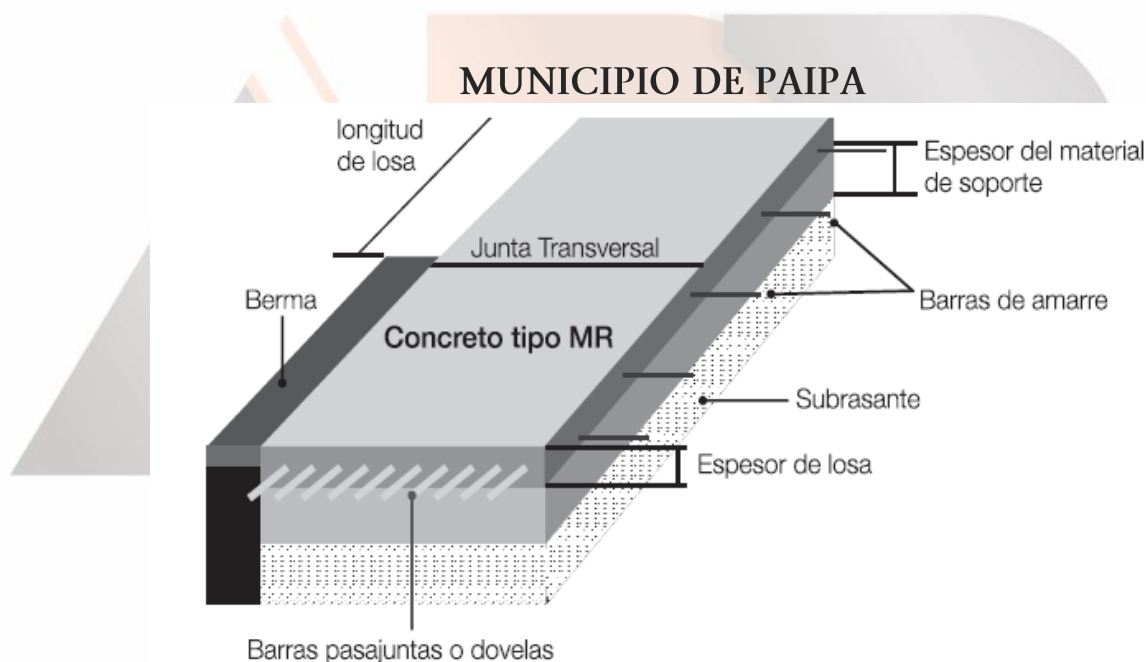


# “MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ”

**LOCALIZACIÓN: CALLE 26 ENTRE CARRERAS 18 Y 17 – CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE PAIPA – DEPARTAMENTO DE BOYACÁ**

## **DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO No 195**



**NIT: 900446925-7**

**SEPTIEMBRE 2025**



### **Contactos:**

Tel: (038) 747 4417

**Cel: 318 683 5421 / 312411 3265**

Calle 43 # 8a - 06 Tunja - Boyacá

[www.appcontrolingenieria.com](http://www.appcontrolingenieria.com)

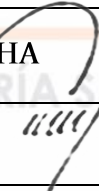
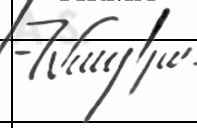
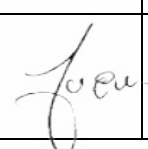
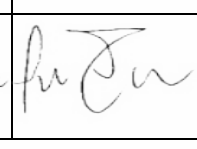
### LISTA DE CONTROL DE CAMBIOS

|               |                                                                                                                                              |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PROYECTO:     | MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ |
| LOCALIZACIÓN: | CALLE 26 ENTRE CARRERAS 18 Y 17 – CASCO URBANO DEL MUNICIPIO DE PAIPA – DEPARTAMENTO DE BOYACÁ                                               |
| No INTERNO:   | INF-DIPAV-195                                                                                                                                |
| ÁREA:         | CONSULTORÍA                                                                                                                                  |

### LISTA DE DISTRIBUCIÓN

|             | CONSULTORÍA                                                                        | INTERVENTOR |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| CONTRATISTA | APP CONTROL INGENIERÍA SAS<br>R/L: Sebastián Toledo Moya                           |             |
| FIRMA       |  |             |
| FECHA       |                                                                                    |             |

### REVISIONES

| ESTADO                   | NOMBRE                                                   | FECHA                                                                                 | FIRMA                                                                                 |
|--------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Vo.Bo.<br>Contratista    | Ing. Carlos Augusto Vargas Igua<br>M.P. 25202-100599 CND |  |  |
| Vo.Bo.<br>Interventoría. |                                                          |                                                                                       |                                                                                       |
| Vo.Bo.<br>Supervisión.   |                                                          |  |  |

## TABLA DE CONTENIDO

|                                                                  | Pág.      |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>                                              | <b>9</b>  |
| <b>1 GENERALIDADES</b>                                           | <b>10</b> |
| 1.1 Descripción del proyecto                                     | 10        |
| 1.2 Ubicación                                                    | 10        |
| <b>2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO - ALCANCE</b>                         | <b>13</b> |
| 2.1 Objetivo general                                             | 13        |
| 2.2 Objetivos específicos                                        | 13        |
| 2.3 Alcance                                                      | 13        |
| <b>3 PARÁMETROS DE DISEÑO</b>                                    | <b>15</b> |
| 3.1 Periodo de diseño                                            | 15        |
| 3.2 Tránsito de diseño                                           | 15        |
| 3.3 Condiciones atmosféricas                                     | 16        |
| 3.4 Características de la subrasante                             | 17        |
| 3.4.1 Módulo resiliente mejorado                                 | 18        |
| 3.5 Características de los materiales                            | 18        |
| 3.6 Métodos de diseño                                            | 18        |
| <b>4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE</b> | <b>20</b> |
| 4.1 Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles            | 20        |
| 4.1.1 Restricciones de tiempo                                    | 20        |
| 4.1.2 Nivel de confiabilidad, (R)                                | 20        |
| 4.1.3 Desviación Normal Estándar, ( $Z_r$ )                      | 20        |
| 4.1.4 Error normal combinado, $S_o$                              | 20        |
| 4.1.5 Efectos ambientales                                        | 20        |
| 4.1.6 Criterios de comportamiento                                | 20        |
| 4.1.7 Propiedades de los materiales                              | 21        |

|       |                                                                                                                             |           |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1.8 | Coeficientes de capas                                                                                                       | 21        |
| 4.1.9 | Características estructurales del pavimento                                                                                 | 22        |
| 4.2   | PLANTEAMIENTO DE LA REDUCCIÓN DE ESPESORES GRANULARES MEDIANTE EL REFUERZO DE LA ESTRUCTURA CON GEOMALLA BIAXIAL COEXTRUIDA | 26        |
| 4.3   | Análisis elástico multicapa                                                                                                 | 30        |
| 4.3.1 | Cargas aplicadas                                                                                                            | 30        |
| 4.3.2 | Criterios de diseños de estructuras de pavimentos flexibles – valores admisibles                                            | 30        |
| 5     | <b>DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO RÍGIDO</b>                                                               | <b>33</b> |
| 5.1   | Método AASHTO para diseño de pavimentos rígidos                                                                             | 33        |
| 5.1.1 | Parámetros de diseño                                                                                                        | 33        |
| 5.2   | Cálculo de esfuerzos y deflexiones de la losa                                                                               | 39        |
| 5.2.1 | Formulación para el chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa                                                       | 40        |
| 5.2.2 | Chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa                                                                           | 42        |
| 5.3   | Dimensiones de la losa y elementos de transferencia de carga                                                                | 43        |
| 5.3.1 | Dimensiones de la losa                                                                                                      | 43        |
| 5.4   | Diseño y construcción de las juntas                                                                                         | 45        |
| 5.4.1 | Tipos de juntas                                                                                                             | 45        |
| 5.4.2 | Recomendaciones para el diseño de las juntas                                                                                | 47        |
| 5.4.3 | Sellado de las juntas                                                                                                       | 48        |
| 5.4.4 | Limpieza Previa                                                                                                             | 48        |
| 5.5   | Modelo estructural del pavimento rígido                                                                                     | 49        |
| 6     | <b>ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS</b>                                                       | <b>51</b> |
| 6.1   | Subbase Granular INV E 320 – 22 - Base Granular INV E 330 –22                                                               | 51        |
| 6.2   | Capa asfáltica: Mezcla densa en caliente MDC – 19. INV E 450 - 22                                                           | 55        |
| 7     | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>                                                                                       | <b>60</b> |
| 8     | <b>LIMITACIONES</b>                                                                                                         | <b>69</b> |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>9 ANEXOS</b>                                                                    | <b>70</b> |
| Anexo 1. Tablas de proyección del tránsito de diseño                               | 71        |
| Anexo 2. Determinación de SN requeridos pavimentos flexibles                       | 74        |
| Anexo 3. Espesores propuestos estructuras de pavimentos flexibles método AASHTO-93 | 75        |
| Anexo 4. Modelaciones BISAR 3.0 de la Shell                                        | 76        |
| Anexo 5. Revisión mecanicista de estructuras de pavimentos flexibles               | 78        |
| Anexo 6. Determinación módulo de reacción afectivo de la subrasante Kef            | 79        |
| Anexo 7. Determinación del espesor de la losa, ecuación AASHTO pavimentos rígido   | 80        |
| Anexo 8. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Esfuerzos)    | 81        |
| Anexo 9. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Deflexiones)  | 82        |

## LISTA DE ESQUEMAS

|                                                                                                                                  | Pág. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Esquema 1. Localización general del proyecto.                                                                                    | 11   |
| Esquema 2. Localización específica del proyecto                                                                                  | 12   |
| Esquema 3 Esquema y abscisas de intervención del proyecto                                                                        | 14   |
| Esquema 3. Determinación del LCR                                                                                                 | 28   |
| Esquema 4. Efecto del mecanismo de transferencia de carga.                                                                       | 36   |
| Esquema 5. Tipos de juntas                                                                                                       | 46   |
| Esquema 6. Recomendaciones construcción de juntas.                                                                               | 46   |
| Esquema 7. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido                                                                   | 49   |
| Esquema 8. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido                                                                   | 63   |
| Esquema 9. Modelo estructural del pavimento flexible recomendado                                                                 | 65   |
| Esquema 10. Modelo estructural del pavimento flexible reforzado con geomalla biaxial recomendado (SELECCIONADA PARA EL PROYECTO) | 66   |
| Esquema 11. Estructura de pavimento rígido recomendada                                                                           | 66   |

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                             | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 1 Coordenadas y abscisas de intervención del proyecto                                                 | 14   |
| Tabla 1. Tránsitos de diseño                                                                                | 16   |
| Tabla 2. Resumen de los TPD establecidos para el proyecto                                                   | 16   |
| Tabla 3. Resumen de las características geomecánicas de los apiques realizados                              | 17   |
| Tabla 4. Valores de CBR del suelo natural o subrasante                                                      | 17   |
| Tabla 5. Sectorización unidades de diseño                                                                   | 18   |
| Tabla 6. Módulos resilientes de la subrasante del tramo vial                                                | 21   |
| Tabla 7. Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de las capas de base y Subbase granular | 23   |
| Tabla 8. Coeficientes de aporte estructural (ai), de drenaje (mi), módulos y relación de Poisson tomados    | 23   |
| Tabla 9. Resumen SN calculados pavimentos flexibles                                                         | 24   |
| Tabla 10. Resumen alternativas analizadas método AASHTO                                                     | 25   |
| Tabla 11. Espesores de las capas de la estructura de pavimento convencional                                 | 26   |
| Tabla 12. Espesores de las capas de la estructura de pavimento sustituyendo la subbase granular             | 27   |
| Tabla 13. Comparación reducción de espesores mediante la inclusión de la geomalla biaxial                   | 29   |
| Tabla 14. Características de resistencia de la subrasante para el diseño de pavimento                       | 34   |
| Tabla 15. Valores iniciales y de diseño.                                                                    | 37   |
| Tabla 16. Valores del coeficiente de drenaje, Cd                                                            | 38   |
| Tabla 17. Resumen SN calculados pavimentos rígidos                                                          | 39   |
| Tabla 18. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.                                             | 39   |
| Tabla 19. Dimensiones máximas de la losa.                                                                   | 43   |

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 20. Dimensiones de la losa según ancho de la calzada.                                                            | 44 |
| Tabla 21. Requisitos mínimos para las dovelas en las juntas.                                                           | 44 |
| Tabla 22. Recomendación para las barras de anclaje                                                                     | 45 |
| Tabla 23. Requisitos de los agregados para subbases granulares INVÍAS 2022.                                            | 51 |
| Tabla 24. Requisitos de los agregados para bases granulares INVÍAS 2022.                                               | 52 |
| Tabla 25. Franja granulométrica subbase granular.                                                                      | 53 |
| Tabla 26. Franja granulométrica base granular.                                                                         | 53 |
| Tabla 27. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.                       | 55 |
| Tabla 28. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. | 56 |
| Tabla 29. Porción y requisitos del llenante mineral.                                                                   | 56 |
| Tabla 30. Franja granulométrica recomendada mezcla densa en caliente.                                                  | 57 |
| Tabla 31. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.                               | 58 |
| Tabla 32. Características de la subrasante                                                                             | 60 |
| Tabla 33. Características de diseño de la subrasante por unida de diseño                                               | 61 |
| Tabla 34. Resumen alternativas analizadas pavimento flexible                                                           | 62 |
| Tabla 35. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.                                                        | 63 |
| Tabla 36. Evaluación económica de alternativas.                                                                        | 64 |

## INTRODUCCIÓN

El diseño de estructura de pavimento se realiza para la ejecución del componente asociado al contrato número 195 de 2025 cuyo objeto es MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ, para un tramo de vía correspondiente a la calle 26 entre carreras 18 y 17 – casco urbano del municipio de Paipa – departamento de Boyacá.

El análisis para el diseño del pavimento, se realiza mediante el MÉTODO AASHTO-93 PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS. Cabe aclarar que la prioridad en la selección de todos los parámetros se hizo pensándose siempre en la forma de garantizar la comodidad, seguridad de los usuarios y en el factor económico en que se incurre al replantear y pavimentar una vía.

Con el fin de verificar la estructura flexible a diseñar, se realiza un análisis elástico multicapa donde se verifica las deformaciones admisibles en cada una de las capas de la estructura, utilizando el programa BISAR 3.0 de la Shell, para comparar los esfuerzos a los que estará sometido la estructura y los que está en capacidad de soportar. Para el pavimento rígido se realiza un análisis del tipo de juntas para el pavimento rígido, para la posterior verificación de los esfuerzos y deflexiones en diferentes posiciones de la losa calculada mediante la mecánica de pavimentos rígidos, asegurando de esta forma que las losas diseñadas están en la capacidad de soportar las cargas impuestas por el tráfico de vehículos.

La variable geotécnica y de tránsito de diseño, se realizó basado en los estudios específicos desarrollados para la consultoría del proyecto.

El informe presenta detalladamente los resultados de la metodología, memorias de cálculo, conclusiones y recomendaciones que se deben tener en cuenta para el diseño y construcción del pavimento, desde el punto de vista técnico y económico.

## 1 GENERALIDADES

En este informe se consigna la información de diseño de estructura de pavimento a partir del análisis del componente geotécnico, de tránsito, variables climatológicas, ambientales y económicas para definir una combinación de espesores que apliquen al proyecto.

### 1.1 Descripción del proyecto

El proyecto consiste en implementar una estructura adecuada de pavimento, mediante la construcción, reforzamiento o reconstrucción de estructuras existentes en el corredor de la vía en estudio, con el fin de que se brinden mejores condiciones de paso de vehículos, garantizando la seguridad, accesibilidad para optimizar la movilidad de los usuarios que a diario transitan por el sector, con costos de operación bajos, siempre y cuando se garanticen actividades de mantenimiento rutinario y preventivo que prolonguen la vida útil de la estructura.

La formulación y estructuración de este proyecto surge como respuesta a la necesidad imperante de mejorar la infraestructura vial en la región. Esta vía, de vital importancia para la conectividad local, ha experimentado un deterioro progresivo que afecta la eficiencia del transporte, la seguridad vial y el desarrollo económico de la zona. La pavimentación de esta carretera no solo busca resolver problemas inmediatos, sino también sentar las bases para un crecimiento sostenible y una movilidad más fluida en la comunidad.

### 1.2 Ubicación

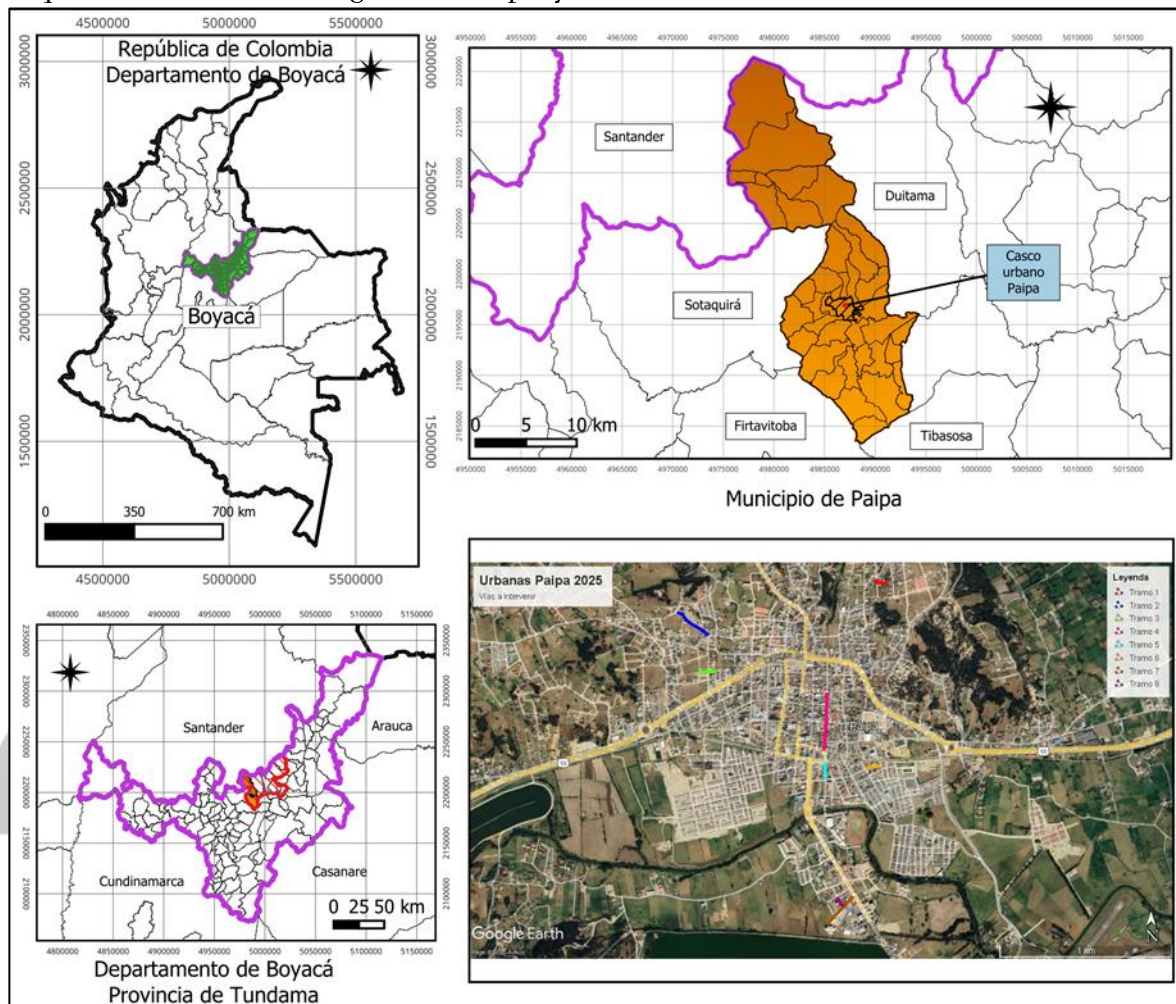
El sitio del proyecto se encuentra localizado en el departamento de Boyacá, en la provincia de Tundama, a una distancia de 41 Km de la ciudad de Tunja, y 15 Km de Duitama, en jurisdicción del municipio de Paipa del departamento de Boyacá.

El inicio del proyecto se encuentra en la intersección de la calle 26 con carrera 18, y termina en la intersección de la calle 26 con carrera 17.

|               |                  |
|---------------|------------------|
| REGIÓN.       | ANDINA           |
| DEPARTAMENTO: | BOYACÁ           |
| PROVINCIA:    | Tundama          |
| MUNICIPIO:    | Paipa            |
| TOPOGRAFÍA:   | Plano - Ondulado |
| VÍAS:         | Urbana           |

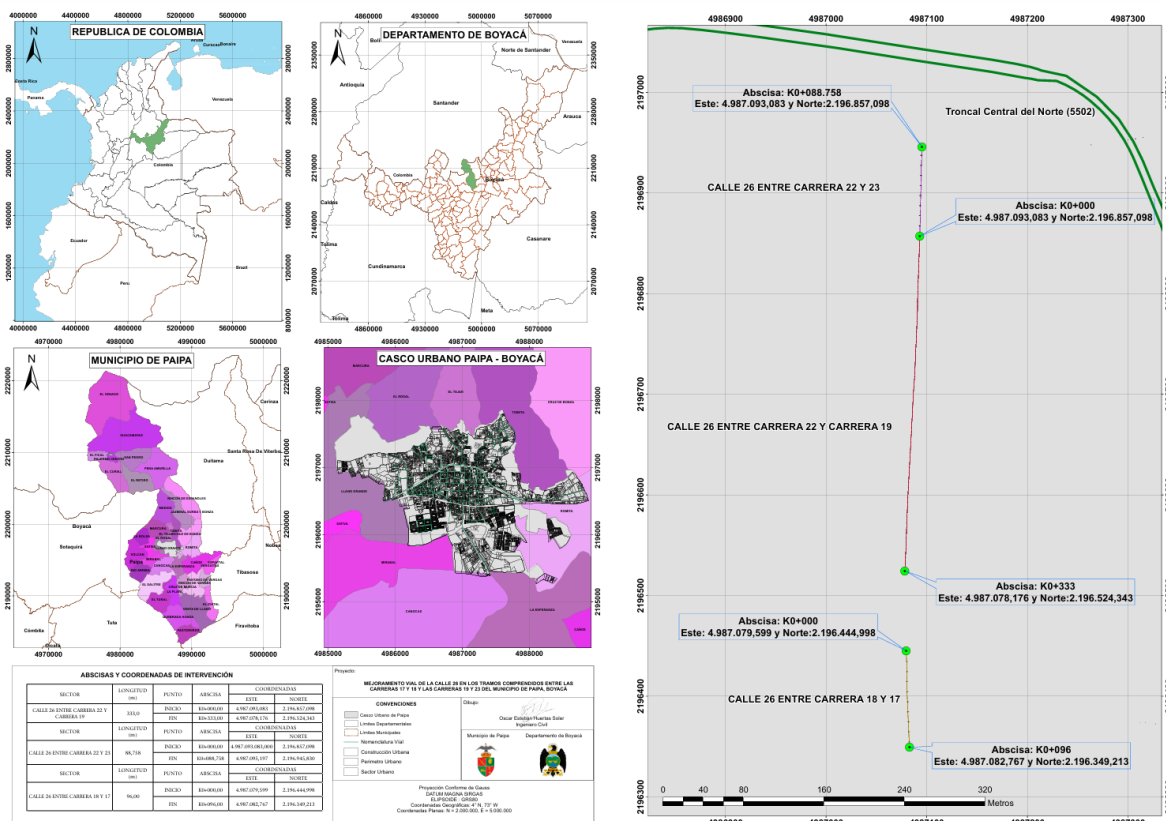
CLIMA: 14.3° C  
ALTITUD: 991 m.s.n.m

Esquema 1. Localización general del proyecto.



Fuente: El estudio

## Esquema 2. Localización específica del proyecto



Fuente: El estudio

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

## 2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO - ALCANCE

A continuación, se presentan el objetivo general, objetivos específicos y alcance del presente informe.

### 2.1 Objetivo general

Determinar la configuración estructural del pavimento el proyecto “MEJORAMIENTO VIAL DE LA CALLE 26 EN LOS TRAMOS COMPRENDIDOS ENTRE LAS CARRERAS 17 Y 18 Y LAS CARRERAS 19 Y 23 DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ” ubicado en calle 26 entre calles 18 y 17 – sector sur del casco urbano del municipio de Paipa – departamento de Boyacá.

### 2.2 Objetivos específicos

- Definir la configuración estructural del pavimento teniendo en cuenta las condiciones geométricas del proyecto, consideraciones de tránsito y exploración geotécnica.
- Calcular los espesores de diseño a partir de la metodología AASHTO-93 y posterior verificación mediante evaluación mecanicista.
- Presentar las respectivas conclusiones y recomendaciones.

### 2.3 Alcance

Determinar la configuración estructural para el tramo de vía en estudio, mediante las consideraciones de tránsito de diseño, condiciones de subrasante definidas en el estudio geotécnico del proyecto, condiciones ambientales, geométricas y particulares del tramo en estudio.

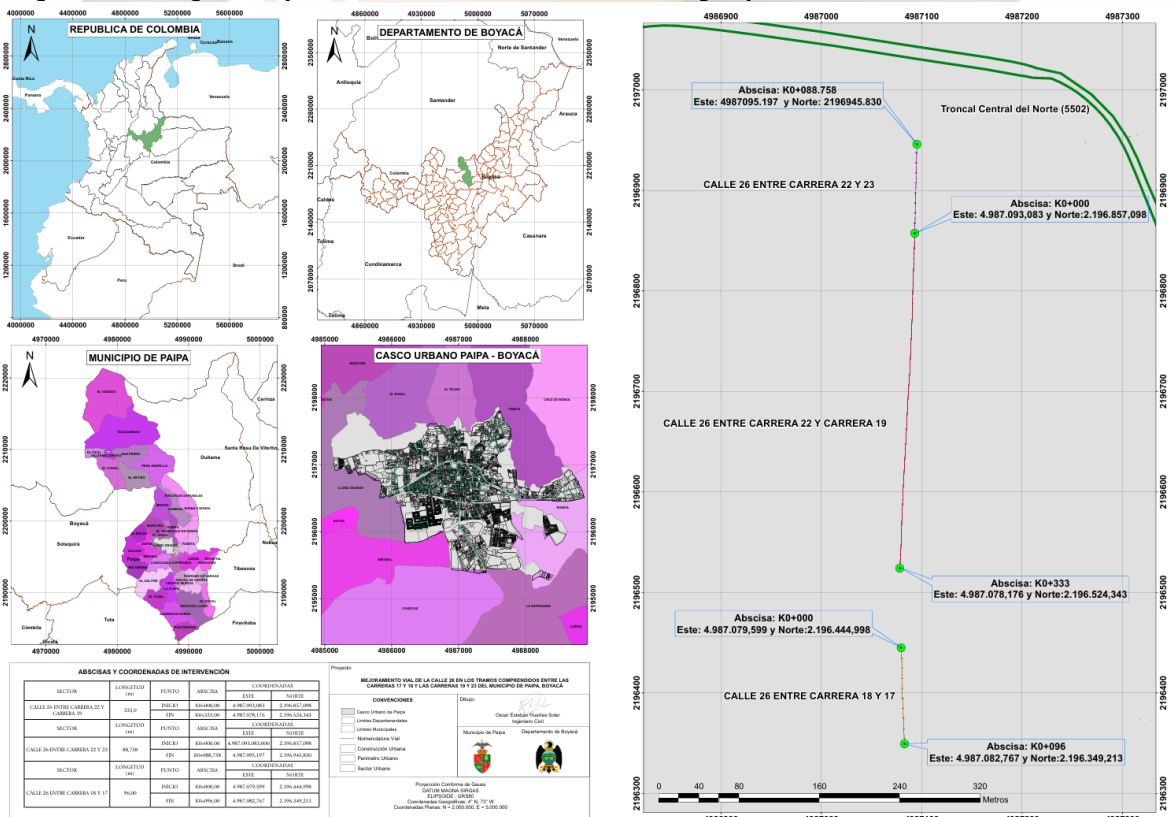
Para el caso del proyecto se tiene contemplado la intervención de la Calle 26 en los tramos comprendidos entre las Carreras 17 y 18 y las Carreras 19 y 23 del municipio de paipa, Boyacá, a continuación, se relaciona las coordenadas y las abscisas respectivas, un aspecto a tener en cuenta es que las abscisas que se relacionan en la tabla están de acuerdo con el diseño geométrico:

Tabla 1 Coordenadas y abscisas de intervención del proyecto

| SECTOR                                    | LONGITUD<br>(m) | PUNTO  | ABSCISA    | COORDENADAS    |               |
|-------------------------------------------|-----------------|--------|------------|----------------|---------------|
|                                           |                 |        |            | ESTE           | NORTE         |
| CALLE 26 ENTRE CARRERA<br>22 Y CARRERA 19 | 333,0           | INICIO | K0+000,00  | 4.987.093,083  | 2.196.857,098 |
|                                           |                 | FIN    | K0+333,00  | 4.987.078,176  | 2.196.524,343 |
| CALLE 26 ENTRE CARRERA<br>22 Y 23         | 88,758          | INICIO | K0+000,00  | 4.987.093,0830 | 2.196.857,098 |
|                                           |                 | FIN    | K0+088,758 | 4.987.095,1970 | 2.196.945,830 |
| SECTOR                                    | LONGITUD<br>(m) | PUNTO  | ABSCISA    | COORDENADAS    |               |
|                                           |                 |        |            | ESTE           | NORTE         |
| CALLE 26 ENTRE CARRERA<br>18 Y 17         | 96,00           | INICIO | K0+000,00  | 4.987.079,599  | 2.196.444,998 |
|                                           |                 | FIN    | K0+096,00  | 4.987.082,767  | 2.196.349,213 |

Fuente: El Estudio.

### Esquema 3 Esquema y abscisas de intervención del proyecto



Fuente: El Estudio.

### 3 PARÁMETROS DE DISEÑO

El diseño estructural de pavimentos implica la consideración y análisis de factores como: Las características del suelo de subrasante, tipo, frecuencia y configuración de cargas esperadas, condiciones climáticas – ambientales y calidad de materiales, etc. los cuales se abordarán secuencialmente en el desarrollo del presente informe.

#### 3.1 Periodo de diseño

La estructura del pavimento de la vía, tendrá un Periodo de diseño acorde al tipo de estructura a evaluar de acuerdo a las condiciones esperadas de tráfico; periodo en el cual no se requerirá ningún mantenimiento estructural y llegará a su serviciabilidad final.

**Periodo de diseño pavimento flexible = 10 años**

**Periodo de diseño pavimento rígido = 20 años**

#### 3.2 Tránsito de diseño

La variable tránsito necesaria para determinar la estructura del pavimento, es el número de ejes equivalentes a 8,2 toneladas que circularán por el carril de diseño, durante el periodo de vida útil, el estudio de tránsito estableció una (1) unidades homogéneas de tránsito, las cuales presentan los siguientes valores recomendados resaltados en negrita, y pueden ser consultados en mayor detalle en el informe de estudio de tránsito. En el anexo 1 se presentan las tablas resúmenes de las proyecciones del tránsito de diseño.

Tabla 2. Tránsitos de diseño

| Periodo de diseño<br>(Años) | Pavimento<br>flexible | Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 8.2 toneladas en<br>el carril de diseño durante el periodo de diseño |           |                  |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|
|                             |                       | Pavimento rígido                                                                                                          |           |                  |
|                             |                       | D=175 mm                                                                                                                  | D=200 mm  | D=225 mm         |
| 5                           | 523 171               | 451 191                                                                                                                   | 455 119   | 380 684          |
| 10                          | <b>1 191 461</b>      | 1 027 537                                                                                                                 | 1 036 482 | 866 963          |
| 15                          | 2 043 693             | 1 762 516                                                                                                                 | 1 777 860 | 1 487 089        |
| 20                          | 3 132 554             | 2 701 568                                                                                                                 | 2 725 088 | <b>2 279 395</b> |

Fuente: Elaboración propia – Estudio de tránsito.

La siguiente tabla presenta los tránsitos promedios diarios “TPD” establecidos en el componente del estudio de tránsito.

Tabla 3. Resumen de los TPD establecidos para el proyecto

| TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL               |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       |       |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| TRÁNSITO<br>PROMEDIO<br>DIARIO SOBRE<br>LA VÍA | TIPO DE VEHÍCULO                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       | TOTAL |
|                                                | AUTOS                                                                               | BUSES                                                                               | C2- P                                                                               | C2- G                                                                               | C3 - C4                                                                              | C5                                                                                    | >C5                                                                                   |       |
|                                                |  |  |  |  |  |  |  |       |
|                                                | TPDS                                                                                | 1255                                                                                | 112                                                                                 | 44                                                                                  | 25                                                                                   | 3                                                                                     | 0                                                                                     |       |
| % TIPO DE<br>VEHÍCULO                          | 87.2%                                                                               | 7.8%                                                                                | 3.1%                                                                                | 1.7%                                                                                | 0.2%                                                                                 | 0.0%                                                                                  | 0.0%                                                                                  | 1439  |
|                                                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |                                                                                       | 100%  |

Fuente: Elaboración propia a partir del informe del componente de tránsito.

### 3.3 Condiciones atmosféricas<sup>1</sup>

La temperatura y la precipitación, son variables que influyen de manera significativa en la durabilidad de los materiales que conforman las capas del pavimento y se definieron de acuerdo a la información disponible en el municipio.

Temperatura media anual ponderada (w-MAAT°C)      w-MAAT = 14.3 °C

Precipitación media anual (mm)      P (mm) = 991

De acuerdo al INVÍAS, según las condiciones climatológicas de la zona del proyecto, se debe trabajar con resultados de CBR en condición sumergida.

<sup>1</sup> Estación agrometeorológica Tunguavita - IDEAM

### 3.4 Características de la subrasante

De acuerdo con las condiciones de la vía y el estudio de suelos se realizaron 1 apiques para la caracterización de las capas existentes y la toma de CBR de la subrasante, determinando<sup>2</sup>:

A continuación, se presenta la tabla resumen de los valores obtenidos.

Tabla 4. Resumen de las características geomecánicas de los apiques realizados

| SECTOR | DIRECCION                              | APIQUE | SUCS  | PROF. MEDIA m | CBR ANTES DE INMERSION % | CBR DESPUES DE INMERSION% | AASTHO IG % | PROP. INDICE % | PDC % | EXPANSION % | ESPESOR MATERIAL GRANULAR |
|--------|----------------------------------------|--------|-------|---------------|--------------------------|---------------------------|-------------|----------------|-------|-------------|---------------------------|
| 5      | Calle 26 entre carrera 18 y carrera 17 | 6      | SM-SC | 0.73          | 5.2                      | 3.1                       | 7.9         | 15.3           | 7.6   | 0.20        | 0.35                      |

Fuente: Tabla 4 del informe de geotécnico de suelos.

En el apique realizado, no se identificaron niveles freáticos<sup>3</sup>, y según el grado de plasticidad, límite líquido y los niveles de humedad encontrados se concluye que los suelos existentes tienen potencial de expansión bajo.<sup>4</sup>

A continuación, se presenta la tabla resumen de los valores de CBR obtenidos en la exploración geotécnica, reportando los valores promedio de la exploración.

Tabla 5. Valores de CBR del suelo natural o subrasante

|                            |          |           |
|----------------------------|----------|-----------|
| Unidad de diseño           | 1        |           |
| Abscisa inicio             | k0+000   |           |
| Abscisa fin                | K0+096   |           |
| Condición                  | Natural  | Sumergido |
| CBR (%)                    | 5.20     | 3.10      |
| Mr (Kg/cm <sup>2</sup> )   | 506      | 363       |
| Mr (lb/pulg <sup>2</sup> ) | 7229     | 5271      |
| Mr (N/m <sup>2</sup> )     | 5.06E+07 | 3.63E+07  |
| Mr (MPa)                   | 50.6     | 36.3      |
| K (Kg/cm <sup>3</sup> )    | 3.94     | 2.78      |
| K (lb/pulg <sup>3</sup> )  | 142.3    | 100.4     |
| K (MPa/m)                  | 39.4     | 27.8      |

Fuente: Elaboración propia a partir de Tabla 4.

<sup>2</sup> Datos estudio geotécnico realizado por APP control Ingeniería S.A.S.

<sup>3</sup> Ver numera 2.1.1 del informe geotécnico de suelos.

<sup>4</sup> Ver numeral 2.1.2 del informe geotécnico de suelos.

La sectorización propuesta para unidades geotécnicas obedece a condiciones de resistencia de la subrasante, para este caso y según las características climatológicas de la zona del proyecto, se toma como condición de diseño los valores correspondientes a CBR's en condición sumergida.

Tabla 6. Sectorización unidades de diseño

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| Unidad de diseño            | 1           |
| Abscisa inicio              | k0+000      |
| Abscisa fin                 | K0+096      |
| <b>CBR (%)</b>              | <b>3.10</b> |
| Mr (Kg/cm <sup>2</sup> )    | 363         |
| Mr (lb(pulg <sup>2</sup> )) | 5271        |
| Mr (N/m <sup>2</sup> )      | 3.63E+07    |
| Mr (MPa)                    | 36.3        |
| K (Kg/cm <sup>3</sup> )     | 2.78        |
| K (lb/pulg <sup>3</sup> )   | 100.4       |
| K (MPa/m)                   | 27.8        |

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1 Módulo resiliente mejorado

Para este caso, y considerando que únicamente se dispone de un (1) apique para la caracterización de la subrasante y la estructura del pavimento existente, el espesor del material granular hallado en la exploración (hasta 0,35 m) se tomará en caso de lograr aprovecharse como capa estructural como un factor de seguridad en el comportamiento estructural del pavimento.

### 3.5 Características de los materiales

Según los niveles de tránsito esperados, los materiales que conformarán la estructura de pavimento, deberán cumplir los requisitos exigidos para materiales con nivel de tránsito tipo NT-2 o clase B, establecidos según las especificaciones de construcción de carreteras del INVÍAS 2022, las cuales pueden ser consultados en la página WEB del INVÍAS.

### 3.6 Métodos de diseño

Los procedimientos para el diseño estructural del pavimento presentado en este estudio, son aplicables para este tipo de vías. Con el fin de encontrar la solución más favorable para el proyecto, se realiza un análisis detallado por diferentes métodos de diseño, que nos permita concluir con la estructura del pavimento que debe alcanzar el nivel de servicio deseado. A continuación, se presenta los métodos de diseño desarrollados en el presente estudio:

- Con el fin de encontrar la solución más favorable para el proyecto, se realiza un análisis detallado por la metodología descrita en la Guía AASHTO 93 para el diseño de estructuras de pavimentos, todo esto verificando los criterios de diseño por la metodología racional o mecanicista.



## 4 CÁLCULO Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Después de capturar toda la información referente a las condiciones climáticas, niveles de tránsito, condiciones de resistencia del suelo de la subrasante y características de los materiales definidos para cada una de las capas, se diseña la estructura del pavimento del tramo de vía en estudio.

### 4.1 Método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles

En este método se consideran los siguientes parámetros y variables de diseño

#### 4.1.1 Restricciones de tiempo

Se desarrolla el diseño del pavimento para un periodo de diseño:  $N = 10$  años.

Tránsito:  $N'$  en 10 años = 1 128 242 Ejes de 8,2 ton cd/pd

#### 4.1.2 Nivel de confiabilidad, (R)

Por las características del proyecto, se considera un nivel de Confiabilidad del 85%.

#### 4.1.3 Desviación Normal Estándar, ( $Z_r$ )

Para un nivel de confiabilidad del 85%, se obtiene una desviación normal estándar de -1,037.

#### 4.1.4 Error normal combinado, $S_o$

Para un pavimento flexible nuevo, se toma un error normal combinado de 0.45.

#### 4.1.5 Efectos ambientales

Temperatura media anual ponderada del aire  $T_{MAP} = 14.3$  °C.

Precipitación media anual (mm) = 991

#### 4.1.6 Criterios de comportamiento

Serviciabilidad: Para encontrar el número estructural del pavimento en este método se tuvo en cuenta niveles de serviciabilidad recomendadas por la AASHTO-93.

Serviciabilidad Inicial  $P_o = 4,2$  (Pavimentos flexibles)

Serviciabilidad Final  $P_t = 2,0$  (Carreteras)

Delta PSI =  $P_o - P_t = 4,2 - 2,0 = 2,2$

#### 4.1.7 Propiedades de los materiales

- Módulo resiliente de subrasante:

Según el estudio geotécnico de suelos los CBR's de la subrasante son menores al 10%, por lo tanto  $M_r$  de la subrasante se determinan con las siguientes expresiones, las cuales son ingresadas según las unidades requeridas por la formula a emplear:

$$\begin{aligned} M_r &= 17.6 \times \text{CBR}^{0.64}(\%); && \text{en MPa.} \\ M_r &= 2555 \times \text{CBR}^{0.64}(\%); && \text{en lb/pulg}^2. \\ M_r &= M_r (\text{MPa}) \times 10; && \text{en Kg/cm}^2. \end{aligned}$$

Tabla 7. Módulos resilientes de la subrasante del tramo vial

|                                |          |
|--------------------------------|----------|
| Unidad de diseño               | 1        |
| Abscisa inicio                 | k0+000   |
| Abscisa fin                    | K0+096   |
| CBR (%)                        | 3.10     |
| $M_r$ (Kg/cm <sup>2</sup> )    | 363      |
| $M_r$ (lb(pulg <sup>2</sup> )) | 5271     |
| $M_r$ (N/m <sup>2</sup> )      | 3.63E+07 |
| $M_r$ (MPa)                    | 36.3     |
| K (Kg/cm <sup>3</sup> )        | 2.78     |
| K (lb/pulg <sup>3</sup> )      | 100.4    |
| K (MPa/m)                      | 27.8     |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.8 Coeficientes de capas

**Concreto Asfáltico:** Ante la falta de más datos para determinar el módulo de la carpeta asfáltica, y tomando la características climatológicas del área, para un clima frio seco con temperatura media anual ponderada del aire, TMAP de 13°C, el manual de diseño de pavimentos asfalticos para vías con medios y

altos volúmenes de tránsito del INVÍAS en la tabla 8.1 recomienda coeficientes estructurales entre 0.37-0.44, para este caso se toma una coeficiente estructural de 0.37, y usando la ecuación de la AASHTO-93 se despeja el módulo dinámico de esta capa, para su respectiva modelación:

$$a_1 = 0,0052E^{0.555}, E_1, \text{ MPa.}$$

$$\text{Con } a_1 = 0,37 \quad \text{entonces } E_1 = 2174 \text{ MPa} \approx 2170 \text{ MPa}$$

**Base Granular:** Según la especificación del INVÍAS para materiales de carreteras y con base en el nivel de tránsito determinado, el aporte estructural de esta capa se establece para un material con CBR  $\geq 80\%$  según el nivel de tránsito.

$$a_2 = 0,032 \text{ CBR}^{0.32}$$

$$a_2 = 0,13 \text{ para nivel de tránsito 2 con CBR} \geq 80\%$$

$$a_2 = 0,249 \log (E_{bg}) - 0,977, E_{bg} \text{ Módulo del material de base granular, lb/pulg}^2.$$

$$\text{Con } a_2 = 0,13 \quad \text{entonces } E_2 = 27911 \text{ lb/pulg}^2 = 192 \text{ MPa}$$

**Sub-base Granular:** Calculado para un material con CBR  $\geq 30\%$ , se obtiene el valor correspondiente del coeficiente estructural  $a_3$ .

$$a_3 = 0,058 \text{ CBR}^{0.19}$$

$$a_3 = 0,11 \text{ para nivel de tránsito 2 con CBR} \geq 30\%$$

$$a_3 = 0,227 \log (E_{sbg}) - 0,839, E_{sbg} \text{ Módulo del material de subbase granular, lb/pulg}^2.$$

$$\text{Con } a_3 = 0,11 \quad \text{entonces } E_3 = 15157 \text{ lb/pulg}^2 = 104 \text{ MPa}$$

#### 4.1.9 Características estructurales del pavimento

De acuerdo con la calidad del drenaje y el tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación, y con ayuda de la Tabla 8 se determina los valores de  $m_i$  para cada una de las capas de la estructura del pavimento.

Tabla 8. Valores de mi recomendados para modificar los coeficientes de las capas de base y Subbase granular

| Calidad de Drenaje | % de tiempo de exposición de la estructura del pavimento a nivel de humedad próximos a la saturación |             |             |      |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|------|
|                    | <1%                                                                                                  | 1 - 5%      | 5 - 25%     | >25% |
| Excelente          | 1,40 – 1,35                                                                                          | 1,35 – 1,30 | 1,30 – 1,20 | 1,20 |
| Buena              | 1,35 – 1,25                                                                                          | 1,25 – 1,15 | 1,15 – 1,00 | 1,00 |
| Aceptable          | 1,25 – 1,15                                                                                          | 1,15 – 1,05 | 1,00 – 0,80 | 0,80 |
| Pobre              | 1,15 – 1,05                                                                                          | 1,05 – 0,80 | 0,8 – 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. Washington D.C., 1993. p. II 25.

Para este informe, y según los niveles de tránsito, el consultor considera prudente, utilizar los valores de diseño para las diferentes capas de la estructura de pavimento, resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 9. Coeficientes de aporte estructural (ai), de drenaje (mi), módulos y relación de Poisson tomados

| Material           | ai   | mi   | E (MPa) | Relación de Poisson |
|--------------------|------|------|---------|---------------------|
| Concreto Asfáltico | 0.35 |      | 2170    | 0.35                |
| Base granular      | 0.13 | 1.00 | 192     | 0.40                |
| Subbase granular   | 0.11 | 0.80 | 104     | 0.40                |
| Subrasante         |      |      | 36.8    | 0.45                |

Fuente: Elaboración propia.

### Diseño de espesores

Número estructural del pavimento SN: se emplea la fórmula básica de la AASHTO como se observa a continuación:

Ecuación 1. Ecuación AASHTO pavimentos flexibles

$$\log(N_{8.2ton}) = Z_r \times S_o + 9.36 \times \log(SN_f + 1) - 0.20 + \left[ \frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4.2 - 1.5}\right)}{\left(0.40 + \left(\frac{1094}{(SN_f + 1)^{5.19}}\right)\right)} \right] - 2.32 \times \log(Mr) - 8.07$$

Dónde:

$N_{8.2\text{ton}}$  = Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño

$Z_r$  = Desviación normal estándar

$S_o$  = Error normal combinado de la previsión del tránsito y del comportamiento.

$\Delta$  IPS = Nivel de Serviciabilidad

$M_r$  = Módulo resiliente de la subrasante, en lb/pulg<sup>2</sup>

$S_{Nf}$  = Número estructural futuro, pulg<sup>2</sup>.

Para el análisis por el método de la AASHTO-93, se utiliza la interfaz para la solución del método, compilada por el Ing. MSc. Luis Ricardo Vásquez y presentadas en el anexo 2, a continuación se presenta el resumen de los SN requerido calculados.

Tabla 10. Resumen SN calculados pavimentos flexibles

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| Nivel de confianza, R                                 | 85%       |
| Desviación estándar. $S_o$                            | 0.45      |
| Nivel de serviciabilidad inicial, $P_o$               | 4.2       |
| Nivel de serviciabilidad final, $P_t$                 | 2.0       |
| Tránsito de diseño, Ejes Equivalentes a 8.2 ton cd/pd | 1 028 242 |
| CBR subrasante saturada, %                            | 3.10      |
| MR de diseño mejorado, Lb/pulg <sup>2</sup>           | 5271      |
| SN Requerido                                          | 3.63      |

Fuente: Elaboración propia.

Determinado el SN requerido del pavimento, con la expresión que relaciona el número estructural de cada capa como función de los coeficientes de aporte, drenaje y espesores<sup>5</sup>, mediante iteraciones a partir de los espesores mínimos establecidos por la metodología, se halla la configuración de la estructura de espesores convenientemente combinados, que aporten un numero estructural mayor o igual al solicitado por el tránsito.

$$SN = a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot h_2 + a_3 \cdot m_3 \cdot h_3 + a_4 \cdot m_4 \cdot h_4 + \dots + a_n \cdot m_n \cdot h_n.$$

$a_i$ : coeficientes de capa

<sup>5</sup>AASHTO guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II-22

$m_i$ : calidad del drenaje  
 $h_i$ : espesor de la capa

En el anexo 3 se presentan la combinación de espesores que satisfacen el criterio de diseño de la AASHTO-93 (SN tránsito  $\leq$  SN estructura), las cuales corresponden a la siguiente configuración estructural.

A continuación, se presentan el resumen de las alternativas propuestas por la metodología AASHTO - 93 para el proyecto, las cuales se proyectan para un periodo de diseño de 10 años.

Tabla 11. Resumen alternativas analizadas método AASHTO

|                   |      |      |         |      |
|-------------------|------|------|---------|------|
|                   | ai   | mi   | E (MPa) | μ    |
| Carpeta asfáltica | 0.37 | -    | 2170    | 0.35 |
| Base granular     | 0.13 | 1.0  | 192     | 0.40 |
| Subbase granular  | 0.11 | 0.80 | 104     | 0.40 |
| Subrasante        |      |      | 36.1    | 0.45 |

|                                                  |          |                                        |    |    |
|--------------------------------------------------|----------|----------------------------------------|----|----|
| Nivel de confianza, R                            | 85%      |                                        |    |    |
| Desviación estándar. So                          | 0.45     |                                        |    |    |
| Nivel de serviciabilidad inicial, P <sub>0</sub> | 4.2      |                                        |    |    |
| Nivel de serviciabilidad final, P <sub>t</sub>   | 2.0      |                                        |    |    |
| Tránsito de diseño, Ejes Equiv a 8.2 ton cd/pd   | 1028242  |                                        |    |    |
| CBR subrasante saturada, %                       | 3.10     |                                        |    |    |
| MR de diseño, MPa                                | 36.3     |                                        |    |    |
| ALTERNATIVA, e (cm)                              |          |                                        |    |    |
| SÍMBOLO                                          | CÓDIGO   | MATERIAL                               | 1  | 2  |
|                                                  | MDC - 19 | Mezcla Densa en Caliente<br>INV 450-22 | 8  | 9  |
|                                                  | BG - 38  | Base Granular<br>INV 330-22            | 15 | 20 |
|                                                  | SBG-50   | Sub Base Granular<br>INV 320-22        | 55 | 45 |
| Espesor de la estructura (cm)                    |          |                                        | 78 | 74 |
| Cumple criterio AASHTO                           |          |                                        | SI | SI |

Notas:

- 1- Espesores en cm.
- 2- En negrita estructura recomendada

RESUMEN VALORES DE DISEÑO  
AASHTO

|              |                |
|--------------|----------------|
| SN Requerido | 3.63           |
| SN Aportado  | 3.84      3.89 |

Fuente: Elaboración propia

## 4.2 PLANTEAMIENTO DE LA REDUCCIÓN DE ESPESORES GRANULARES MEDIANTE EL REFUERZO DE LA ESTRUCTURA CON GEOMALLA BIAxIAL COEXTRUIDA

Teniendo en cuenta los espesores obtenidos y que pueden llegar a reducirse mediante la implementación de geosintéticos, se procede a evaluar la disminución de espesores de la estructura de pavimento mediante la inclusión de una geomalla biaxial con esfuerzo a la tensión bidireccional de 30 KN/m (Denominada actualmente P-BX 30-30), con el objetivo de lograr 4 beneficios principales:

1. Restricción del desplazamiento lateral de los agregados de la base a subbase.
2. Aumento del confinamiento y de la resistencia de la base a subbase en la vecindad del refuerzo.
3. Mejoramiento en la distribución de esfuerzos sobre la subrasante.
4. Reducción del esfuerzo y deformación por corte sobre la subrasante.

La contribución estructural de una geomalla PAVCO o similar en un sistema de pavimento flexible puede cuantificarse con el incremento al esfuerzo del coeficiente de la capa de la base de la vía. Por lo tanto, el cálculo del nuevo número estructural se convierte en:

$$SN = a_1 * h_1 + a_2 * LCR * h_{2r} * m_2 + a_3 * h_{3r} * m_3$$

La onvinación de espesores de la estructura de pavimento convencional se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 12. Espesores de las capas de la estructura de pavimento convencional

| Capa               | Coeficiente estructural, $a_i$ | Espesor, $h_i$ (pulg) | Espesor, $h_i$ (cm) | Coeficiente de drenaje, $m_i$ | SN $a_i * h_i * m_i$ |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------|
| Concreto Asfáltico | 0.37                           | 3.54                  | 9.00                | 0.00                          | 1.31                 |
| Base granular      | 0.13                           | 7.87                  | 20.00               | 1.00                          | 1.02                 |
| Subbase granular   | 0.11                           | 17.72                 | 45.00               | 0.80                          | 1.56                 |

|             |      |   |               |      |
|-------------|------|---|---------------|------|
| SN tránsito | 3.63 | ≤ | SN estructura | 3.89 |
|-------------|------|---|---------------|------|

Cumple la condición

Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente se calcula el número estructural de la estructura de pavimento convencional a una donde se contemple tan solo material de subbase granular ajustandose el número estructural de la estructura de pavimento convencional, por lo tanto:

Tabla 13. Espesores de las capas de la estructura de pavimento sustituyendo la subbase granular

| Capa               | Coeficiente estructural, $a_i$ | Espesor, $h_i$ (pulg) | Espesor, $h_i$ (cm) | Coeficiente de drenaje, $m_i$ | SN $a_i \cdot h_i \cdot m_i$ |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Concreto Asfáltico | 0.37                           | 3.54                  | 9                   |                               | 1.31                         |
| Base granular      | 0.13                           | 0.00                  | 0                   | 1.00                          | 0.00                         |
| Subbase granular   | 0.11                           | 29.37                 | 74.6                | 0.80                          | 2.58                         |

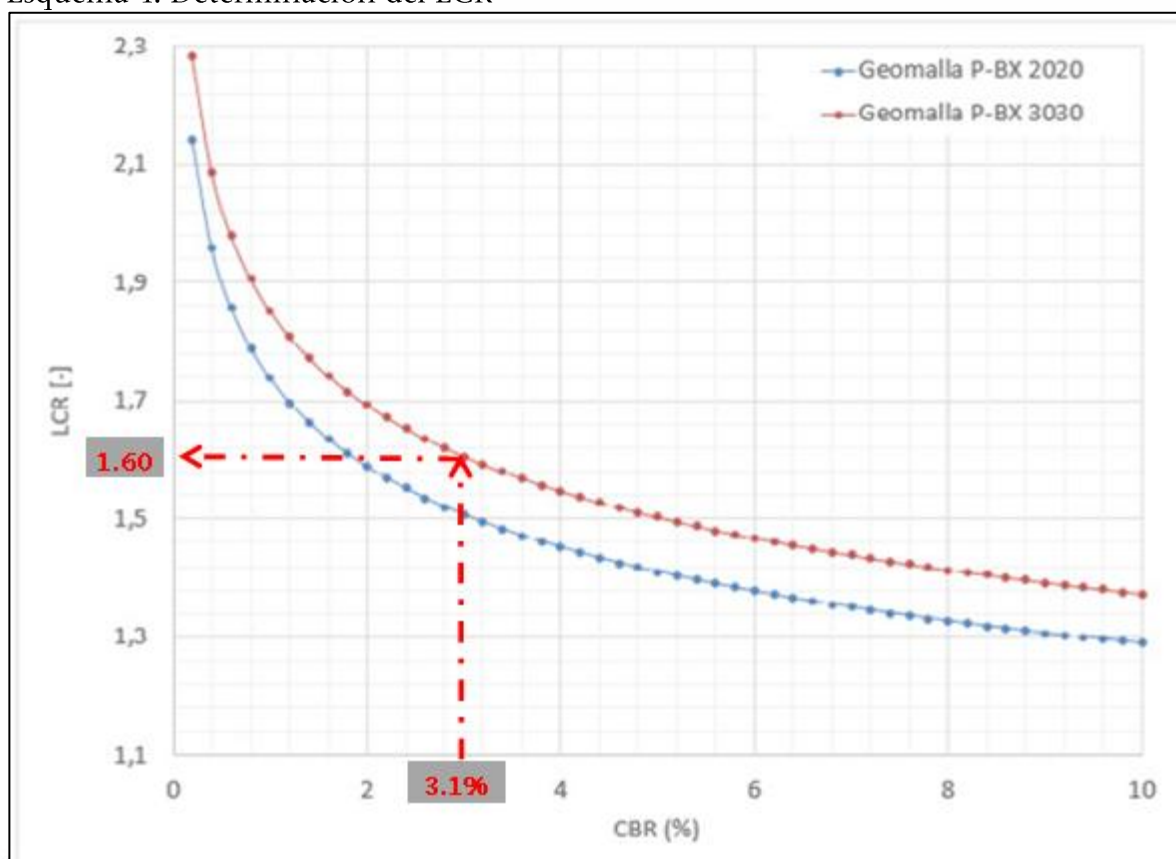
|             |      |   |               |      |
|-------------|------|---|---------------|------|
| SN tránsito | 3.63 | ≤ | SN estructura | 3.90 |
|-------------|------|---|---------------|------|

Cumple la condición

Fuente: Elaboración propia.

Empleando una geomalla Tipo P-BX 30-30 con esfuerzo a la tensión bidireccional de 30 KN/m, para una subrasante de CBR = 3.1%, del Esquema 4 el valor de LCR o valor de aporte de la geomalla a la capa granular de la estructura de 1.60, la cual se traduce en disminución de los espesores granulares que conforman la estructura de pavimento reforzado, además del incremento de la calidad del material donde se proyecta instalar, tal es el caso de un incremento del modulo de elasticidad en 1.60 a un radio de afectación del material granular estimado de 30 cm (15 cm superiores e inferiores de la profundidad de instalación de la geomalla).

Esquema 4. Determinación del LCR



Fuente: Figura 6.8 - Manual de diseño con geosintéticos PAVCO versión 10.

Para incluir el aporte de la geomalla dentro de la estructura de pavimento y obtener una disminución de espesor, se debe mantener constante a través de los cálculos realizados el valor inicial del número estructural.

$$\begin{aligned} \boxed{\text{SNr}} &= \boxed{\text{SN}} \\ \boxed{\text{SNr}} &= \boxed{a_1 * h_1 + a_3 * \text{LCR} * h_{3r} * m_3} \end{aligned}$$

Una vez hallado el nuevo espesor de la capa granular, por la utilización de la geomalla, se calcula el número estructural de la misma.

$$\boxed{\text{SN}_{\text{GR}}} = \boxed{a_3 * h_{3r} * m_3}$$

Como la estructura seguirá manteniendo la misma conformación de materiales de base y subbase, se deben calcular los nuevos espesores de dichas capas en función del número estructural de la capa de subbase obtenido en el paso anterior y con sus coeficientes de capa respectivos.

$$SN_{GR} = a_2 * h_{2r} * m_2 + a_3 * h_{3r} * m_3$$

Debido a que se tienen dos incógnitas y una sola ecuación, se debe realizar un proceso de iteración para obtener unos espesores de capa razonables para la estructura. Para el espesor de la base granular no se recomienda que este valor se encuentre por debajo de los 20 cm o 8 pulgadas. Para la solución del problema, se deja constante el espesor de la base granular de la estructura inicial que cumple con todos los criterios de diseño y se despeja de la ecuación el espesor de la subbase granular.

$$SN_{GR} = a_2 * h_{2r} * m_2 + a_3 * h_{3r} * m_3$$

Para que la estructura sea constructivamente viable, los espesores calculados por lo general son modificados para facilitar su proceso constructivo. Es por eso que se debe verificar que la variación de estos no altere el desempeño de la estructura, por lo que el número estructural de las capas granulares con respecto al paso anterior, debe ser en lo posible iguales.

Finalmente la reducción total de la estructura de pavimento mediante la inclusión de la geomalla Biaxial es de 28 cm, no obstante, por confiabilidad de los materiales, procesos constructivos y criterio ingenieril, se limita la reducción efectiva a 20 cm.

Tabla 14. Comparación reducción de espesores mediante la inclusión de la geomalla biaxial

| Capa                    | Espesores iniciales (cm) | Espesores finales mediante la inclusión de la geomalla biaxial (cm) |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Concreto Asfáltico      | 9                        | 9                                                                   |
| Base granular           | 20                       | 20                                                                  |
| Subbase granular        | 45                       | 17                                                                  |
| Altura total (cm)       | 74                       | 46                                                                  |
| Reducción (cm)          | 28                       |                                                                     |
| Reducción adoptada (cm) | 20                       |                                                                     |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen los criterios de diseño generales que debe cumplir la estructura de pavimento, con la correspondiente modelación de la estructura usando el software BISAR 3.0 de la Shell.

### 4.3 Análisis elástico multicapa

Con el fin de verificar los espesores de las capas de la estructura a diseñar, a continuación, se realiza un análisis elástico multicapa, utilizando el programa desarrollado por la SHELL (BISAR 3.0), programa que calcula los esfuerzos y deformaciones máximas que una rueda doble colocada en la superficie produce en los niveles de interface de un sistema elástico multicapa, constituido por cada una de las capas, caracterizadas por el espesor, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Se debe verificar: **Valor de servicio < Valor admisible**

#### 4.3.1 Cargas aplicadas

Eje Estándar: 80 kN (8.2t) de peso total, 40kN (4.1t) por extremo del eje, 2 llantas en cada extremo.

Radio de Carga = 10,8 cm

Separación entre Llantas = 32,4cm

Presión de Contacto = 5,6 kg/cm<sup>2</sup>

#### 4.3.2 Criterios de diseños de estructuras de pavimentos flexibles – valores admisibles

A continuación, se presentan los criterios de verificación utilizados para el diseño de las estructuras de pavimento.

##### 4.3.2.1 Deformación radial admisible de tracción en la base de la capa asfáltica er adm criterio de la Shell

De acuerdo con el criterio de la Shell la ley de comportamiento de la deformación radial de tracción en la base de la capa asfáltica es la siguiente:

$$\epsilon_{\text{radm}} = (0,856Vb + 1,08)E_1^{-0,36}(N/K)^{-0,20}$$

Donde:

$$Vb_1 = 11,0\%$$

$$E_1 = 2,00 \times 10^9 \text{ N/m}^2 \quad \text{Módulo concreto asfáltico}$$

$$N_{\text{dis}} = \text{Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.}$$

$$K_1 = 10,0$$

4.3.2.2 Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante  $\epsilon Z_{\text{adm}}$  criterio de la Shell

El criterio de la Shell o ley de comportamiento de la deformación vertical admisible de compresión sobre la subrasante está en función de la confiabilidad:

$$\epsilon Z_{\text{adm}} = 2,1 \text{ E-02} * N^{-0,25} \text{ (85\% de confiabilidad)}$$

$$N_{\text{dis}} = \text{Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.}$$

4.3.2.3 Esfuerzo vertical de compresión admisible sobre la subrasante,  $\sigma z_{\text{adm}}$ .

El esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante se determina de acuerdo a los criterios de Dormon – Kerhoven y la CRR de Bélgica, los cuales son los siguientes:

- Criterio de Dormon – Kerhoven.

$$\sigma z_{\text{adm}} = (0,007E_{\text{sub}}/1 + 0,7 * \text{Log } N); \text{ Kg/cm}^2$$

Donde:

Ndis= Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.

E<sub>sub</sub> = Módulo de elasticidad de la subrasante; Kg/cm<sup>2</sup>

- Criterio de la CRR de Bélgica

$$\sigma Z_{adm} = ((0,9607 \text{ CBR}^{1,2}) / (N^{0,229})) ; \text{ Kg/cm}^2$$

Dónde:

Ndis= Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.

CBR= Valore del CBR de diseño de la subrasante; %

#### 4.3.2.4 Deflexión admisible del modelo estructural

Para la determinación de la deflexión admisible se utilizó el criterio de Yang H. Huang.

$$\Delta_{adm} = 26,32202 \text{ N}^{-0.2438}; \text{ mm}$$

Dónde:

Ndis= Tránsito de diseño expresado en Ejes de 8,2 ton cd/pd.

$\Delta_{adm}$ = Deflexión admisible del modelo estructural

En el anexo 5 se muestran las tablas resumen de comparación de valores de servicio versus los valores admisibles, y en el anexo 4 se presentan los reportes de las modelaciones de la estructura de pavimento, modelados mediante el programa BISAR 3.0 de la Shell.

## 5 DISEÑO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO RÍGIDO

Después de capturar toda la información referente a las condiciones climáticas, niveles de tránsito, condiciones de resistencia del suelo de la subrasante y características de los materiales definidos para cada una de las capas, se diseña la alternativa de estructura del pavimento rígido de la vía en estudio.

### 5.1 Método AASHTO para diseño de pavimentos rígidos

La metodología AASHTO considera la vida útil de un pavimento relacionada con el número de repeticiones de carga que podrá soportar el pavimento antes de llegar a las condiciones de servicio final predeterminadas para el pavimento. El método AASHTO utiliza en su formulación el número de repeticiones esperadas de carga de Ejes Equivalentes, es decir, transforma los Ejes de Pesos Normales de los vehículos que circularán por la vía, en Ejes Sencillos Equivalentes de 18 kips (8.2 Ton) también conocidos como ESAL's.

En este método y diseño de estructura de pavimento, se consideran los siguientes parámetros:

#### 5.1.1 Parámetros de diseño

##### 5.1.1.1 Periodo de diseño, (n)

Se desarrolla el diseño del pavimento para un Periodo de diseño:  $N = 20$  años.

##### 5.1.1.2 Tránsito de diseño, (Ndis)

2 279 395 ejes equivalentes a 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el periodo de diseño

##### 5.1.1.3 Nivel de confiabilidad, (R)

Por las características del proyecto, se considera un nivel de Confiabilidad del 85%.

##### 5.1.1.4 Desviación Normal Estándar, ( $Z_r$ )

Para un nivel de confiabilidad del 85%, se obtiene una desviación normal estándar de -1,037.

#### 5.1.1.5 Error normal combinado, (So)

Para un pavimento rígido nuevo, se toma un error normal combinado de 0.35.

#### 5.1.1.6 Nivel de Serviciabilidad inicial, (Po)

Se parte de un valor inicial de 4.5.

#### 5.1.1.7 Nivel de Serviciabilidad final, (Pt)

El valor donde ocurre la falla de 2.0.

#### 5.1.1.8 Diferencia en el nivel de Serviciabilidad, ( $\Delta IPS$ )

Serviciabilidad inicial  $P_0 = 4,5$  y una Serviciabilidad final  $P_t = 2,0$ , obteniéndose una diferencia del nivel de Serviciabilidad  $\Delta IPS = 4,5 - 2,0 = 2,5$

#### 5.1.1.9 Resistencia de la subrasante, (Mr, K)

##### Módulo resiliente de la subrasante, (Mr)

Para una capacidad de soporte expresada en términos de CBR y de acuerdo con la ecuación recomendada por la AASHTO para materiales se tiene:

$$Mr \text{ [lb/pulg}^2\text{]} = 2555 * CBR^{0.64} (\%)$$

##### Módulo de reacción de la subrasante, (K)

$$K \text{ [kg/cm}^3\text{]} = 0,25 + 5,15 * \text{Log}(\text{CBR } \%)$$

$$K \text{ [pci]} = 36,05 \text{ k[kg/cm}^3\text{]}$$

Tabla 15. Características de resistencia de la subrasante para el diseño de pavimento

|                             |          |
|-----------------------------|----------|
| Unidad de diseño            | 1        |
| Abscisa inicio              | k0+000   |
| Abscisa fin                 | K0+096   |
| CBR (%)                     | 3.10     |
| Mr (Kg/cm <sup>2</sup> )    | 363      |
| Mr (lb(pulg <sup>2</sup> )) | 5271     |
| Mr (N/m <sup>2</sup> )      | 3.63E+07 |
| Mr (MPa)                    | 36.3     |
| K (Kg/cm <sup>3</sup> )     | 2.78     |
| K (lb/pulg <sup>3</sup> )   | 100.4    |
| K (MPa/m)                   | 27.8     |

Fuente: Elaboración propia

#### 5.1.1.10 Características del concreto, ( $S_c$ , $E_c$ )

Son dos las propiedades del concreto que influyen en el diseño de un pavimento de concreto y en su comportamiento a lo largo de su vida útil:

##### Módulo de ruptura del concreto $M_r$ ( $S_c$ , resistencia a la flexión)

$$S_c = 0.8 (f'c)^{0.5} : \text{resistencia a la compresión del concreto (MPa)}$$

Debido al tipo de nivel de tránsito (NT-2), se plantea módulo de rotura mínimo de 4.0 MPa (582.9 lb/pulg<sup>2</sup>)

$$4.0 \text{ MPa} = 0.8 * (f'c)^{0.5}$$

$$f'c = (4.0/0.8)^2$$

$$f'c = 25.0 \text{ MPa}, 255 \text{ Kg/cm}^2, 3643 \text{ lb/pulg}^2.$$

Módulo de elasticidad del concreto: como no se conoce el tipo de materiales a emplear en la mezcla, se emplea la siguiente ecuación:

$$E_c = 12500(f'c)^{0.5} \text{ resistencia a la compresión del concreto (kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 199\,613 \text{ kg/cm}^2, 2\,851\,613 \text{ lb/pulg}^2$$

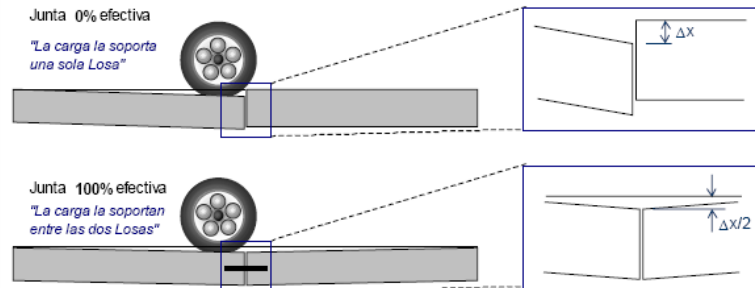
#### 5.1.1.11 Transferencia de cargas, ( $J$ )

Se adopta un valor de 2.8, para losas en concreto simple con mecanismos de transferencia de carga y bermas de concreto.

La transferencia de carga es la capacidad que tiene una losa del pavimento de transmitir fuerzas cortantes con sus losas adyacentes con el objeto de minimizar las deformaciones y los esfuerzos en la estructura del pavimento, mientras mejor sea la transferencia de cargas mejor será el comportamiento de las losas del pavimento. En este caso se proyecta la transferencia de carga por barras de transferencia de carga o dovelas.

El Coeficiente de transferencia de carga considera el esfuerzo de transferencia a través de la junta o grieta.

Esquema 5. Efecto del mecanismo de transferencia de carga.



#### 5.1.1.12 Características de la subbase granular

Se deberá instalar una subbase granular con CBR  $\geq 30\%$  compactada al 95% de su peso seco volumétrico máximo. Teniendo en cuenta el niveles de tránsito "NT-2", el valor mínimo de CBR exigido para el material de subbase granular es del 30%, el cual según la AASHTO tiene un módulo de elasticidad de 15.157 lb/pulg<sup>2</sup>, 1.061 Kg/cm<sup>2</sup> o 104 MPa.

#### 5.1.1.13 Factor de pérdida de soporte, (Ls)

Con el tipo de material de subbase granular se tiene un valor de  $L_s = 1.5$ .

#### 5.1.1.14 Módulo de reacción del Conjunto ( $K_{ef}$ )

Utilizando el programa ASMODO desarrollado por el Ing. Giovanni Edgar Rincón Ochoa, programa que a partir del módulo Resiliente de la subrasante, módulo de reacción de la subrasante, espesor de la subbase granular, módulo dinámico de la subbase granular, espesor estimado de la losa de concreto, pérdida de soporte, se obtiene el módulo de reacción efectivo conjunto estructural subbase granular subrasante, se supone un espesor de la losa de 9 pulg. El espesor de la subbase granular se estima de 15 cm.

Tabla 16. Valores iniciales y de diseño.

|                                     |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| Módulo de rotura del concreto, $Sc$ |                      |
| $Sc$ ( $f'_c$ en MPa)               | $0.8 (f'_c)^{0.5}$   |
| $f'_c$ (Kg/cm <sup>2</sup> )        | 255                  |
| $Sc$ (Kg/cm <sup>2</sup> )          | 40.8                 |
| $Sc$ (lb/pulg <sup>2</sup> )        | 582.9                |
| $Sc$ (MPa)                          | 4.0                  |
| Módulo de elasticidad del concreto  |                      |
| $Ec$                                | $12500 (f'_c)^{0.5}$ |
| $Ec$ (Kg/cm <sup>2</sup> )          | 199613               |
| $Ec$ (lb/pulg <sup>2</sup> )        | 2851613              |
| $Ec$ (MPa)                          | 19570                |
| CBR Subbase granular (%)            | 30                   |
| $E_{sbg}$ (kg/cm <sup>2</sup> )     | 1061                 |
| $E_{sbg}$ (lb/pulg <sup>2</sup> )   | 15157                |
| $E_{sbg}$ (MPa)                     | 104.0                |
| CBR Subrasante (%)                  | 3.1                  |
| $Mr$ (kg/cm <sup>2</sup> )          | 363                  |
| $Mr$ (lb/pulg <sup>2</sup> )        | 5271                 |
| $Mr$ (MPa)                          | 36.3                 |
| $K$ (Kg/cm <sup>3</sup> )           | 2.8                  |
| $K$ (lb/pulg <sup>3</sup> )         | 100.4                |
| $K$ (MPa/m)                         | 27.8                 |

Fuente: El estudio

Se procede a calcular el módulo de reacción efectivo de la subrasante ( $k_{ef}$ ) de acuerdo al espesor asumido de subbase, módulo de reacción de la subrasante, espesor estimado de la losa de concreto, y el factor de pérdida de soporte, obteniendo en  $K_{ef}$  de 35.7 lb/pulg<sup>3</sup>. Ver anexo 6.

#### 5.1.1.15 Coeficiente de drenaje, $C_d$

De acuerdo con la Tabla 17 y a las condiciones climáticas de la zona del proyecto, se adopta la calidad de drenaje para la subbase granular en este caso como pobre, para el cual el coeficiente de drenaje,  $C_d = 0,8$

Tabla 17. Valores del coeficiente de drenaje, Cd

| Calidad de Drenaje | Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próxima a la saturación |             |             |             |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
|                    | Menos del 1%                                                                                                   | 1 - 5%      | 5 - 25%     | Más del 25% |
| Excelente          | 1.25 - 1.20                                                                                                    | 1.20 - 1.15 | 1.15 - 1.10 | 1.10        |
| Buena              | 1.20 - 1.15                                                                                                    | 1.25 - 1.10 | 1.10 - 1.00 | 1.00        |
| Aceptable          | 1.15 - 1.10                                                                                                    | 1.10 - 1.00 | 1.00 - 0.90 | 0.90        |
| Pobre              | 1.10 - 1.00                                                                                                    | 1.00 - 0.90 | 0.90 - 0.80 | 0.80        |
| Muy pobre          | 1.00 - 0.90                                                                                                    | 0.90 - 0.80 | 0.80 - 0.70 | 0.70        |

Fuente: AASHTO, Guide for design of pavement structures, Washington D.C., 1993. P. II-26.

#### 5.1.1.16 Espesor de la losa de concreto

Reemplazando las variables de los numerales anteriores en la ecuación básica de diseño (Ecuación 2), se obtiene un espesor de la losa de concreto el cual se toma teniendo en cuenta el tránsito de diseño, las características del concreto, y los coeficientes de drenaje, entre otros.

Ecuación 2. Ecuación AASHTO pavimentos rígidos

$$\log(N) = Z_r \times S_o + 7.35 \times \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log\left[\frac{\Delta IPS}{4.5 - 1.5}\right]}{1 + \frac{1.624 \times 10^{-7}}{(D + 1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \times \log\left[\frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{k}\right)^{0.25}}\right]}\right]$$

Donde:

- N:** Número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño durante el período de diseño.
- Z<sub>r</sub>:** Desviación normal estándar.
- S<sub>o</sub>:** Error normal combinado de la previsión del tránsito y del comportamiento.
- ΔIPS:** Diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial P<sub>o</sub> y final P<sub>t</sub>.
- P<sub>t</sub>:** Serviciabilidad final.
- S<sub>c</sub>:** Módulo de rotura del concreto a la flexo tracción a los 28 días, lb/pulg<sup>2</sup>.
- E<sub>c</sub>:** Módulo de elasticidad del concreto, lb/pulg<sup>2</sup>.
- C<sub>d</sub>:** Coeficiente de drenaje.
- J:** Coeficiente de transmisión de carga en las juntas.
- k:** Módulo de reacción del conjunto sobre la cual se apoya la losa de concreto, lb/pulg<sup>3</sup>.
- D:** Espesor de la losa de concreto, pulgadas.

Para el análisis por el método de la AASHTO-93, se utiliza la interfaz para la solución del método, compilada por el Ing. MSc. Luis Ricardo Vásquez, en el anexo 7, se presenta el cálculo del SN requerido.

Tabla 18. Resumen SN calculados pavimentos rígidos

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Nivel de confianza, R                                                    | 85%       |
| Desviación estándar. So                                                  | 0.35      |
| Nivel de serviciabilidad inicial, P <sub>o</sub>                         | 4.5       |
| Nivel de serviciabilidad final, P <sub>t</sub>                           | 2         |
| Tránsito de diseño, Ejes Equiv a 8.2 ton cd/pd                           | 2 279 395 |
| Módulo de elasticidad del concreto E <sub>c</sub> , Lb/pulg <sup>2</sup> | 2 851 613 |
| Módulo de rotura del concreto S <sub>c</sub> , Lb/pulg <sup>2</sup>      | 582.9     |
| Coeficiente de transferencia de carga, J                                 | 2.8       |
| Coeficiente de drenaje, Cd                                               | 0.8       |
| K efectivo                                                               | 35.7      |
| Espesor de la losa D, pulg                                               | 8.8       |
| Espesor de la losa D, cm                                                 | 22.3      |
| Espesor de la losa recomendado D, cm                                     | 23        |

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra el resumen de los espesores de los espesores obtenidos por la metodología de diseño de pavimentos por la metodología AASHTO.

Tabla 19. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.

| SÍMBOLO | CÓDIGO           | MATERIAL                                         | Espesor<br>cm |
|---------|------------------|--------------------------------------------------|---------------|
|         | Losa de concreto | Concreto hidráulico<br>MR 4.0 MPa<br>INV 500-22  | 23            |
|         | SBG-50           | Sub Base Granular SBG-50<br>INV 320-22 CBR > 30% | 15            |

Fuente: El estudio

## 5.2 Cálculo de esfuerzos y deflexiones de la losa

Para el diseño de la losa de concreto, se calculan los esfuerzos y las deflexiones en el borde, en el interior y en la esquina de la losa, utilizando las expresiones utilizadas para el chequeo de los esfuerzos y deflexiones expuestas en la mecánica de pavimentos rígidos, los cuales se relacionan a continuación, y tomando como carga de análisis la correspondiente al eje de camión rígido tipo C2G de 11 toneladas en el simple y como carga aplicada sobre la losa la

correspondiente a 5,5 toneladas, con un radio de carga de 17,68 cm, y una presión de contacto de 5,6 kg/cm<sup>2</sup>.

## 5.2.1 Formulación para el chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa

### 5.2.1.1 Esfuerzos debidos a las cargas del tránsito

- Esfuerzo de tensión en la esquina de la losa,  $\sigma_e$

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left( 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right)$$

Donde:

$\sigma_e$  = Esfuerzo de tensión en la esquina de la losa, Lb/pulg<sup>2</sup>

h = Espesor de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

$$I = \left[ \frac{E h^3}{12 (1 - \mu^2) k} \right]^{0.25}$$

Donde:

l = Radio de rigidez relativa en pulgadas.

E= Módulo de elasticidad del concreto en libras/pulg<sup>2</sup>.

h= Espesor de la losa en pulgadas.

$\mu$ = Relación de Poisson del concreto.

k= Módulo de reacción de la subrasante en libras/pulg<sup>3</sup>.

- Esfuerzo de tensión en el interior de la losa,  $\sigma_i$

$$\sigma_i = 0.316 \frac{P}{h^2} \left[ 4x \log \left( \frac{l}{b} \right) + 1.069 \right]$$

Donde:

$\sigma_i$  = Esfuerzo de tensión en el interior de la losa, Lb/pulg<sup>2</sup>

P = Carga aplicada, Lb

h = Espesor de la losa, pulg

l = Radio de rigidez relativa, pulg

$$b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h \quad \text{Si } a < 1.724h$$

$$b = a \quad \text{Si } a \geq 1.724h$$

a = Radio del área cargada, pulg

- Esfuerzo de tensión en el borde de la losa,  $\sigma_b$

$$\sigma_b = 0.572 \frac{P}{h^2} \left[ 4 \log \left( \frac{l}{b} \right) + 0.359 \right]$$

Donde:

$\sigma_b$  = Esfuerzo de tensión en el borde de la losa, Lb/pulg<sup>2</sup>

P = Carga aplicada, Lb

h = Espesor de la losa, pulg

l = Radio de rigidez relativa, pulg

$$b = (1.6a^2 + h^2)^{1/2} - 0.675h$$

Si  $a < 1.724h$

$$b = a \quad \text{Si } a \geq 1.724h$$

a = Radio del área cargada, pulg

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

#### 5.2.1.2 Deflexiones en pavimentos rígidos por acción del tránsito

- Deflexiones en esquina de la losa.  $\Delta_e$

$$\Delta_e = \frac{P}{kl^2} \left[ 1.1 - 0.88 \left( \frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right]$$

Donde:

$\Delta_e$  = Deflexión en la esquina de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

k = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg<sup>3</sup>

- Deflexión en el borde de la losa,  $\Delta_b$

$$\Delta_b = \frac{0.413P}{kl^2} \left[ 1 - 0.82 \left( \frac{a}{l} \right) \right]$$

Donde:

$\Delta_b$  = Deflexión en el borde de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

k = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg<sup>3</sup>

- Deflexión en el interior de la losa,  $\Delta_i$

$$\Delta_i = \frac{P}{8Kl^2} \left[ 1 + \frac{1}{2\pi} \left( Ln \left( \frac{a}{2l} \right) - 0.673 \right) \left( \frac{a}{l} \right)^2 \right]$$

Donde:

$\Delta_i$  = Deflexión en el interior de la losa, pulg

P = Carga aplicada, Lb

l = Radio de rigidez relativa, pulg

a = Radio del área cargada, pulg

k = Módulo de reacción de la subrasante, lb/pulg<sup>3</sup>

## 5.2.2 Chequeo de los esfuerzos y deflexiones de la losa

### 5.2.2.1 Chequeo de esfuerzos en la losa de concreto

El resumen del cálculo de los esfuerzos de tensión en la losa de concreto, se presenta en el anexo 8 y de la información contenida en este se aprecia que los esfuerzos actuantes de tensión en la losa son menores al esfuerzo a la flexotracción del concreto de las alternativas analizadas por la AASHTO, por lo tanto, la losa está bien diseñada.

Los resultados permiten apreciar que el punto más débil de la losa es el borde por la magnitud de la de los esfuerzos actuantes lo cual se puede traducir en fracturas si los esfuerzos actuantes son mayores a los admisibles.

### 5.2.2.2 Chequeo de deflexiones en la losa de concreto

El resumen del cálculo de las deflexiones en la losa de concreto, se presenta en el anexo 9. Y los resultados permiten apreciar que el punto más débil de la losa son las esquinas por las magnitudes de la deflexión, lo cual se puede traducir en fracturas si los esfuerzos actuantes son mayores a los admisibles. Se debe verificar mediante ensayos de módulo de rotura de vigas prismáticas la deflexión máxima permitida por el concreto que se use en obra, en todo caso, se espera que las deflexiones en estos puntos sean asumidas por las barras de transferencia de carga de las losas, (ver Esquema 5).

## 5.3 Dimensiones de la losa y elementos de transferencia de carga

### 5.3.1 Dimensiones de la losa

Para el dimensionamiento de la losa de concreto, se tiene dos criterios importantes los cuales son:

- Criterio del Espesor:  
 $L=25 D$
- Criterio de la AASHTO:  
 $L=1.25 A$

Aplicando los criterios descritos anteriormente, se obtienen las siguientes dimensiones máximas de la losa.

Tabla 20. Dimensiones máximas de la losa.

|                                                               |             |
|---------------------------------------------------------------|-------------|
| Espesor de la losa, e, (m)                                    | <b>0.23</b> |
| Longitud de la losa (m),                                      | 5.75        |
| Criterio 1, $L=25 \cdot e$                                    |             |
| Ancho de la losa                                              | 4.6         |
| ( $A=L/1.25$ )                                                |             |
| Longitud máxima según AASHTO - 93, (m)                        | 4.5         |
| Ancho máximo según longitud máxima según AASHTO-93, (m)       | 3.6         |
| Ancho de la losa según ancho de calzada típico, (m)           | <b>3.0</b>  |
| Longitud máxima de la losa según ancho de calzada típico, (m) | <b>3.75</b> |

Fuente: El estudio.

Para anchos de calzada diferentes a 6.0m, se recomienda implementar las siguientes dimensiones de losa según el ancho de la calzada.

Tabla 21. Dimensiones de la losa según ancho de la calzada.

|                                    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ancho de calzada, (C), m           | 5.0 | 5.2 | 5.4 | 5.6 | 5.8 | 6.0 | 6.2 | 6.4 | 6.6 | 6.8 | 7.0 | 7.2 |
| Ancho de carril, (A=C/2), m        | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 |
| Longitud de la losa, (L=1.25*A), m | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.5 |

Fuente: El estudio.

**Cálculo de los pasadores:** para losas de 23 cm de espesor, entrando con este valor se tiene:

Tabla 22. Requisitos mínimos para las dovelas en las juntas.

| ESPESOR DE LA LOSA,<br>(mm) | DIÁMETRO DEL PASADOR |          | LONGITUD TOTAL, (mm) | SEPARACIÓN ENTRE CENTROS, (mm) |
|-----------------------------|----------------------|----------|----------------------|--------------------------------|
|                             | mm                   | pulgadas |                      |                                |
| 0 – 100                     | 13                   | ½        | 250                  | 300                            |
| 110 – 130                   | 16                   | 5/8      | 300                  | 300                            |
| 140 – 150                   | 19                   | ¾        | 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 ¼      | 450                  | 300                            |
| 260 – 280                   | 35                   | 1 3/8    | 450                  | 300                            |
| 290 – 300                   | 38                   | 1 ½      | 500                  | 300                            |

Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE – ICPC. Manual de diseño de pavimento de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá D.C.

- Diámetro del pasador liso = 1 1/8 pulg
- Longitud del pasador = 400 mm
- Separación entre centros = 300 mm

**Cálculo de las barras de anclaje:** para losas de 23 cm de espesor, entrando a la siguiente tabla tenemos:

Tabla 23. Recomendación para las barras de anclaje

| ESPESOR<br>DE LA<br>LOSA, cm                              | BARRAS DE $\phi$ 9.5 mm (3/8") |                            |                     |                     | BARRAS DE $\phi$ 12.7 mm (1/2") |                            |                     |                     | BARRAS DE $\phi$ 15.9 mm (5/8") |                            |                     |                     |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|
|                                                           | Longitud,<br>mm                | Separación entre barras, m |                     |                     | Longitud,<br>mm                 | Separación entre barras, m |                     |                     | Longitud,<br>mm                 | Separación entre barras, m |                     |                     |
|                                                           |                                | Carril de<br>3.05 m        | Carril de<br>3.35 m | Carril de<br>3.65 m |                                 | Carril de<br>3.05 m        | Carril de<br>3.35 m | Carril de<br>3.65 m |                                 | Carril de<br>3.05 m        | Carril de<br>3.35 m | Carril de<br>3.65 m |
| Acero de $f_y = 187.5$ MPa (40,000 lb/pulg <sup>2</sup> ) |                                |                            |                     |                     |                                 |                            |                     |                     |                                 |                            |                     |                     |
| 15.0                                                      | 450                            | 0.80                       | 0.75                | 0.65                | 600                             | 1.20                       | 1.20                | 1.20                | 700                             | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 17.5                                                      |                                | 0.70                       | 0.60                | 0.55                |                                 | 1.20                       | 1.10                | 1.00                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 20.0                                                      |                                | 0.60                       | 0.55                | 0.50                |                                 | 1.05                       | 1.00                | 0.90                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 22.5                                                      |                                | 0.55                       | 0.50                | 0.45                |                                 | 0.95                       | 0.85                | 0.80                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 25.0                                                      |                                | 0.45                       | 0.45                | 0.40                |                                 | 0.85                       | 0.80                | 0.70                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.10                |
| Acero de $f_y = 280$ MPa (60,000 lb/pulg <sup>2</sup> )   |                                |                            |                     |                     |                                 |                            |                     |                     |                                 |                            |                     |                     |
| 15.0                                                      | 650                            | 1.20                       | 1.10                | 1.00                | 850                             | 1.20                       | 1.20                | 1.20                | 1000                            | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 17.5                                                      |                                | 1.05                       | 0.95                | 0.85                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 20.0                                                      |                                | 0.90                       | 0.80                | 0.75                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 22.5                                                      |                                | 0.80                       | 0.75                | 0.65                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |
| 25.0                                                      |                                | 0.70                       | 0.65                | 0.60                |                                 | 1.20                       | 1.15                | 1.10                |                                 | 1.20                       | 1.20                | 1.20                |

Fuente: MINISTERIO DE TRANSPORTE – ICPC. Manual de diseño de pavimento de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Bogotá D.C.

Se adoptan los siguientes valores:

- Diámetro de la barra = 1/2" o 12.7 mm.
- Acero de  $f_y = 60\,000$  lb/pulg<sup>2</sup>.
- Longitud de la barra = 850 mm.
- Separación entre centros = 1.2 m.

## 5.4 Diseño y construcción de las juntas

Las juntas del pavimento rígido van a ser las responsables del control del agrietamiento, así como de mantener la capacidad estructural del pavimento y su calidad de servicio en los más altos niveles al menor costo anual.

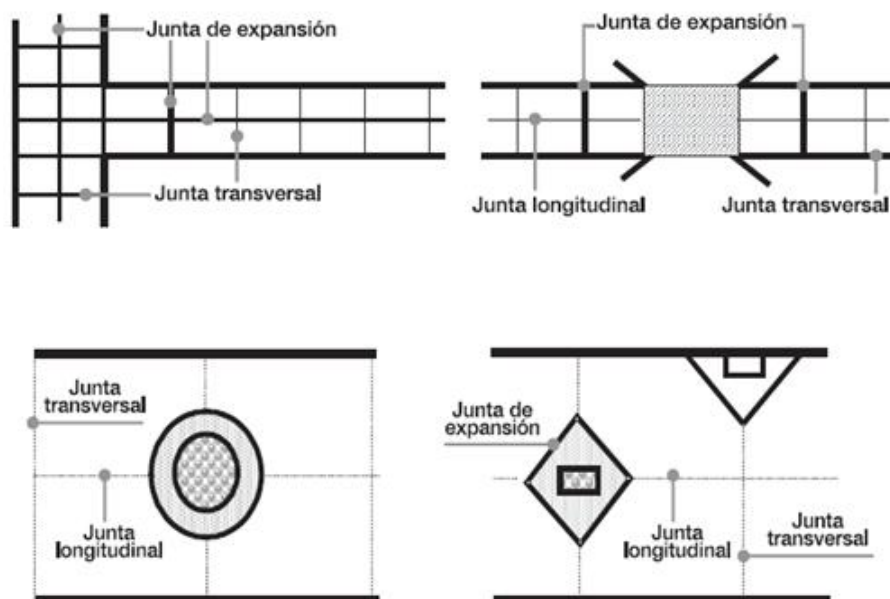
Además, las juntas cumplen funciones más específicas, como lo son:

- El control del agrietamiento transversal y longitudinal provocado por las restricciones de contracción combinándose con los efectos de pandeo ó alabeo de las losas, así como las cargas del tráfico.
- Dividir el pavimento en incrementos prácticos para la construcción (por ejemplo, los carriles de circulación).
- Absorber los esfuerzos provocados por los movimientos de las losas.
- Proveer una adecuada transferencia de carga.
- Darle forma al depósito para el sellado de la junta.

### 5.4.1 Tipos de juntas

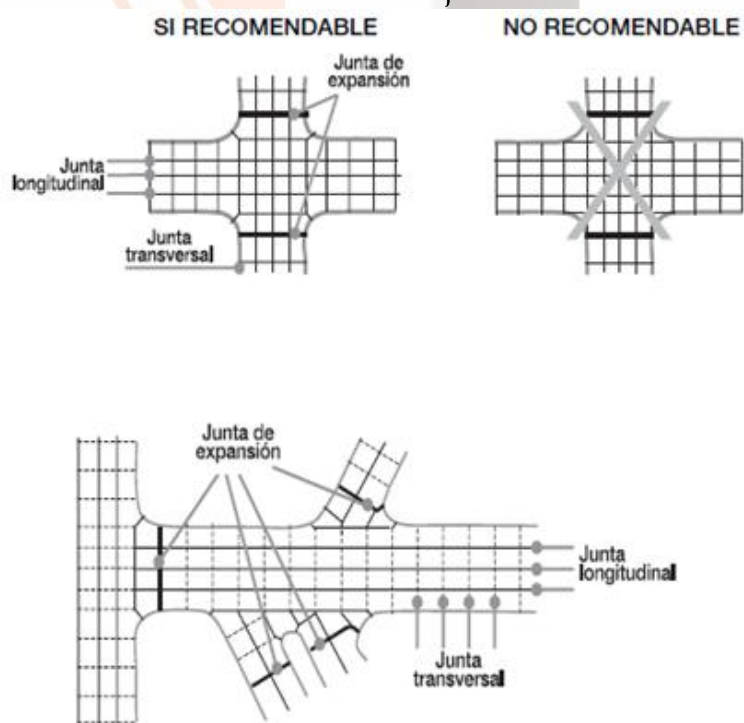
Los tipos de juntas a usar en el pavimento rígido son las siguientes

Esquema 6. Tipos de juntas



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Esquema 7. Recomendaciones construcción de juntas.



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Las juntas longitudinales de contracción cortando con disco en el concreto endurecido o formando una ranura en el concreto fresco, de una manera muy similar al caso de las juntas transversales de contracción, sin embargo la profundidad del corte o de la ranura deberá ser de un tercio del espesor ( $D/3$ ) y el tiempo o el momento para hacer el corte inicial no es tan crítico como en el caso de las juntas transversales de contracción ya que el movimiento de contracción longitudinal no es tan grande como la contracción transversal.

El corte de las juntas longitudinales deberá realizarse antes de 48 horas y antes de que cualquier equipo pesado o vehículo circule sobre el pavimento. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, como una fuerte caída en la temperatura ambiente durante la primera o segunda noche, se pueden presentar agrietamientos longitudinales más temprano, por lo que es una buena práctica el realizar el corte tan pronto como sea pueda hacer.

#### **5.4.2 Recomendaciones para el diseño de las juntas**

Las siguientes recomendaciones se hacen para un correcto diseño de juntas:

- Evitar losas de forma irregular.
- La separación máxima entre juntas transversales deberá ser de 25 veces el espesor ó 4.5 metros, la que sea menor.
- Mantener losas tan cuadradas como sea posible, ya que losas angostas y largas tienden a agrietarse en mayor cantidad que las cuadradas.
- Todas las juntas de contracción transversales, deberán ser continuas a través de la guarnición y tener una profundidad igual a  $1/3$  del espesor del pavimento.
- En las juntas de aislamiento, el relleno deberá ser a toda la profundidad y extenderse por la guarnición.
- Si no se cuenta con guarniciones, las juntas longitudinales deberán amarrarse con barras de amarre.
- Ajustes menores en la ubicación de las juntas, desplazando o inclinando algunas juntas para que coincidan con los pozos de visita o alcantarillas mejoran el comportamiento del pavimento.
- Cuando el área pavimentada cuenta con estructuras de drenaje, colocar las juntas de manera que coincidan con las estructuras.

### 5.4.3 Sellado de las juntas

La ranura entre juntas debe sellarse, tanto para impedir la entrada de agua a la Subrasante como para evitar la penetración de cuerpos extraños dentro de la junta, como también evitar que se produzca el bombeo. Adicionalmente, el sello mejora la calidad del rodamiento.

El material sellante ideal debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Ser impermeable.
- Deformarse sin rotura, de acuerdo con los movimientos que ocurran en la junta.
- Recuperar su forma original después de repeticiones cíclicas de la deformación.
- Permanecer en contacto con las caras de la junta.
- No fluir con la gravedad.
- No reblandecerse excesivamente a las mayores temperaturas de servicio.
- No endurecerse ni notarse quebradizo a temperaturas bajas de servicio.
- No perder sus cualidades con la edad ni con la acción del medio.
- Resistir al ataque químico.

### 5.4.4 Limpieza Previa

Previo al sellado, la abertura de la junta deberá ser limpiada a fondo de compuestos de curado, residuos, natas y cualquier otro material ajeno. La limpieza de las caras de la junta afecta directamente la adherencia del sellante al concreto. Una limpieza pobre reduce la adherencia del sellador a la interface con la junta, lo que reduce significativamente la efectividad del sellador. Por lo tanto, la correcta limpieza es esencial para obtener una superficie de junta que no perjudicará el lazo o adhesión con el sellador. La limpieza se puede hacer con sand-blast, agua, aire a presión, cepillado de alambre o de varias otras maneras, esto dependiendo de las condiciones de la junta y las recomendaciones del fabricante del sellador.

### Tipos de sellantes

1. **Masillas:** Compuestas por un líquido viscoso (asfalto) al cual se adicionan materiales llenantes, como fibras de asbesto.

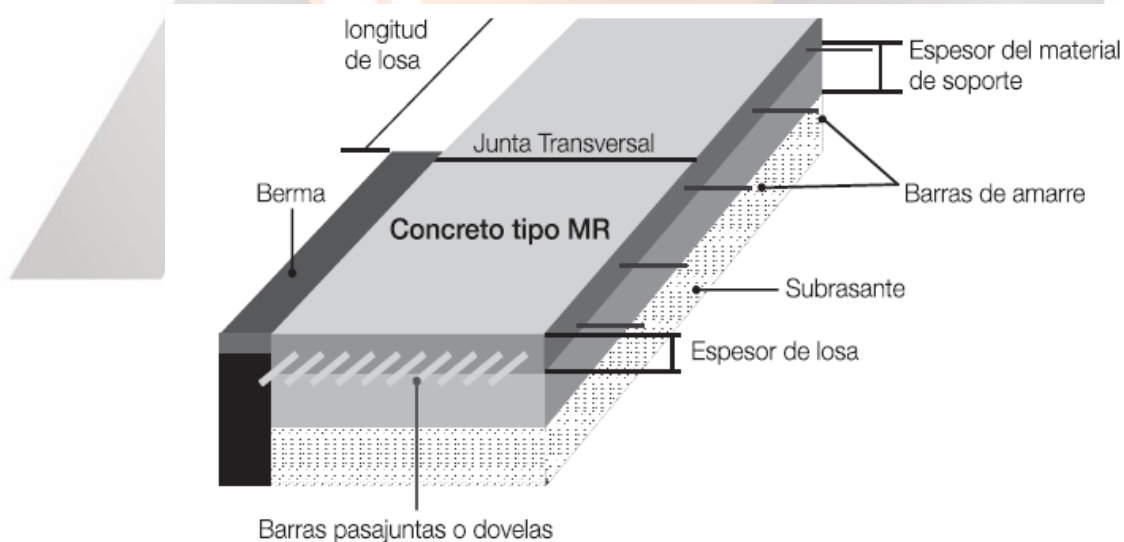
2. **Sellantes Termoplásticos:** EL GRAYDIN EE, y el GRAYDIN ASCAS IMPERSEL.
3. **Sellantes de curado Químico:** SIKAFLEX-T 68 y el COLMA JOINT SEALER, ambos de Sika.

En general, según los equipos de construcción con los que se cuentan, se recomienda implementar los procesos constructivos descritos en las especiaciones generales de construcción de carreteras del INVÍAS, en el Artículo INV-500-22.

### 5.5 Modelo estructural del pavimento rígido

A continuación, se presenta el modelo estructural de las losas de pavimento rígido, el cual muestra el dimensionamiento de los diferentes elementos.

Esquema 8. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido



Fuente: INVÍAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

- Concreto tipo: 4.0 MPa
- Espesor de la losa: 23 cm.
- Material de soporte tipo: Subbase granular CBR  $\geq$  30%, clase B
- Espesor material de soporte: 15 cm

- Barras pasajuntas o dovelas: D= 1 1/8 pulg lisa, longitud de 40 cm, separadas cada 30 cm, engrasadas en una de sus puntas.
- Barras de amarre: D=1/2 Pulg, longitud 85 cm, separadas cada 120 cm.
- Berma: Se garantizará por sardineles de confinamiento o losas contiguas que se encuentren en buen estado.

El ancho de la losa no deberá ser mayor a 4.5 m por ningún motivo, en caso de requerirse mayores anchos, se deberá optar por construir en la calzada tres losas en sentido longitudinal, sin exceder un largo de 1.25 veces el ancho de la losa. Los anchos y longitudes de la losa según el ancho de la calzada pueden ser consultados en la Tabla 21.



## 6 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES Y RECOMENDACIONES CONSTRUCTIVAS

La estructura de pavimento deberá realizarse con la normatividad vigente del INVÍAS (especificaciones 2022), los materiales que se empleen deberán cumplir con las especificaciones que se presentan a continuación que son correspondientes a un nivel de tránsito NT1 – Clase C y aplican para los caso de estructuras de pavimentos flexibles, y materiales con nivel de tránsito NT2 – Clase B para estructuras de pavimento rígido, especificaciones generales de construcción de carreteras que pueden ser descargadas de la página WEB del INVÍAS.

### 6.1 Subbase Granular INV E 320 – 22 - Base Granular INV E 330 –22

Se presentan especificaciones técnicas y recomendaciones generales para la instalación de estos materiales como se observa:

Tabla 24. Requisitos de los agregados para subbases granulares INVÍAS 2022.

| Característica                                                                                                                                          | Norma de ensayo INV | Subbase granular |          |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|----------|----------|
|                                                                                                                                                         |                     | Clase A          | Clase B  | Clase C  |
| <b>Dureza (O)</b>                                                                                                                                       |                     |                  |          |          |
| Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%):<br>- 500 revoluciones                                                              | E-218               | 50               | 50       | 50       |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).                                                                                          | E-238               | 30               | 35       | -        |
| <b>Durabilidad (O)</b>                                                                                                                                  |                     |                  |          |          |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota):<br>- Sulfato de sodio<br>- Sulfato de magnesio                                           | E-220               | 12<br>18         | 12<br>18 | 12<br>18 |
| <b>Limpieza (F)</b>                                                                                                                                     |                     |                  |          |          |
| Límite líquido, máximo (%).                                                                                                                             | E-125               | 25               | 25       | 25       |
| Índice de Plasticidad, máximo (%).                                                                                                                      | E-125 y E-126       | 6                | 6        | 6        |
| Equivalente de arena, mínimo (%).                                                                                                                       | E-133               | 25               | 25       | 25       |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).                                                                                   | E-211               | 2                | 2        | 2        |
| <b>Resistencia del material (F)</b>                                                                                                                     |                     |                  |          |          |
| CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo. | E-148               | 40               | 30       | 30       |

Nota: se puede validar el requisito de durabilidad, empleando cualquiera de los dos sulfatos indicados.

Fuente: Artículo 320-22 INVÍAS

Tabla 25. Requisitos de los agregados para bases granulares INVÍAS 2022.

| Característica                                                                                                                                          | Norma de ensayo INV | Subbase granular |          |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------|----------|----------|
|                                                                                                                                                         |                     | Clase A          | Clase B  | Clase C  |
| <b>Dureza (O)</b>                                                                                                                                       |                     |                  |          |          |
| Desgaste en la máquina de Los Ángeles (Granulometría A), máximo (%):<br>- 500 revoluciones                                                              | E-218               | 50               | 50       | 50       |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%).                                                                                          | E-238               | 30               | 35       | -        |
| <b>Durabilidad (O)</b>                                                                                                                                  |                     |                  |          |          |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota):<br>- Sulfato de sodio<br>- Sulfato de magnesio                                           | E-220               | 12<br>18         | 12<br>18 | 12<br>18 |
| <b>Limpieza (F)</b>                                                                                                                                     |                     |                  |          |          |
| Límite líquido, máximo (%).                                                                                                                             | E-125               | 25               | 25       | 25       |
| Índice de Plasticidad, máximo (%).                                                                                                                      | E-125 y E-126       | 6                | 6        | 6        |
| Equivalente de arena, mínimo (%).                                                                                                                       | E-133               | 25               | 25       | 25       |
| Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%).                                                                                   | E-211               | 2                | 2        | 2        |
| <b>Resistencia del material (F)</b>                                                                                                                     |                     |                  |          |          |
| CBR (%): porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días (4 d) de inmersión, mínimo. | E-148               | 40               | 30       | 30       |

Nota: se puede validar el requisito de durabilidad, empleando cualquiera de los dos sulfatos indicados.

Fuente: Artículo 330-22 INVÍAS

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

**Gradación:** la gradación debe ajustarse a las siguientes bandas granulométricas para cada caso:

Tabla 26. Franja granulométrica subbase granular.

| Tipo de gradación                                         | Tamiz (mm / U.S. Standard) |              |           |             |             |         |         |         |          |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|---------|---------|---------|----------|
|                                                           | 50,0                       | 37,5         | 25,0      | 12,5        | 9,5         | 4,75    | 2,00    | 0,425   | 0,075    |
|                                                           | 2 Pulgadas                 | 1 ½ Pulgadas | 1 Pulgada | 1/2 Pulgada | 3/8 Pulgada | Nro. 4  | Nro. 10 | Nro. 40 | Nro. 200 |
|                                                           | Pasa tamiz (%)             |              |           |             |             |         |         |         |          |
| SBG-50 (Nota)                                             | 100                        | 70 – 95      | 60 – 90   | 45 – 75     | 40 – 70     | 25 – 55 | 15 – 40 | 6 – 25  | 2 – 15   |
| SBG-38 (Nota)                                             | -                          | 100          | 75 – 95   | 55 – 85     | 45 – 75     | 30 – 60 | 20 – 45 | 8 – 30  | 2 – 15   |
| Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±) | 0 %                        | 7 %          |           |             |             | 6 %     |         |         | 3 %      |

Nota: el número indica el tamaño máximo, en milímetros, de las partículas en la gradación empleada.

Fuente: Artículo 320-22 INVÍAS.

Tabla 27. Franja granulométrica base granular.

| Tipo de gradación                                         | Tamiz (mm / U.S. Standard) |           |             |             |         |         |         |          |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|-------------|-------------|---------|---------|---------|----------|
|                                                           | 37,5                       | 25,0      | 19,0        | 9,5         | 4,75    | 2,00    | 0,425   | 0,075    |
|                                                           | 1½ Pulgadas                | 1 Pulgada | 3/4 Pulgada | 3/8 Pulgada | Nro. 4  | Nro. 10 | Nro. 40 | Nro. 200 |
|                                                           | Pasa tamiz (%)             |           |             |             |         |         |         |          |
| Bases granulares de gradación gruesa                      |                            |           |             |             |         |         |         |          |
| BG-40                                                     | 100                        | 75 — 100  | 65 — 90     | 45 — 68     | 30 — 50 | 15 — 32 | 7 — 20  | 0 — 9    |
| BG-27                                                     | -                          | 100       | 75 — 100    | 52 — 78     | 35 — 59 | 20 — 40 | 8 — 22  | 0 — 9    |
| Bases granulares de gradación fina                        |                            |           |             |             |         |         |         |          |
| BG-38                                                     | 100                        | 70 — 100  | 60 — 90     | 45 — 75     | 30 — 60 | 20 — 45 | 10 — 30 | 5 — 15   |
| BG-25                                                     | -                          | 100       | 70 — 100    | 50 — 80     | 35 — 65 | 20 — 45 | 10 — 30 | 5 — 15   |
| Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±) | 0 %                        | 7 %       |             |             | 6 %     |         |         | 3 %      |

Fuente: Artículo 330-22 INVÍAS.

- El material se colocará y se extenderá en capas de 15 cm, el espesor de cada capa y el número de pasadas para lograr la compactación adecuada se realizarán de acuerdo al equipo que emplee el constructor.
- El material se deberá humedecer hasta obtener un contenido de humedad próximo al óptimo, se deberá compactar hasta obtener el porcentaje ideal de la densidad seca máxima del ensayo de Proctor modificado, para base este porcentaje debe ser 98% y para subbase de 95%.

- Los materiales para la construcción deberán ser extraídos de canteras y/o depósitos aluviales previamente estudiados y aceptados por la interventoría, y se recomienda hacer controles de calidad de material continuos con el fin de garantizar la funcionalidad de estos.
- Para proteger los materiales al contacto con el agua, se recomienda emplear materiales granulares con porcentajes bajos en el contenido de finos (pasa malla 200), baja plasticidad.
- La base y subbase tendrá una densidad uniforme en toda su extensión y profundidad y ese requisito se observará de manera especial en las zonas cercanas a las estructuras de confinamiento, sumideros, cajas de inspección etc.



## 6.2 Capa asfáltica: Mezcla densa en caliente MDC – 19. INV E 450 - 22

Tabla 28. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

| Característica                                                                                                                                                                    | Norma de ensayo          | Nivel de tránsito |                    |                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
|                                                                                                                                                                                   |                          | NT1               | NT2                | NT3                   |
| Dureza, agregado grueso (O)                                                                                                                                                       |                          |                   |                    |                       |
| Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%).<br>(Nota 1):<br>- Capa de: rodadura/intermedia/base, 500 revoluciones<br>- Capa de: rodadura/intermedia/base, 100 revoluciones | INV E-218                | 25/35/-<br>5/7/-  | 25/35/35<br>5/7/7  | 25/35/35<br>5/7/7     |
| Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%):<br>- Capa de: rodadura/intermedia/base                                                                             | INV E-238                | -                 | 25/30/30           | 20/25/25              |
| Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura/intermedia/base<br>- Valor en seco, mínimo (kN)<br>- Relación húmedo/seco, mínima (%)                      | INV E-224                | -<br>-            | -<br>-             | 110/90/75<br>75/75/75 |
| Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, mínimo.                                                                                                                       | INV E-232                | 45                | 45                 | 45                    |
| Durabilidad (O)                                                                                                                                                                   |                          |                   |                    |                       |
| Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%).                                                                                        | INV E-220                | 18                | 18                 | 18                    |
| Análisis petrográfico                                                                                                                                                             |                          |                   |                    |                       |
| Cuantifica los porcentajes relativos de los diferentes minerales y las tipologías de rocas que componen el agregado (Nota 2).                                                     | ASTM C295                | -                 | -                  | Reportar              |
| Limpieza, agregado grueso (F)                                                                                                                                                     |                          |                   |                    |                       |
| Impurezas en agregado grueso, máximo (%).                                                                                                                                         | INV E-237                | 0,5               | 0,5                | 0,5                   |
| Limpieza, gradación combinada (F)                                                                                                                                                 |                          |                   |                    |                       |
| Índice de Plasticidad, máximo (%).                                                                                                                                                | INV E-125 e<br>INV E-126 | NP                | NP                 | NP                    |
| Equivalente de arena, mínimo (%).                                                                                                                                                 | INV E-133                | 50                | 50                 | 50                    |
| Valor de azul de metileno, máximo.                                                                                                                                                | INV E-235                | 10                | 10                 | 10                    |
| Geometría de las partículas, agregado grueso (F)                                                                                                                                  |                          |                   |                    |                       |
| Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%).                                                                                                                          | INV E-240                | 10                | 10                 | 10                    |
| Caras fracturadas, mínimo (%):<br>- Una Cara: rodadura/intermedia/base<br>- Dos caras: rodadura/intermedia/base                                                                   | INV E-227                | 75/60/-<br>-/-/-  | 75/75/60<br>60/-/- | 85/75/60<br>70/-/-    |
| Geometría de las partículas, agregado fino (F)                                                                                                                                    |                          |                   |                    |                       |
| Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%):<br>- Capa de: rodadura/intermedia/base                                                                                     | INV E-239                | 40/35/-           | 45/40/35           | 45/40/35              |
| Adhesividad (O)                                                                                                                                                                   |                          |                   |                    |                       |
| Agregado grueso: cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%).                                                                      | INV E-757                |                   | Reportar           |                       |
| Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel-Weber), índice mínimo.                                                                | INV E-774                |                   | 4                  |                       |

Nota 1: se aceptan valores superiores de desgaste siempre y cuando el valor de Micro-Deval se cumpla; esta nota no resulta aplicable para tránsito NT1.

Nota 2: este ensayo es aplicable únicamente para tránsito NT3. El informe debe cuantificar los porcentajes relativos de los diferentes minerales y las tipologías de rocas que componen el agregado, debe incluir advertencia sobre la presencia de minerales contaminantes, deletéreos, con posibles reactividades químicas, inestables o susceptibles a cambios volumétricos. Debe indicar el grado de meteorización o de alteración del agregado, y la porosidad. También debe incluir valores de acidez y carga de partícula con un concepto sobre la adherencia con el asfalto y las emulsiones.

Fuente: Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

## Gradación:

Tabla 29. Proporción máxima de arena natural en el agregado para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

| Característica                                                                       | Nivel de tránsito |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|------|
|                                                                                      | NT1               | NT2  | NT3  |
| Proporción de arena natural: porcentaje (%) de la masa total del agregado combinado. | ≤ 25              | ≤ 25 | ≤ 15 |
| Proporción de arena natural: porcentaje (%) de la masa total del agregado fino.      |                   | ≤ 50 |      |

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Tabla 30. Porción y requisitos del llenante mineral.

| Característica                                                                        | Norma de ensayo INV | Nivel de tránsito |           |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------|------|
|                                                                                       |                     | NT1               | NT2       | NT3  |
| Proporción de llenante mineral de aporte: (porcentaje (%) en masa del llenante total) |                     |                   |           |      |
| - Capa de rodadura                                                                    | -                   | -                 | ≥ 25      | ≥ 50 |
| - Capa intermedia                                                                     | -                   | -                 | ≥ 25      | ≥ 50 |
| - Capa de base                                                                        | -                   | -                 | -         | ≥ 25 |
| Granulometría del llenante mineral de aporte:                                         |                     |                   |           |      |
| - % que pasa tamiz de 1,18 mm (nro. 16)                                               |                     |                   | 100       |      |
| - % que pasa tamiz de 0,600 mm (nro. 30)                                              | E-215               |                   | 97 – 100  |      |
| - % que pasa tamiz de 0,150 mm (nro. 100)                                             |                     |                   | 95 – 100  |      |
| - % que pasa tamiz de 0,075 mm (nro. 200)                                             |                     |                   | 70 – 100  |      |
| Densidad <i>bulk</i> (g/cm³).                                                         | E-225               |                   | 0,5 – 0,8 |      |
| Vacíos del llenante seco compactado (%).                                              | E-229               | -                 | ≥ 38      |      |

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Tabla 31. Franja granulométrica recomendada mezcla densa en caliente.

| Tipo de mezcla                                            | Tamiz (mm / U.S. Standard) |                      |                        |                     |                       |                |                 |                  |                  |                   |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|
|                                                           | 37,5<br>1 1/2<br>Pulgadas  | 25,0<br>1<br>Pulgada | 19,0<br>3/4<br>Pulgada | 12,5<br>1/2 Pulgada | 9,5<br>3/8<br>Pulgada | 4,75<br>Nro. 4 | 2,00<br>Nro. 10 | 0,425<br>Nro. 40 | 0,180<br>Nro. 80 | 0,075<br>Nro. 200 |
|                                                           | Pasa tamiz (%)             |                      |                        |                     |                       |                |                 |                  |                  |                   |
| Densa                                                     | MDC-25                     | -                    | 100                    | 67 – 85             | 60 – 77               | 43 – 59        | 29 – 45         | 14 – 25          | 8 – 17           | 4 – 8             |
|                                                           | MDC-19                     | -                    | 100                    | 80 – 95             | 70 – 88               | 49 – 65        | 29 – 45         | 14 – 25          | 8 – 17           | 4 – 8             |
|                                                           | MDC-10                     | -                    | -                      | -                   | 100                   | 65 – 87        | 43 – 61         | 16 – 29          | 9 – 19           | 5 – 10            |
| Semidensa                                                 | MSC-25                     | -                    | 100                    | 65 – 80             | 55 – 70               | 40 – 55        | 24 – 38         | 9 – 20           | 6 – 12           | 3 – 7             |
|                                                           | MSC-19                     | -                    | 100                    | 80 – 95             | 65 – 80               | 40 – 55        | 24 – 38         | 9 – 20           | 6 – 12           | 3 – 7             |
| Gruesa                                                    | MGC-38                     | 100                  | 75 – 95                | 47 – 67             | 40 – 60               | 28 – 46        | 17 – 32         | 7 – 17           | 4 – 11           | 2 – 6             |
|                                                           | MGC-25                     | -                    | 100                    | 55 – 75             | 40 – 60               | 28 – 46        | 17 – 32         | 7 – 17           | 4 – 11           | 2 – 6             |
| Alto módulo                                               | MAM-25                     | -                    | 100                    | 65 – 80             | 55 – 70               | 40 – 55        | 24 – 38         | 10 – 20          | 8 – 14           | 6 – 9             |
|                                                           | MAM-19                     | -                    | -                      | 80 – 95             | 65 – 80               | 40 – 55        | 24 – 38         | 9 – 20           | 6 – 12           | 3 – 7             |
| Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±) | -                          | -                    | -                      | 4 %                 | -                     | -              | -               | 3 %              | -                | 2 %               |

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

Tabla 32. Criterios de diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.

| Característica                                                    |               | Norma de Ensayo INV          | Mezclas densas, semidensas y gruesas |                          |                          | Mezcla de alto módulo |
|-------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
|                                                                   |               |                              | Categoría de tránsito                |                          |                          |                       |
|                                                                   |               |                              | NT1                                  | NT2                      | NT3                      |                       |
| Compactación (golpes/cara)                                        |               | E-748<br>(E-800)<br>(Nota 1) | 50                                   | 75 (112)                 | 75 (112)                 | 75                    |
| Estabilidad mínima (N)                                            |               |                              | 5 000                                | 7 500<br>(16 875)        | 9 000<br>(20 250)        | 15 000                |
| Flujo (mm). (Nota 2)                                              |               |                              | 2,0 — 4,0                            | 2,0 — 4,0<br>(3,0 — 6,0) | 2,0 — 3,5<br>(3,0 — 5,3) | 2,0 — 3,0             |
| Relación Estabilidad/Flujo (kN/mm)                                |               |                              | 2,0 — 4,0                            | 3,0 — 5,0<br>(4,5 — 7,5) | 3,0 — 6,0<br>(4,5 — 9,0) | -                     |
| Vacíos con aire (Va) (%). (Nota 3)                                | Rodadura      | E-736<br>E-799               | 3,0 — 5,0                            | 3,0 — 5,0                | 3,0 — 5,0                | 4,0 — 6,0             |
|                                                                   | Intermedia    |                              | 4,0 — 8,0                            | 4,0 — 7,0                | 4,0 — 7,0                | 4,0 — 6,0             |
|                                                                   | Base          |                              | NA                                   | 5,0 — 8,0                | 5,0 — 8,0                | 4,0 — 6,0             |
| Vacíos en los agregados minerales (VAM), mínimo (%)               | T. Máx. 38 mm | E-799                        |                                      | 13,0                     |                          | -                     |
|                                                                   | T. Máx. 25 mm |                              |                                      | 14,0                     |                          | 14,0                  |
|                                                                   | T. Máx. 19 mm |                              |                                      | 15,0                     |                          | -                     |
|                                                                   | T. Máx. 10 mm |                              |                                      | 16,0                     |                          | -                     |
| Vacíos llenos de asfalto (VFA) (%)                                |               | E-799                        | 65 — 80                              | 65 — 78                  | 65 — 75                  | 63 — 75               |
| Relación Llenante/Ligante efectivo, en peso                       |               | E-799                        |                                      | 0,8 — 1,2                |                          | 1,2 — 1,4             |
| Concentración de llenante, valor máximo                           |               | E-745                        |                                      | Valor crítico            |                          |                       |
| Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey |               | -                            |                                      | Reportar                 |                          |                       |
| Espesor promedio de película de asfalto, mínimo (µm)              |               | E-741                        |                                      |                          | 7,5                      |                       |

Nota 1: se debe usar la norma de ensayo INV E-800, en lugar de la INV E-748 cuando los agregados tengan un tamaño máximo superior a veinticinco milímetros (25 mm) (1 pulgada). Los valores entre paréntesis corresponden a ensayos efectuados, de acuerdo con la norma INV E-800.

Nota 2: para mezclas elaboradas con asfaltos modificados con polímeros, se puede aceptar un valor de flujo hasta de cinco milímetros (5,0 mm). En cualquier caso, se debe cumplir el requisito establecido en la respectiva columna de la tabla para la relación Estabilidad/Flujo.

Nota 3: para bacheos en capas de cincuenta a setenta y cinco milímetros (50 mm – 75 mm) de espesor, se deben exigir los requisitos de vacíos con aire de «intermedia» y para los de capas de más de setenta y cinco milímetros (75 mm) se deben exigir los requisitos para «base». Si se llegase a efectuar un bacheo con mezcla asfáltica en caliente en espesor mayor de setenta y cinco milímetros (75 mm) en una vía cuyo tránsito de proyecto es NT1, se debe aplicar el criterio de vacíos con aire para las capas de «base» con tránsito NT2 (5 % – 8 %).

Fuente: Artículo 450-22 INVÍAS.

- En el proceso del diseño y dosificación de materiales para la mezcla asfáltica se deberá emplear el método Marshall, el cual debe garantizar que las propiedades intrínsecas de esta se encuentran en los siguientes valores de acuerdo con la variable a analizar:
- La temperatura de mezclado no debe ser menos a 120 °C.
- Una vez terminada la base granular. se dispondrá de un riego de liga de tipo CRR 1 o CRR 2 de acuerdo con el artículo 421 del INVÍAS. La superficie de la base debe ser uniforme y para una mejor adhesión se procederá a realizar una limpieza mediante barredoras o sopladoras mecánicamente en sitios accesibles y escobas manuales donde estas no puedan acceder.
- La dosificación del ligante será definida por el Interventor. sobre la base de las pruebas iniciales en obra. En condiciones normales. se recomiendan dosificaciones del orden de doscientos a trescientos gramos de ligante residual por metro cuadrado (200 a 300 g/m<sup>2</sup>).
- No se abrirá paso del tránsito en la superficie en que ha sido aplicado el riego de liga. a menos que el interventor lo autorice.

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El tránsito de diseño, exploración geotécnica y condiciones ambientales permitieron definir 1 unidad de diseño, la cual aplica para toda la longitud del proyecto.
2. La exploración geotécnica y condiciones ambientales permitieron definir una (1) zona homogénea, la cual aplica para toda la longitud del proyecto.
3. La exploración geotécnica a partir de 1 apique permitió sectorizar y resumir las propiedades propias de los materiales que conforman la estructura de pavimento existente, además de la subrasante, las cuales se muestran de manera resumida en la Tabla 33, y pueden ser consultados en el informe geotécnico desarrollado para el proyecto.

Tabla 33. Características de la subrasante

| SECTOR | DIRECCION                                    | APIQUE | SUCS  | PROF.<br>MEDIA m | CBR<br>ANTES DE<br>INMERSION<br>% | CBR<br>DESPUES<br>DE<br>INMERSION% | AASTHO<br>IG % | PROP.<br>INDICE % | PDC % | EXPANSION<br>% | ESPESOR<br>MATERIAL<br>GRANULAR |
|--------|----------------------------------------------|--------|-------|------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------|-------------------|-------|----------------|---------------------------------|
| 5      | Calle 26 entre<br>carrera 18 y<br>carrera 17 | 6      | SM-SC | 0.73             | 5.2                               | 3.1                                | 7.9            | 15.3              | 7.6   | 0.20           | 0.35                            |

Fuente: Tabla 4 - Estudio geotécnico realizado por APP control Ingeniería SAS.

4. Para este caso, y considerando que únicamente se dispone de un (1) apique para la caracterización de la subrasante y la estructura del pavimento existente, el espesor del material granular hallado en la exploración (hasta 0,35 m) se tomará en caso de lograr aprovecharse como capa estructural como un factor de seguridad en el comportamiento estructural del pavimento.
5. Los parámetros de resistencia de la subrasante de diseño se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 34. Características de diseño de la subrasante por unida de diseño

|                                 |                 |
|---------------------------------|-----------------|
| Unidad de diseño                | 1               |
| Abscisa inicio                  | k0+000          |
| Abscisa fin                     | K0+096          |
| <b>CBR (%)</b>                  | <b>3.10</b>     |
| <b>Mr (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>   | <b>363</b>      |
| <b>Mr (lb(pulg<sup>2</sup>)</b> | <b>5271</b>     |
| <b>Mr (N/m<sup>2</sup>)</b>     | <b>3.63E+07</b> |
| <b>Mr (MPa)</b>                 | <b>36.3</b>     |
| <b>K (Kg/cm<sup>3</sup>)</b>    | <b>2.78</b>     |
| <b>K (lb/pulg<sup>3</sup>)</b>  | <b>100.4</b>    |
| <b>K (MPa/m)</b>                | <b>27.8</b>     |

Fuente: El estudio.

6. La estructura de pavimento deberá diseñarse y ejecutarse conforme a la normatividad vigente del INVÍAS (Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, edición 2022). Los materiales utilizados deberán cumplir con las especificaciones técnicas correspondientes al nivel de tránsito NT2 – Clase B. Estas especificaciones pueden ser consultadas y descargadas en la página web oficial del INVÍAS.

7. En la Tabla 35 se presentan las estructuras de pavimento flexible analizadas en este informe, en negrita se resalta la estructura de pavimento recomendada a implementar en el proyecto en caso de decidirse implementar una estructura en pavimento flexible.

8. Debido a que las exploraciones de campo son puntuales, en caso de encontrar suelos con capacidades de soporte evidentemente menores a las consideradas, se deberán realizar las labores de mejoramiento en campo a juicio del profesional responsable de la obra e interventoría.

Tabla 35. Resumen alternativas analizadas pavimento flexible

|                   | ai   | mi   | E (MPa) | $\mu$ |
|-------------------|------|------|---------|-------|
| Carpeta asfáltica | 0.37 | -    | 2170    | 0.35  |
| Base granular     | 0.13 | 1.0  | 192     | 0.40  |
| Subbase granular  | 0.11 | 0.80 | 104     | 0.40  |
| Subrasante        |      |      | 36.1    | 0.45  |

| Nivel de confianza, R                          |          |                                        | 85%                 |    |
|------------------------------------------------|----------|----------------------------------------|---------------------|----|
| Desviación estándar. So                        |          |                                        | 0.45                |    |
| Nivel de serviciabilidad inicial, $P_0$        |          |                                        | 4.2                 |    |
| Nivel de serviciabilidad final, $P_t$          |          |                                        | 2.0                 |    |
| Tránsito de diseño, Ejes Equiv a 8.2 ton cd/pd |          |                                        | 1028242             |    |
| CBR subrasante saturada, %                     |          |                                        | 3.10                |    |
| MR de diseño, MPa                              |          |                                        | 36.3                |    |
|                                                |          |                                        | ALTERNATIVA, e (cm) |    |
| SÍMBOLO                                        | CÓDIGO   | MATERIAL                               | 1                   | 2  |
|                                                | MDC - 19 | Mezcla Densa en Caliente<br>INV 450-22 | 8                   | 9  |
|                                                | BG - 38  | Base Granular<br>INV 330-22            | 15                  | 20 |
|                                                | SBG-50   | Sub Base Granular<br>INV 320-22        | 55                  | 45 |
| Espesor de la estructura (cm)                  |          |                                        | 78                  | 74 |
| Cumple criterio AASHTO                         |          |                                        | SI                  | SI |

Notas:

1- Espesores en cm.

2- En negrita estructura recomendada

RESUMEN VALORES DE DISEÑO  
AASHTO

|              |      |      |
|--------------|------|------|
| SN Requerido | 3.63 |      |
| SN Aportado  | 3.84 | 3.89 |

RESUMEN PORCENTAJES DE  
CONSUMO REVISIÓN RACIONAL

|                                                                              |     |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|
| Deformación radial admisible por tracción en la base de la carpeta asfáltica |     | 83.2 | 76.2 |
| Deformación vertical admisible por compresión sobre la subrasante            |     | 58.7 | 60.9 |
| Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante                | D-K | 29.6 | 30.7 |
|                                                                              | CRR | 92.2 | 95.5 |
| Deflexión admisible del modelo estructural                                   |     | 86.9 | 82.6 |

Fuente: El estudio

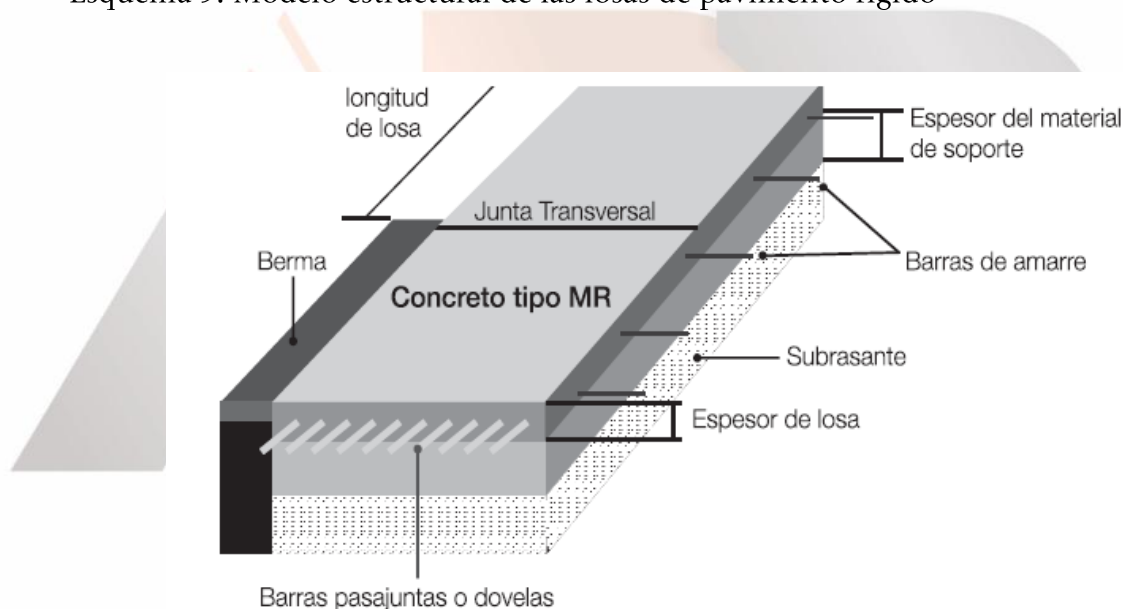
9. En La Tabla 36 se presentan las estructuras de pavimento rígido analizadas en este informe, en negrita se resalta la estructura de pavimento recomendada a implementar en el proyecto en caso de decidirse implementar una estructura en pavimento rígido.

Tabla 36. Espesores de la estructura rígida metodología AASHTO.

| SÍMBOLO | CÓDIGO           | MATERIAL                                         | Espesor<br>cm |
|---------|------------------|--------------------------------------------------|---------------|
|         | Losa de concreto | Concreto hidráulico<br>MR 4.0 MPa<br>INV 500-22  | 23            |
|         | SBG-50           | Sub Base Granular SBG-50<br>INV 320-22 CBR > 30% | 15            |

Fuente: El estudio

Esquema 9. Modelo estructural de las losas de pavimento rígido



Fuente: INVIAS, Manual de diseño de pavimentos en concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

- Concreto tipo: 4.0 MPa
- Espesor de la losa: 23 cm.
- Material de soporte tipo: Subbase granular CBR  $\geq$  30%, clase B.
- Espesor material de soporte: 15 cm
- Barras pasajuntas o dovelas: D= 11/8 pulg lisa, longitud de 40 cm, separadas cada 30 cm, engrasadas en una de sus puntas.
- Barras de amarre: D=1/2 Pulg, longitud 85 cm, separadas cada 120 cm.

- Berma: Se garantizará por sardineles de confinamiento o losas contiguas que se encuentren en buen estado.

10. Si las condiciones de desarrollo de la vida útil de la estructura cambian, se deberán recalcular los espesores de refuerzo a que haya lugar.

11. En la Tabla 37 se presenta un análisis económico de estas alternativas según descripción y precios de ítems de precios unitarios de la gobernación de Boyacá del año 2025, donde se presenta el valor por metro cuadrado de estructura.

Tabla 37. Evaluación económica de alternativas.

| MATERIAL                                      | Valor Unitario \$ | Unidad             | Alt flexible 1 | Alt flexible 2 | Alt flexible - Reforzada | Alt rígida |
|-----------------------------------------------|-------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------------------|------------|
| Mezcla Densa en Caliente                      | 1127227.78        | m <sup>3</sup>     | 8              | 9              | 9                        | 0          |
| Base Granular                                 | 145808.19         | m <sup>3</sup>     | 15             | 20             | 20                       | 0          |
| Sub Base Granular                             | 140355.91         | m <sup>3</sup>     | 55             | 45             | 25                       | 15         |
| Mejoramiento subrasante con afirmado          | 106587.96         | m <sup>3</sup>     | 0              | 0              | 0                        | 0          |
| Losa MR39                                     | 998846.54         | m <sup>3</sup>     | 0              | 0              | 0                        | 0          |
| Losa MR40                                     | 1006494.42        | m <sup>3</sup>     | 0              | 0              | 0                        | 23         |
| Imprimación                                   | 4913.16           | m <sup>2</sup>     | 1              | 1              | 1                        | 0          |
| Geomalla                                      | 24961             | m <sup>2</sup>     | 0              | 0              | 1                        | 0          |
| Adoquín en concreto, e=8cm                    | 129473.04         | m <sup>2</sup>     | 0              | 0              | 0                        | 0          |
| Altura excavación                             | 33952.53          | m <sup>3</sup>     | 78             | 74             | 54                       | 38         |
| Acero f'y=280 MPa                             | 6843.45           | Kg                 | 0              | 0              | 0                        | 1.32       |
| Acero f'y=420 MPa                             | 7675.05           | Kg                 | 0              | 0              | 0                        | 2.89       |
| Transporte materiales asfálticos***           | 3452.4            | m <sup>3</sup> /Km | 8              | 9              | 9                        | 0          |
| Transporte materiales granulares***           | 2765.1            | m <sup>3</sup> /Km | 70             | 65             | 45                       | 15         |
| Costo inicial (en miles de pesos)             |                   | \$/m <sup>2</sup>  | 273.7          | 274.4          | 251.2                    | 306.6      |
| Porcentaje considerado para rehabilitación    |                   | %                  | 70             | 70             | 71                       | 0          |
| Costo considerado para rehabilitación         |                   | \$/m <sup>2</sup>  | 191.6          | 192.1          | 175.9                    | 0.0        |
| Año de rehabilitación                         |                   | año                | 10             | 10             | 10                       | 0          |
| Tasa de descuento anual**                     |                   |                    | 9              | 9              | 9                        | 9          |
| Valor Presente Rehabilitación                 |                   | \$/m <sup>2</sup>  | 80.9           | 81.1           | 74.3                     | 0.0        |
| Total Valor presente neto (en miles de pesos) |                   | \$/m <sup>2</sup>  | 354.7          | 355.5          | 325.5                    | 306.6      |

Nota:

\* Valor de la excavación por efectos de la altura total de la estructura

\*\* Tasa Social de Descuento recomendada por el DNP para proyectos de inversión pública

\*\*\* Distancia de acarreo materiales asfálticos 24 Km (Planta EVM)

\*\*\*\* Distancia de acarreo materiales granulares 24 Km (Planta EVM)

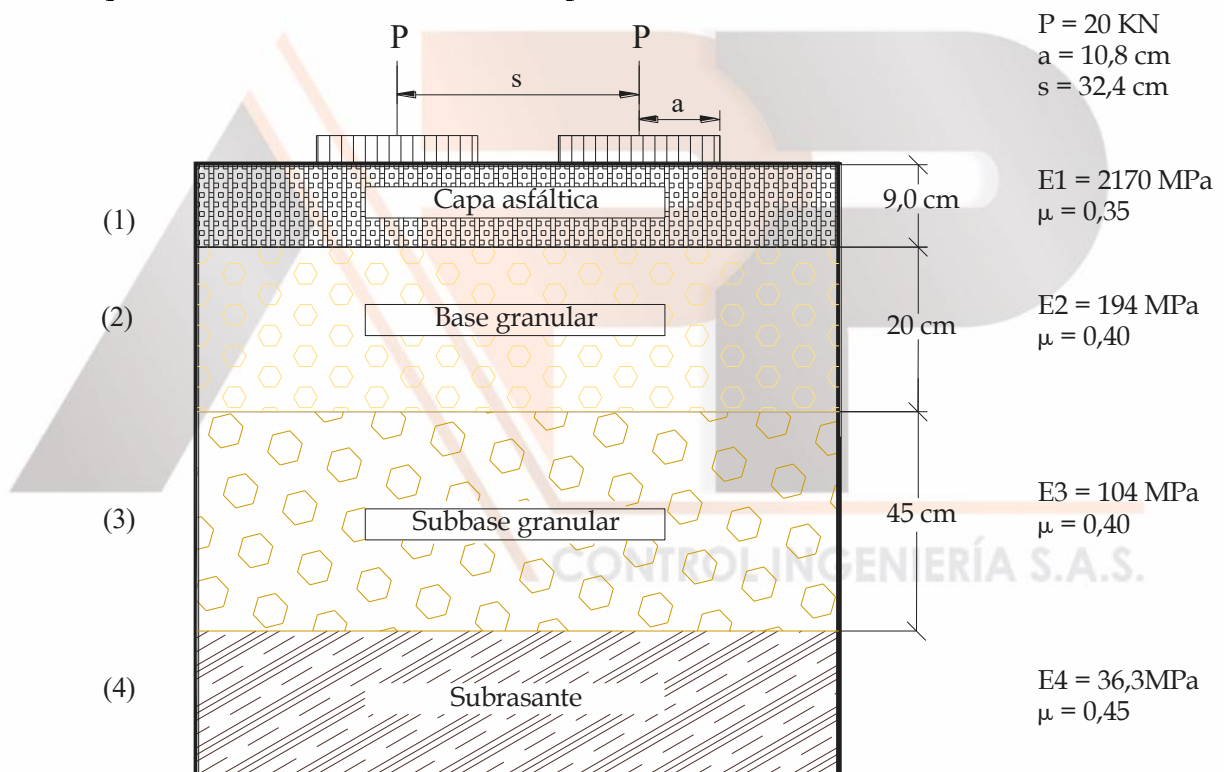
Fuente: El estudio

12. De la Tabla 37 se puede concluir que la alternativa de menor costo presente neto evaluado a periodo de análisis de 20 años corresponde a la alternativa de pavimento rígido, pero presenta costos iniciales mayores para su implementación comparándola con alternativas de pavimentos flexibles, no obstante y teniendo en

cuenta el componente económico y técnico del proyecto, se recomienda la implementación de la alternativa pavimento flexible reforzada con geomalla biaxial (Ver Esquema 11), que presenta ventajas en cuanto a menores restricciones en la profundidad de implantación del pavimento por interacción con redes de servicios públicos como alcantarillados existentes, estructura que adicionalmente presenta ventajas económicas frente a otras alternativas.

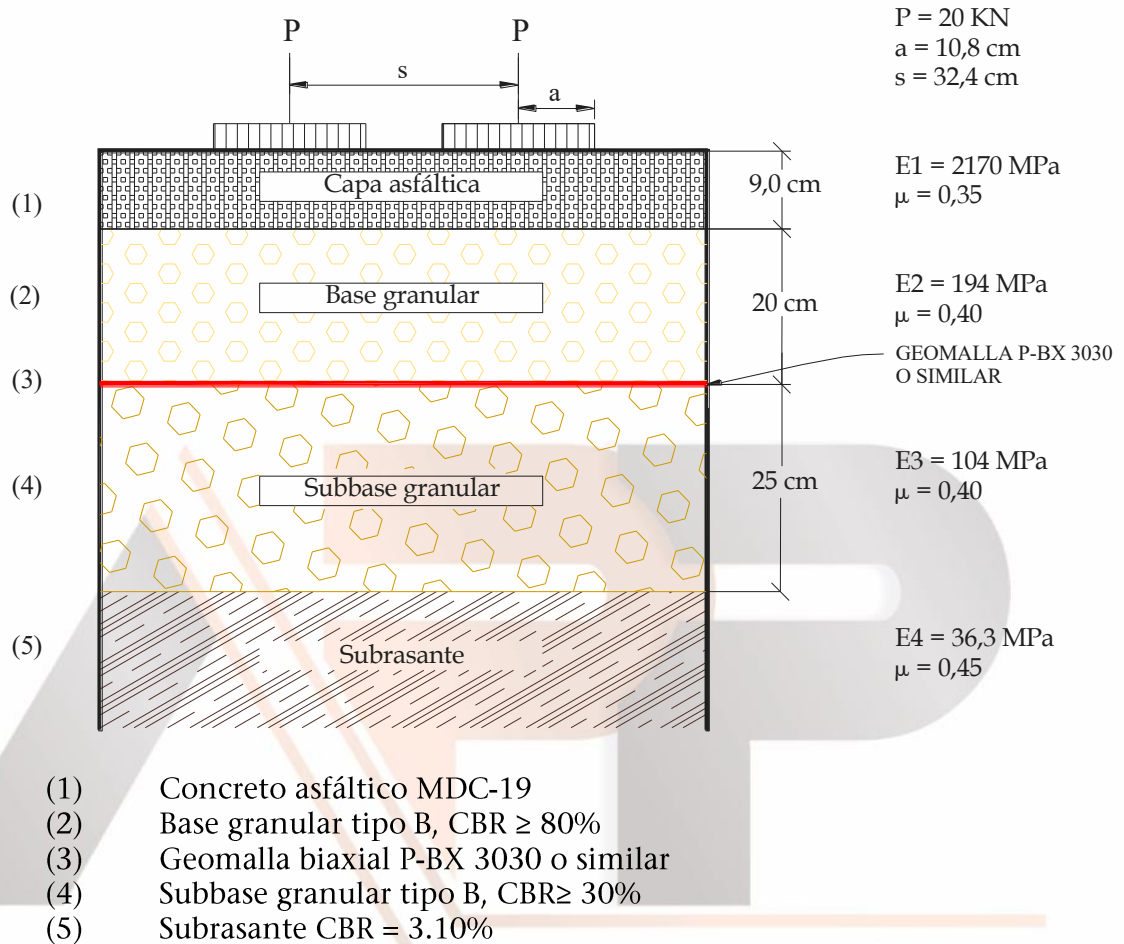
13. A continuación se presentan los modelos estructurales recomendados a implementar en el proyecto según tipo de estructura.

Esquema 10. Modelo estructural del pavimento flexible recomendado

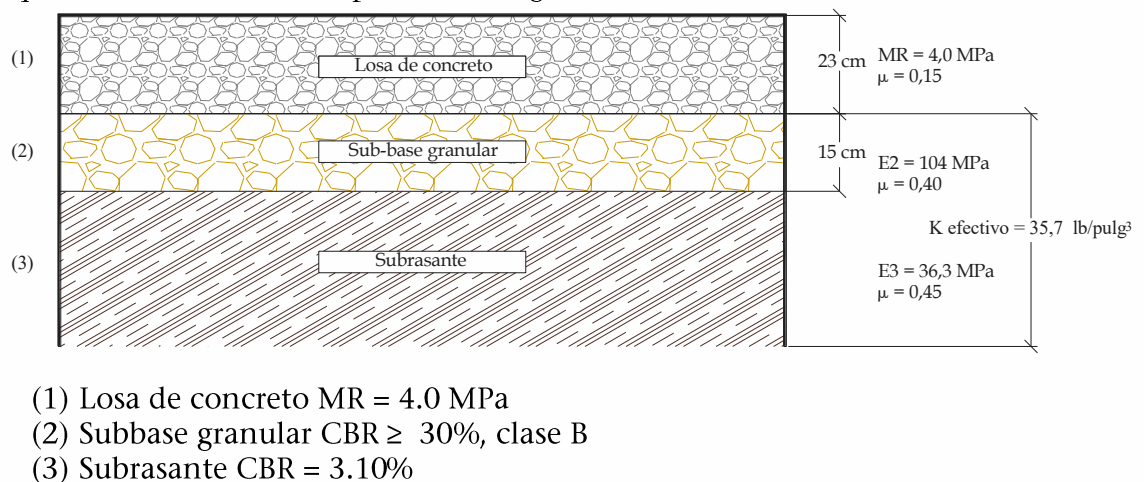


- (1) Concreto asfáltico MDC-19
- (2) Base granular tipo B, CBR  $\geq 80\%$
- (3) Subbase granular tipo B, CBR  $\geq 30\%$
- (4) Subrasante CBR = 3.10%

Esquema 11. Modelo estructural del pavimento flexible reforzado con geomalla biaxial recomendado (SELECCIONADA PARA EL PROYECTO)



Esquema 12. Estructura de pavimento rígido recomendada



## Recomendaciones

1. Se recomienda proyectar una pendiente transversal Bombeo  $\geq 2\%$  para cada uno de los materiales del pavimento, obteniendo una evacuación rápida de las aguas de escorrentía superficial y como consecuencia el buen funcionamiento de la estructura.
2. El suelo de fundación de la estructura de pavimento debe ser aprobado por el ingeniero Geotécnista o de suelos.
3. Debido a que las exploraciones de campo son puntuales, en caso de encontrar suelos con capacidades de soporte evidentemente menores a las consideradas (CBR = 3.1%), se deberán realizar las labores de mejoramiento de campo necesarias.
4. Se recomienda utilizar como producto de sellante de las juntas SIKAROAD y SIKAFLEX 1CSL o productos similares.
5. Se recomienda instalar previamente a la estructura de pavimento los diferentes sistemas de drenaje tanto superficial y subsuperficial, así como las redes de servicios públicos, para evitar futuras intervenciones a la estructura de pavimento, y con esto asegurar la vida útil de la estructura de pavimento con un adecuado nivel de servicio.
6. Durante la etapa constructiva los materiales deberán someterse a controles de calidad en cuanto a plasticidad, durabilidad, gradación, estabilidad, compactación y demás que estipulen las normas vigentes, para así garantizar el buen desempeño en conjunto con la estructura del pavimento.
7. Para que la estructura se mantenga dentro de las condiciones de durabilidad, seguridad y confort para los usuarios, es recomendable hacer un seguimiento al pavimento mediante inspecciones visuales que permitan identificar deterioros que puedan ser corregidos a tiempo y no incurrir en gastos elevados.

8. Para la etapa de replanteo se recomienda que sea dirigido por un Ingeniero Civil o de Transporte y Vías con experiencia en este tipo de proyectos.
9. Si por algún motivo es necesaria la construcción de losas irregulares, estas deben ser reforzadas con dos parrillas de barras #4 separadas cada 0.20m y de  $f'y = 420$  MPa.
10. En las zonas de transición con estructuras existentes (e4estructuras de pavimento al inicio y fin del tramo a intervenir), se deberá realizar un aumento gradual del espesor de la losa, con espesor final equivalente al 120% del espesor inicial, desarrollado en una longitud mínima de 1,5 m.



## 8 LIMITACIONES

1. Los resultados obtenidos en el informe, las conclusiones y recomendaciones dadas, están basados en el estudio de suelos adelantado por APP control ingeniería S.A.S., y condiciones de operación de tránsito esperadas para el proyecto, por lo que cualquier cambio implicará nuevas condiciones que deberán ser evaluadas en el estudio de tránsito, geotécnico y estructural del pavimento.
2. El presente informe no contempla el análisis de la mezcla asfáltica (granulometrías y contenidos de asfalto), pues no se tiene información de los materiales que se utilizaran, ni está en el alcance de la propuesta presentada.
3. El análisis de la estructura de pavimento no contempla la identificación de sitios geológicamente inestables, con deficiencias en la fundación y eventos hidrológicos que amenacen la estabilidad de la estructura.
4. Si durante la construcción de la estructura, aparecen circunstancias no previstas en este informe, se debe avisar inmediatamente al Ingeniero Consultor para buscar las soluciones y recomendaciones más convenientes.

Cordialmente.

  
CARLOS AUGUSTO VARGAS IGUA  
Ingeniero civil  
Especialista en Geotécnia vial y pavimentos  
Especialista en gerencia de proyectos de construcción  
M.P. 25202-100599 CND

Paipa, septiembre de 2 025

## 9 ANEXOS

### Lista de anexos

Anexo 1. Tablas de proyección del tránsito de diseño

Anexo 2. Determinación de SN requeridos pavimentos flexibles

Anexo 3. Espesores propuestos estructuras de pavimentos flexibles método AASHTO-93

Anexo 4. Modelaciones BISAR 3.0 de la Shell

Anexo 5. Revisión mecanicista de estructuras de pavimentos flexibles

Anexo 6. Determinación módulo de reacción afectivo de la subrasante K<sub>f</sub>

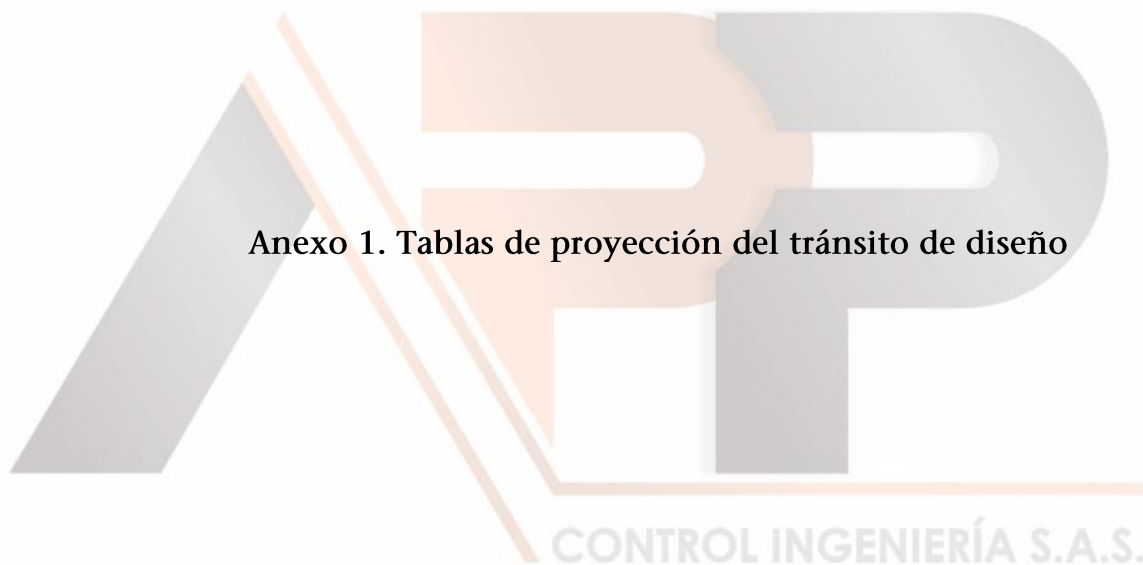
Anexo 7. Determinación del espesor de la losa, ecuación AASHTO pavimentos rígidos

Anexo 8. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Esfuerzos)

Anexo 9. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Deflexiones)

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

## Anexo 1. Tablas de proyección del tránsito de diseño



## Tránsito pavimento flexible

| TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL               |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     |       |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| TRÁNSITO<br>PROMEDIO<br>DIARIO SOBRE<br>LA VÍA | TIPO DE VEHÍCULO                                                                  |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     | TOTAL |
|                                                | AUTOS                                                                             | BUSES                                                                             | C2- P                                                                             | C2- G                                                                             | C3 - C4                                                                            | C5                                                                                  | >C5                                                                                 |       |
|                                                |  |  |  |  |  |  |  |       |
|                                                | TPDS                                                                              | 1255                                                                              | 112                                                                               | 44                                                                                | 25                                                                                 | 3                                                                                   | 0                                                                                   |       |
| % TIPO DE<br>VEHÍCULO                          | 87.2%                                                                             | 7.8%                                                                              | 3.1%                                                                              | 1.7%                                                                              | 0.2%                                                                               | 0.0%                                                                                | 0.0%                                                                                | 1439  |
|                                                |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |                                                                                     | 100%  |

| Factores adoptados y cálculo de factor camión |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| F. Direcc, Fd                                 | 1.00  |
| F. Distrib, Fca                               | 0.75  |
| Parámetro Zr                                  | 1.037 |
| F. Camión Fc                                  | 1.04  |

| Tránsito de diseño pavimento Flexible                               |         |           |           |           |
|---------------------------------------------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%) | 5.0%    |           |           |           |
| Nivel de Confianza, (Nc)                                            | 85%     |           |           |           |
| Valor del parámetro Zr                                              | 1.037   |           |           |           |
| Periodo de diseño, n                                                | 5       | 10        | 15        | 20        |
| Fp                                                                  | 5.66    | 12.89     | 22.11     | 33.89     |
| N                                                                   | 296 807 | 675 945   | 1 159 437 | 1 777 173 |
| Tránsito atraído, Tat                                               | 44 521  | 101 392   | 173 916   | 266 576   |
| Tránsito generado, TG                                               | 44 521  | 101 392   | 173 916   | 266 576   |
| Tránsito desarrollado, TD                                           | 14 840  | 33 797    | 57 972    | 88 859    |
| N <sub>Dis</sub>                                                    | 400 689 | 912 526   | 1 565 240 | 2 399 184 |
| N' = N * 1.127                                                      | 451 500 | 1 028 242 | 1 763 725 | 2 703 420 |

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

## Tránsito pavimento rígido

| TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO SEMANAL               |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |       |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| TRÁNSITO<br>PROMEDIO<br>DIARIO SOBRE<br>LA VÍA | TIPO DE VEHÍCULO                                                                  |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     | TOTAL |
|                                                | AUTOS                                                                             | BUSES                                                                             | C2- P                                                                             | C2- G                                                                             | C3 - C4                                                                           | C5                                                                                 | >C5                                                                                 |       |
|                                                |  |  |  |  |  |  |  |       |
| TPDS                                           | 1255                                                                              | 112                                                                               | 44                                                                                | 25                                                                                | 3                                                                                 | 0                                                                                  | 0                                                                                   | 1439  |
| % TIPO DE<br>VEHÍCULO                          | 87.2%                                                                             | 7.8%                                                                              | 3.1%                                                                              | 1.7%                                                                              | 0.2%                                                                              | 0.0%                                                                               | 0.0%                                                                                | 100%  |

| Factores adoptados y cálculo de factor camión |          |          |          |
|-----------------------------------------------|----------|----------|----------|
|                                               | D=175 mm | D=200 mm | D=225 mm |
| F. Direcc, Fd                                 | 1.00     | 1.00     | 1.00     |
| F. Distrib, Fca                               | 0.75     | 0.75     | 0.75     |
| Parámetro Zr                                  | 1.037    | 1.037    | 1.037    |
| F. Camión Fc                                  | 0.85     | 0.85     | 0.86     |

| Tránsito de diseño pavimento rígidos D = 175 mm                     |         |         |           |           |
|---------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%) | 5.0%    |         |           |           |
| Nivel de Confianza, (Nc)                                            | 85%     |         |           |           |
| Valor del parámetro Zr                                              | 1.037   |         |           |           |
| Periodo de diseño, n                                                | 5       | 10      | 15        | 20        |
| Fp                                                                  | 5.66    | 12.89   | 22.11     | 33.89     |
| N                                                                   | 245 921 | 560 057 | 960 657   | 1 472 486 |
| Tránsito atraído, Tat                                               | 36 888  | 84 009  | 144 099   | 220 873   |
| Tránsito generado, TG                                               | 36 888  | 84 009  | 144 099   | 220 873   |
| Tránsito desarrollado, TD                                           | 12 296  | 28 003  | 48 033    | 73 624    |
| N <sub>Dis</sub>                                                    | 331 993 | 756 077 | 1 296 887 | 1 987 856 |
| N' = N * 1.127                                                      | 374 093 | 851 954 | 1 461 343 | 2 239 933 |

| Tránsito de diseño pavimento rígidos D = 200mm                      |         |         |           |           |
|---------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Crecimiento Normal del tránsito durante el periodo de diseño, r (%) | 5.0%    |         |           |           |
| Nivel de Confianza, (Nc)                                            | 85%     |         |           |           |
| Valor del parámetro Zr                                              | 1.037   |         |           |           |
| Periodo de diseño, n                                                | 5       | 10      | 15        | 20        |
| Fp                                                                  | 5.66    | 12.89   | 22.11     | 33.89     |
| N                                                                   | 246 373 | 561 087 | 962 423   | 1 475 193 |
| Tránsito atraído, Tat                                               | 36 956  | 84 163  | 144 363   | 221 279   |
| Tránsito generado, TG                                               | 36 956  | 84 163  | 144 363   | 221 279   |
| Tránsito desarrollado, TD                                           | 12 319  | 28 054  | 48 121    | 73 760    |
| N <sub>Dis</sub>                                                    | 332 604 | 757 467 | 1 299 271 | 1 991 511 |
| N' = N * 1.127                                                      | 374 780 | 853 521 | 1 464 029 | 2 244 050 |

| Tránsito de diseño pavimento rígidos D = 225 mm |         |         |           |           |
|-------------------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Crecimiento Normal del tránsito durante el      | 5.0%    |         |           |           |
| Nivel de Confianza, (Nc)                        | 85%     |         |           |           |
| Valor del parámetro Zr                          | 1.037   |         |           |           |
| Periodo de diseño, n                            | 5       | 10      | 15        | 20        |
| Fp                                              | 5.66    | 12.89   | 22.11     | 33.89     |
| N                                               | 250 254 | 569 924 | 977 582   | 1 498 428 |
| Tránsito atraído, Tat                           | 37 538  | 85 489  | 146 637   | 224 764   |
| Tránsito generado, TG                           | 37 538  | 85 489  | 146 637   | 224 764   |
| Tránsito desarrollado, TD                       | 12 513  | 28 496  | 48 879    | 74 921    |
| N <sub>Dis</sub>                                | 337 843 | 769 397 | 1 319 736 | 2 022 878 |
| N' = N * 1.127                                  | 380 684 | 866 963 | 1 487 089 | 2 279 395 |

## Anexo 2. Determinación de SN requeridos pavimentos flexibles

**Ecuación AASHTO 93**

Tipo de Pavimento  
☒ Pavimento flexible ☐ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)  
 85 % Zr=-1.037 So 0.45

Serviciabilidad inicial y final  
 PSI inicial 4.2 PSI final 2

Módulo resiliente de la subrasante  
 Mr 5271 psi

Información adicional para pavimentos rígidos  
 Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi)   
 Módulo de rotura del concreto - Sc (psi)   
 Coeficiente de transmisión de carga - (J)   
 Coeficiente de drenaje - (Cd)

Tipo de Análisis  
☒ Calcular SN **W18 =** 1028242  
☐ Calcular W18

Número Estructural  
**SN =** 3.63

Calcular Salir

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

### Anexo 3. Espesores propuestos estructuras de pavimentos flexibles método AASHTO-93

#### Alternativa 1

| Capa               | Coefficiente estructural, $a_i$ | Espesor, $h_i$ (pulg) | Espesor, $h_i$ (cm) | Coefficiente de drenaje, $m_i$ | SN $a_i \cdot h_i \cdot m_i$ |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Concreto Asfáltico | 0.37                            | 3.15                  | 8                   |                                | 1.17                         |
| Base granular      | 0.13                            | 5.91                  | 15                  | 1                              | 0.77                         |
| Subbase granular   | 0.11                            | 21.65                 | 55                  | 0.8                            | 1.91                         |

|             |      |        |               |      |
|-------------|------|--------|---------------|------|
| SN tránsito | 3.63 | $\leq$ | SN estructura | 3.84 |
|-------------|------|--------|---------------|------|

Cumple la condición

#### Alternativa 2

| Capa               | Coefficiente estructural, $a_i$ | Espesor, $h_i$ (pulg) | Espesor, $h_i$ (cm) | Coefficiente de drenaje, $m_i$ | SN $a_i \cdot h_i \cdot m_i$ |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Concreto Asfáltico | 0.37                            | 3.54                  | 9                   |                                | 1.31                         |
| Base granular      | 0.13                            | 7.87                  | 20                  | 1                              | 1.02                         |
| Subbase granular   | 0.11                            | 17.72                 | 45                  | 0.8                            | 1.56                         |

|             |      |        |               |      |
|-------------|------|--------|---------------|------|
| SN tránsito | 3.63 | $\leq$ | SN estructura | 3.89 |
|-------------|------|--------|---------------|------|

Cumple la condición

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

Anexo 4. Modelaciones BISAR 3.0 de la Shell

| <div><div>BISAR 3.0 - Block Report</div><div>Urbanas Paipa 2025 - T5</div><div>System 1: Alternativa 1</div></div> |               |                             |                 |             |           |                       |                              |            |                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------|-------------|-----------|-----------------------|------------------------------|------------|-----------------------|
| Loads                                                                                                                                                                                                 |               |                             |                 |             |           |                       |                              |            |                       |
| Structure                                                                                                                                                                                             |               |                             |                 |             |           |                       |                              |            |                       |
| Layer Number                                                                                                                                                                                          | Thickness (m) | Modulus of Elasticity (MPa) | Poisson's Ratio | Load Number | Load (kN) | Vertical Stress (MPa) | Horizontal (Shear) Load (kN) |            | Shear Angle (Degrees) |
|                                                                                                                                                                                                       |               |                             |                 |             |           |                       | Stress (MPa)                 | Radius (m) |                       |
| 1                                                                                                                                                                                                     | 0.080         | 2.170E+03                   | 0.35            | 1           | 2.000E+01 | 5.458E-01             | 0.000E+00                    | 1.080E-01  | 0.000E+00             |
| 2                                                                                                                                                                                                     | 0.150         | 1.520E+02                   | 0.40            | 2           | 2.000E+01 | 5.458E-01             | 0.000E+00                    | 1.080E-01  | 1.620E-01             |
| 3                                                                                                                                                                                                     | 0.550         | 1.040E+02                   | 0.40            |             |           |                       |                              |            | 0.000E+00             |
| 4                                                                                                                                                                                                     |               | 3.630E+01                   | 0.45            |             |           |                       |                              |            | 0.000E+00             |

| Position Number | Layer Number | X-Coord (m) | Y-Coord (m) | Depth (m) | Stresses   |            |            | Strains         |                 |                 | Displacements |               |               |
|-----------------|--------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|
|                 |              |             |             |           | XX (MPa)   | YY (MPa)   | ZZ (MPa)   | XX $\mu$ strain | YY $\mu$ strain | ZZ $\mu$ strain | UX ( $\mu$ m) | UY ( $\mu$ m) | UZ ( $\mu$ m) |
| 1               | 1            | 0.000E+00   | 1.620E-01   | 0.000E+00 | -1.600E+00 | -1.393E+00 | -5.458E-01 | -4.248E+02      | -2.958E+02      | 2.313E+02       | 0.000E+00     | -2.349E+01    | 7.823E+02     |
| 2               | 1            | 0.000E+00   | 1.620E-01   | 8.000E-02 | 1.042E+00  | 8.611E-01  | -2.270E-01 | 3.781E+02       | 2.653E+02       | -4.116E+02      | 0.000E+00     | 1.362E+01     | 7.742E+02     |
| 3               | 4            | 0.000E+00   | 0.000E+00   | 7.801E-01 | 5.277E-05  | -3.388E-04 | -1.418E-02 | 1.815E+02       | 1.658E+02       | -3.872E+02      | 0.000E+00     | 0.000E+00     | 4.453E+02     |



**BISAR 3.0 - Block Report**  
**Urbanas Paipa 2025 - T5**  
**System 2: Alternativa 2**

**Structure**

**Loads**

| Layer<br>Number | Thickness<br>(m) | Modulus of<br>Elasticity<br>(MPa) | Poisson's<br>Ratio | Vertical     |                 | Horizontal (Shear) |                 | Radius<br>(m) | X-Coord<br>(m) | Y-Coord<br>(m) | Shear<br>Angle<br>(Degrees) |
|-----------------|------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------|----------------|----------------|-----------------------------|
|                 |                  |                                   |                    | Load<br>(kN) | Stress<br>(MPa) | Load<br>(kN)       | Stress<br>(MPa) |               |                |                |                             |
| 1               | 0.090            | 2.170E+03                         | 0.35               | 1            | 2.000E+01       | 5.458E-01          | 0.000E+00       | 1.080E-01     | 0.000E+00      | -1.620E-01     | 0.000E+00                   |
| 2               | 0.200            | 1.920E+02                         | 0.40               | 2            | 2.000E+01       | 5.458E-01          | 0.000E+00       | 1.080E-01     | 0.000E+00      | 1.620E-01      | 0.000E+00                   |
| 3               | 0.450            | 1.040E+02                         | 0.40               |              |                 |                    |                 |               |                |                |                             |
| 4               |                  | 3.630E+01                         | 0.45               |              |                 |                    |                 |               |                |                |                             |

| Position<br>Number | Layer<br>Number | X-Coord<br>(m) | Y-Coord<br>(m) | Depth<br>(m) | Stresses    |             |             | Strains       |               |               | Displacements |            |            |
|--------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|------------|
|                    |                 |                |                |              | XX<br>(MPa) | YY<br>(MPa) | ZZ<br>(MPa) | XX<br>μstrain | YY<br>μstrain | ZZ<br>μstrain | UX<br>(μm)    | UY<br>(μm) | UZ<br>(μm) |
| 1                  | 1               | 0.000E+00      | 1.620E-01      | 0.000E+00    | -1.462E+00  | -1.272E+00  | -5.458E-01  | -3.804E+02    | -2.623E+02    | 1.893E+02     | 0.000E+00     | -2.295E+01 | 7.438E+02  |
| 2                  | 1               | 0.000E+00      | 1.620E-01      | 9.000E-02    | 9.542E-01   | 7.810E-01   | -2.028E-01  | 3.465E+02     | 2.387E+02     | -3.733E+02    | 0.000E+00     | 1.409E+01  | 7.344E+02  |
| 3                  | 4               | 0.000E+00      | 0.000E+00      | 7.401E-01    | 8.824E-05   | -3.424E-04  | -1.469E-02  | 1.887E+02     | 1.715E+02     | -4.014E+02    | 0.000E+00     | 0.000E+00  | 4.543E+02  |

Código:  
INF-DIPAV-195-05  
Versión: 01  
Fecha: Sept 2025

## Anexo 5. Revisión mecanicista de estructuras de pavimentos flexibles

### Alternativa 1

| CRITERIO                                                                     | VALOR ADMISIBLE       |                           | VALOR DE SERVICIO | (VS/VA) *100% | CUMPLE O NO CUMPLE |        |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|---------------|--------------------|--------|
| DEFORMACIÓN RADIAL ADMISIBLE POR TRACCIÓN EN LA BASE DE LA CARPETA ASFÁLTICA | εr Admisible=         |                           | 4.54E-04          | 3.78E-04      | 83                 | CUMPLE |
| DEFORMACIÓN VERTICAL ADMISIBLE POR COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE            | εz Admisible (NC=85%) |                           | 6.59E-04          | 3.87E-04      | 58.7               | CUMPLE |
| ESFUERZO VERTICAL ADMISIBLE DE COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE                | σz Admisible=         | DORMON-KERHOVEN,(Kg/cm²)= | 0.488             | 0.145         | 29.6               | CUMPLE |
|                                                                              |                       | CRR de BÉLGICA,(Kg/cm²)=  | 0.157             | 0.145         | 92.2               | CUMPLE |
| DEFLEXIÓN ADMISIBLE DEL MODELO ESTRUCTURAL                                   | Δ Admisible, (mm)=    |                           | 0.901             | 0.782         | 86.9               | CUMPLE |

### Alternativa 2

| CRITERIO                                                                     | VALOR ADMISIBLE                 |                                         | VALOR DE SERVICIO | (VS/VA) *100% | CUMPLE O NO CUMPLE |        |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------|--------------------|--------|
| DEFORMACIÓN RADIAL ADMISIBLE POR TRACCIÓN EN LA BASE DE LA CARPETA ASFÁLTICA | $\epsilon_r$ Admisible=         | 4.54E-04                                | 3.47E-04          | 76            | CUMPLE             |        |
| DEFORMACIÓN VERTICAL ADMISIBLE POR COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE            | $\epsilon_z$ Admisible (NC=85%) | 6.59E-04                                | 4.01E-04          | 60.9          | CUMPLE             |        |
| ESFUERZO VERTICAL ADMISIBLE DE COMPRESIÓN SOBRE LA SUBRASANTE                | $\sigma_z$ Admisible=           | DORMON-KERHOVEN, (Kg/cm <sup>2</sup> )= | 0.488             | 0.150         | 30.7               | CUMPLE |
|                                                                              |                                 | CRR de BÉLGICA, (Kg/cm <sup>2</sup> )=  | 0.157             | 0.150         | 95.5               | CUMPLE |
| DEFLEXIÓN ADMISIBLE DEL MODELO ESTRUCTURAL                                   | $\Delta$ Admisible, (mm)=       | 0.901                                   | 0.744             | 82.6          | CUMPLE             |        |

## Anexo 6. Determinación módulo de reacción afectivo de la subrasante Kef

**Módulo de Reacción Efectivo de la Subrasa...**

Archivo Resultados Ayuda

**MÓDULO DE REACCIÓN DE LA SUBRASANTE  
METODO AASHTO 1993**

Unidades:  
☒ U.S. ☐ S.I.

Módulo Resiliente de la Subrasante, Mr: 5271 lb/pulg<sup>2</sup>

Módulo de Reaccion de la Subrasante, Ks: 100.4 lb/pulg<sup>2</sup> ¿Ks?

Espesor de la Subbase Granular, Dsb: 6 pulgadas

Módulo de la Subbase Granular, Esb: 15157 lb/pulg<sup>2</sup>

☐ Estrato Rocoso

Espesor Estimado Losa de Concreto, D: 9 pulgadas

Pérdida de Soporte, Ls: 1.5 ¿Ls?

Salir Reporte **Calcular**

Módulo de Reacción Compuesto, Kc: 267.5 lb/pulg<sup>2</sup>

| Valores de K<br>(lb/pulg <sup>2</sup> ) | Daño Relativo<br>Ur |
|-----------------------------------------|---------------------|
| Ks 100.4                                | 110.8               |
| Kc 267.5                                | 81.3                |

Daño Relativo Promedio,  $\bar{U}_r$ : 96.1

Módulo de Reacción Promedio,  $\bar{K}_c$ : 164.4 lb/pulg<sup>2</sup>

**Módulo Efectivo de Reacción, Kef:** 35.7 lb/pulg<sup>2</sup>

## Anexo 7. Determinación del espesor de la losa, ecuación AASHTO pavimentos rígido

**Ecuación AASHTO 93**

Tipo de Pavimento  
☐ Pavimento flexible ☒ Pavimento rígido

Confiabilidad (R) y Desviación estándar (So)  
 85 % Zr=-1.037 So 0.35

Serviciabilidad inicial y final  
 PSI inicial 4.5 PSI final 2

Módulo de reacción de la subrasante  
 k 35.7 pci

Información adicional para pavimentos rígidos

Módulo de elasticidad del concreto - Ec (psi) 2851613 Coeficiente de transmisión de carga - (J) 2.8

Módulo de rotura del concreto - Sc (psi) 582.9 Coeficiente de drenaje - (Cd) 0.8

Tipo de Análisis  
☒ Calcular D **W18 =** 2279395

Esesor de losa (plg)  
**D =** 8.8

Calcular Salir

CONTROL INGENIERÍA S.A.S.

## Anexo 8. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto (Esfuerzos)

| Posición en la losa | Autor             | Esfuerzo de tensión (lb/pulg <sup>2</sup> ) | Módulo de rotura del concreto, Sc (lb/pulg <sup>2</sup> ) | ( $\sigma/Sc$ ) * 100% |
|---------------------|-------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|
| Esquina             | Westergard        | 270.97                                      | 582.9                                                     | 46.5                   |
|                     | Ioannides y otros | 275.45                                      |                                                           | 47.3                   |
| Interior            | Westergard        | 211.10                                      |                                                           | 36.2                   |
| Borde               | Westergard        | 322.05                                      |                                                           | 55.2                   |



**Anexo 9. Verificación de estados tensionales en la losa de concreto  
(Deflexiones)**

| Posición en la losa | Autor             | Deflexión (pulg) | Deflexión (mm) |
|---------------------|-------------------|------------------|----------------|
| Esquina             | Westergard        | 0.1386           | 3.52           |
|                     | Ioannides y otros | 0.1667           | 4.235          |
| Interior            | Westergard        | 0.0187           | 0.474          |
| Borde               | Westergard        | 0.0573           | 1.455          |

