DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO PARA EL BARRIO CHUCHURUBI MUNICIPIO DE CERETÉ DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA



JUNIO DE 2021

CONTROL DE REVISIONES		
REV	**FECHA**	**DESCRIPCIÓN**
1	(JUNIO - 2021)	PRIMERA ENTREGA DISEÑO DE PAVIMENTO

CONTROL DE COPIAS		
No. Copias	Física/Digital	
1	Digital	
Elaboró:	Revisó:	Aprobó:
MARCIO CANABAL PATERNINA	LAURA MARTÍNEZ MORALES	JAMILTON ECHEVERRI DÍAZ
		
INGENIERO CIVIL. ESP. M.P. 22202-272228 COR	INGENIERO SANITARIO Y AMBIENTAL. ESP. M.P. 22236-345950 COR	INGENIERO CIVIL. ESP. M.P. 22202-269762 COR

TABLA DE CONTENIDO

1 RESUMEN EJECUTIVO 9
2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO 10
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 15
4.1 Clasificación del suelo. 15
4.2 Determinación del grado de expansión: 15
4.3 Presencia de nivel freático: 16
4.4 CBR de diseño 16
4.5 Análisis de las características de la subrasante natural. 17
5 DESCRIPCIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE 18
5.1 Adaptación según cartilla de obras menores y estructuras viales del programa Colombia rural 18
5.2 Identificación de la capa granular según especificaciones INVIAS. 18
5.3 Metodología de Ivanov para selección de espesor mínimo de mejoramiento. 20
5.4 Modelo seleccionado 22
6 DETERMINACIÓN DEL MODULO DEL CONJUNTO Y ESPESOR DE SUBBASE 22
6.1 Determinación del módulo de reacción de la subrasante 22
6.2 Determinación del módulo del conjunto y espesor de la subbase 23
7 ANÁLISIS DEL TRANSITO 25
7.1 Clasificación y peso vehicular 25
7.2 Transito promedio diario 27
7.3 Periodo de diseño 28
7.4 Distribución direccional y por carril de vehículos pesados 28
7.5 Tasa de crecimiento 29
7.6 Factor daño 29
7.7 Calculo transito equivalente al eje de referencia de 8.2 Tn. 29
8 DETERMINACIÓN DEL MODULO DE ROTURA 31

9 DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO 32
9.1 Parámetros de entrada software BS-PCAA 32
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
9.7 Comparativo según Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural 50
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). 55
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 63
13 CONCLUSIONES 65
14 RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS 67

GRAFICAS

Grafica 1 Selección del módulo de reacción en función del CBR equivalente. 23
Grafica 2 Grafica para hallas factor de ajuste por efecto de ubicación del camión. 43
Grafica 3 Carta de Bradbury para hallar los coeficientes de alabeo Cx y Cy. 61

ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Localización general del proyecto 11
Ilustración 2 Localización especifica del proyecto. 11
Ilustración 3 Localización de los apiques 13

Ilustración 4 Modelo estructural de mejoramiento de la subrasante metodología IVANOV. 21
Ilustración 5 Modelo estructural según características de la subrasante 22
Ilustración 6 Relación entre la clasificación del suelo y los valores de CBR y K..... 23
Ilustración 7 Distribución de esfuerzos sobre una estructura de pavimento rígido..... 25
Ilustración 8 Esquema de clasificación de vehículos. 26
Ilustración 9 Esquema de los tipos de ejes y su carga máxima. 27
Ilustración 10 Esquema de los vehículos de transporte de carga más comunes en Colombia. 30
Ilustración 11 Expresiones para hallar el Ec en función del tipo de agregado. 38
Ilustración 12 Pre-dimensionamiento espesor losa de concreto método de la AASHTO SBG 15. .. 39
Ilustración 13 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 18 cm. 48
Ilustración 14 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 20 cm. 49
Ilustración 15 Modelo seleccionado en dimensionamiento Software BS – PCAA..... 49
Ilustración 16 Espesores de concretos Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural. 50
Ilustración 17 Ubicación de los tipos de juntas. 52
Ilustración 18 Esquema para construcción de juntas longitudinales. 53
Ilustración 19 Ubicación de juntas longitudinales. 53
Ilustración 20 Sección típica para la ubicación de las barras de anclaje y construcción de junta. ... 54
Ilustración 21 Posición de las juntas de expansión. 54
Ilustración 22 Sección típica ubicación de las barras de transferencia y construcción de junta. 56
Ilustración 23 Posición de las juntas transversales..... 56
Ilustración 24 Isométrico colocación de barras de transferencia..... 57
Ilustración 25 Isométrico losas de concreto y juntas..... 57
Ilustración 26 Detalle construcción de juntas..... 58
Ilustración 27 Comportamiento de alabeo teórico diurno y nocturno. 60
Ilustración 28 Losa con esfuerzos. 60
Ilustración 29 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección centrados. 64
Ilustración 30 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre una losa. 64

Ilustración 31 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre más de una losa. 64

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

Ilustración 33 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares. 65

Ilustración 34 Representación gráfica de una óptima modulación de losas de concreto. 69

Ilustración 35 Representación gráfica de fisuras por alabeo. 69

Ilustración 36 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares. 70

Ilustración 37 Detalle constructivo de bordillo prefabricado y vaciado “in-situ”. 70

TABLAS

Tabla 1 Nomenclatura de la vía a intervenir. 10

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. 16

Tabla 5 Predicción de la expansividad a partir del IP. 16

Tabla 6 Verificación del grado de expansión de las muestras. 16

Tabla 7 Selección del CBR de diseño. 17

Tabla 8 Análisis de las características de la subrasante Natural. 17

Tabla 9 Resultados de análisis de las características de la subrasante Natural. 17

Tabla 10 Categorías de la resistencia a la subrasante. 18

Tabla 11 Requisitos de los agregados para afirmados. 19

Tabla 12 Relaciones que debe cumplir el material de afirmado. 19

Tabla 13 Comparaciones capa granular. 19

Tabla 14 Clasificación del suelo según el CBR de la subrasante. 20

Tabla 15 Capacidad de soporte equivalente metodología IVANOV. 21

Tabla 16 Selección del módulo del conjunto en función del espesor de la subbase y módulo de la subrasante. 24

Tabla 17 Módulo de reacción y modulo del conjunto de los diferentes tramos viales 24

Tabla 18 Categoría de tránsito para selección de espesores. 28

Tabla 19 Factor de distribución por carril. 28
Tabla 20 Tasas promedio de crecimiento del tránsito. 29
Tabla 21 Clasificación de vehículos según su carga y tipo de eje 29
Tabla 22 Calculo de transito equivalente diario y total. 30
Tabla 23 Información para el cálculo de espectro de carga. 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 33
Tabla 27 Selección ancho de ejes. 33
Tabla 28 Selección separación de ejes. 34
Tabla 29 Cargas patrón y exponenciales para el cálculo del Factor de equivalencia. 34
Tabla 30 Factor de seguridad de carga. 34
Tabla 31 Niveles de confiabilidad. 36
Tabla 32 Valores de Zr en función de la confiabilidad. 36
Tabla 33 Capacidad del drenaje para remover el agua. 37
Tabla 34 Valores de coeficiente de drenaje 37
Tabla 35 Coeficiente de transmisión de cargas. 38
Tabla 36 Correlación entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad. 38
Tabla 37 Calculo del módulo de elasticidad del concreto. 39
Tabla 38 Valores del coeficiente de expansión térmica del concreto. 41
Tabla 39 Intervalos para el Análisis de Sensibilización. 51
Tabla 40 Análisis de Sensibilización. 51
Tabla 41 Tabla para la selección de las barras de anclaje. 53
Tabla 42 Espaciamiento de juntas transversales, según el tipo de agregado del concreto. 55
Tabla 43 Recomendaciones para la selección de barras de transferencia de carga. 56
Tabla 44 Valores del factor de fricción. 59
Tabla 45 Variables para el cálculo de esfuerzos de bordes e internos. 62
Tabla 46 Líneas de tendencia para cálculo de CX y CY. 62
Tabla 47 Calculo y verificación de esfuerzos de borde 62

Tabla 48 Calculo y verificación de esfuerzos internos..... 63

Tabla 49 Categoría de transito de acuerdo con INVIAS 2013..... 66

Tabla 50 Estructura pre-dimensionamiento pavimento rígido AASHTO..... 66

Tabla 51 Estructura pre-dimensionamiento pavimento rígido PCA. 66

Tabla 52 Estructura dimensionada pavimentos rígido. 67

Tabla 53 Uso típico de las diferentes subbases granulares. 68

Tabla 54 Categoría de transito de acuerdo con INVIAS 2013..... 68

ANEXOS

ANEXO 1: CONTEO VEHICULAR.

ANEXO 2: SUMA DE CONTEOS VEHICULARES.

ANEXO 3: CÁLCULO DE VOLUMEN TRANSITO.

ANEXO 4: CALCULO TPD.

ANEXO 5 PLANO DE DETALLE CONSTRUCTIVO.

ANEXO 6 PLANO MODULACIÓN DE LOSAS.

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, priorizando en todo momento y siempre cuando sea posible conservar las alternativas diseño según el programa de obras menores de drenaje y estructuras viales programa Colombia rural.

Dentro de los insumos necesarios para la valoración y diseño de estructuras de pavimentos, es necesario contar con el estudio de suelos, el cual fue subcontratado con la entidad GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS.

A continuación, se hace un breve resumen que describe en términos generales el contenido del presente estudio, el cual permite conocer en cada numeral las metodologías empleadas y resultados esperados.

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 se** describen la localización de los diferentes apiques realizados; adicionalmente, se muestra de manera general los resultados que entrega la empresa GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS como insumo para el diseño de la estructura de pavimento. Seguidamente en el **numeral 4** se realiza un resumen con parámetros geotécnicos en términos generales, parámetros fundamentales para el diseño de la estructura de pavimento. Cabe aclarar que estos parámetros serán valorados y analizados para definir alternativas y limitaciones durante la etapa del diseño de la estructura de pavimento.

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, espectro de carga y el número de ejes equivalentes asociado al 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 pasaran 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. Posteriormente se realiza el dimensionamiento y espesor de la losa de concreto calculando 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

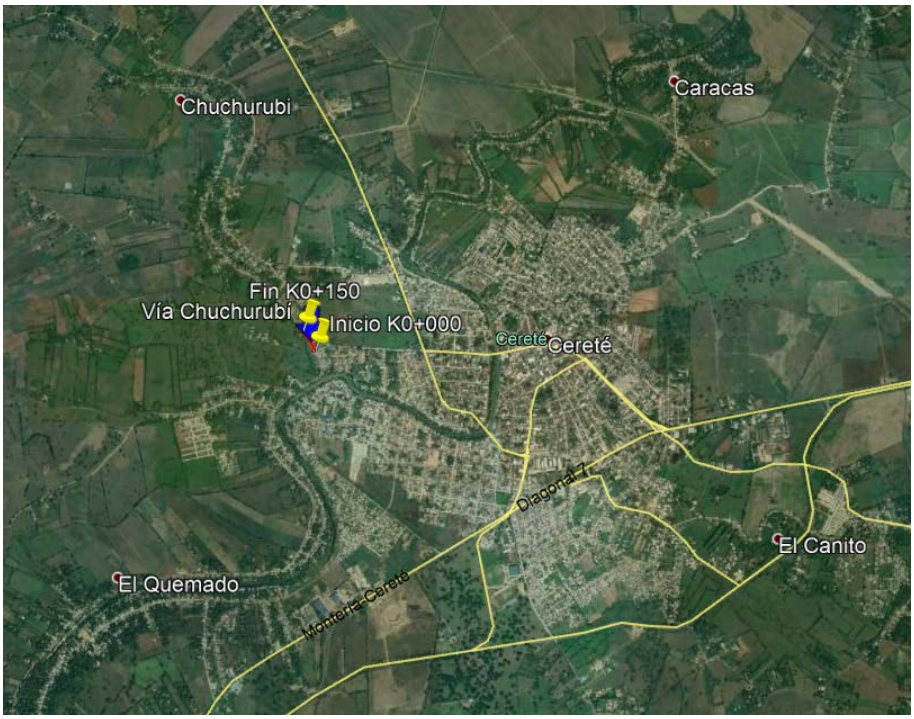
El proyecto se encuentra localizado en el municipio de Cereté, en el departamento de Córdoba, Colombia. El municipio de Cereté limita por el norte con los municipios de San Pelayo y Chimá, por el este con el municipio de Ciénaga de Oro, por el oeste con el municipio de Montería y por el sur con los municipios de San Carlos y Montería.

El proyecto en estudio se localiza en zona urbana del municipio de Cereté en el barrio Chuchurubí. En las **ilustraciones 1 y 2** se observa la localización general y especifica de la vía objeto de estudio respectivamente, de igual forma, la **tabla 1** se muestra la vía con sus características de ancho, longitud y nomenclatura.

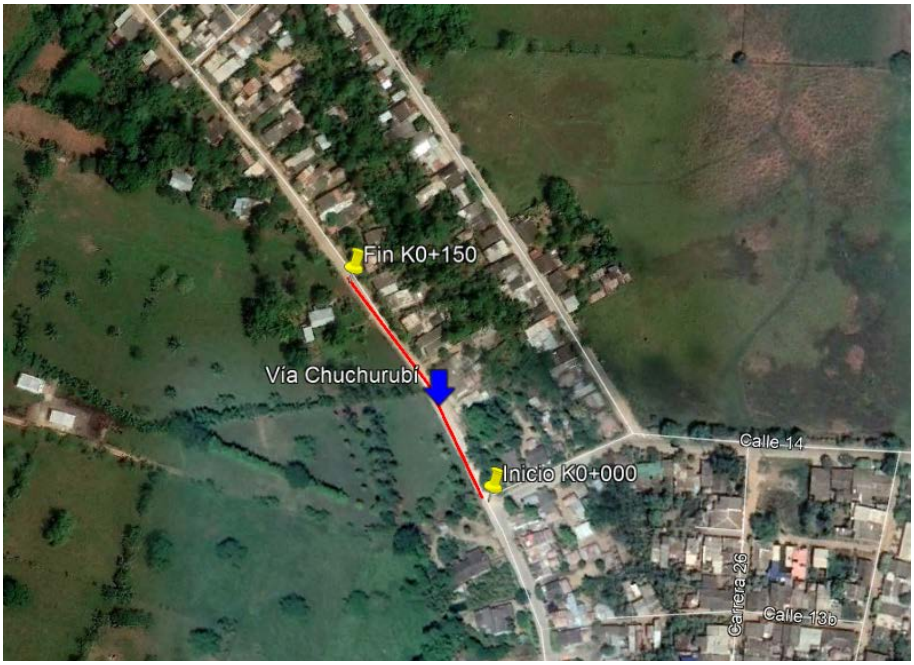
Nomenclatura Catastral	Ancho de calzada (m)	Longitud del tramo (m)	Funcionalidad	Tipo de terreno
Chuchurubí	6.00	150.00	Terciaria	Plano

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1 Nomenclatura de la vía a intervenir.



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



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

3 RESULTADOS DEL ESTUDIO GEOTÉCNICO

Esta consultoría contrata a la firma consultora "GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS" 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 ***3 apiques*** 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).

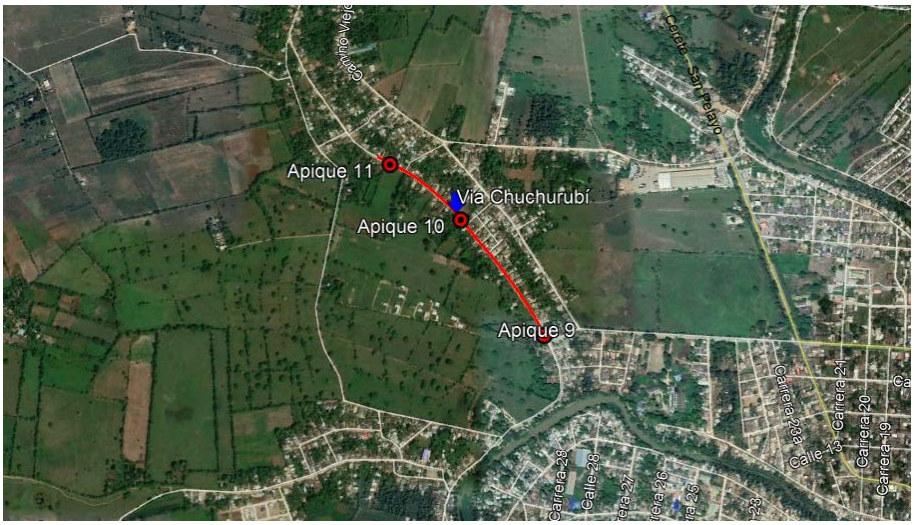
De los ***3 apiques*** realizados en campo, se obtuvieron ***3*** *resultados de* ***CBR inalterado*** distribuidos espacialmente a lo largo de la vía, estos se tomaron para el cálculo del CBR de diseño tomando, así se logró valorar el comportamiento de la subrasante a la compresión en función del módulo resiliente.

En la **tabla 2 e ilustración 3** se visualizan las localizaciones de los apiques

Localización	Apique N°	Muestra	Norte	Este	CBR (%)
Chuchurubí	9	2	1474900.19	1140159.76	0.97
	10	2	1475221.11	1139919.98	1.14
	11	2	1475376.83	1139716.22	2.40

Fuente: Estudio de suelos realizado por GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS.

Tabla 2 Localización de los apiques.



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

3.3 Resultados de exploración y caracterización del subsuelo

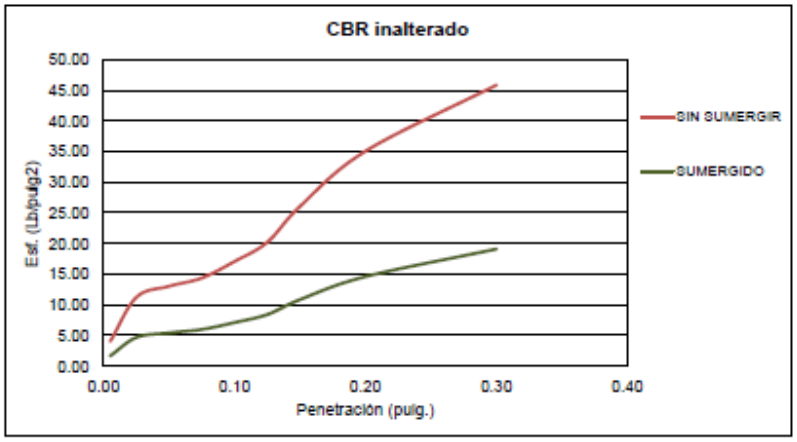
La exploración de campo permite identificar comportamientos y características de los suelos que se encuentran en la zona de influencia del proyecto, tales como los niveles freáticos que se presentan en la zona de estudio, características de los materiales a diferentes profundidades y estratos, contenido 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.

C.B.R. INALTERADO

V1

NOMBRE DEL PROYECTO: MEJORAMIENTO DE LA VÍAS LOCALIZADAS EN LOS SECTORES DE LOS
LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO: CHUCHURUBÍ-CERETÉ – CÓRDOBA
FECHA: NOVIEMBRE DE 2020
CONTRATISTA: SERTET SAS
OBSERVACION:

Molde Nº	CBR 9		CBR 9	
	SIN SUMERGIR		SUMERGIDO	
Penetración (pulg.)	Lect. Dial (KN)	Esf. (Lb/pulg²)	Lect. Dial (KN)	Esf. (Lb/pulg²)
0.005	0.05	4.05	0.02	1.69
0.025	0.15	11.24	0.06	4.68
0.050	0.17	13.04	0.07	5.43
0.075	0.19	14.39	0.08	5.99
0.100	0.23	17.08	0.10	7.12
0.125	0.27	20.23	0.11	8.43
0.150	0.35	26.08	0.15	10.87
0.200	0.47	35.07	0.20	14.61
0.300	0.61	45.86	0.26	19.11
0.400				
0.500				
CBR CORR 0.1"	1.71%		0.71%	
CBR CORR 0.2"	2.34%		0.97%	



Nº CBR	LECTURA INICIAL L1 (mm)	LECTURA FINAL L2 (mm)	% DE EXPANSIÓN	Clasificación
9	0.051	0.051	0.00	Suelo no expansivo

Ing. Civil NATHALIA HERNANDEZ R
M.P. 22202166765COR

Ing. de calidad PABLO CASTILLA NEGRETE
M.P. 1320251172BLV

Fuente: Estudio de suelos realizado por GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS.
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 de grano medio de tipo Arcilla arenosa en la parte superior de la subrasante.

Del estudio de suelo se puede deducir que el subsuelo entre **1.00 m y 2.00 m** de profundidad está compuesto por *suelo tipo Arena Limosa de color pardo* por lo cual los cambios volumétricos no se deben 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 5** respectivamente. Los parámetros presentados en las tablas mencionadas sirven de referencia y de los cuales se puede deducir según el estudio de suelos que el subsuelo de la subrasante no presenta valores relacionados a los límites y por tanto no presenta índice de plasticidad por lo que no se puede determinar el grado de expansión por medio de estas variables y se clasifica dentro de suelos no expansivos. Ver **tabla 6.**

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.

Localización	Apique N°	Muestra	Profundidad (m)	IP (%)	Grado de Expansión	LL (%)	Grado de Expansión
Chuchurubí	9	2	1.00 - 2.00	NP	-	NL	-
	10	2	1.00 - 2.00	NP	-	NL	-
	11	2	1.00 - 2.00	NP	-	NL	-

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 **3 apiques**, 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.

El cálculo del CBR de diseño, se realizó promediando los valores encontrados del CBR después de inmersión ya que los suelos tienen comportamiento típico a la inmersión. En la **tabla 7** se obtiene el valor del CBR de diseño para la vía en estudio.

Localización	Apique N°	Muestra	Profundidad (m)	CBR (%)	CBR (%) Promedio
Chuchurubí	9	2	1.00 - 2.00	0.97	1.50
	10	2	1.00 - 2.00	1.14	
	11	2	1.00 - 2.00	2.4	

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

4.5 Análisis de las características de la subrasante natural.

Este análisis se fundamenta en validar las características de la clasificación del suelo granulométrico, límites de consistencias y capacidad portante de la subrasante natural de la cual se extrajeron muestras inalteradas, realizando el ensayo de CBR de laboratorio según especificación INV 148-13 arrojando resultados de CBR en todos los apiques realizados, estos resultados se extraen del estudio de suelo realizado por la empresa consultora GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS. Ver **tablas 8 y 9.**

Resultado Exploraciones / Apiques	IP	LL	P. Tamiz #200	CBR Diseño	Cambio Volumétrico	Separación	Capacidad Portante
9	NP	NL	35.17	1.5	-	NO	NO CUMPLE
10	NP	NL	35.11		-	NO	
11	NP	NL	36.55		-	NO	

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 8 Análisis de las características de la subrasante Natural.

Resultado Exploraciones / Apiques	Mejoramiento Cambio Volumétrico	Geotextil por Separación	Mejoramiento Capacidad Portante
9	NO	NO	SI
10	NO	NO	
11	NO	NO	

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 9 Resultados de análisis de las características de la subrasante Natural.

De la anterior tabla se puede evidenciar que la subrasante actual a una profundidad de 1.00 – 2.00 m, no cumple con las condiciones de capacidad portante debido a que su CBR de diseño es menor a 3%, no tiene presencia de potencial de cambios volumétricos en todos sus apiques, y además no requiere Geotextil por separación debido a que la presencia de material fino es menor al 75%, por lo tanto se contempla un espesor de mejoramiento por capacidad portante solamente.

A continuación se desarrollaran alternativas para encontrar un espesor aproximado de mejoramiento, que en este caso será el material existente en campo que en la mayoría de las exploraciones y según los resultados reportados en el estudio de suelo y analizados por esta consultoría cumple con las

características de afirmados, debido a que con el paso del tiempo estas comunidades han mejorado la capa de rodadura de este trayecto vial.

5 DESCRIPCIÓN Y MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE

5.1 Adaptación según cartilla de obras menores y estructuras viales del programa Colombia rural

Esta cartilla la cual se implementa en vías terciarias, se encuentra delimitada bajo restricciones como lo son: no considerar procesos de estabilización sobre suelos especiales, ya sean suelos blandos, arcillas expansivas o cenizas volcánicas, implementar un CBR mínimo de 3%. Pese a lo cual, se plantea como alternativa la opción de selección del CBR en función de la categoría de la vía como se muestra en la **tabla 10.**

CATEGORÍA	CBR [%]
S1	3 ≤ CBR < 5
S2	5 ≤ CBR < 7
S3	7 ≤ CBR < 10
S4	10 ≤ CBR < 15

Fuente: Tabla 8-5 *Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural*.
Tabla 10 Categorías de la resistencia a la subrasante.

Como se encontró un suelo de subrasante en la cual se apoyará la estructura de pavimento con características granulométricas y capacidad portante similares a las de un suelo mejorado, no se contempla emplear mejoramiento de la subrasante, sin embargo, como en algunos de los apiques se encontró materiales finos en su capa superior, esta consultoría plantea un espesor de mejoramiento para estos tramos viales, este mejoramiento tendrá características similares al material encontrado en campo.

5.2 Identificación de la capa granular según especificaciones INVIAS.

Según los resultados arrojados en las exploraciones del estudio de suelos subcontratado con la entidad GEOTECNIA Y AMBIENTE SAS, a una profundidad aproximada de 0.00 m– 0.50 m se observa una capa de suelo con especificaciones granulométricas similares a un afirmado como lo plantean las especificaciones técnicas del INVIAS ART 311-13, Esta capa serviría de soporte para la estructura del pavimento debido a que se comporta como un suelo de buena calidad.

Esta consultoría realiza dicha comparación en cada uno de los apiques con los requisitos implementados en las especificaciones del INVIAS. Ver **tablas 11 y 12.**

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	REQUISITO
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%) - 500 revoluciones	E-218	50
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	 12 18
Limpieza (F)		
Límite líquido, máximo (%)	E-125	40
Índice de plasticidad (%)	E-125 y E-126	4 - 9
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%)	E-211	2
Contracción lineal	E-127 o E-129	Tabla 311 - 3
Resistencia del material (F)		
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 15

Fuente: Tabla 311-1 Especificaciones técnicas INVIAS 2013 Art 311.
Tabla 11 Requisitos de los agregados para afirmados.

RELACIÓN	REQUISITO
$\frac{\%\text{ pasa tamiz No. 200}}{\%\text{ pasa tamiz No.10}}$	0.20 a 0.45
$\frac{\%\text{ pasa tamiz No. 200}}{\%\text{ pasa tamiz No. 40}}$	$\leq \frac{2}{3}$
{(% pasa tamiz de 1")-(% pasa tamiz No. 10)}×{% pasa tamiz No. 4}	16 a 34
(% de contracción lineal)×(% pasa tamiz No. 40)	100 a 240

Fuente: Tabla 311-3 Especificaciones técnicas INVIAS 2013 Art 311.
Tabla 12 Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.

Resultado Exploraciones / Apiques	% P #200/ % P #10	% P #200/ % P #40	LL	IP	Espesor existente (m)
9	0.98	0.98	46.00	20.00	0.50
10	0.99	0.99	46.00	21.00	0.50
11	0.98	0.98	45.00	20.00	0.50
Rangos	0.2 - 0.45	<=0.66	<40	4 - 9	

Fuente: Elaboración Propia.
Tabla 13 Comparaciones capa granular.

Según lo visto en la **tabla 13** en los apiques no se cumple la comparación del material encontrado en campo con las especificaciones INVIAS. Por lo tanto es necesario el uso de un material de apoyo con características granulares para mejorar la subrasante actual y así llegar a un CBR mínimo 3%.

A continuación, se presenta una metodología para calcular el espesor en cual debe tener el material de mejoramiento soporte de la estructura de pavimento para cumplir la relación en función del CBR de diseño equivalente y CBR del material de mejoramiento.

5.3 Metodología de Ivanov para selección de espesor mínimo de mejoramiento.

Esta metodología permite calcular el espesor del refuerzo de mejoramiento de la subrasante, en este caso el material encontrado en campo para garantizar que en todo el tramo vial se cumpla los valores de CBR de diseño equivalente y CBR de material de mejoramiento, 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 garantizar que en todo el tramo vial el material encontrado en campo cumpla con un valor mínimo requerido para una subrasante de buenas condiciones. Según la **tabla 14** esta consultoría contempla un valor de CBR mínimo de 3% para afirmados y subbase y además debe cumplir con las especificaciones del artículo **230-13** 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 14 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 3.0%, 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 este caso el CBR equivalente es igual a **3.0%** como lo recomienda la *Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural en su tabla 8-5*. En la **tabla 15** se reporta el resultado de la modelación utilizando la teoría de Ivanov.

Metodología Ivanov		
CBR Subrasante (%)	1.50	CBR suministrado estudio geotécnico
CBR Material de mejoramiento (%)	**10**	CBR del material de remplazo
MR subrasante(Kg/cm2)	232.86	Módulos resilientes por correlación (MR=2555*CBR^0.64)*0.070307. Lister y Powell (1987)
MR Mejoramiento (Kg/cm2)	**784.13**	
n	1.63	Modulo ponderado de las Capas
2a (cm)	30.14	Radio del área cargada (15.07)
s (cm)	20	Espesor del material de mejoramiento
MR Equivalente (Kg/cm2)	**407.29**	Módulo resiliente equivalente (Ivanov)
MR Equivalente (PSI)	**5792.99**	
CBR de Diseño Equivalente (%)	3.62	CBR de diseño

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 15 Capacidad de soporte equivalente metodología IVANOV.

Reemplazo con espesor de 20 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 espesor del material encontrado en campo que actuará como mejoramiento de la estructura de pavimento para la vía del barrio Chuchurubi es de **20 cm** a lo largo de todo su trayecto, además de presentar un **CBR de 10%,** para garantizar un CBR de Diseño Equivalente de 3%.

5.4 Modelo seleccionado

Una vez evaluado la relación del espesor de mejoramiento de la subrasante por la metodología de IVANOV, se selecciona el modelo más acorde a las circunstancias actuales.

Esta consultoría selecciona el espesor del material encontrado en campo que actuará como mejoramiento recomendado por la metodología de IVANOV. Ver **ilustración** 5, este material debe cumplir con las especificaciones técnicas INV-311-13 y tener un CBR de 10%.

Reemplazo con espesor de 20 cm para mejoramiento de la subrasante, CBR: 10%
Material existente en campo según estudio geotécnico

Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 5 Modelo estructural según características 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 1.** La ecuación que más se ajustó a la serie de datos fue la polinómica cuya forma es:

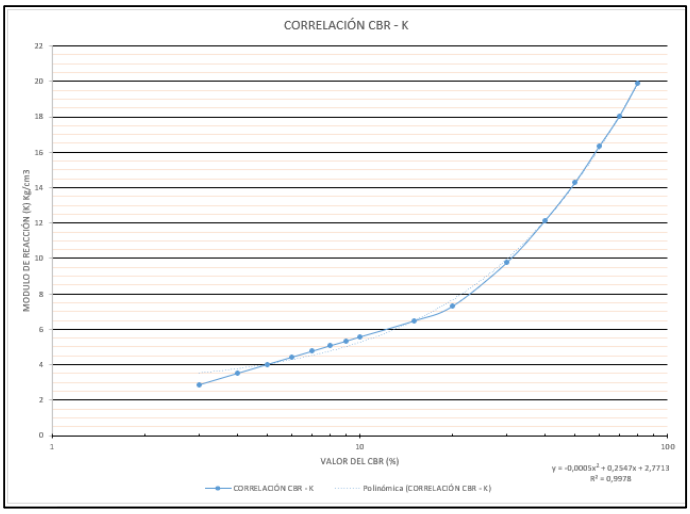
$$K = -0.0005CBR^2 + 0.2547CBR + 2.7713 \qquad EC\ 2$$

Donde:

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

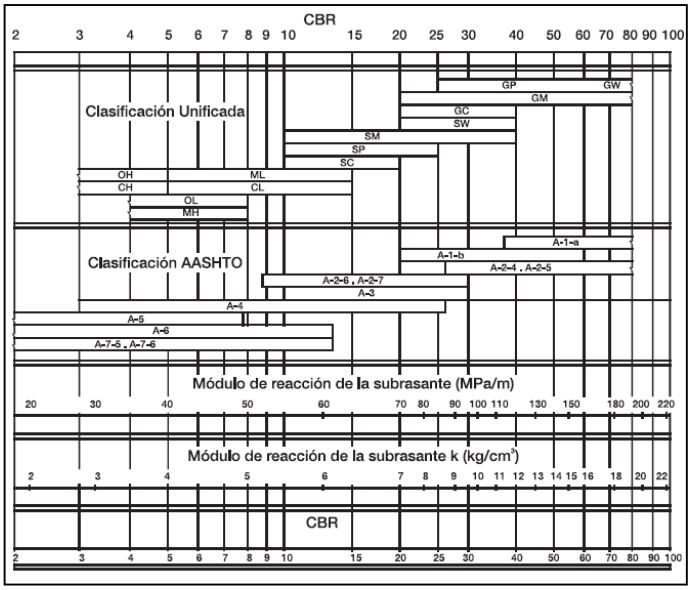
Los valores representados en la **gráfica 1,** corresponden a los correlacionados en la **ilustración 6**, los cuales fueron graficados para hallar un modelo que permita calcular el valor del módulo de reacción de la subrasante de forma analítica y más precisa por medio de la **ecuación 2**.

El valor calculado del módulo de reacción K de la subrasante para un CBR equivalente es de **3.62 %** es igual a (K= 3.687 Kg/cm3 ≈ 36.87 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 6 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 el módulo de reacción de la subrasante, se calcula el módulo 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 16.**

En la **tabla 17** 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
36.87	134.58	41.6	151.6	45.4	165.9	50.5	184.9	55.9	205.4	61.6	227.4
40.00	147.00	45.0	165.0	49.0	180.0	54.3	200.0	60.0	221.7	66.0	245.0
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 16 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)**	
3.687	36.87	134.58	4.540	45.40	165.90	15

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17 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 – 13** (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%).

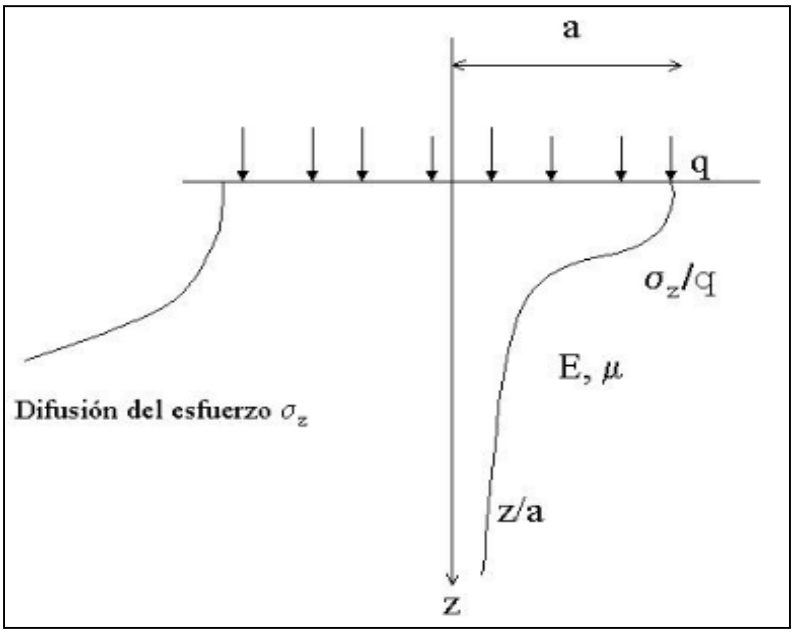


Ilustración 7 Distribución de esfuerzos sobre una estructura de pavimento rígido.

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, para lo cual esta consultoría realizó una abstracción de un conteo vehicular cercano al proyecto en estudio que se realizó durante 7 días consecutivos para así poder determinar el transito promedio diario (TPD), el conteo vehicular queda registrado en el **Anexo 1**.

Posteriormente se realizó una suma de los conteos vehiculares y se clasificó según el tipo de vehículo. A continuación, se desglosan los diferentes parámetros o variables para definir el transito equivalente asociado a un periodo de diseño

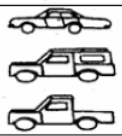
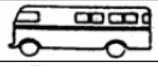
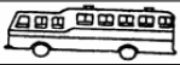
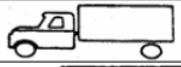
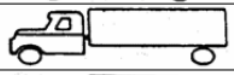
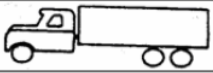
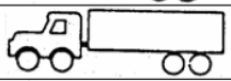
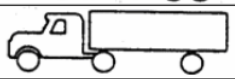
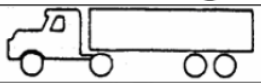
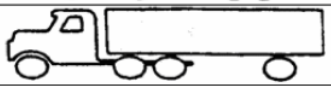
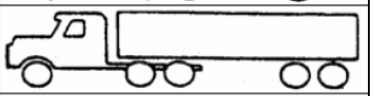
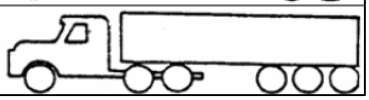
7.1 Clasificación y peso vehicular

El instituto nacional de vías ha designado la siguiente terminología para los vehículos que circulan en el país:

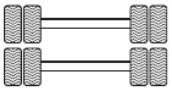
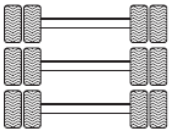
- ✓ *A = vehículos livianos*
- ✓ *B = Buses*

- ✓ *C = Camiones.*

Además, ha clasificado el tipo de vehículo de acuerdo con el número y disposición de sus ejes como se muestra en la **ilustración 8 y 9.**

TIPO DE VEHÍCULO		ESQUEMA
AUTOS		
BUSES	BUSETA	
	BUS	
	BUS METROPOLITANO	
C2-P	CAMIÓN DE DOS EJES PEQUEÑOS	
C2-G	CAMIÓN DE DOS EJES GRANDES	
C3 Y C4	CAMIÓN C3	
	CAMIÓN C4	
	TRACTOR-CAMIÓN C2-S1	
	TRACTOR-CAMIÓN C2-S2	
	TRACTOR CAMIÓN C3-S1	
C5	TRACTOR CAMIÓN C3-S2	
> C5	TRACTOR CAMIÓN C3-S3	

Fuente: Figura 2.1 Manual de diseño pavimentos asfalticos vías con bajos volúmenes de tránsito.
Ilustración 8 Esquema de clasificación de vehículos.

Descripción	Configuración	Peso, t
Eje simple direccional		6.0
Eje simple llanta doble		11.0
Eje tándem llanta doble		22.0
Eje tridem llanta doble		24.0

Fuente: Figura 1.2 Manual de diseño de pavimentos de concreto.
Ilustración 9 Esquema de los tipos de ejes y su carga máxima.

7.2 Transito promedio diario

Con el conteo vehicular, se procede a calcular el transito promedio diario para lo cual se realiza una suma de los conteos realizados según la clasificación y el peso vehicular. Cabe resaltar que la tabla de conteos se divide en intervalos de tiempo de 15 minutos.

Una vez realizada la suma del tránsito de intervalos por 15 minutos (**Anexo 2**), se obtiene el volumen de flujo para el intervalo de tiempo, esta actividad se realiza seleccionando el flujo máximo de una hora de los intervalos de tiempo de 15 minutos; tal actividad se realiza para todas las horas de conteo y por cada eje. Ver **Anexo 3.**

Durante el conteo vehicular, se pudo observar un moderado tráfico de vehículo liviano, una mayor incidencia de circulación de camiones. Por tal motivo extrae el valor del TPD de 67,225 $N_{equi\ 8.2}$ Ton según la categoría de la vía T0 según la **tabla 18**. La suma del volumen de flujo se puede observar en el **Anexo 4,** el TPD dio un valor de 80, como lo categoriza el MDC en su tabla 3-1. Ver **tabla 19.**

Categoría	Tipo de Vía	TPDs	Ejes acumulados de 8.2 t
T_o	(Vt) – (E)	0 a 200	< 1´000.000
T1	(Vs) – (M ó A) – (CC)	201 a 500	1´000.000 a 1´500.000
T2	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	501 a 1.000	1´500.000 a 5´000.000
T3	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	1.001 a 2.500	5´000.000 a 9´000.000
T4	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	2.501 a 5.000	9´000.000 a 17´000.000
T5	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	5.001 a 10.000	17´000.000 a 25´000.000
T6	(Vp) – (A) – (AP-MC-CC)	Más de 10.001	25´000.000 a 100´000.000

Tabla 3-1. Categorías de tránsito para la selección de espesores

En la Tabla 3-1 las siglas tienen el siguiente significado:	
Vt: Vía terciaria	**M:** Medias
Vs: Vía secundaria	**A:** Anchas
Vp: Vía principal	**CC:** Carreteras de 2 direcciones
E: Estrechas	**MC:** Carreteras multicarriles
	AP: Autopistas

Fuente: Tabla 3-1 M.D.C.
Tabla 18 Categoría de tránsito para selección de espesores.

7.3 Periodo de diseño

Los periodos de diseño pueden variar entre 10 y 30 años según la categoría de la vía seleccionada, para este caso consideramos un periodo de diseño de 20 años, el cual bajo premisas teóricas debe coincidir como mínimo con la vida útil del pavimento rígido, en el caso que exista una buena certidumbre en el análisis de las variables de diseño.

7.4 Distribución direccional y por carril de vehículos pesados

Mediante observación, se determina la distribución direccional (Fd) de los vehículos comerciales o bien se adopta una distribución del 50% en cada dirección. Posteriormente, se corrige el número de vehículos comerciales en cada dirección por un factor de distribución por carril (Fca) en función del número de carriles en cada sentido, para lo cual se recomienda la **tabla 19.**

De acuerdo con la **tabla 19** se infiere que el factor direccional es igual a 0.50, y el factor carril es igual a 1.

Clasificación de la vía	% por dirección	% para el carril de diseño	% del Tpd en el carril de diseño
Autopistas y vías multicarril con tres carriles por dirección	50	75	37,5
Autopistas y vías multicarril con dos carriles por dirección	50	90	45,0
Carreteras anchas y de dos direcciones	50	100	50
Carreteras de dos direcciones y con ancho medio	100	75	75
Carreteras estrechas y de dos direcciones	100	100	100

Fuente: INVIAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto.
Tabla 19 Factor de distribución por carril.

7.5 Tasa de crecimiento

En caso de no disponer de una serie histórica, para determinar el pronóstico del tránsito futuro se puede establecer la tasa de crecimiento con base a la información registrada en la **tabla 20.**

Nivel de tránsito	Tasa de crecimiento
T1	2.0
T2	3.0

Fuente: Tabla 2.3. Manual de diseño pavimentos asfalticos para vías bajos volúmenes de tránsito.
Tabla 20 Tasas promedio de crecimiento del tránsito.

7.6 Factor daño

Para realizar el cálculo del factor daño de un vehículo se utilizó el método de la AASHTO simplificado o método de la cuarta potencia, por lo que es necesario conocer la clasificación, peso máximo bruto, cargas por ejes en toneladas y el tipo de eje como se muestra en la **tabla 21.**

Tipo	Peso Bruto Máximo (Ton)	Carga (Ton)			Carga (Ton)			Calculo FD
		Eje Delantero	Eje Trasero	Eje Remolque	Eje Delantero	Eje Trasero	Eje Remolque	
Bus	10	4	6		0.13	0.29		**0.42**
Camión C2 Pequeño	8.5	2.5	6		0.02	0.29		**0.31**
Camión C2 Grande	16	6	10		0.68	2.21		**2.89**
Camión C3	28	6	22		0.68	4.63		**5.31**
Camión C5	48	6	21	21	0.68	3.84	3.84	**8.37**
Camión C3-S3	52	6	21	25	0.68	3.84	1.40	**5.92**

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 21 Clasificación de vehículos según su carga y tipo de eje.

7.7 Calculo transito equivalente al eje de referencia de 8.2 Tn.

Para el cálculo del tránsito equivalente la variable de tránsito se considera como una de las variables más subjetivas durante el diseño de pavimentos. El número de ejes equivalentes de 8.2 Tn se puede hallar por medio de la **ecuación 3.** De igual forma se calcula el espectro de cargas por cada eje según el número de vehículos diarios por medio de la **ecuación 4.**

$$N = Nd * 365 * Fs * Fc * \frac{(1+r)^n - 1}{r} \qquad EC\ 3$$

$$N = Nvdi * 365 * Fs * Fc * \frac{(1+r)^n - 1}{r} \qquad EC\ 4$$

Donde
N = Numero de ejes equivalentes de 8.2 Tn.
Nd = Transito equivalente diario = $\Sigma(Nvdi * Fdi)$
Nvd = Numero de vehículos diarios según distribución de vehículos.
Fd = Factor daño de cada vehículo.
Fs = Factor sentido.

Fc =factor carril.
.r = Tasa de crecimiento.
.n = Periodo de diseño en años.

Designación	Configuración	Descripción
2		Camión de dos ejes Camión sencillo
3		Camión de tres ejes Dobletroque
3S2		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes
3S3		Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes

Fuente: Figura 1.1 Manual de diseño de pavimentos de concreto.
Ilustración 10 Esquema de los vehículos de transporte de carga más comunes en Colombia.

A continuación, se presenta los cálculos obtenidos de transito equivalente diario y total 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**.

Una vez calculado el número de ejes equivalentes de 8.2 Ton en la **tabla 23**, se puede categorizar la vía para selección de espesores, específicamente conociendo el número de camiones que pasan por la vía, ya que estos son los que van trasmitir cargas significativas a la estructura de pavimento.

Vehiculos	Porcentaje (%)	Numero de Vehiculos Diarios	Factor Daño	Transito Equivalente Diario
Vehiculos		80		
Autos	84	67	0.00	0
Buses	0	0	0.42	0
Camiones	15	12		
C2P	75	9	0.31	3
C2G	17	2	2.89	6
C3	8	1	5.31	5
C3S2	0	0	8.37	0
C3S3	0	0	5.92	0
Transito Equivalente Diario				**14**
Transito Equivalente Total Acumulado				**67225**

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 22 Calculo de transito equivalente diario y total.

Información por Calculo Espectro de Carga											
Vehiculos	Numero de Vehiculos Acumulados	Simples de Rueda Simple (Tn)				Simple de Rueda Doble (Tn)		Tandem (Tn)			Tridem
		0	4	6	7	6	10	20	21	22	25
Vehiculos											
Autos	329345										
Buses	0		0			0					
Camiones											
C2P	43590		43590			43590					
C2G	9687			9687			9687				
C3	4843			4843						4843	
C3S2	0			0					0	0	
C3S3	0			0					0		0
TOTAL	**387464**	**0**	**43590**	**14530**	**0**	**43590**	**9687**	**0**	**0**	**4843**	**0**

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 23 Información para el cálculo de espectro de carga.

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 5.**

$$MR = k\sqrt{Fc} \qquad EC\ 5$$

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 23**. 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 = 12, MR = 3.8 Mpa,** este valor del módulo de rotura puede variar dependiendo las diferentes metodologías de diseño realizadas, y de igual forma según las recomendaciones que brinda la *Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural*.

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 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	10	22
Peso por Llanta (P) (Tn)	2	3	1.50	2.50	2.75
Peso por Llanta (P) (Kn)	19.6	29.4	14.72	24.53	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	10.14	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	31
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
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 6.**

$$log_{10}(E18) = \left\{ \begin{array}{l} Zr \times So + 7.35 \times log_{10}(D+1) - 0.006 + \dfrac{log_{10}\left[\dfrac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right]}{1+\dfrac{1.624\times10^{7}}{(D+1)^{8.46}}} \\ +(4.22 - 0.32 \times Pt) \times log_{10}\left[\dfrac{S'c \times Cd \times (D^{0.75}-1.132)}{215.63 \times J\left[D^{0.75} - \dfrac{18.42}{(\frac{Ec}{k})^{0.25}}\right]}\right] \end{array} \right\}$$

EC 6

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 **372,202 = E18**. Ver **tabla 23.**

- ✓ **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 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 **3.8 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 34.**

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 11.**

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	$Ec = 3.600\sqrt{fc'} - 11500\sqrt{fc'}$
Sin información	$Ec = 3.900\sqrt{fc'} - 12500\sqrt{fc'}$

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 11 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 5** se obtiene el valor de la resistencia a la compresión (Fc). Ver **ecuación 7.** El valor obtenido de la resistencia a la compresión y el valor seleccionado del módulo de elasticidad **(Ec)** se observa en la **tabla 37.**

$$Fc = \left(\frac{MR}{2.67}\right)^2 \qquad EC\ 7$$

(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
3.8	38	20	247534	250000	Agregado Grueso de Origen Ígneo

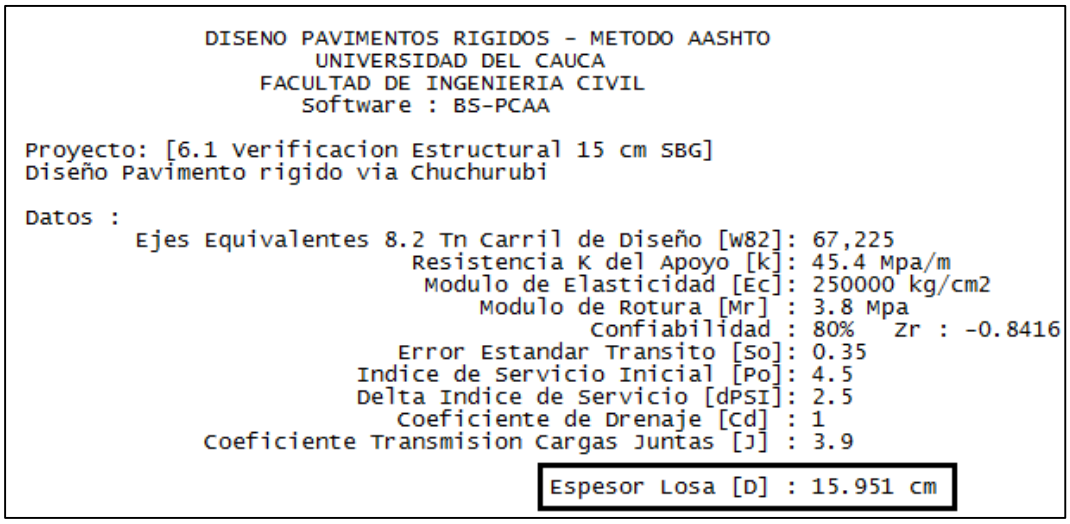
Fuente: Elaboración propia.
Tabla 37 Calculo del módulo de elasticidad del concreto.

- ✓ **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 16**. Para 15 cm de SBG K = 45.4 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. El valor obtenido se presenta en la **ilustración 12**.

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 16 cm.



Fuente: Calculo Software BS – PCAA.
Ilustración 12 Pre-dimensionamiento espesor losa de concreto método de la AASHTO SBG 15.

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 **3.8 Mpa (38 Kg/cm2).**
- ✓ **Módulo de reacción del conjunto:** Como se mencionó en el **numeral 6.2,** se obtuvo el siguiente valor: **45.4 Mpa/m** para un espesor de subbase de **15 cm.**
- ✓ **Espectro de carga**: Esta variable se obtuvo en el análisis de transito específicamente en el **numeral 7.7.**
- ✓ **Periodo de diseño**: Esta variable se obtuvo en el análisis de transito 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 **2.50 m** y una longitud de **3.00 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 8. Δt = 10.56°C.**

$$\Delta T = \delta t * H \qquad EC\ 8$$

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 (160).

- ✓ **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 38.**

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 38 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 **3.8 Mpa (38 Kg/cm2),** esto debido a que los pavimentos rígidos para bajos volúmenes de transito 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:

$$\sigma_e = \frac{6Me}{h^2}\, f1 * f2 * f3 * f4 \qquad EC\ 9$$

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.

$$M_{e=}\,(1202.6 * Log(\rho) + 53.587 * \rho - 970.4) * (0.8742 + 0.01088K_k^{0.447})\ \ EJE\ SENCILLO\ \ EC\ 10$$

$$M_{e=}\,(2005.4 - 1980.9 * Log(\rho) + 99.008 * \rho) * (0.8742 + 0.01088K_k^{0.447})\ \ TANDEM \qquad EC\ 11$$

En las **expresiones 10 y 11** 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 12.**

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

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.

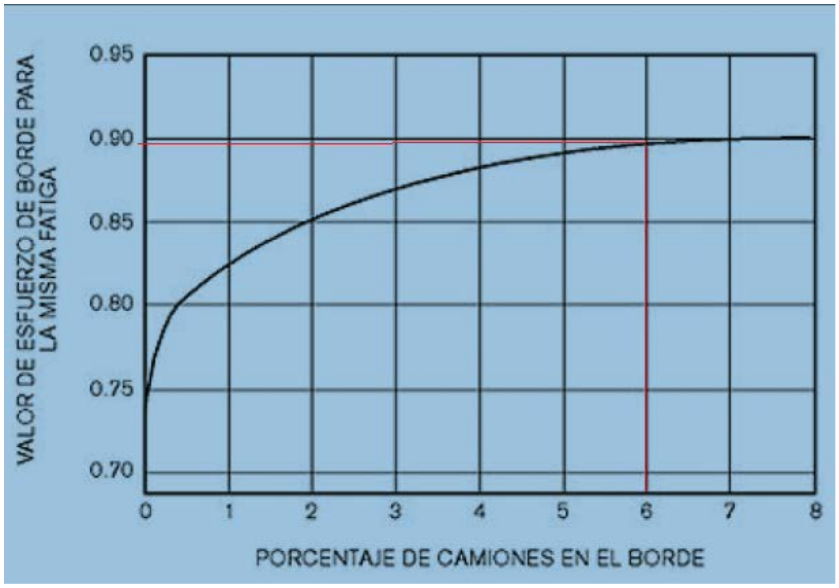
$$f1 = \left(\frac{24}{CES}\right)^{0.06} * \left(\frac{CES}{18}\right) \quad EJE\ SENCILLO \quad EC\ 13$$

$$f1 = \left(\frac{48}{CET}\right)^{0.06} * \left(\frac{CET}{18}\right) \quad EJE\ TANDEM \quad EC\ 14$$

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 15.**

$$f4 = \frac{1}{[1.235 * (1 - CV)]} \qquad EC\ 15$$

- ✓ **Relación de esfuerzos (Rσ):**

Una vez calculado el esfuerzo equivalente, se calcula la relación de esfuerzos por medio de la **ecuación 16.**

$$R\sigma = \frac{\sigma_e}{MR} \qquad EC\ 16$$

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 17**.

$$Ni = \left(\frac{4.2577}{R\sigma - 0.4325}\right)^{3.268} \qquad EC\ 17$$

- Cuando la relación de esfuerzos es mayor a 0.55 se utiliza la **ecuación 18.**

$$Ni = 10^{(11.737 - 12.077 R\sigma)} \qquad EC\ 18$$

- ✓ **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 19.**

$$D_{r(i)} = \frac{ni}{Ni} * 100 \qquad EC\ 19$$

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 20.**

$$D_r = \sum_{i=1}^{m} D_{r(i)} \qquad EC\ 20$$

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:

$$\delta_{eq} = \frac{Pc * f5 * f6 * f7}{K_{eff}} \qquad EC\ 21$$

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 22 y 23.**

$$Pc = 0.018 + \frac{72.99}{\rho} + \frac{323.1}{\rho^2} + \frac{1620}{\rho^3} \qquad EJE\ SENCILLO \qquad EC\ 22$$

$$Pc = 0.0345 + \frac{7146.25}{\rho} + \frac{2385.6}{\rho^2} + \frac{23848}{\rho^3} \qquad TANDEM\ O\ TRIDEM \qquad EC\ 23$$

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:

$$f5 = \frac{Qeje}{18} \quad EJE\ SENCILLO \qquad EC\ 24$$

$$f5 = \frac{Qeje}{36} \quad EJE\ TANDEM \qquad EC\ 25$$

$$f5 = \frac{Qeje}{54} \quad EJE\ TRIDEM \qquad EC\ 26$$

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

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

$$FE = \log\left(\frac{11111 * (0.896 * P)^2 * C_1}{h * K_{eff}^{0.73}}\right) \qquad EC\ 27$$

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:

$$C_1 = 1 - \left[\left(\frac{K_{eff}}{2000}\right) * \left(\frac{4}{h}\right)\right]^2 \qquad EC\ 28$$

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 29.** La expresión para hallar P es la siguiente:

$$P = 268.7\left(\frac{(K_{eff})^{1.27} * (\delta_{eq})^2}{h}\right) \qquad EC\ 29$$

- ✓ **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 30** teniendo en cuenta dos consideraciones:

- Si C1 * P > 9 se utiliza la **ecuación 30.**

$$Log(N_{i(e)} = 14.524 - 6.777 * (C1 * P - 9)^{0.103} - Log(C2) \qquad EC\ 30$$

- 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 31.** La sumatoria del consumo por erosión debe ser inferior al 100%.

$$D_{k(i)} = \sum \frac{ni}{N_{i(e)}} \qquad EC\ 31$$

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 superior al obtenido en la metodología de la AASHTO de la losa de concreto de **16 cm**, se realiza nuevamente el análisis con el software BS-PCAA para un espesor de subbase de **15 cm (K = 45.4 Mpa/m)** y de la losa de concreto de **18 cm** con MR= **3.8 Mpa**. Ver **ilustraciones 13.**

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

Proyecto: [6.1 Verificacion Estructural 15 cm SBG]
Diseño Pavimento rigido via Chuchurubi

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: 2.0 Factor Esfuerzo: 0.5393 Factor Erosion: 2.9673							
4.00	4.00	43,590	148.2	Inf	0.00	Inf	0.00
6.00	6.00	14,530	217.0	Inf	0.00	85,481,190	0.02
EJES SIMPLES RUEDA DOBLE							
Esfuerzo Equivalente: 2.0 Factor Esfuerzo: 0.5393 Factor Erosion: 2.9673							
6.00	6.00	43,590	217.0	Inf	0.00	85,481,190	0.05
10.00	10.00	9,687	350.7	11,410	84.90	1,687,014	0.57
EJES TANDEM RUEDA DOBLE							
Esfuerzo Equivalente: 1.7 Factor Esfuerzo: 0.4590 Factor Erosion: 3.0819							
22.00	22.00	4,843	322.5	47,256	10.25	458,929	1.06
				Total :	95.14	PCA-84:	1.70

Fuente: Calculo Software BS – PCAA.
Ilustración 13 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 18 cm.

Se concluye que el espesor de la losa de concreto de **18 cm** para un espesor de subbase granular de **15 cm** y un módulo de rotura de **3.8 Mpa**, Genera un porcentaje de consumo por fatiga (**Esfuerzo 95%)** y un porcentaje de consumo por erosión (**Deflexión 1.70%**), ver **ilustración 13**. 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 **18 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 14**, 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.

Por último, en las **ilustración 15** se obtienen los modelos estructurales del pavimento rígido.

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

Proyecto: [6.1 Verificacion Estructural 15 cm SBG]
Diseño Pavimento rigido via Chuchurubi

Datos :
            Resistencia K del Apoyo : 45.4 Mpa/m
                      Espesor Losa : 20 cm
                     Longitud Losa : 3 m
                        Ancho Losa : 2.5 m
              Modulo de Elasticidad : 250000 kg/cm2
                          Densidad : 2.4 Tn/m3
                Relacion de Poisson : 0.15
                  Modulo de Rotura : 3.8 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 : 11.88 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: 1.8  Factor Esfuerzo: 0.4644  Factor Erosion: 2.8273

   4.00    4.00        43,590    127.8           Inf    0.00           Inf    0.00
   6.00    6.00        14,530    187.1           Inf    0.00 3,014,921,019    0.00

EJES SIMPLES RUEDA DOBLE

Esfuerzo Equivalente: 1.8  Factor Esfuerzo: 0.4644  Factor Erosion: 2.8273

   6.00    6.00        43,590    187.1           Inf    0.00 3,014,921,019    0.00
  10.00   10.00         9,687    302.4       130,573    7.42      4,529,768    0.21

EJES TANDEM RUEDA DOBLE

Esfuerzo Equivalente: 1.5  Factor Esfuerzo: 0.4044  Factor Erosion: 2.9619

  22.00   22.00         4,843    284.2       391,891    1.24      1,010,227    0.48

                                                  --------               --------
                                          Total :    8.65          PCA-84:   0.70
```

Fuente: Calculo Software BS – PCAA.

Ilustración 14 Ajuste dimensionamiento espesor losa de concreto 20 cm.

Losa de Concreto Hidráulico e = 20 cm MR = 3.8 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm K = 45.4 Mpa/m
Reemplazo con espesor de 20 cm, CBR 10%
Material existente en campo según estudio geotécnico

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 15 Modelo seleccionado en dimensionamiento Software BS – PCAA.

9.7 Comparativo según Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural

Esta cartilla define espesores reportados en el **plano 119**, la cual con ayuda a una codificación (**tabla 8-4, tabla 8-5 y tabla 8-8** de la *Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural)* y selección del material de soporte de la losa de concreto, se puede definir dicha estructura, en la **ilustración 16** se muestra las posibles alternativas que satisfacen la codificación del presente diseño, codificación N1-S1-TC1.

ESPESORES DE CONCRETO–UNIDAD: cm									
CONFIGURACIÓN	6 (H1 SOBRE SUBRASANTE)			7 (H1 + 15 cm SBG)			8 (H1 + 15 cm SCE)		
	ESPESOR	% FATIGA	% EROSIÓN	ESPESOR	% FATIGA	% EROSIÓN	ESPESOR	% FATIGA	% EROSIÓN
N1 S1 TC1	21	49.52	1.15	20	85.11	1.68	18	49.52	1.86
N1 S1 TC2	24	78.48	1.47	24	41.77	1.31	21	37.46	2.75
N1 S1 TC3	21	49.52	14.69	24	85.11	18.21	18	49.52	21.02
N1 S1 TC4	20	78.48	10.77	24	41.77	9.16	21	37.46	13.04
N1 S2 TC1	19	86.3	1.14	19	59.49	0.96	17	36.01	1.65
N1 S2 TC2	23	34.54	0.69	22	59.49	0.97	19	73.33	2.8
N1 S2 TC3	19	86.3	10.9	19	59.49	9.7	17	36.01	14.03
N1 S2 TC4	23	34.54	4.5	22	59.49	5.79	19	73.33	11.1
N1 S3 TC1	19	54.7	0.93	19	39.15	0.79	16	73.33	3.12
N1 S3 TC2	22	54.7	0.96	22	36.01	0.91	19	39.15	2.68
N1 S3 TC3	19	54.7	9.49	19	39.15	8.67	16	73.33	23.25
N1 S3 TC4	22	54.7	5.69	22	36.01	5.26	19	39.15	10.38
N1 S4 TC1	19	36.01	0.76	18	86.3	1.43	16	39.15	2.85

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 16 Espesores de concretos Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural.

Esta consultoría recomienda un material de soporte de subbase granular de 15 cm de espesor, por lo tanto la estructura de modelo seleccionada seria la mostrada en la **ilustración 15,** el cual se puede integrar al diseño geométrico y con el cual se puede calcular las cantidades de obra**.**

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 39,** se puede verificar la combinación de estos en las **tablas 40** y verificar si cumple los factores de esfuerzos y erosión.

Intervalos para el análisis de sensibilidad		
K Conjunto	**Espesor**	**Módulo de Rotura**
(Mpa/m)	**(mm)**	**(Mpa)**
44- 46	180 - 200	3.8 - 4.0

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39 Intervalos para el Análisis de Sensibilización.

Análisis de Sensibilidad							
K Conjunto	**Espesor**	**Módulo de Rotura**	**Factor de Mayoración**	**Consumo de Esfuerzo**	**Consumo de Erosión**	**Verificación de Consumo de Esfuerzo**	**Verificación de Consumo de Esfuerzo**
(Mpa/m)	**(mm)**	**(Mpa)**	**Repetición**				
44	180	3.80	1	105.49	1.72	NO CUMPLE	OK
44	180	3.90	1	67.13	1.72	OK	OK
44	180	4.00	1	43.70	1.72	OK	OK
44	190	3.80	1	29.65	1.09	OK	OK
44	190	3.90	1	19.46	1.09	OK	OK
44	190	4.00	1	12.94	1.09	OK	OK
44	200	3.80	1	9.55	0.71	OK	OK
44	200	3.90	1	6.19	0.71	OK	OK
44	200	4.00	1	3.87	0.71	OK	OK
45	180	3.80	1	97.95	1.70	OK	OK
45	180	3.90	1	62.45	1.70	OK	OK
45	180	4.00	1	40.72	1.70	OK	OK
45	190	3.80	1	27.66	1.08	OK	OK
45	190	3.90	1	18.16	1.08	OK	OK
45	190	4.00	1	12.08	1.08	OK	OK
45	200	3.80	1	8.90	0.70	OK	OK
45	200	3.90	1	5.73	0.70	OK	OK
45	200	4.00	1	3.55	0.70	OK	OK
46	180	3.80	1	91.14	1.69	OK	OK
46	180	3.90	1	58.21	1.69	OK	OK
46	180	4.00	1	38.02	1.69	OK	OK
46	190	3.80	1	25.85	1.07	OK	OK
46	190	3.90	1	16.97	1.07	OK	OK
46	190	4.00	1	11.29	1.07	OK	OK
46	200	3.80	1	8.31	0.69	OK	OK
46	200	3.90	1	5.31	0.69	OK	OK
46	200	4.00	1	3.26	0.69	OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

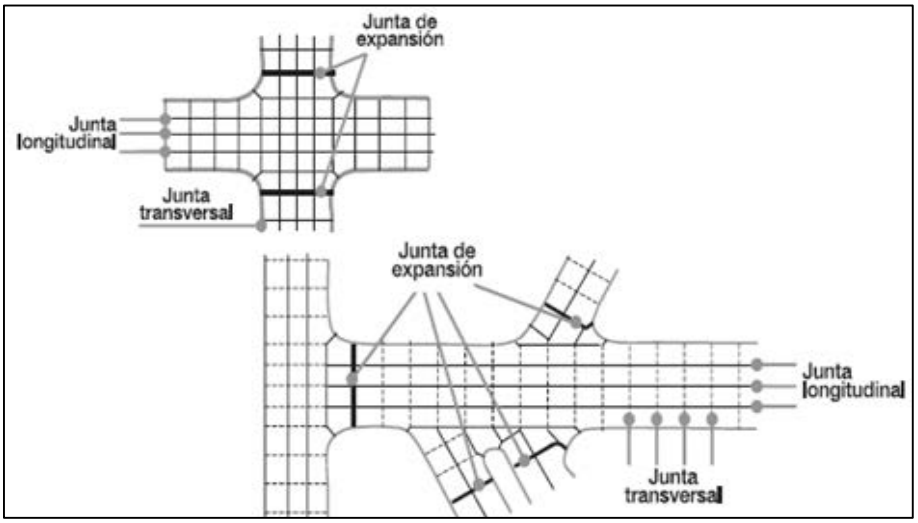
Tabla 40 Análisis de Sensibilización.

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.



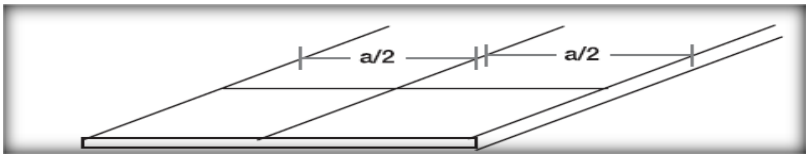
Fuente: Figura 6.4 y 6.5 M.D.C.
Ilustración 17 Ubicación de los tipos de juntas.

11.1 Juntas Longitudinales y barras de anclaje

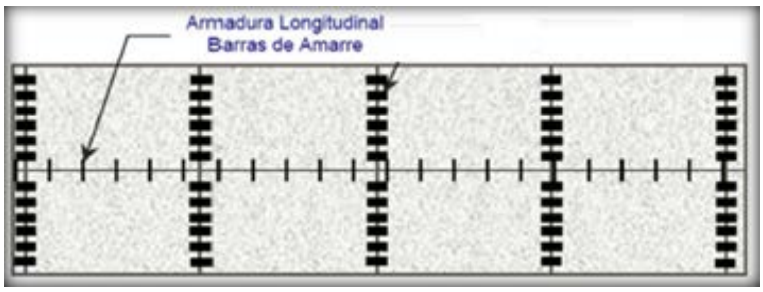
Las juntas longitudinales se definen teniendo en cuenta la dimensión de los equipos de construcción, el ancho de la vía a pavimentar y las restricciones constructivas, se deben evitar siempre que la separación entre dos juntas longitudinales (ancho de las losas), sea mayor que cuatro metros.

- ✓ 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 5.00 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 18 Esquema para construcción de juntas longitudinales.



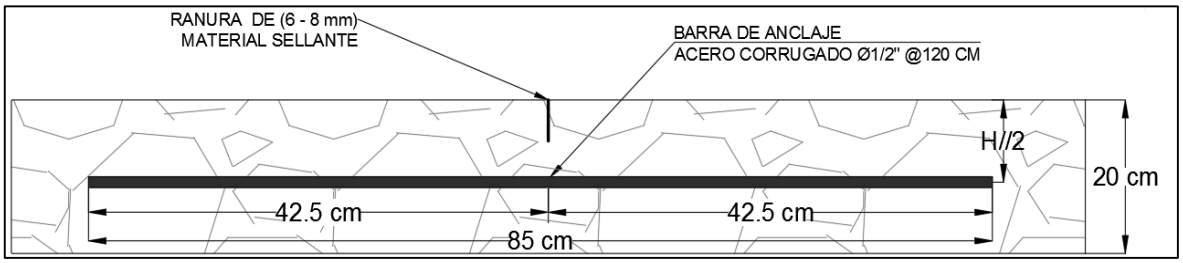
Fuente: Elaboración Propia.
Ilustración 19 Ubicación de juntas longitudinales.

Para la vía en estudio donde se realizará confinamiento lateral con bordillos, el Artículo INV 500-13 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 41.**

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 41 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 20**. 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.

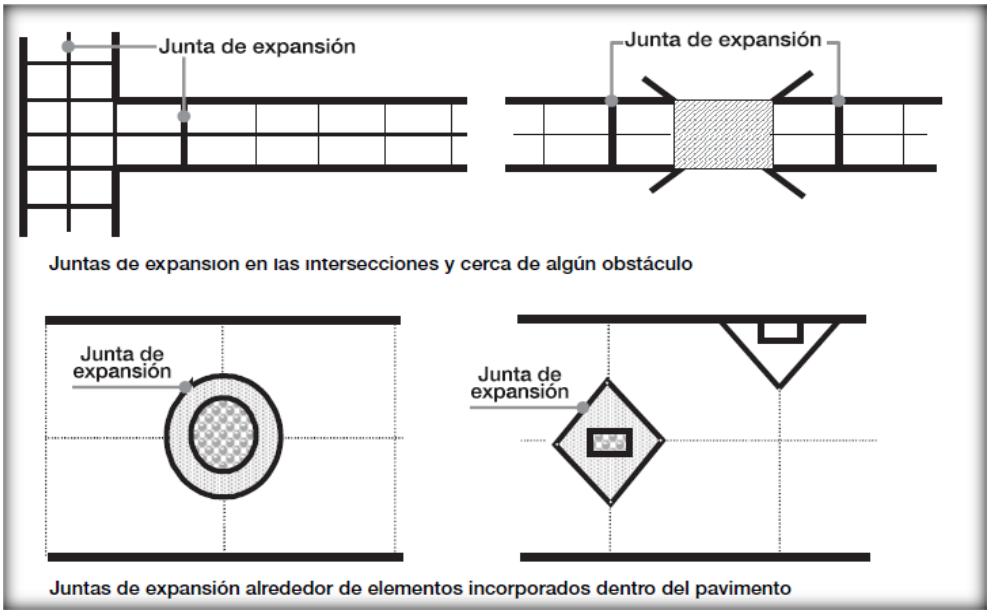


Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 20 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 21** se puede observar posibles casos de construcción de juntas de aislamiento.



Fuente: Figura 6.1 y 6.2 M.D.C.

Ilustración 21 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 500-13.

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 43** 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

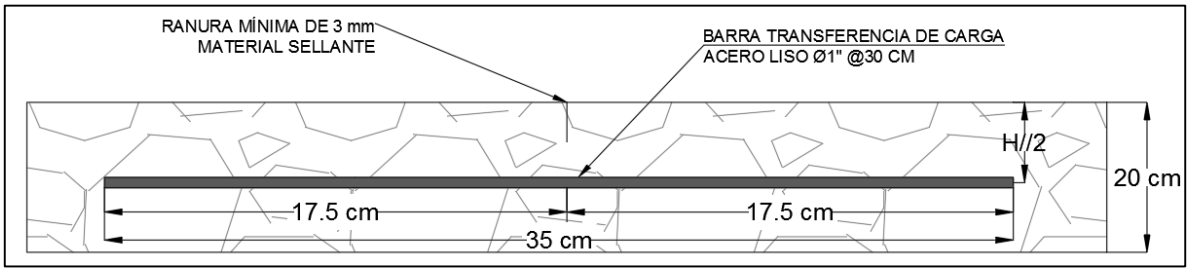
Fuente: Tabla 8.42 Ingeniería de Pavimentos Alfonso Montejo.
Tabla 42 Espaciamiento de juntas transversales, según el tipo de agregado del concreto.

Se seleccionan barras de transferencia de fluencia mínima de 280 Mpa (60000 PSI), diámetro de 1”, espaciamiento cada 30 cm y en longitudes de 35 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

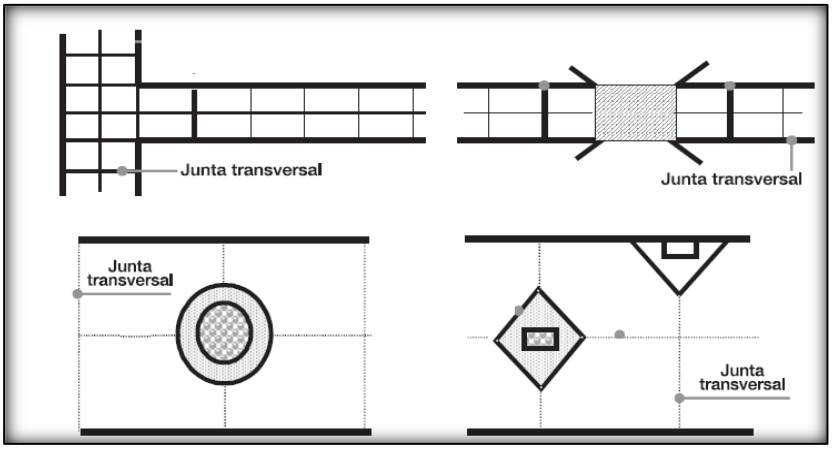
puede fisurar. Durante el proceso constructivo se recomienda que la posición de las barras de transferencia de carga y la construcción de la junta se haga según la **Ilustración 23**.

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 43 Recomendaciones para la selección de barras de transferencia de carga.



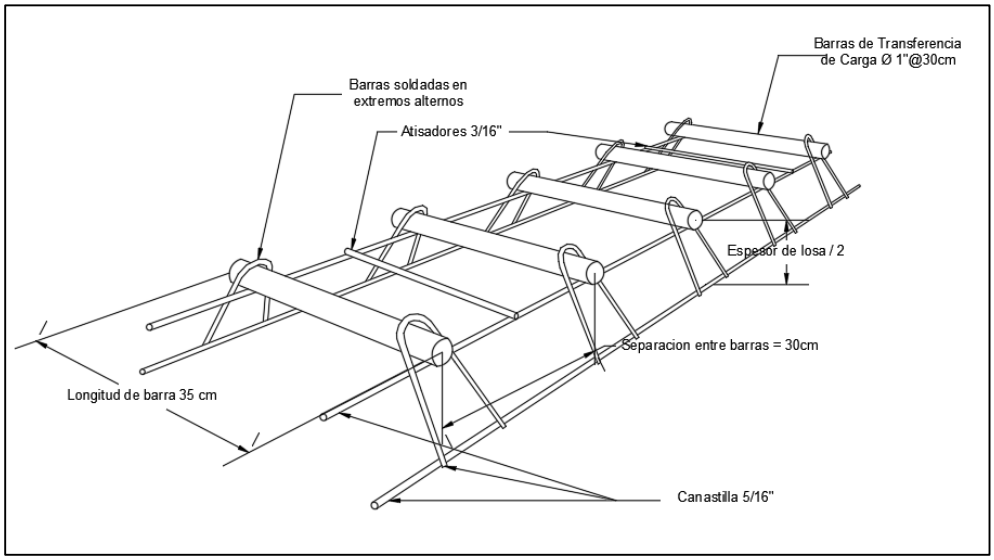
Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 22 Sección típica ubicación de las barras de transferencia y construcción de junta.



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

En la **Ilustración 24** se puede observar posibles casos de construcción de juntas transversales.

Por último, en la **ilustración 25** 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: Elaboración Propia.
Ilustración 24 Isométrico colocación de barras de transferencia.

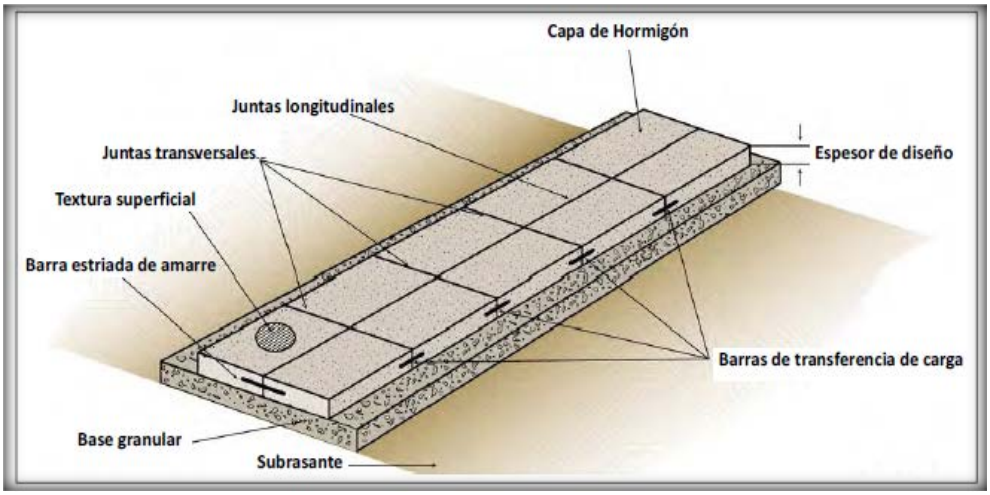


Ilustración 25 Isométrico losas de concreto y juntas.

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.

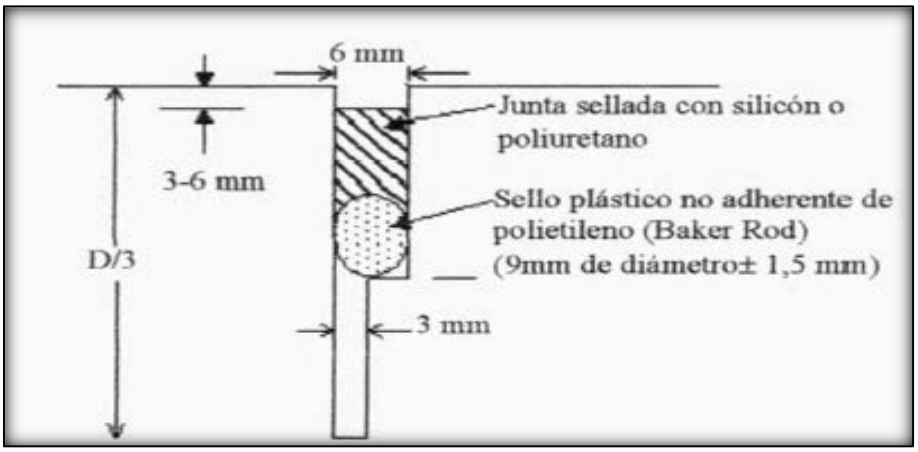


Ilustración 26 Detalle construcción de juntas.

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 2.9 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 3.00 (m)
H = Altura de la losa = 20 cm
A = Ancho de la losa = 2.50 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 3.50 m, dimensión con el cual se verifico el porcentaje de consumo por fatiga y erosión. El cálculo se realiza con la **ecuación 36.**

$$(\sigma_{ta}) = \frac{(\mu_{cto}) * L * f}{2} = \frac{2400 * 3.60 * 1.5}{2} = 6480\ \frac{Kg}{m2} < 8000 \frac{Kg}{m2} \qquad OK \qquad EC\ 36$$

Se puede concluir que por este método de control para una losa de 3.00 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 44 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 27** se puede observar el comportamiento de la losa tanto en el día como la noche.

En la **Ilustración 28** 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

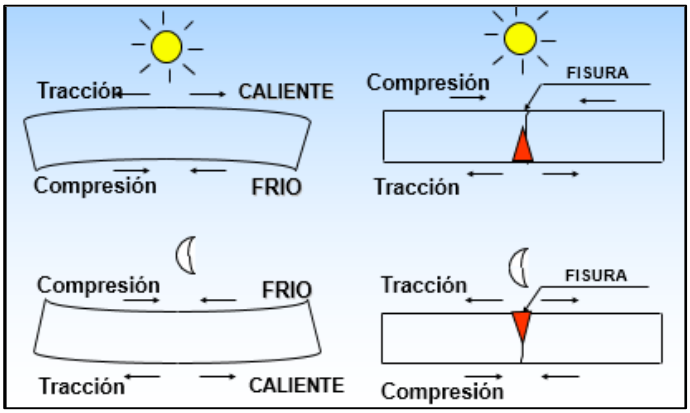
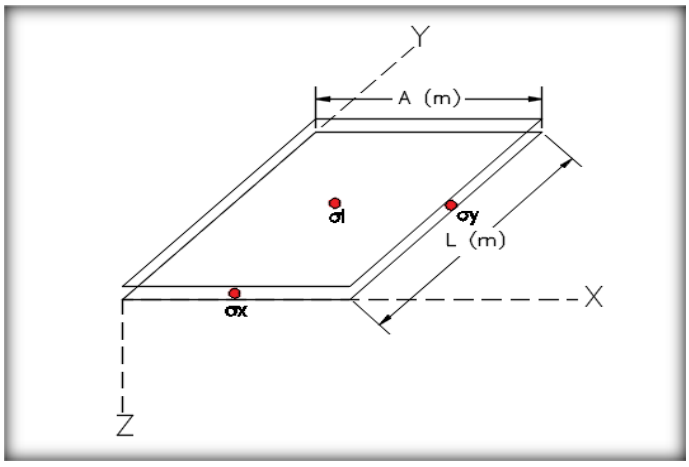


Ilustración 27 Comportamiento de alabeo teórico diurno y nocturno.



Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 28 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

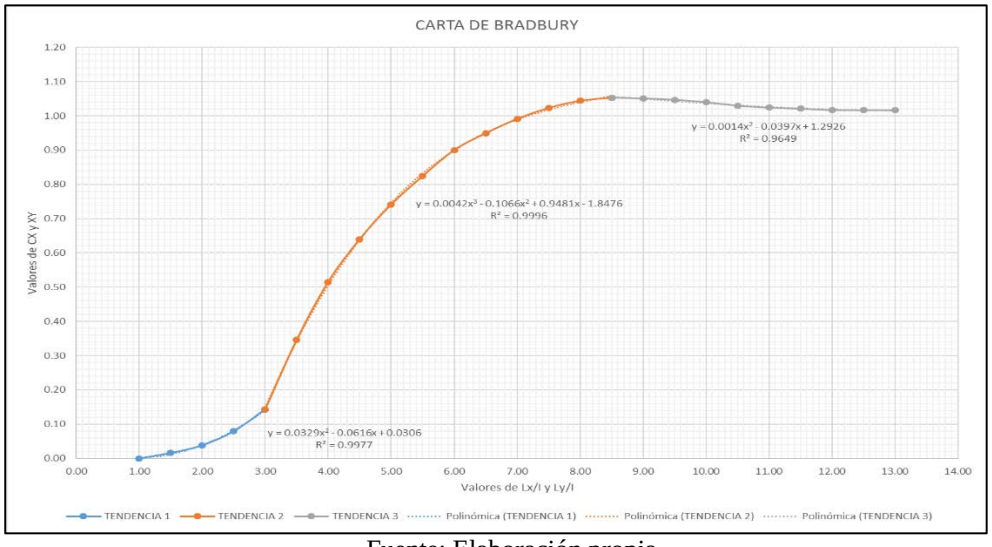
$$Cx = \frac{Lx}{\rho} \quad y \quad Cy = \frac{Ly}{\rho}$$

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 3.**



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

En la **tabla 45** se pueden observar los valores de las diferentes variables mencionadas anteriormente. Igualmente, en la **tabla 46,** 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 47** para poder encontrar los esfuerzos de borde en la placa de concreto rígido.

E = Modulo de Elasticidad del concreto	250000	Kg/cm2
H = Espesor de la Losa	0.20	m
μ = Relación de Poisson	0.15	
Keff = Modulo del Conjunto	4.54	Kg/cm3
I = Radio de Rigidez Relativa	78.28	cm
α = Coeficiente de Exp Term	1.08E-05	°C
Δt = Diferencia de Temperatura	13.20	°C
MR = Modulo de Rotura del Concreto	3.80	Mpa

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45 Variables para el cálculo de esfuerzos de bordes e internos.

Linea de Tendencia 2 Valores de Lx/I y Ly/I de 3 a 9								
CX / CY		**K1**	**(LX/I / LY/I)^3**	**K2**	**(LX/I / LY/I)^2**	**K3**	**LX/I / LY/I**	**K4**
CY	0.67	0.0042	4.60	-0.1066	4.60	0.9481	4.60	-1.8476
CX	0.46		3.83		3.83		3.83	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46 Líneas 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.**

Calculo 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**
Chuchuribi	3.60	3.00	3.83	4.60	0.46	0.67	11.94	8.20
Dirección	**σC (Kg/cm2) = 0.45MR**		**σb Y**	**σb X**	**Chequeo en Y**		**Chequeo X**	
Chuchuribi	17.10		11.94	8.20	OK		OK	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 47 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 48.**

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

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

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.

Calculos de Esfuerzo Internos en X y Y								
Dirección	**Geometria de la Losa (m)**		**Lx/I**	**Ly/I**	**Por Grafica**		**Calculo de Esfuerzo**	
	Ly	**Lx**			**CX**	**CY**	**σb Y**	**σb X**
Chuchuribi	3.60	3.00	3.83	4.60	0.46	0.67	13.47	10.22
Dirección	**σC (Kg/cm2) = 0.45MR**		**σb Y**	**σb X**	**Chequeo en Y**		**Chequeo X**	
Chuchuribi	17.10		13.47	10.22	OK		OK	

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 48 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 6** 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.

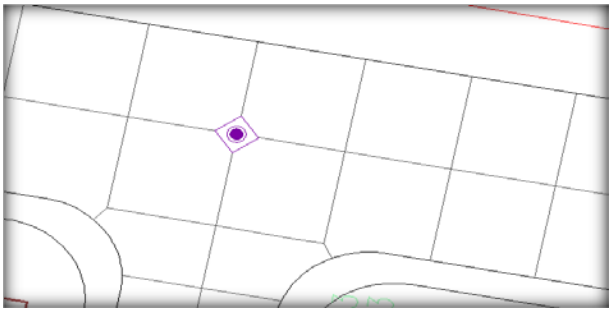
12.3 Control geométrico

- ✓ **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 29.**



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 29 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 30**. En caso de que el pozo de inspección involucre dos o más placas, es necesario reforzarlas. **Ilustración 31,** 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 32.**



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 30 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre una losa.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 31 Representación gráfica de la construcción para pozos de inspección sobre más de una losa.



Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 32 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 33**.



Fuente: Elaboración propia.
Ilustración 33 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares.

13 CONCLUSIONES

- ✓ La vía a construir se encuentra localizada en el municipio de Cereté específicamente en la vía del barrio Chuchurubi, departamento de Córdoba.
- ✓ El diseño transversal se definió para un ancho de **6.00 m**, con bombeos normales del 2% y bombeos transicionales ajustados a las condiciones actuales de drenaje y empalmes viales, tal información se puede observar en los planos de secciones transversales e informes de diseño geométrico.
- ✓ El transito equivalente calculado se deduce en función de la categoría de la vía. Numero de ejes equivalentes **67,225** ejes equivalentes, por lo cual se encuentra en categoría NT1 como se muestra en la **tabla 49** y en el M.D.C. de INVIAS.

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 49 Categoría de transito de acuerdo con INVIAS 2013.

- ✓ Las estructuras adoptadas durante el pre-dimensionamiento del pavimento rígido por la metodología de la AASHTO 93 se puede observar en las **tabla 50.**

Losa de Concreto Hidráulico e = 18 cm MR = 3.8 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm K = 45.4 Mpa/m
Reemplazo con espesor de 20 cm, CBR 10%
Material existente en campo según estudio geotécnico

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 50 Estructura pre-dimensionamiento pavimento rígido AASHTO.

- ✓ Las estructuras adoptadas durante el dimensionamiento del pavimento rígido por la metodología de la **PCA** se puede observar en las **tablas 51.**

Losa de Concreto Hidráulico e = 20 cm MR = 3.8 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm K = 45.4 Mpa/m
Reemplazo con espesor de 20 cm, CBR 10%
Material existente en campo según estudio geotécnico

Fuente: Elaboración propia.
Tabla 51 Estructura pre-dimensionamiento pavimento rígido PCA.

- ✓ 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 por la *Cartilla de Obras Menores Y Estructuras Viales del Programa Colombia Rural*, una vez verificado los esfuerzos por fatiga, deflexión por erosión y porcentaje de consumo, se concluye que las estructura óptima para soportar las repeticiones calculadas es la que se observa en la **tabla 52.** La estructura presentada en la tabla antes mencionadas, serán las que se incorporen durante el diseño geométrico de la vía para el cálculo de cantidades de obra.

Losa de Concreto Hidráulico e = 20 cm MR = 3.8 Mpa
Subbase Granular e = 15 cm K = 45.4 Mpa/m
Reemplazo con espesor de 20 cm, CBR 10%
Material existente en campo según estudio geotécnico

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

14 RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

- ✓ Durante el proceso constructivo de la subrasante mejorada se recomienda utilizar un material de mejoramiento según la especificación técnica del articulo **INV 230 - 13** “mejoramiento de la subrasante”

- ✓ 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 – 13** “subbase granular tipo 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** presenta el número de vehículos esperados según el espectro de carga (**67,225 vehículos**). Las referencias de selección de subbase se muestran en las **tablas 53 y 54.**

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 53 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 54 Categoría de transito 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 construir estructuras de drenaje tipo cunetas o box culvert, en caso que hayan sido proyectadas en el estudio hidráulico acompañado del diseño geométrico horizontal y vertical ya que el manejo de las aguas es de vital importancia para evitar que la estructura de pavimento falle por precipitación y drenaje; adicional se recomienda conservar las pendientes mínimas de drenaje para evitar la sedimentación y las pendientes máximas para evitar la erosión del concreto, ver manual de drenaje vial.

- ✓ 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 34**, 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 35.**

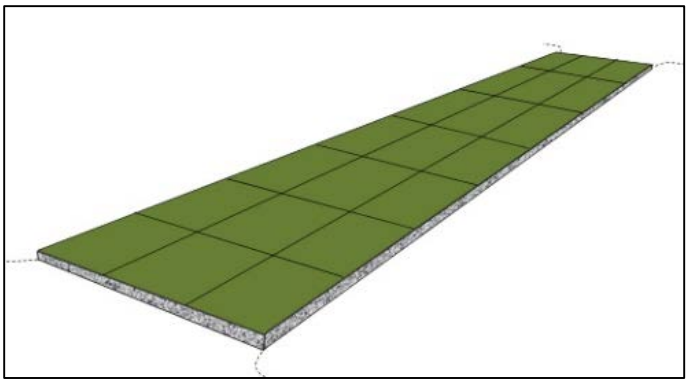


Ilustración 34 Representación gráfica de una óptima modulación de losas de concreto.

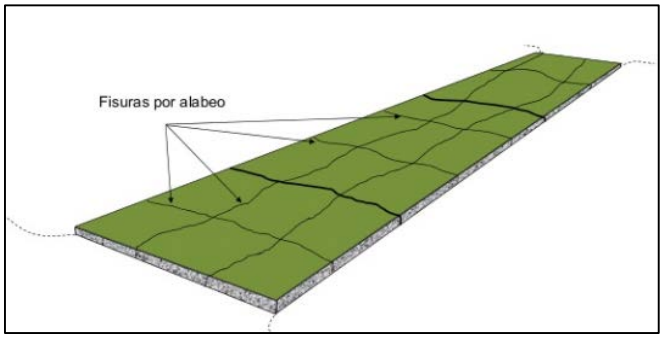


Ilustración 35 Representación gráfica de fisuras por alabeo.

- ✓ 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 1/3 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 – 13 INV** "acero de refuerzo".

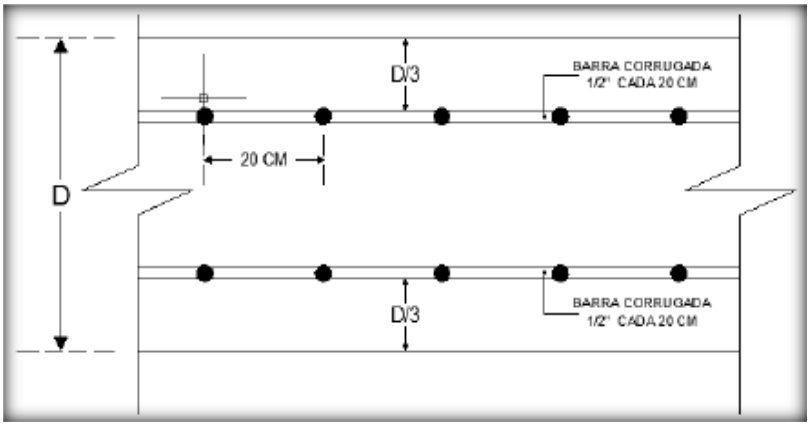


Ilustración 36 Representación gráfica de del refuerzo de losas irregulares.

- ✓ Si 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 – 13 INV** "bordillos de concreto" y al **artículo 630 - 13 INV** "concreto estructural".

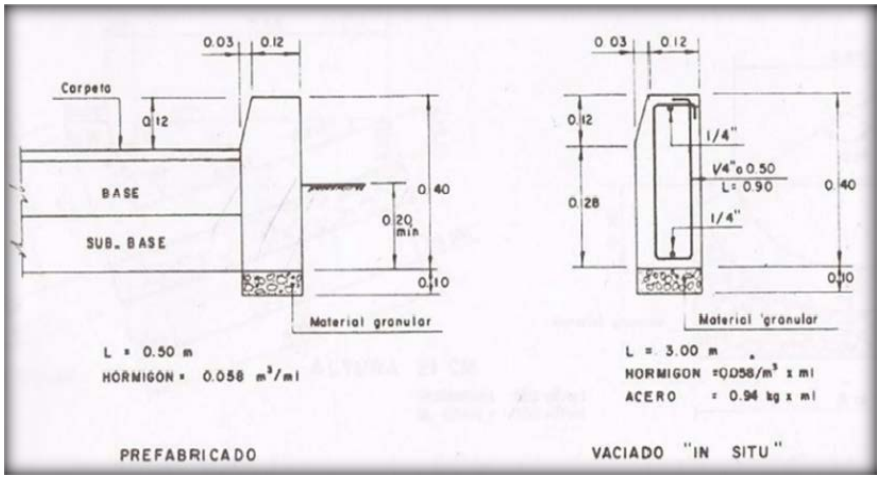


Ilustración 37 Detalle constructivo de bordillo prefabricado y vaciado "in-situ".