir con las especificaciones según el **artículo INV 320 – 22** "Subbase Granular clase C". Lo anterior al nivel del tránsito ya que la clasificación y selección de la subbase granular, de debe a la variable mencionada. La **Tabla 22** presentan el número de vehículos esperados según el espectro de carga (**273,831 vehículos**). Las referencias de selección de subbase se muestran en la **Tabla 50 y Tabla 51.**

CLASE DE SUB-BASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
Clase C	NT1
Clase B	NT2
Clase A	NT3

Fuente: Tabla 320-1 Articulo 320-2013 INVIAS
Tabla 50 Uso típico de las diferentes subbases granulares.

Número de ejes equivalentes de 80 kN que circulan en el carril y período de diseño x 10^6								
Invías (2013)			IDU (2011)					
NT1	NT2	NT3	T0	T1	T2	T3	T4	T5
<0.5	0.5-5.0	>5.0	<0.2	0.2-0.5	0.5-1.5	1.5-3.0	3.0-7.5	>7.5

Fuente: Tabla 2.1 Pavimentos, materiales, construcción y diseño, Freddy Alberto Reyes
Tabla 51 Categoría de tránsito de acuerdo con INVIAS 2013.

- ✓ Se recomienda hacer control estricto de la superficie o nivelación del material granular antes de instalar la capa con apoyo de equipo topográfico, garantizando que los bombeos planteados en el diseño geométrico se respeten para esta capa del pavimento rígido con el fin de evitar dejar desniveles o depresiones que generen en el concreto esfuerzo de tensión inadmisible para el mismo.

- ✓ Se recomienda respetar la modulación de las losas de concreto conservando las dimensiones seleccionadas por esta consultoría y garantizando un desarrollo homogéneo a lo largo de todas las vías como se muestra en la **Ilustración 36**, en caso de generarse por procesos constructivos cambios en la geometría de las losas de concreto, se debe consultar al diseñador ya que de exceder los valores máximos de las losas de concreto se puede presentar fisuras por alabeo como se indica en la **Ilustración 37.**

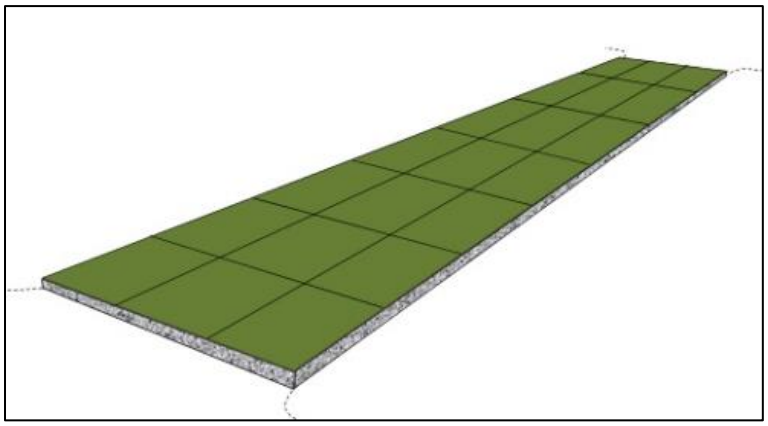


Ilustración 36 Representación gráfica de una óptima modulación de losas de concreto.

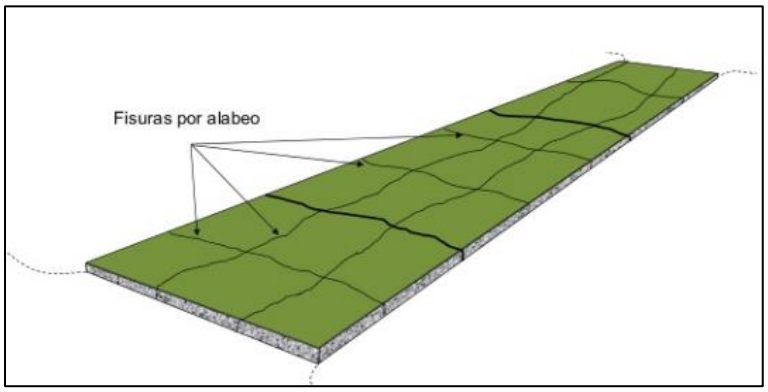


Ilustración 37 Representación gráfica de fisuras por alabeo.

- ✓ Se recomienda reforzar las losas irregulares y las que se encuentren en una intersección vial, adicional se debe reforzar las losas que se vean involucradas con algún tipo de registro o pozo de inspección; cuando más del 50% de la losa se vea involucrada por el tipo de estructuras mencionadas anteriormente, se debe colocar parrilla sencilla de acero de refuerzo corrugado de ½" cada 25 cm en ambas direcciones, ubicadas a h/2 del espesor en la fibra superior, como medida de control de auto fisuración del concreto. También, se recomienda el empleo de este refuerzo en aquellas losas que hacen parte de zonas de paraderos, considerando los efectos de frenado y aceleración de los vehículos. Se puede reemplazar la parrilla en acero por una malla electrosoldada. Se debe seguir las especificaciones del **artículo 640 – 22 INV** "acero de refuerzo".

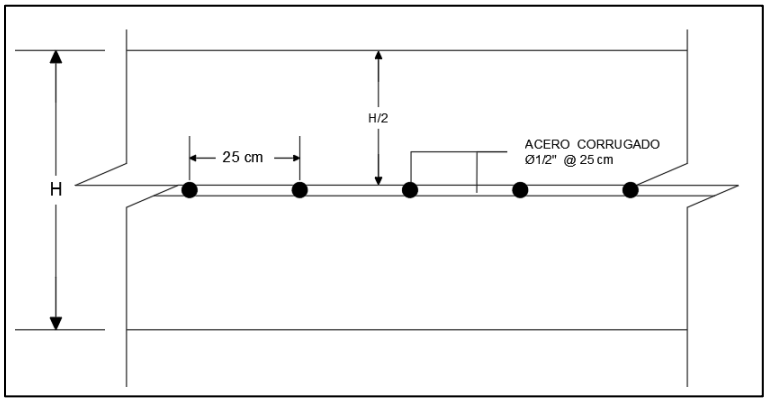


Ilustración 38 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares.

- ✓ Se requieren bordillos, estos pueden ser prefabricados (sin refuerzo) con un ancho de 0,20 m y altura 0,60 m, con una resistencia mínima a la compresión a 28 días de 140 (Kg/cm2) (Clase F) o bordillos fundidos in situ el cual deberá llevar dilataciones cada 80 cm de tal modo que, de una apariencia de bordillo prefabricado, con una resistencia mínima a la compresión a 28 días de 175 (Kg/cm2) (Clase E). Los bordillos deben tener una pendiente longitudinal similar a la del eje de la vía según diseño geométrico. La mezcla de concreto hidráulico debe tener como requerimiento las especificaciones técnicas **artículo 672 – 22 INV** "bordillos de concreto" y al **artículo 630 - 22 INV** "concreto estructural".

- ✓ Se recomienda que la construcción de andenes sea de espesor de 10 cm de concreto; de igual forma, se recomienda el diseño implementado en el diseño de urbanismo; el material de soporte de estos andenes deberá ser un material seleccionado y cumplir con las especificaciones técnicas vigentes.

- ✓ En el proceso de construcción de la losa de pavimento, es fundamental asegurar una conexión adecuada entre las losas nuevas y las ya construidas para garantizar la integridad estructural y prevenir fallas. Para esto, se utiliza el anclaje longitudinal con barras de acero, según las recomendaciones del informe.

  Si el pavimento ya construido no incluye estas barras de acero, se debe anclar las mismas utilizando un adhesivo epóxico. Este material es crucial, ya que permite una fuerte adhesión entre el acero y el concreto existente, asegurando una correcta transferencia de cargas y prolongando la vida útil de la

estructura. La correcta instalación de las barras ancladas con epóxico contribuirá a evitar desplazamientos y deformaciones entre los diferentes segmentos del pavimento. Según lo evidenciado en la **Ilustración 39** se logran identificar losas de pavimento en buen estado por tal motivo, se recomienda siempre y cuando durante el proceso constructivo se evidencia las mismas condiciones seguir las pautas aquí planteadas.



Ilustración 39 Losas de pavimento existente.

14 CONCLUSIONES

- ✓ Las vías por construir se encuentran localizadas en la zona urbana del municipio de Montería, departamento de Córdoba, específicamente en el barrio Monteverde.
- ✓ Si bien se obtuvieron resultados de capacidad portante mediante ensayos de CBR y por correlaciones mediante ensayo de PDC, como los valores presentan una homogeneidad, esto nos permite utilizar los resultados obtenidos tanto por ensayo CBR, como por correlación para calcular el CBR de diseño.
- ✓ El transito equivalente calculado se deduce en función de la categoría de la vía. Numero de ejes equivalentes **273,831** ejes equivalentes, por lo cual se encuentra en categoría NT1 como se muestra en la **Tabla 51** y en el M.D.C. de INVIAS.
- ✓ La metodología para la verificación de esfuerzos y deflexiones obedece a la propuesta por la PCA, se concluye que esta metodología aplica para el diseño de pavimentos rígidos.
- ✓ La estructura adoptada durante el pre-dimensionamiento del pavimento rígido por la metodología de la AASHTO 93 se pueden observar en la **Tabla 52.**

Losa de Concreto Hidráulico e = 19 cm MR = 4.0 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm
Reemplazo con material tipo afirmado CBR: 10%, e= 40 cm
Geotextil T2100 para separación
Material existente en campo según estudio geotécnico.

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 52 Estructura pre-dimensionada pavimentos rígido.

- ✓ Una vez realizado la verificación de esfuerzos por fatiga, deflexión por erosión y porcentaje de consumo, se concluye que la estructura óptima para soportar las repeticiones calculadas es las que se observa en la **Tabla 53.**

Losa de Concreto Hidráulico e = 20 cm MR = 4.0 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm
Reemplazo con material tipo afirmado CBR: 10%, e= 40 cm
Geotextil T2100 para separación
Material existente en campo según estudio geotécnico.

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 53 Estructura dimensionada pavimentos rígido.