# INFORME DE DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS

## PROYECTO: CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE CHAGUANÍ, CUNDINAMARCA.

**MUNICIPIO DE CHAGUANÍ, CUNDINAMARCA**

**JUNIO DE 2026**

# Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN ..... 5
2. OBJETIVOS ..... 6
2.1. Objetivo General ..... 6
2.2. Objetivos Específicos ..... 6
3. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ..... 7
3.1. INFORMACIÓN BÁSICA EL PROYECTO ..... 9
4. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO ..... 10
4.1. PAVIMENTOS RÍGIDOS ..... 10
4.2. GEOTECNIA APLICADA A PAVIMENTOS ..... 11
4.3. TRANSITO DE DISEÑO ..... 13
4.4. CAPACIDAD DE SOPORTE – CBR ..... 14
4.5. MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE ..... 16
4.6. BASES GRANULARES ..... 17
4.7. CONCRETO HIDRÁULICO Y MODULO DE ROTURA (MR) ..... 19
4.8. TRANSFERENCIA DE CARGA Y CONFINAMIENTO LATERAL ..... 21
4.9. JUNTAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS ..... 23
4.10. CONSIDERACIÓN HIDRÁULICAS Y DRENAJE ..... 25
4.11. NORMATIVA APLICABLE ..... 27
5. INFORMACIÓN TÉCNICA DISPONIBLE ..... 28
5.1. ESTUDIO GEOTÉCNICO ..... 29
5.2. ESTUDIO GEOLÓGICO ..... 30
5.3. ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO ..... 31
5.4. INFORMACIÓN GEOMÉTRICA ..... 32
5.5. INFORMACIÓN DE TRANSITO ..... 33
6. TRABAJOS DE CAMPO Y ENSAYOS ..... 34
6.1. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA ..... 34
6.2. ENSAYOS DE LABORATORIO ..... 36
6.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MATERIALES ..... 37
6.4. DETERMINACIÓN DEL CBR ..... 38
6.5. CLASIFICACIÓN DE SUBRASANTE ..... 40

7. PARÁMETROS DE DISEÑO ..... 41
7.1. TRANSITO DE DISEÑO ..... 43
7.2. SUBRASANTE DE DISEÑO ..... 44
7.3. MATERIAL DE SOPORTE PARA EL PAVIMENTO ..... 45
7.4. TRANSFERENCIA DE CARGA Y CONFINAMIENTO LATERAL ..... 46
7.5. RESISTENCIA DEL CONCRETO – MODULO DE ROTURA (MR) ..... 48
7.6. PERIODO DE DISEÑO Y CRITERIOS METODOLÓGICOS ..... 49
8. DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO ..... 51
8.1. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN ESTRUCTURAL ..... 51
8.2. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y SELECCIÓN ESTRUCTURAL ..... 52
9. VALIDACIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE “UNALOSA” ..... 54
10. CONCLUSIONES ..... 65
11. RECOMENDACIONES ..... 67
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 69

Tabla 1: Coordenadas tramo ..... 7
Tabla 2. Información Básica Corredor ..... 10
Tabla 3: Descripción variables CBR ..... 15
Tabla 4: Valores CBR ..... 15
Tabla 5: Variables Correlación ..... 17
Tabla 6: Variables ecuación MR ..... 20
Tabla 7: Normativa aplicable ..... 28
Tabla 8: Especificaciones INVIAS ..... 28
Tabla 9: Localización Apiques ..... 35
Tabla 10: Ensayos de Laboratorio ..... 36
Tabla 11: Caracterización Materiales ..... 38
Tabla 12: Valores CBR % ..... 39
Tabla 13: Parámetros de diseño adoptados para el proyecto (Autor) ..... 42
Tabla 14: Parámetros de tránsito adoptados para diseño (Autor) ..... 43
Tabla 15: Parámetros de subrasante adoptados para diseño (Autor) ..... 45
Tabla 16: Material de soporte adoptado para diseño (Autor) ..... 46
Tabla 17:Condiciones de transferencia de carga y confinamiento lateral Fuente: Adaptado de INVÍAS – ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito. ..... 47
Tabla 18: Condiciones adoptadas para el proyecto (Autor) ..... 47

Tabla 19: Clasificación de resistencias del concreto (MR). Fuente: Adaptado de INVÍAS – ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito. ..... 48
Tabla 20: Resistencia de concreto adoptada para diseño (Autor) ..... 49
Tabla 21: Criterios metodológicos adoptados para diseño (Autor) ..... 50
Tabla 22: Variables adoptadas para selección estructural (Autor) ..... 51
Tabla 23:Alternativas estructurales evaluadas. Fuente: Adaptado de INVÍAS – ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito. .. 53
Tabla 24: Estructura de pavimento adoptada para el proyecto. (Autor) ..... 54
Tabla 25: Parámetros de entrada utilizados en UNALOSA (Autor) ..... 55
Tabla 26: Interfaz Datos de entrada UNALOSA. (UNALOSA) ..... 55
Tabla 27: Resultados principales de modelación estructural mediante UNALOSA. Fuente: Elaboración propia con base en resultados obtenidos en UNALOSA. ..... 60
Tabla 28: Resultados Calculo UNALOSA interfaz. (UNALOSA) ..... 61

Ilustración 1: Localización General ..... 8
Ilustración 2: Localización Especifica ..... 8

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe técnico tiene como finalidad desarrollar el diseño estructural de pavimento para el proyecto denominado **CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE CHAGUANÍ, CUNDINAMARCA,** el cual contempla la construcción de infraestructura vial bajo condiciones y parámetros definidos según las necesidades funcionales y operacionales del corredor proyectado.

El diseño de pavimento constituye una de las etapas fundamentales dentro de la planeación y desarrollo de proyectos viales, debido a que permite definir una estructura capaz de soportar adecuadamente las cargas generadas por el tránsito vehicular y las condiciones propias del terreno de fundación, garantizando condiciones apropiadas de estabilidad, funcionalidad, durabilidad y seguridad durante el periodo de servicio de la vía.

Para el desarrollo del presente informe se consideran criterios técnicos asociados al análisis del tránsito proyectado, las características geotécnicas de la subrasante, el comportamiento mecánico de los materiales de soporte y las propiedades estructurales de los materiales que conforman el pavimento, teniendo en cuenta la normativa, manuales y metodologías aplicables para vías de bajo volumen de tránsito.

De igual manera, el documento presenta el análisis de los datos de entrada requeridos para el diseño, el soporte teórico y normativo de los parámetros considerados, la evaluación de alternativas estructurales y la definición de la estructura de pavimento adoptada para el proyecto, conforme a las condiciones particulares identificadas durante el proceso de análisis.

Finalmente, el informe consolida las consideraciones técnicas necesarias para la selección de la solución de pavimento propuesta, incluyendo recomendaciones constructivas y criterios generales que permitan garantizar el adecuado desempeño de la estructura durante su vida útil de servicio.

2. OBJETIVOS

## 2.1. Objetivo General

Desarrollar el diseño estructural de pavimento para el proyecto **CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE CHAGUANÍ, CUNDINAMARCA**, mediante el análisis de las condiciones de tránsito, características geotécnicas de la subrasante, propiedades de los materiales y criterios técnicos aplicables, con el fin de definir una estructura de pavimento funcional, estable y acorde con las condiciones del proyecto.

## 2.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar la información técnica requerida para el desarrollo del diseño estructural de pavimento.
- Evaluar las condiciones de tránsito y los parámetros de diseño asociados al corredor vial objeto del proyecto.
- Analizar las características geotécnicas y de capacidad de soporte de la subrasante, considerando los parámetros obtenidos mediante estudios y ensayos aplicables.
- Desarrollar el marco teórico y normativo relacionado con el diseño de pavimentos, incluyendo criterios técnicos asociados a materiales, comportamiento estructural y parámetros de diseño.
- Evaluar alternativas de estructura de pavimento de acuerdo con las condiciones del proyecto y los criterios establecidos en la metodología de diseño adoptada.
- Definir la estructura de pavimento recomendada para el proyecto, considerando aspectos de funcionalidad, estabilidad, comportamiento estructural y viabilidad constructiva.
- Establecer recomendaciones técnicas generales para la correcta ejecución y desempeño de la estructura de pavimento proyectada.

## 3. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto **"CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE CHAGUANÍ, CUNDINAMARCA."** se encuentra localizado en el municipio de **CHAGUANÍ**, departamento de **CUNDINAMARCA**, y contempla la intervención de un corredor vial urbano destinado a mejorar las condiciones de movilidad, transitabilidad y funcionalidad de la infraestructura existente o proyectada.

La intervención comprende la ejecución de obras de pavimento rígido, adecuación de la subrasante, construcción de capas de soporte, elementos de confinamiento lateral y obras de drenaje requeridas para el adecuado funcionamiento de la infraestructura vial.

El proyecto contempla el desarrollo de las actividades requeridas para la conformación de la estructura de pavimento, incluyendo las obras preliminares, adecuación de la subrasante, conformación de capas de soporte, construcción de la estructura de pavimento y demás elementos complementarios necesarios para garantizar el adecuado funcionamiento de la vía proyectada, así como las debidas obras hidráulicas requeridas para el manejo, conducción y evacuación adecuada de las aguas superficiales y/o de escorrentía presentes en el sector de intervención.

La localización del corredor vial y las condiciones geométricas generales del proyecto fueron definidas con base en los requerimientos funcionales del sector y las necesidades de conectividad y movilidad identificadas para la zona de intervención.

De igual manera, el presente informe se enfoca en el análisis y diseño de la estructura de pavimento requerida para el corredor vial proyectado, considerando las condiciones de tránsito, capacidad portante del terreno y parámetros técnicos aplicables al tipo de vía objeto de estudio.

| TRAMO | INICIO | | | | FIN | | | | LONGITUD |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ESTE | NORTE | LONGITUD | LATITUD | ESTE | NORTE | LONGITUD | LATITUD | |
| 1 | 4823390.0643m | 2105141.8740m | W74° 35' 36.54" | N4° 56' 58.76" | 4823281.2514m | 2105131.5491m | W74° 35' 40.07" | N4° 56' 58.42" | 106 |
| 2 | 4823344.0677m | 2105079.2071m | W74° 35' 38.03" | N4° 56' 56.72" | 4823352.1103m | 2105127.9016m | W74° 35' 37.77" | N4° 56' 58.30" | 52 |
| 3 | 4823392.3486m | 2105081.4856m | W74° 35' 36.46" | N4° 56' 56.79" | 4823357.4715m | 2105111.5052m | W74° 35' 37.60" | N4° 56' 57.77" | 52 |

*Tabla 1: Coordenadas tramo*




*Ilustración 1: Localización General*




*Ilustración 2: Localización Especifica*

### 3.1. INFORMACIÓN BÁSICA EL PROYECTO

El corredor vial objeto del presente estudio corresponde a una vía urbana proyectada en pavimento rígido, localizada en el municipio de **CHAGUANÍ**, departamento de **CUNDINAMARCA**. El proyecto contempla la construcción de una estructura de pavimento en concreto hidráulico sobre un corredor de bajo volumen de tránsito, destinada a mejorar las condiciones de movilidad, accesibilidad y conectividad del sector intervenido.

La intervención comprende la construcción de una infraestructura vial con una longitud aproximada de **210 m**, incluyendo las actividades necesarias para la conformación de la estructura de pavimento, adecuación de la subrasante, construcción de elementos de confinamiento lateral y ejecución de las obras hidráulicas requeridas para garantizar el adecuado manejo de las aguas superficiales.

De acuerdo con la información recopilada durante la etapa de estudios y diseños, el corredor presenta las condiciones geométricas y funcionales requeridas para el desarrollo del presente proyecto, las cuales constituyen la base para el análisis y diseño de la estructura de pavimento que se desarrolla en los capítulos posteriores de este informe.

| Ítem | Descripción |
|---|---|
| Proyecto | CONSULTORÍA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA EL MEJORAMIENTO DE VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE CHAGUANÍ, CUNDINAMARCA |
| Ubicación | CHAGUANÍ- CUNDINAMARCA |
| Tipo de intervención | CONSTRUCCIÓN |
| Tipo de vía | URBANA |
| Tipo de pavimento proyectado | Pavimento rígido en concreto hidráulico |
| Longitud aproximada del corredor | 210m |
| Ancho de calzada | 6,00 m |
| Número de calzadas/carriles | **1 / 2** |
| Sentido vial | DOBLE |
| Tipo de tránsito | Bajo volumen de tránsito |

| | |
|---|---|
| Obras | Construcción de bordillos, ejecución de sumideros transversales, y demás obras complementarias para el manejo y conducción de aguas superficiales. |
| Condiciones de soporte analizadas | Subrasante + Mejoramiento + Base granular |
| Método general de diseño | Diseño de pavimento rígido mediante metodología para vías de bajo volumen de tránsito |
| Fuente normativa principal | Manuales y especificaciones técnicas del INVÍAS vigentes aplicables al diseño de pavimentos rígidos y obras viales |

*Tabla 2. Información Básica Corredor*

# 4. MARCO TEÓRICO Y NORMATIVO

## 4.1. PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los pavimentos rígidos son estructuras conformadas principalmente por una losa de concreto hidráulico apoyada sobre una capa granular o sobre una estructura de soporte previamente acondicionada, diseñada con el propósito de resistir y distribuir las cargas generadas por el tránsito vehicular hacia las capas inferiores del pavimento y la subrasante.

El comportamiento estructural de los pavimentos rígidos se fundamenta en la alta rigidez de la losa de concreto, la cual permite distribuir las cargas sobre un área considerablemente mayor en comparación con los pavimentos flexibles, reduciendo así los esfuerzos transmitidos al terreno de fundación. Debido a esta condición, las deformaciones producidas sobre la subrasante son menores y el comportamiento estructural depende en gran medida de la resistencia a la flexión del concreto y de las condiciones de soporte de la estructura.

De acuerdo con Huang (2004), el pavimento rígido puede modelarse estructuralmente como una placa apoyada sobre una fundación elástica, donde la capacidad de soporte del sistema depende de la interacción entre la losa de concreto y las capas inferiores de apoyo.

La teoría clásica de Westergaard establece que las losas de concreto experimentan esfuerzos de flexión generados por las cargas vehiculares, los cuales pueden analizarse principalmente en tres condiciones críticas:

- Carga en el interior de la losa.
- Carga en el borde.
- Carga en la esquina.

Estas condiciones permiten evaluar el comportamiento estructural del pavimento frente a diferentes posiciones de carga y son ampliamente utilizadas en metodologías de análisis y modelación de pavimentos rígidos.

El desempeño de un pavimento rígido depende de múltiples factores, entre los cuales se destacan:

- Resistencia a la flexión del concreto.
- Capacidad de soporte de la subrasante.
- Condiciones de drenaje.
- Transferencia de carga entre losas.
- Espesor de la losa.
- Geometría y modulación de juntas.
- Condiciones de confinamiento lateral.
- Magnitud y repetición de las cargas vehiculares.

En términos generales, los pavimentos rígidos presentan ventajas importantes asociadas a durabilidad, estabilidad estructural y menor susceptibilidad a deformaciones permanentes, especialmente en zonas con condiciones de humedad elevada o subrasantes de baja capacidad portante.

Entre las principales ventajas de este tipo de pavimento se encuentran:

- Mayor vida útil de servicio.
- Menor susceptibilidad al ahuellamiento y deformaciones permanentes.
- Mejor comportamiento frente a humedad y saturación.
- Reducción de actividades de mantenimiento periódico.
- Adecuado desempeño estructural para vías urbanas y corredores de bajo y medio volumen de tránsito.

Para el presente proyecto se adopta una estructura de pavimento rígido en concreto hidráulico, considerando las condiciones geotécnicas identificadas, la baja capacidad de soporte de la subrasante y las condiciones de tránsito proyectadas para el corredor vial analizado.

## 4.2. GEOTECNIA APLICADA A PAVIMENTOS

La geotecnia aplicada al diseño de pavimentos corresponde al estudio y análisis de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos que conforman la subrasante y las capas de apoyo de la estructura vial, con el propósito de evaluar su capacidad para soportar las cargas transmitidas por el tránsito vehicular durante el periodo de servicio del pavimento.

El comportamiento estructural de un pavimento depende en gran medida de las condiciones geotécnicas del terreno de fundación, debido a que las deformaciones y esfuerzos generados por las cargas vehiculares son finalmente transmitidos hacia la subrasante. Por esta razón, la

caracterización geotécnica constituye una de las etapas fundamentales dentro del proceso de diseño estructural de pavimentos.

Dentro de los principales parámetros geotécnicos utilizados en ingeniería de pavimentos se encuentran:

- Clasificación del suelo.
- Distribución granulométrica.
- Límites de Atterberg.
- Humedad natural.
- Densidad y compactación.
- Relación de soporte California (CBR).
- Presencia y profundidad del nivel freático.

La clasificación del suelo permite identificar el comportamiento general del material frente a cambios de humedad, capacidad de soporte y susceptibilidad a deformaciones. Sistemas como el Unified Soil Classification System (USC) y la clasificación AASHTO son ampliamente utilizados en proyectos viales para categorizar los materiales de fundación de acuerdo con su granulometría y plasticidad.

Los límites de Atterberg permiten evaluar el comportamiento plástico de los suelos finos y su sensibilidad frente a variaciones en el contenido de humedad. De acuerdo con Das (Principles of Geotechnical Engineering, 2010), valores elevados de límite líquido e índice de plasticidad generalmente se asocian a materiales con mayor compresibilidad, menor capacidad de soporte y mayor susceptibilidad a cambios volumétricos.

La humedad natural del suelo también representa un parámetro de alta importancia, debido a que influye directamente sobre la resistencia y rigidez del material. En condiciones de saturación o contenidos altos de humedad, los suelos finos tienden a disminuir significativamente su capacidad portante, afectando el desempeño estructural del pavimento.

Otro aspecto fundamental corresponde a la presencia de nivel freático, ya que condiciones de humedad elevada o saturación permanente pueden generar pérdida de soporte, bombeo de finos y deterioro progresivo de la estructura de pavimento. Por esta razón, el análisis geotécnico debe complementarse con una adecuada evaluación de drenaje superficial y subsuperficial.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, cuando la subrasante presenta baja capacidad de soporte o condiciones geotécnicas desfavorables, es necesario implementar medidas de mejoramiento mediante reemplazo de material, estabilización o incorporación de capas granulares que permitan garantizar condiciones adecuadas de soporte para la estructura de pavimento.

En zonas asociadas a depósitos aluviales recientes es común encontrar materiales heterogéneos compuestos por mezclas de arcillas, limos, arenas y gravas con altos contenidos de humedad y

variabilidad estratigráfica, condiciones que pueden generar disminución en la capacidad de soporte de la subrasante y requerir tratamientos de mejoramiento para garantizar la estabilidad de la estructura vial.

Para el presente proyecto, el análisis geotécnico constituye un componente fundamental del diseño estructural del pavimento, debido a las características de soporte identificadas en el corredor vial y la necesidad de garantizar una plataforma estable y uniforme para la estructura proyectada.

## 4.3. TRANSITO DE DISEÑO

El tránsito de diseño corresponde a la estimación de las cargas vehiculares que actuarán sobre la estructura de pavimento durante el periodo de servicio proyectado, constituyéndose como uno de los parámetros fundamentales para el dimensionamiento estructural de pavimentos rígidos y flexibles.

La magnitud y repetición de las cargas transmitidas por el tránsito influyen directamente sobre los esfuerzos, deformaciones y procesos de deterioro que experimenta la estructura de pavimento a lo largo de su vida útil. Por esta razón, el análisis de tránsito permite establecer categorías de diseño y seleccionar espesores estructurales acordes con las condiciones operacionales de la vía.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, el tránsito de diseño puede evaluarse mediante parámetros como:

- Tránsito Promedio Diario (TPD).
- Número de ejes equivalentes.
- Composición vehicular.
- Tasa de crecimiento del tránsito.
- Periodo de diseño.
- Configuración de carriles y sentidos de circulación.

En vías de bajo volumen de tránsito, el diseño estructural puede realizarse mediante metodologías simplificadas basadas en rangos de TPD y categorías de tránsito establecidas en manuales de diseño de pavimentos rígidos.

El Tránsito Promedio Diario (TPD) corresponde al número promedio de vehículos que circulan por una vía durante un periodo de 24 horas, y constituye uno de los indicadores más utilizados para clasificar funcionalmente un corredor vial y determinar las condiciones generales de diseño del pavimento.

En pavimentos rígidos, las cargas vehiculares generan esfuerzos de flexión en la losa de concreto, los cuales aumentan con la magnitud y frecuencia del tránsito pesado. Por esta razón,

el incremento del tránsito generalmente implica mayores espesores de losa, mejores condiciones de soporte y mayores requerimientos de transferencia de carga entre paños.

La clasificación del tránsito también influye en aspectos asociados a:

- Selección del espesor de losa.
- Necesidad de dovelas.
- Modulación de juntas.
- Tipo de materiales de soporte.
- Requerimientos de confinamiento lateral.
- Periodicidad de mantenimiento.

Para vías urbanas de bajo volumen de tránsito, las metodologías simplificadas de diseño permiten adoptar estructuras de pavimento mediante tablas de selección basadas en categorías de tránsito y capacidad de soporte de la subrasante, facilitando el dimensionamiento estructural para corredores con bajas solicitaciones vehiculares.

En el presente proyecto, el análisis de tránsito constituye uno de los parámetros principales para la definición de la estructura de pavimento, considerando las condiciones operacionales del corredor y el bajo volumen de tránsito proyectado para la vía objeto de estudio.

## 4.4. CAPACIDAD DE SOPORTE – CBR

La capacidad de soporte de la subrasante corresponde a la resistencia que presenta el suelo de fundación frente a las cargas transmitidas por la estructura de pavimento y el tránsito vehicular. Este parámetro constituye uno de los factores más importantes dentro del diseño estructural de pavimentos, debido a que influye directamente sobre el comportamiento, estabilidad y desempeño de la estructura durante su vida útil.

Uno de los métodos más utilizados para evaluar la capacidad de soporte de los suelos es el ensayo de Relación de Soporte California o California Bearing Ratio (CBR), desarrollado originalmente por el California Division of Highways y adoptado ampliamente en ingeniería vial como criterio de caracterización geotécnica de subrasantes y materiales granulares.

El ensayo CBR consiste en determinar la resistencia a la penetración de un pistón normalizado sobre una muestra compactada bajo condiciones controladas de humedad y densidad, comparando la carga requerida con respecto a un material patrón de alta calidad. El resultado se expresa como un porcentaje denominado valor CBR.

La expresión general del ensayo corresponde a:

$$CBR = \frac{Carga\ medida}{Carga\ patrón} \times 100$$

| Parámetro | Descripción |
|---|---|
| Carga medida | Carga requerida para penetrar la muestra de suelo |
| Carga patrón | Carga correspondiente al material de referencia |
| CBR | Relación de soporte expresada en porcentaje |

*Tabla 3: Descripción variables CBR*

Los valores de CBR permiten establecer la calidad relativa de la subrasante y definir la necesidad de implementar capas de mejoramiento o estabilización cuando el terreno presenta baja capacidad portante.

En términos generales:

| Valor CBR | Condición aproximada |
|---|---|
| > 20 % | Buena capacidad de soporte |
| 10 – 20 % | Capacidad media |
| 5 – 10 % | Capacidad baja |
| < 5 % | Capacidad muy baja |

*Tabla 4: Valores CBR*

Los suelos con valores bajos de CBR suelen asociarse a materiales finos, altos contenidos de humedad, elevada plasticidad y presencia de nivel freático, condiciones que generan deformaciones y pérdida de soporte bajo cargas repetidas.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, cuando la subrasante presenta valores bajos de capacidad soporte, es necesario implementar medidas de mejoramiento mediante reemplazo de material, estabilización o incorporación de capas granulares que permitan garantizar condiciones adecuadas para el apoyo de la estructura de pavimento.

La capacidad de soporte de la subrasante también guarda relación con el módulo de reacción del suelo y el comportamiento mecánico de la estructura de pavimento, especialmente en pavimentos rígidos, donde las condiciones de apoyo influyen directamente sobre los esfuerzos y deformaciones generados en la losa de concreto.

Para el presente proyecto, la determinación del CBR constituye un parámetro fundamental dentro del análisis geotécnico y estructural del pavimento, debido a que permite definir las condiciones de soporte de la subrasante y establecer la necesidad de implementar capas de mejoramiento para garantizar el adecuado desempeño de la estructura proyectada.

## 4.5. MEJORAMIENTO DE SUBRASANTE

El mejoramiento de subrasante corresponde al conjunto de actividades y tratamientos ejecutados sobre el suelo de fundación con el propósito de incrementar su capacidad de soporte, reducir deformaciones y proporcionar una plataforma adecuada para el apoyo de la estructura de pavimento.

Cuando la subrasante presenta condiciones geotécnicas desfavorables, tales como bajos valores de CBR, alta plasticidad, elevados contenidos de humedad o presencia de materiales compresibles, se hace necesario implementar medidas de mejoramiento que permitan garantizar un comportamiento estructural adecuado de la vía durante su vida útil.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, las capas de mejoramiento tienen como finalidad:

- Incrementar la capacidad portante de la subrasante.
- Reducir deformaciones y asentamientos diferenciales.
- Disminuir la susceptibilidad a cambios volumétricos por humedad.
- Mejorar las condiciones de compactación.
- Proporcionar una plataforma uniforme y estable para las capas superiores del pavimento.

Las técnicas de mejoramiento pueden incluir:

- Reemplazo de material.
- Estabilización mecánica.
- Estabilización química.
- Incorporación de materiales granulares seleccionados.
- Uso de geosintéticos.
- Mejoramiento por capas de transición estructural.

En proyectos de pavimento rígido de bajo volumen de tránsito, el mejoramiento mediante reemplazo con material granular seleccionado constituye una de las soluciones más utilizadas cuando se presentan subrasantes con baja capacidad de soporte.

El comportamiento estructural de la subrasante mejorada depende de factores asociados a:

- Espesor de la capa implementada.
- Calidad del material de reemplazo.
- Humedad de compactación.
- Densidad alcanzada.
- Condiciones de drenaje.
- Uniformidad de la plataforma de apoyo.

Diversos métodos empíricos y correlaciones geotécnicas permiten estimar espesores preliminares de mejoramiento en función de la capacidad de soporte del suelo natural y la capacidad requerida para la estructura de pavimento.

Una de las correlaciones empíricas comúnmente empleadas para estimar espesores de mejoramiento corresponde a:

$$e = k\left(\frac{CBR_{deseado}}{CBR_{natural}} - 1\right)$$

| Parámetro | Descripción |
|---|---|
| (e) | Espesor estimado de mejoramiento |
| (k) | Coeficiente empírico |
| (CBR_{natural}) | CBR de la subrasante existente |
| (CBR_{deseado}) | CBR objetivo o equivalente requerido |

*Tabla 5: Variables Correlación*

Este tipo de correlaciones permite establecer espesores preliminares de mejoramiento para proyectos de bajo tránsito, especialmente cuando se presentan subrasantes de muy baja capacidad soporte.

En pavimentos rígidos, las capas de mejoramiento cumplen una función importante debido a que contribuyen a uniformizar las condiciones de apoyo de la losa de concreto, reduciendo el riesgo de pérdida de soporte, deformaciones diferenciales y concentración de esfuerzos sobre la estructura.

Adicionalmente, una adecuada capa de mejoramiento favorece el desempeño constructivo de la vía, permitiendo obtener mejores condiciones de compactación y estabilidad para la colocación de las capas superiores del pavimento.

Para el presente proyecto, el análisis del mejoramiento de subrasante constituye un componente fundamental del diseño estructural, debido a las condiciones geotécnicas identificadas y a la necesidad de garantizar una plataforma estable y uniforme para el apoyo de la estructura de pavimento proyectada.

## 4.6. BASES GRANULARES

Las bases granulares corresponden a capas estructurales conformadas por materiales pétreos seleccionados y compactados, ubicadas entre la subrasante o capa de mejoramiento y la losa de concreto hidráulico, cuya función principal es proporcionar una plataforma uniforme, estable y resistente para el apoyo de la estructura de pavimento.

En pavimentos rígidos, las bases granulares cumplen un papel fundamental en el comportamiento estructural del sistema, debido a que contribuyen a mejorar las condiciones de soporte, reducir la concentración de esfuerzos sobre la subrasante y disminuir el riesgo de pérdida de apoyo bajo la losa de concreto.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, las capas granulares deben garantizar condiciones adecuadas de resistencia, drenaje, estabilidad y compactación, permitiendo distribuir las cargas vehiculares hacia las capas inferiores y proporcionar uniformidad estructural a la fundación del pavimento.

Entre las principales funciones de las bases granulares se encuentran:

- Distribuir las cargas transmitidas por la losa de concreto.
- Uniformizar las condiciones de soporte de la estructura.
- Reducir deformaciones sobre la subrasante.
- Disminuir el riesgo de bombeo de finos.
- Facilitar las actividades constructivas.
- Mejorar las condiciones de drenaje de la estructura.
- Servir como plataforma de trabajo para la construcción del pavimento.

El fenómeno de bombeo corresponde a la expulsión de agua y finos a través de juntas y grietas debido al paso repetido de cargas vehiculares, condición que puede generar pérdida progresiva de soporte bajo la losa y deterioro estructural del pavimento. La incorporación de capas granulares adecuadamente compactadas contribuye significativamente a reducir este tipo de afectaciones.

Las bases granulares utilizadas en proyectos viales deben cumplir requisitos asociados a:

- Gradación granulométrica.
- Plasticidad.
- Resistencia al desgaste.
- Contenido de finos.
- Compactación mínima.
- Capacidad de drenaje.

Las especificaciones técnicas del INVÍAS establecen diferentes tipos de bases granulares de acuerdo con las condiciones de tránsito y exigencia estructural del proyecto, siendo común el uso de bases granulares clase A, B o C dependiendo de las solicitaciones previstas.

En vías de bajo volumen de tránsito, las bases granulares clase C suelen emplearse como solución estructural adecuada, siempre que cumplan los requisitos mínimos establecidos en las especificaciones técnicas vigentes y se garantice una adecuada compactación y control de calidad durante su construcción.

El comportamiento mecánico de una base granular depende de factores como:

- Calidad del material.
- Humedad de compactación.
- Densidad alcanzada.
- Espesor de la capa.
- Condiciones de confinamiento.
- Presencia de humedad o drenaje deficiente.

En pavimentos rígidos, la base granular no constituye la capa estructural principal del sistema, ya que la mayor parte de la capacidad estructural es aportada por la losa de concreto hidráulico. Sin embargo, una deficiente condición de apoyo puede generar concentraciones de esfuerzos y deterioros prematuros sobre la losa, razón por la cual la calidad de la base granular representa un aspecto fundamental dentro del diseño y construcción del pavimento.

Para el presente proyecto, la base granular constituye una capa de apoyo esencial para garantizar condiciones adecuadas de soporte, estabilidad y uniformidad bajo la losa de concreto hidráulico proyectada.

## 4.7. CONCRETO HIDRÁULICO Y MODULO DE ROTURA (MR)

El concreto hidráulico constituye el principal elemento estructural de los pavimentos rígidos, debido a que es la capa encargada de resistir y distribuir las cargas transmitidas por el tránsito vehicular hacia las capas inferiores de soporte. Su comportamiento estructural depende principalmente de la resistencia a la flexión, propiedades mecánicas, durabilidad y condiciones de apoyo de la losa.

A diferencia de otros materiales utilizados en pavimentación, el concreto hidráulico presenta una elevada rigidez estructural, lo que permite distribuir las cargas sobre áreas mayores y reducir los esfuerzos transmitidos hacia la subrasante. Esta condición proporciona una mayor estabilidad estructural y menor susceptibilidad a deformaciones permanentes.

Dentro de las propiedades más importantes del concreto para pavimentos rígidos se encuentran:

- Resistencia a la flexión.

- Resistencia a la compresión.
- Módulo de elasticidad.
- Relación de Poisson.
- Contracción y expansión térmica.
- Durabilidad frente a agentes ambientales.
- Resistencia al desgaste superficial.

En el diseño de pavimentos rígidos, la propiedad mecánica más importante corresponde a la resistencia a la flexión del concreto, expresada comúnmente mediante el Módulo de Rotura (MR), debido a que las losas trabajan principalmente sometidas a esfuerzos de flexión generados por las cargas vehiculares.

El módulo de rotura representa el esfuerzo máximo de tracción por flexión que puede soportar el concreto antes de presentar falla estructural y generalmente se expresa en megapascales (MPa) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²).

El ensayo de resistencia a la flexión del concreto se realiza mediante vigas sometidas a carga, de acuerdo con metodologías establecidas en normas técnicas nacionales e internacionales.

La expresión general del módulo de rotura puede representarse mediante:

$$MR = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2}$$

| Parámetro | Descripción |
|---|---|
| (MR) | Módulo de rotura del concreto |
| (P) | Carga aplicada |
| (L) | Longitud entre apoyos |
| (b) | Ancho de la viga |
| (d) | Altura de la viga |

*Tabla 6: Variables ecuación MR*

En pavimentos rígidos, valores mayores de MR permiten reducir el espesor requerido de la losa debido a la mayor capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión. Sin embargo, concretos con mayor módulo de rotura generalmente implican mayores exigencias de producción, control de calidad y costos constructivos.

De acuerdo con los manuales de diseño de pavimentos rígidos del Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, es común clasificar los concretos para pavimentos mediante categorías de MR, utilizadas como parámetro de selección estructural en tablas y metodologías de diseño simplificado.

El desempeño del concreto hidráulico también depende de factores asociados a:

- Calidad de los agregados.
- Relación agua/cemento.
- Contenido de cemento.
- Curado.
- Condiciones ambientales.
- Control de fisuración.
- Adecuada ejecución de juntas.

Adicionalmente, las variaciones térmicas y los cambios de humedad generan fenómenos de contracción, expansión y alabeo en las losas de concreto, razón por la cual resulta fundamental garantizar una adecuada modulación y diseño de juntas para controlar el comportamiento del pavimento durante su vida útil.

Para el presente proyecto, el módulo de rotura del concreto constituye uno de los parámetros fundamentales dentro del diseño estructural del pavimento rígido, debido a que influye directamente sobre la selección del espesor de losa y el comportamiento estructural de la vía proyectada.

## 4.8. TRANSFERENCIA DE CARGA Y CONFINAMIENTO LATERAL

La transferencia de carga en pavimentos rígidos corresponde al mecanismo mediante el cual una parte de las cargas aplicadas sobre una losa de concreto es transmitida hacia las losas adyacentes a través de las juntas, permitiendo reducir concentraciones de esfuerzos y deformaciones diferenciales entre paños.

Cuando un vehículo circula sobre una junta transversal, la losa cargada tiende a deformarse verticalmente. Si no existe una adecuada transferencia de carga, se generan diferencias importantes de deflexión entre losas contiguas, produciendo pérdida de soporte, bombeo de finos, deterioro de juntas y fisuración prematura del pavimento.

La transferencia de carga puede lograrse mediante:

- Interacción entre agregados.
- Uso de dovelas.

- Barras de amarre.
- Confinamiento lateral adecuado.

En pavimentos de bajo volumen de tránsito y losas de dimensiones reducidas, la transferencia de carga puede generarse principalmente mediante la trabazón de agregados y el adecuado confinamiento lateral de la estructura. Sin embargo, para condiciones de mayores solicitaciones estructurales, es común incorporar dovelas o dispositivos de transferencia mecánica entre paños.

Las dovelas corresponden a barras lisas de acero instaladas transversalmente en las juntas, cuya función principal consiste en transmitir cargas verticales entre losas adyacentes permitiendo el movimiento longitudinal ocasionado por contracción y expansión térmica del concreto.

El uso adecuado de dispositivos de transferencia de carga permite:

- Reducir deflexiones diferenciales.
- Disminuir esfuerzos en bordes y esquinas.
- Minimizar el deterioro de juntas.
- Reducir el fenómeno de bombeo.
- Mejorar el comportamiento estructural del pavimento.

El desempeño de la transferencia de carga depende de factores como:

- Espesor de la losa.
- Magnitud del tránsito.
- Separación entre juntas.
- Calidad del soporte.
- Condiciones de humedad.
- Presencia de dispositivos mecánicos de transferencia.

Por otra parte, el confinamiento lateral corresponde a la restricción horizontal proporcionada a los bordes de la losa mediante bermas, bordillos u otros elementos laterales, contribuyendo a reducir desplazamientos y deformaciones en los extremos del pavimento.

En pavimentos rígidos urbanos, los bordillos prefabricados o elementos laterales de confinamiento cumplen una función importante debido a que proporcionan estabilidad lateral a la estructura, mejoran las condiciones de apoyo del borde de la losa y contribuyen al control de deformaciones y fisuración.

La ausencia de confinamiento lateral puede generar:

- Mayor deflexión en bordes.
- Incremento de esfuerzos de esquina.
- Deterioro prematuro de juntas.
- Descalce lateral de la losa.

De acuerdo con las metodologías de diseño de pavimentos rígidos, las condiciones de transferencia de carga y confinamiento lateral influyen directamente sobre el espesor requerido de la losa y el comportamiento estructural del sistema.

En vías de bajo volumen de tránsito, con geometrías reducidas y adecuado confinamiento lateral mediante bordillos, es posible adoptar soluciones simplificadas de transferencia de carga dependiendo de las condiciones específicas del proyecto y los criterios establecidos en la metodología de diseño empleada.

Para el presente proyecto, las condiciones de transferencia de carga y confinamiento lateral constituyen parámetros importantes dentro del análisis estructural del pavimento rígido, considerando las características geométricas de la vía, el tránsito proyectado y la configuración estructural adoptada.

## 4.9. JUNTAS EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Las juntas en pavimentos rígidos corresponden a discontinuidades planificadas en las losas de concreto hidráulico, diseñadas con el propósito de controlar los esfuerzos generados por contracción, expansión térmica, variaciones de humedad y efectos inducidos por las cargas vehiculares, permitiendo dirigir y controlar la formación de fisuras dentro de la estructura del pavimento.

Debido a las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, las losas experimentan cambios volumétricos asociados principalmente a:

- Contracción por secado.
- Variaciones de temperatura.
- Gradientes térmicos.
- Cambios de humedad.
- Efectos de alabeo.

Cuando estos movimientos no son controlados adecuadamente, pueden producirse fisuras aleatorias que afectan el desempeño estructural y funcional del pavimento. Por esta razón, el

diseño y modulación de juntas constituye uno de los aspectos más importantes dentro de la ingeniería de pavimentos rígidos.

Las juntas permiten:

- Controlar la ubicación de fisuras.
- Reducir esfuerzos internos en la losa.
- Facilitar movimientos térmicos y de contracción.
- Mejorar la durabilidad del pavimento.
- Conservar la capacidad estructural de la losa.
- Facilitar actividades constructivas.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS y la Portland Cement Association (PCA), las juntas en pavimentos rígidos pueden clasificarse principalmente en:

**Juntas transversales de contracción**

Son las más comunes en pavimentos rígidos y se utilizan para controlar la fisuración ocasionada por contracción del concreto y cambios térmicos. Estas juntas inducen un plano de debilidad controlado donde se espera que ocurra la fisura.

Generalmente se ejecutan mediante corte aserrado una vez el concreto alcanza suficiente resistencia superficial.

**Juntas longitudinales**

Se emplean para controlar fisuración longitudinal y dividir la calzada en franjas de circulación. En algunos casos pueden incorporar barras de amarre para limitar desplazamientos laterales entre losas contiguas.

**Juntas de expansión**

Permiten absorber movimientos de expansión térmica del concreto, especialmente en zonas donde existen estructuras rígidas, intersecciones u obstáculos que puedan restringir el movimiento de la losa.

**Juntas de construcción**

Corresponden a discontinuidades generadas durante el proceso constructivo debido a interrupciones de vaciado o secuencia de ejecución de la obra.

El espaciamiento de juntas depende de diversos factores, entre los cuales se destacan:

- Espesor de la losa.

- Geometría del pavimento.
- Condiciones climáticas.
- Tipo de tránsito.
- Resistencia del concreto.
- Condiciones de soporte.
- Presencia de dispositivos de transferencia de carga.

Una modulación inadecuada puede generar:

- Fisuración aleatoria.
- Escalonamiento entre losas.
- Deterioro prematuro de juntas.
- Pérdida de soporte.
- Ingreso de agua y materiales finos.

En pavimentos rígidos urbanos de bajo volumen de tránsito es común emplear modulaciones de losa relativamente cortas con juntas transversales regularmente espaciadas, buscando controlar adecuadamente los esfuerzos de contracción y minimizar el riesgo de fisuración no controlada.

Adicionalmente, las juntas requieren un adecuado sellado para impedir el ingreso de agua y materiales incomprensibles hacia la estructura del pavimento, evitando procesos de deterioro asociados a pérdida de soporte y bombeo de finos.

Para el presente proyecto, el diseño y modulación de juntas constituye un componente fundamental dentro del comportamiento estructural del pavimento rígido, debido a que permite controlar los esfuerzos inducidos en las losas y garantizar un adecuado desempeño funcional de la estructura proyectada.

## 4.10. CONSIDERACIÓN HIDRÁULICAS Y DRENAJE

El comportamiento hidráulico y las condiciones de drenaje constituyen factores fundamentales dentro del desempeño estructural y funcional de los pavimentos, debido a que la presencia de agua en la estructura vial puede generar pérdida de soporte, disminución de resistencia de los materiales, deformaciones y deterioro progresivo del pavimento.

En ingeniería vial, el drenaje comprende el conjunto de medidas y obras destinadas a controlar, conducir y evacuar adecuadamente las aguas superficiales y subsuperficiales presentes en el

corredor vial, con el propósito de proteger la estructura del pavimento y garantizar su estabilidad durante el periodo de servicio.

La presencia de humedad excesiva dentro de la estructura de pavimento puede ocasionar:

- Disminución de la capacidad portante de la subrasante.
- Saturación de materiales granulares.
- Bombeo de finos.
- Pérdida de soporte bajo las losas.
- Incremento de deformaciones diferenciales.
- Fisuración y deterioro prematuro del pavimento.

En pavimentos rígidos, el agua puede ingresar a través de juntas, fisuras, bordes de losa o por infiltración lateral, afectando principalmente las capas de apoyo y la subrasante. Por esta razón, resulta fundamental garantizar condiciones adecuadas de drenaje superficial y subsuperficial.

El drenaje superficial tiene como finalidad captar y evacuar rápidamente las aguas de escorrentía para evitar su acumulación sobre la superficie de rodadura y en los bordes de la estructura vial. Para ello, se emplean elementos como:

- Pendientes longitudinales y transversales.
- Cunetas.
- Bordillos.
- Sumideros.
- Canales.
- Obras de entrega y disipación.

Por otra parte, el drenaje subsuperficial busca controlar la humedad presente en las capas inferiores del pavimento y reducir los efectos asociados a saturación y ascenso capilar del agua.

Las condiciones hidráulicas también influyen sobre la estabilidad geotécnica del terreno de fundación, especialmente en zonas asociadas a depósitos aluviales, laderas o sectores con presencia de niveles freáticos elevados, donde el comportamiento del suelo puede variar significativamente en función del contenido de humedad.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, el diseño hidráulico y las obras de drenaje deben integrarse adecuadamente al diseño geométrico y estructural de la vía, garantizando que el agua no afecte las condiciones de soporte del pavimento ni comprometa la estabilidad de la infraestructura proyectada.

En proyectos urbanos, las obras hidráulicas cumplen además una función importante en el control de escorrentías superficiales y manejo de caudales provenientes de sectores intervenidos, evitando erosión, socavación y afectaciones sobre la estructura vial.

Para el presente proyecto, las consideraciones hidráulicas y de drenaje representan un aspecto fundamental dentro del análisis general de la estructura de pavimento, debido a las condiciones ambientales y geotécnicas identificadas en el corredor vial, así como a la necesidad de garantizar un adecuado manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales asociadas al área de intervención.

## 4.11. NORMATIVA APLICABLE

Para el desarrollo del presente estudio y diseño estructural de pavimento rígido se tuvieron en cuenta los criterios técnicos, metodologías, especificaciones y lineamientos establecidos en la normativa nacional vigente aplicable a proyectos viales, geotécnicos y de pavimentación.

Las referencias normativas utilizadas constituyen el soporte técnico para la caracterización geotécnica, evaluación de tránsito, selección de materiales, definición de parámetros de diseño y construcción de la estructura de pavimento proyectada.

Entre las principales normas, manuales y documentos técnicos aplicables al presente proyecto se encuentran:

| Documento | Aplicación |
|---|---|
| Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito | Metodología de diseño estructural del pavimento rígido |
| Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras | Requisitos técnicos y constructivos de materiales y actividades de obra |
| Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Manual de Drenaje para Carreteras | Criterios hidráulicos y de drenaje vial |
| Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Normas de Ensayo INV | Procedimientos para ensayos geotécnicos y de materiales |
| ASTM International | Métodos de ensayo complementarios para materiales y concreto |
| AASHTO Standards | Parámetros y metodologías de evaluación vial y geotécnica |

| | |
|---|---|
| PCA – Portland Cement Association | Criterios técnicos para pavimentos rígidos |
| ACI – American Concrete Institute | Recomendaciones relacionadas con concreto hidráulico y juntas |

*Tabla 7: Normativa aplicable*

Dentro de las principales normas INVÍAS utilizadas en el desarrollo del estudio se incluyen:

| Norma | Descripción |
|---|---|
| INV E-122 | Determinación en laboratorio del contenido de agua de suelos y rocas |
| INV E-123 | Análisis granulométrico de suelos por tamizado |
| INV E-125 | Determinación del límite liquido |
| INV E-126 | Determinación del límite plástico e índice de plasticidad |
| INV E-141 | Relación humedad-densidad mediante ensayo Proctor modificado |
| INV E-148 | Relación de soporte del suelo en laboratorio – CBR |

*Tabla 8: Especificaciones INVIAS*

Adicionalmente, para el análisis estructural complementario de pavimentos rígidos se consideran fundamentos teóricos asociados a los modelos clásicos de Westergaard e Ioannides, ampliamente utilizados para la evaluación de esfuerzos y deformaciones en losas de concreto hidráulico.

La aplicación de la normativa y documentación técnica mencionada permite garantizar que el diseño estructural del pavimento se desarrolle bajo criterios técnicos reconocidos y conforme a las condiciones funcionales, geotécnicas y operacionales del proyecto.

## 5. INFORMACIÓN TÉCNICA DISPONIBLE

Para el desarrollo del presente diseño estructural de pavimento rígido se recopiló y analizó la información técnica disponible relacionada con las condiciones geotécnicas, geológicas, geométricas, hidráulicas y operacionales de los corredores viales objeto de estudio.

La información recopilada constituye el soporte técnico para la definición de los parámetros de diseño y la evaluación de las condiciones de soporte y funcionamiento de la estructura de pavimento proyectada.

Los estudios y documentos técnicos considerados corresponden principalmente a:

- Estudios geotécnicos y exploración de campo.
- Ensayos de laboratorio para caracterización de materiales.
- Evaluación de capacidad de soporte mediante ensayos CBR.
- Información geológica regional y local.
- Información geométrica del corredor vial.
- Información hidrológica, hidráulica y de drenaje.
- Parámetros preliminares de tránsito y operación vial.

Debido a que algunos de estos componentes corresponden a estudios especializados desarrollados en volúmenes independientes, dentro del presente informe se presentan únicamente los aspectos más relevantes para el diseño estructural del pavimento, evitando duplicidad de información y manteniendo la trazabilidad hacia los documentos técnicos específicos del proyecto.

En los subcapítulos siguientes se presenta el resumen de la información técnica más relevante utilizada como soporte para el diseño estructural del pavimento rígido proyectado.

## 5.1. ESTUDIO GEOTÉCNICO

Como parte del desarrollo del proyecto se cuenta con un estudio geotécnico orientado a la caracterización de las condiciones del suelo presentes en el corredor vial objeto de intervención, mediante actividades de exploración de campo y ensayos de laboratorio realizados sobre muestras representativas del terreno.

El estudio geotécnico tuvo como finalidad identificar las características físicas y mecánicas de la subrasante, evaluar su capacidad de soporte y establecer las condiciones generales de fundación requeridas para el diseño de la estructura de pavimento proyectada.

Las actividades desarrolladas incluyeron:

- Exploración mediante sondeos y apiques.
- Identificación visual y descripción estratigráfica de materiales.
- Determinación de niveles de humedad y presencia de agua.
- Clasificación de suelos mediante sistemas USC y AASHTO.
- Ensayos de granulometría y límites de Atterberg.
- Determinación de capacidad soporte mediante ensayos CBR.

Los trabajos de exploración y caracterización permitieron obtener información representativa de las condiciones geotécnicas presentes en los corredores objeto de intervención. Como parte del estudio se ejecutaron apiques distribuidos en los diferentes tramos del proyecto, con profundidades comprendidas entre 1,50 m y 2,00 m, sobre los cuales se realizaron los ensayos de laboratorio requeridos para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que conforman la subrasante.

De acuerdo con la información obtenida, los valores de capacidad de soporte (CBR) determinados para los cinco tramos evaluados se encuentran comprendidos entre 2,92 % y 3,65 %, constituyendo uno de los principales parámetros de entrada para el desarrollo del diseño estructural del pavimento.

Desde el punto de vista geológico, el área de estudio se localiza sobre la unidad Q-al, correspondiente a depósitos aluviales y de llanuras aluviales de edad Cuaternaria, según la cartografía geológica del Servicio Geológico Colombiano. Esta unidad está asociada a materiales de origen aluvial, cuyas características geotécnicas fueron consideradas durante el proceso de evaluación y definición de los parámetros de diseño.

La información detallada correspondiente a la exploración de campo, descripción estratigráfica, resultados de laboratorio y demás análisis geotécnicos se presenta en el informe específico de geotecnia elaborado para el proyecto, mientras que en el presente documento únicamente se incorporan los aspectos relevantes para el diseño estructural del pavimento.

## 5.2. ESTUDIO GEOLÓGICO

Como parte de los estudios básicos del proyecto, se contó con información geológica regional y local, la cual permitió identificar las condiciones generales del terreno donde se desarrollarán las obras y complementar la interpretación de los resultados obtenidos durante la exploración geotécnica.

De acuerdo con la cartografía oficial del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el área de intervención se encuentra localizada sobre la unidad geológica Q-al, correspondiente a depósitos aluviales y de llanuras aluviales de edad Cuaternaria. Esta unidad está conformada por materiales transportados y depositados por procesos fluviales, cuya composición y características pueden presentar variaciones laterales y verticales propias de este tipo de ambientes sedimentarios.

Las condiciones geológicas identificadas son coherentes con el entorno geomorfológico del municipio, caracterizado por la presencia de planicies aluviales asociadas a la dinámica de los cuerpos hídricos de la región. Estas características constituyen un insumo importante para la evaluación de las condiciones de fundación y para la interpretación del comportamiento geotécnico de los materiales presentes en los corredores objeto de intervención.

La información geológica fue utilizada como complemento para el desarrollo del diseño estructural del pavimento, en conjunto con los resultados de exploración de campo y ensayos de laboratorio. El análisis detallado de los aspectos geológicos corresponde al estudio específico elaborado para el proyecto, por lo que en el presente informe únicamente se presentan los elementos relevantes para el diseño de la estructura de pavimento.

## 5.3. ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

Como parte integral del proyecto se cuenta con estudios hidrológicos e hidráulicos orientados a evaluar las condiciones de escorrentía superficial, comportamiento hidráulico del sector de intervención y requerimientos de manejo y conducción de aguas asociados al corredor vial proyectado.

El análisis hidráulico constituye un componente fundamental dentro del proyecto, debido a la presencia de cauces y flujos superficiales en el área de intervención, así como a la necesidad de garantizar condiciones adecuadas de drenaje y protección de la infraestructura vial proyectada.

Los estudios desarrollados contemplan, entre otros aspectos:

- Evaluación hidrológica de la zona de influencia.
- Identificación de escorrentías superficiales.
- Análisis de condiciones de drenaje del corredor.
- Determinación de estructuras hidráulicas requeridas.
- Evaluación de capacidad hidráulica de las obras proyectadas.
- Definición de medidas para conducción y evacuación de aguas.

Dentro de las obras hidráulicas contempladas en el proyecto se incluyen estructuras para el manejo de aguas lluvias, tales como sumideros transversales, y demás obras complementarias requeridas para garantizar el adecuado funcionamiento hidráulico de los corredores intervenidos.

Las condiciones hidráulicas y de drenaje identificadas representan un aspecto relevante dentro del diseño del pavimento, debido a que la presencia de humedad y agua infiltrada puede afectar directamente las condiciones de soporte de la subrasante y las capas de apoyo de la estructura vial.

La información hidrológica e hidráulica disponible permitió definir los criterios de drenaje requeridos para el proyecto y complementar el proceso de diseño de las obras hidráulicas asociadas. El desarrollo metodológico, los análisis hidrológicos e hidráulicos y el dimensionamiento de las estructuras se presentan en el informe específico correspondiente, por

lo que en el presente documento únicamente se incluyen los aspectos de interés para el diseño estructural del pavimento.

## 5.4. INFORMACIÓN GEOMÉTRICA

Para el desarrollo del presente diseño estructural de pavimento se tuvo en cuenta la información geométrica disponible del corredor vial proyectado, incluyendo las características generales de alineamiento, dimensiones de la calzada y configuración funcional de la vía.

Los corredores objeto de intervención corresponden a vías urbanas con una longitud total aproximada de **210 m**, distribuidas en tramos, proyectadas con una calzada de **6,00 m** de ancho para circulación en doble sentido vehicular. La sección vial contempla además la construcción de confinamiento lateral mediante bordillos y la incorporación de las obras hidráulicas requeridas para el adecuado funcionamiento de la infraestructura vial.

La información geométrica disponible permitió establecer las condiciones generales requeridas para el diseño de la estructura de pavimento, particularmente en aspectos asociados a:

- Ancho de losa.
- Modulación de paños.
- Configuración de juntas.
- Condiciones de confinamiento lateral.
- Pendientes de drenaje superficial.
- Interacción entre la estructura vial y las obras hidráulicas proyectadas.

Adicionalmente, la geometría del corredor fue considerada dentro de la definición de las condiciones de operación y tránsito de la vía, así como en el análisis de constructibilidad y comportamiento funcional de la estructura proyectada.

Debido a las características urbanas del proyecto, la geometría vial incorpora elementos complementarios como bordillos, sumideros transversales y demás obras hidráulicas proyectadas, garantizando la adecuada integración entre la infraestructura vial y el sistema de drenaje superficial.

La información geométrica detallada del corredor, incluyendo planos, perfiles y secciones transversales, hace parte de los documentos técnicos específicos del proyecto y constituye soporte complementario para el presente diseño estructural de pavimento.

## 5.5. INFORMACIÓN DE TRANSITO

Para el desarrollo del presente diseño estructural de pavimento se consideró la información de tránsito disponible para los corredores viales proyectados, con el propósito de establecer las condiciones operacionales de las vías y definir la categoría de tránsito aplicable dentro de la metodología de diseño adoptada.

El tránsito vehicular constituye uno de los principales parámetros de entrada para el diseño de pavimentos, debido a que las cargas transmitidas por los vehículos generan esfuerzos y deformaciones sobre la estructura durante su período de servicio.

De acuerdo con el estudio de tránsito elaborado para el proyecto, los corredores objeto de intervención corresponden a vías urbanas de bajo volumen de tránsito, destinadas principalmente a atender la movilidad local y el acceso a los sectores intervenidos. El estudio incluyó la realización de aforos vehiculares, la caracterización de la composición del tránsito y el desarrollo de las proyecciones requeridas para el diseño estructural del pavimento. Los parámetros específicos adoptados se presentan en los capítulos posteriores del presente informe.

La clasificación del tránsito constituye un parámetro fundamental dentro del proceso de selección de la estructura de pavimento, debido a que influye directamente sobre:

- Espesor de la losa de concreto.
- Condiciones de transferencia de carga.
- Requerimientos de soporte estructural.
- Modulación de juntas.
- Condiciones de confinamiento lateral.
- Necesidad de dispositivos mecánicos de transferencia.

Considerando las características geométricas y operacionales del corredor, el tránsito proyectado se asocia a condiciones de baja solicitación estructural, compatibles con metodologías simplificadas de diseño para pavimentos rígidos urbanos de bajo volumen de tránsito.

El análisis detallado del estudio de tránsito, incluyendo la metodología empleada, los aforos vehiculares, las proyecciones y los parámetros de diseño adoptados, se presenta en el informe específico correspondiente y en los capítulos posteriores del presente documento.

## 6. TRABAJOS DE CAMPO Y ENSAYOS

Con el propósito de caracterizar las condiciones geotécnicas del corredor vial y obtener los parámetros requeridos para el diseño de la estructura de pavimento, se desarrolló un programa de exploración de campo y ensayos de laboratorio orientado a evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales presentes en la subrasante.

Las actividades desarrolladas durante la exploración incluyeron:

- Exploración geotécnica mediante sondeos y apiques.
- Descripción visual y estratigráfica de materiales.
- Identificación de presencia de humedad y niveles freáticos.
- Toma de muestras representativas del suelo.
- Ensayos de laboratorio para clasificación y caracterización geotécnica.
- Determinación de capacidad de soporte mediante ensayos CBR.

La información obtenida durante estas actividades permitió establecer las condiciones generales del terreno de fundación, identificar la variabilidad de los materiales presentes en el corredor vial y definir los parámetros geotécnicos requeridos para el diseño estructural del pavimento.

Los resultados obtenidos durante la caracterización geotécnica constituyen la base para la definición de los parámetros de diseño de la estructura de pavimento. Esta información se complementa con la caracterización geológica del área de estudio, correspondiente a la unidad geológica Q-al (Depósitos aluviales y llanuras aluviales de edad Cuaternaria), permitiendo establecer las condiciones del terreno que soportan el diseño estructural del pavimento.

En los subcapítulos siguientes se presentan los resultados más relevantes obtenidos durante la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio, incluyendo la caracterización de la subrasante y la determinación de la capacidad de soporte utilizada como parámetro de entrada para el diseño estructural del pavimento.

### 6.1. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Con La exploración geotécnica constituye una de las actividades fundamentales para el diseño estructural de pavimentos, ya que permite identificar las condiciones del terreno de fundación y obtener muestras representativas para la caracterización física y mecánica de los materiales que conforman la subrasante. De acuerdo con las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del INVÍAS, la exploración debe desarrollarse mediante procedimientos que garanticen una caracterización representativa del corredor vial, suministrando la información necesaria para la determinación de los parámetros geotécnicos empleados en el diseño de la estructura de pavimento.

Para el presente proyecto se ejecutó una campaña de exploración geotécnica mediante la construcción de **nueve (9) apiques**, distribuidos estratégicamente en los tres tramos objeto de intervención. Las excavaciones se realizaron manualmente hasta una profundidad de **2,00 m**, permitiendo registrar las características generales de los materiales presentes, identificar su disposición estratigráfica y obtener muestras representativas para la ejecución de los ensayos de laboratorio.

La localización de los apiques ejecutados durante la exploración geotécnica se presenta en la Tabla**:**

| .Apique | Tramo | Abscisa | Profundidad (m) |
|---|---|---|---|
| 1 | Tramo 1 | K0+010 | 2,00 |
| 2 | Tramo 1 | K0+050 | 2,00 |
| 3 | Tramo 1 | K0+100 | 2,00 |
| 4 | Tramo 2 | K0+010 | 2,00 |
| 5 | Tramo 2 | K0+025 | 2,00 |
| 6 | Tramo 2 | K0+050 | 2,00 |
| 7 | Tramo 3 | K0+010 | 2,00 |
| 8 | Tramo 3 | K0+025 | 2,00 |
| 9 | Tramo 3 | K0+050 | 2,00 |

*Tabla 9: Localización Apiques*

La distribución de los apiques permitió obtener una caracterización representativa de las condiciones geotécnicas presentes a lo largo del corredor vial, constituyendo la base para la ejecución de los ensayos de laboratorio y la determinación de los parámetros utilizados en el análisis y diseño de la estructura de pavimento.

Durante la ejecución de la exploración geotécnica **no se evidenció la presencia de nivel freático** hasta la profundidad máxima investigada de **2,00 m** en ninguno de los apiques ejecutados. No obstante, se recomienda que durante la etapa constructiva se implementen las medidas necesarias para el adecuado manejo de las aguas superficiales y se considere la posible variación de las condiciones de humedad del terreno asociadas al régimen de precipitaciones característico de la zona

.

6.2. ENSAYOS DE LABORATORIO

Con el propósito de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales obtenidos durante la exploración geotécnica, se ejecutó un programa de ensayos de laboratorio sobre las muestras representativas del corredor vial. Estos ensayos permitieron caracterizar la subrasante y establecer los parámetros geotécnicos requeridos para el análisis y diseño de la estructura de pavimento.

Los procedimientos de laboratorio fueron desarrollados de conformidad con las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVÍAS, complementadas con los procedimientos establecidos por AASHTO y ASTM, garantizando la confiabilidad y representatividad de los resultados obtenidos.

Dentro del programa de laboratorio se realizaron ensayos orientados a determinar el contenido de humedad natural, los límites de consistencia, la clasificación geotécnica de los materiales, las características de compactación y la capacidad de soporte de la subrasante. Cada uno de estos parámetros constituye un insumo fundamental para la caracterización geotécnica del terreno y la definición de las variables empleadas en el diseño estructural del pavimento.

A continuación, se presenta una descripción general de los ensayos realizados y de su aplicación dentro del proceso de caracterización geotécnica.

*Tabla 10: Ensayos de Laboratorio*

| Ensayo | Norma de referencia | Finalidad |
|---|---|---|
| Humedad Natural | INV E-122 | Determinar el contenido natural de agua presente en el suelo al momento de la exploración. |
| Límites de Atterberg | INV E-125 / INV E-126 | Determinar la consistencia y plasticidad de los suelos finos. |
| Clasificación USCS y AASHTO | ASTM D2487 / AASHTO M145 | Clasificar los materiales de acuerdo con sus propiedades físicas y de comportamiento geotécnico. |
| Ensayo de Compactación (Proctor Modificado) | INV E-141 | Determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima para procesos de compactación. |
| Relación de Soporte California (CBR) | INV E-148 | Evaluar la capacidad de soporte de la subrasante para el diseño estructural del pavimento. |

Los ensayos anteriormente descritos conforman la base para la caracterización geotécnica del corredor vial y permiten establecer los parámetros requeridos para el análisis del comportamiento de la subrasante. Los resultados obtenidos mediante cada uno de estos procedimientos se presentan e interpretan en los capítulos siguientes, donde se analiza su incidencia en la definición de los parámetros de diseño estructural del pavimento.

## 6.3. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MATERIALES

La caracterización geotécnica de los materiales constituye una etapa fundamental dentro del proceso de diseño estructural de pavimentos, ya que permite identificar las propiedades físicas y mecánicas de la subrasante mediante la interpretación de los resultados obtenidos durante la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio. Estos parámetros proporcionan la información necesaria para evaluar el comportamiento del terreno y establecer las condiciones de soporte consideradas en el diseño de la estructura de pavimento.

La caracterización se desarrolló a partir de la determinación de los límites de Atterberg, el contenido de humedad natural y la clasificación geotécnica de los materiales conforme a los sistemas USCS y AASHTO, de acuerdo con las metodologías establecidas en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del INVÍAS. Estos ensayos permiten establecer la plasticidad, consistencia y comportamiento esperado de los materiales frente a las condiciones de servicio.

Los resultados obtenidos para cada uno de los puntos de exploración se presentan en la Tabla continua, donde se resumen las principales propiedades índice determinadas para los materiales que conforman la subrasante del corredor vial.

| Apique | Tramo | Abscisa | Prof. (m) | LL (%) | LP (%) | IP (%) | Wnat (%) | Clasificación AASHTO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Tramo 1 | K0+010 | 2,00 | 34,0 | 29,0 | 5,3 | 13,8 | A-4 |
| 2 | | K0+050 | 2,00 | 40,0 | 37,2 | 2,8 | 25,0 | A-4 |
| 3 | | K0+100 | 2,00 | 35,0 | 27,5 | 7,5 | 12,7 | A-4 |
| 4 | Tramo 2 | K0+010 | 2,00 | 34,0 | 29,1 | 4,9 | 25,8 | A-4 |
| 5 | | K0+025 | 2,00 | 30,0 | 24,2 | 5,8 | 20,4 | A-4 |
| 6 | | K0+050 | 2,00 | 24,0 | 22,6 | 1,4 | 24,6 | A-4 |
| 7 | Tramo 3 | K0+010 | 2,00 | 57,0 | 53,0 | 4,0 | 8,5 | A-5 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | | K0+025 | 2,00 | 44,0 | 34,2 | 9,8 | 5,7 | A-5 |
| 9 | | K0+050 | 2,00 | 46,0 | 37,3 | 8,7 | 9,0 | A-5 |

*Tabla 11: Caracterización Materiales*

Los resultados obtenidos evidencian la presencia predominante de materiales finos con características geotécnicas variables, clasificados principalmente como A-4 y A-5 de acuerdo con el sistema AASHTO, y correspondientes a materiales tipo ML, SM y SC según la clasificación USCS. Estas clasificaciones son consistentes con los depósitos superficiales identificados durante la exploración geotécnica y representan materiales cuyo comportamiento depende principalmente de su contenido de finos y de las condiciones de humedad.

Los valores de los límites de Atterberg indican materiales de baja a moderada plasticidad, condición que permite prever variaciones limitadas en su comportamiento frente a cambios en el contenido de humedad. De igual manera, los contenidos de humedad natural determinados durante la caracterización se encuentran dentro del rango esperado para las condiciones del terreno al momento de la exploración, constituyendo un parámetro representativo para la evaluación geotécnica de la subrasante.

La caracterización geotécnica obtenida mediante los ensayos de laboratorio proporciona la base para la evaluación de la capacidad de soporte de los materiales y la posterior definición de los parámetros de diseño estructural del pavimento, los cuales se desarrollan en los capítulos siguientes del presente informe.

## 6.4. DETERMINACIÓN DEL CBR

La Relación de Soporte de California (CBR) constituye uno de los principales parámetros geotécnicos empleados en el diseño estructural de pavimentos, debido a que permite evaluar la capacidad de soporte de la subrasante frente a las cargas inducidas por el tránsito vehicular. Este parámetro representa el comportamiento mecánico del terreno bajo condiciones controladas de laboratorio y constituye la base para la clasificación de la subrasante y la definición de las capas estructurales del pavimento.

La determinación del CBR se realizó de conformidad con la Norma INV E-148 "Relación de Soporte del Suelo (CBR)", contenida en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Los ensayos fueron ejecutados sobre muestras representativas obtenidas durante la exploración geotécnica, garantizando la representatividad de los resultados para las condiciones del corredor vial objeto de estudio.

Los valores obtenidos mediante este ensayo constituyen el principal parámetro de entrada para la evaluación de la capacidad de soporte de la subrasante y el posterior diseño de la estructura de pavimento.

En la siguiente tabla se evidencian los valores obtenidos:

| Apique | Tramo | Abscisa | Profundidad (m) | CBR (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Tramo 1 | K0+010 | 2,00 | 1,72 |
| 2 | Tramo 1 | K0+050 | 2,00 | 2,09 |
| 3 | Tramo 1 | K0+100 | 2,00 | 1,86 |
| 4 | Tramo 2 | K0+010 | 2,00 | 2,00 |
| 5 | Tramo 2 | K0+025 | 2,00 | 2,15 |
| 6 | Tramo 2 | K0+050 | 2,00 | 2,00 |
| 7 | Tramo 3 | K0+010 | 2,00 | 1,86 |
| 8 | Tramo 3 | K0+025 | 2,00 | 2,32 |
| 9 | Tramo 3 | K0+050 | 2,00 | 1,89 |
| **Promedio** | | | | **1,99 = 2.00** |

*Tabla 12: Valores CBR %*

Los Los resultados obtenidos evidencian valores de CBR comprendidos entre 1,72 % y 2,32 %, con un valor promedio de 1,99 % = 2.00%, indicando una capacidad de soporte baja de los materiales que conforman la subrasante del corredor vial. La reducida dispersión entre los valores obtenidos permite considerar un comportamiento geotécnico relativamente uniforme a lo largo de los tres tramos evaluados.

De acuerdo con las condiciones identificadas durante la exploración geotécnica y los resultados obtenidos en laboratorio, se adopta un CBR de diseño de 2,00 %, correspondiente al valor promedio de los ensayos realizados. Este valor representa de manera adecuada las condiciones de soporte de la subrasante y constituye el parámetro geotécnico utilizado para la clasificación de la subrasante y el dimensionamiento de la estructura de pavimento.

La evaluación de la capacidad de soporte obtenida mediante los ensayos CBR constituye el principal criterio para la definición de los parámetros de diseño estructural del pavimento, razón por la cual su aplicación se desarrolla en el capítulo siguiente correspondiente a la clasificación de la subrasante.

6.5. CLASIFICACIÓN DE SUBRASANTE

La clasificación de la subrasante constituye uno de los parámetros fundamentales dentro del diseño estructural de pavimentos rígidos, debido a que permite establecer las condiciones de soporte del terreno de fundación y definir los requerimientos estructurales de la metodología de diseño adoptada.

De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito (ICPC–INVÍAS), la clasificación de la subrasante se realiza con base en el valor del CBR de diseño, correlacionado con las condiciones generales de soporte y comportamiento mecánico del material.

Los resultados obtenidos durante la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio realizados sobre las muestras representativas del corredor evidenciaron valores de capacidad de soporte comprendidos entre 1,72 % y 2,32 %, asociados a las condiciones geotécnicas identificadas en el área de intervención.

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de Relación de Soporte California (CBR), se adoptó un valor de diseño correspondiente al promedio de los ensayos ejecutados, el cual representa adecuadamente las condiciones de soporte de la subrasante para el diseño estructural del pavimento:

**CBR de diseño = 2,00 %**

Con base en la clasificación establecida por el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito (ICPC–INVÍAS), la subrasante del proyecto corresponde a una:

Subrasante Tipo S2

La categoría S2 corresponde a subrasantes con valores de CBR comprendidos entre 2 % y 5 %, asociadas a materiales con capacidad de soporte baja a media, para los cuales la metodología establece condiciones específicas de soporte y configuración estructural del pavimento.

Las condiciones identificadas presentan concordancia con:

- La caracterización geotécnica obtenida mediante la exploración de campo y los ensayos de laboratorio.
- La clasificación predominante de los materiales como suelos A-4 y A-5, de acuerdo con el sistema AASHTO.
- La capacidad de soporte determinada mediante los ensayos CBR, representada por un valor de diseño de 2,00 %.
- La uniformidad de las condiciones geotécnicas identificadas a lo largo de los tres tramos objeto de estudio.

Debido a las condiciones geotécnicas identificadas, la clasificación S2 será utilizada como parámetro principal para la selección de la estructura de pavimento rígido mediante la metodología establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito (ICPC–INVÍAS).

## 7. PARÁMETROS DE DISEÑO

Para el desarrollo del diseño estructural del pavimento rígido proyectado se definieron los parámetros técnicos, geotécnicos y operacionales requeridos por la metodología de diseño adoptada.

La selección de dichos parámetros se realizó con base en:

- Información de tránsito del corredor vial.
- Resultados de exploración geotécnica y ensayos de laboratorio.
- Condiciones geométricas y operacionales de la vía.
- Características hidráulicas y ambientales del sector.
- Recomendaciones establecidas en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.

El diseño estructural se desarrolló mediante el uso del catálogo de estructuras establecido en el manual INVÍAS – ICPC, el cual considera como variables principales:

- Categoría de tránsito.
- Clasificación de subrasante.
- Tipo de soporte estructural.
- Condición de transferencia de carga.
- Condición de confinamiento lateral.
- Resistencia a la flexión del concreto (MR).

Con base en la información disponible para el proyecto, los parámetros de diseño adoptados corresponden a los siguientes:

| Parámetro | Valor adoptado |
|---|---|
| Tipo de pavimento | Pavimento rígido en concreto hidráulico |
| Longitud del corredor | 210 m |
| Ancho de calzada | 6,00 m |

| | |
|---|---|
| Número de carriles | 2 |
| Sentido vial | Doble sentido |
| Tipo de tránsito | Bajo volumen |
| TPD adoptado | 348 vehículos/día |
| Categoría de tránsito | T1 |
| CBR de diseño | 2,00 % |
| Clasificación de subrasante | S2 |
| Tipo de soporte analizado | BG – Base granular |
| Transferencia de carga | Sin dovelas |
| Confinamiento lateral | Con bordillos (B) |
| Resistencia del concreto | MR1 (3,8 MPa) |
| Método general de diseño | Catálogo estructural INVÍAS–ICPC |

*Tabla 13: Parámetros de diseño adoptados para el proyecto (Autor)*

La clasificación del tránsito dentro de la categoría T1 se adopta con base en el estudio de tránsito realizado para el proyecto, el cual determinó un Tránsito Promedio Diario (TPD) de 348 vehículos/día. Asimismo, el análisis independiente de los tramos permitió establecer como condición de diseño un Número de Ejes Equivalentes (NEE) de $1{,}45 \times 10^5$, correspondiente al escenario más crítico identificado, criterio conservador que garantiza un comportamiento adecuado de la estructura durante el período de diseño.

La subrasante se clasifica como S2, debido a que el CBR de diseño adoptado es de 2,00 %, valor que, de acuerdo con la metodología del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito (ICPC–INVÍAS), corresponde a dicha categoría.

La condición de soporte adoptada corresponde a BG (Base Granular), considerando la incorporación de una capa granular de apoyo entre el mejoramiento de la subrasante y la losa de concreto hidráulico.

Debido a las características geométricas y operacionales del proyecto, se adopta una solución con confinamiento lateral mediante bordillos y sin transferencia mecánica de carga mediante dovelas, condición compatible con la categoría de tránsito T1 definida para el presente diseño.

7.1. TRANSITO DE DISEÑO

El tránsito de diseño constituye uno de los principales parámetros de entrada dentro del diseño estructural de pavimentos, debido a que las cargas transmitidas por los vehículos generan esfuerzos y deformaciones acumuladas sobre la estructura durante su periodo de servicio.

Para el presente proyecto, el análisis de tránsito se realizó considerando las características funcionales y operacionales del corredor vial proyectado, correspondiente a corredores viales urbanos, con una calzada de 6,00 m de ancho, destinada a la circulación en doble sentido vehicular, orientada principalmente a atender la movilidad local y el acceso a los sectores intervenidos.

El parámetro adoptado para el análisis preliminar corresponde al Tránsito Promedio Diario (TPD), definido como el promedio diario de vehículos que circulan por los corredores objeto del proyecto durante un período determinado.

Con base en la información suministrada para el proyecto, se adoptaron los siguientes parámetros de tránsito:

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| TPD adoptado | 348 vehículos/día |
| Tipo de vía | Urbana |
| Número de carriles | 2 |
| Sentido vial | Doble |
| Tipo de tránsito | Bajo volumen |

*Tabla 14: Parámetros de tránsito adoptados para diseño (Autor)*

De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, los corredores con un TPD comprendido entre 201 y 500 vehículos por día corresponden a la categoría de tránsito T1.

Por lo tanto, para efectos del presente diseño estructural se adopta la siguiente clasificación:

**Categoría de tránsito: T1**

La categoría T1 corresponde a pavimentos de bajo volumen de tránsito y bajas a moderadas solicitaciones estructurales, condición compatible con las características funcionales y operacionales de los corredores objeto del presente proyecto.

La adopción de esta categoría permite utilizar el catálogo estructural correspondiente a tránsito T1 dentro de la metodología establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto

para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito para la selección de espesores y definición de la estructura de pavimento.

La información de tránsito utilizada para el presente diseño corresponde a parámetros preliminares suministrados dentro del desarrollo del proyecto, adoptándose un TPD de 348 vehículos/día para efectos de clasificación estructural inicial del pavimento.

Debido a que el presente documento corresponde específicamente al diseño estructural del pavimento rígido, los análisis detallados relacionados con:

- composición vehicular,
- distribución porcentual de tránsito,
- proyección vehicular,
- factores de crecimiento,
- determinación de ejes equivalentes (NEE).
- y determinación de ejes equivalentes,

deberán ser consultados directamente en el Estudio de Tránsito correspondiente del proyecto.

No obstante, considerando que el tránsito proyectado se encuentra por debajo de 500 vehículos/día, el corredor clasifica dentro de la categoría T1 conforme a los criterios establecidos en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.

## 7.2. SUBRASANTE DE DISEÑO

La subrasante corresponde al terreno de fundación sobre el cual se apoya la estructura de pavimento y constituye uno de los principales parámetros de entrada dentro del diseño estructural, debido a que su capacidad de soporte influye directamente sobre el comportamiento mecánico y desempeño del pavimento durante su vida útil.

La caracterización de la subrasante del presente proyecto se realizó con base en los resultados obtenidos durante la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio ejecutados sobre muestras representativas del corredor vial.

Los resultados obtenidos evidenciaron valores de CBR comprendidos entre 1,72 % y 2,32 %, correspondientes a los diferentes tramos evaluados, los cuales constituyen la base para la definición de la capacidad de soporte de la subrasante utilizada en el presente diseño.

Considerando los resultados obtenidos y con fines de diseño estructural, se adopta el siguiente parámetro de diseño:

| Parámetro | Valor Adoptado |
|---|---|
| CBR de diseño | 2.00 % |
| Clasificación de subrasante | S2 |

*Tabla 15: Parámetros de subrasante adoptados para diseño (Autor)*

De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito (ICPC–INVÍAS), la clasificación de la subrasante se realiza con base en el valor de CBR del suelo, correlacionado con las condiciones de soporte del terreno de fundación.

Conforme a dicha metodología, el valor de CBR adoptado corresponde a una:

**Subrasante Tipo S2**

La categoría S2 corresponde a subrasantes con valores de CBR comprendidos entre 2 % y 5 %, asociadas a materiales con capacidad de soporte baja a media, condición que requiere la implementación de una estructura de pavimento con capas de soporte que garanticen un adecuado comportamiento estructural durante su período de servicio.

* Las condiciones geotécnicas identificadas en el corredor presentan concordancia con:

* Los valores de CBR obtenidos durante la investigación geotécnica.

* La clasificación geotécnica determinada mediante los ensayos de laboratorio.

* Las condiciones geológicas correspondientes

Debido a las condiciones anteriores, el diseño estructural del pavimento contempla la implementación de capas de mejoramiento y soporte granular orientadas a proporcionar una plataforma estable y uniforme para el apoyo de la estructura de concreto hidráulico proyectada.

## 7.3. MATERIAL DE SOPORTE PARA EL PAVIMENTO

De acuerdo con la metodología establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, el material de soporte corresponde a la capa ubicada entre la subrasante y la losa de concreto hidráulico, cuya función principal es mejorar las condiciones de apoyo y proporcionar una plataforma estructural adecuada para el pavimento.

El manual contempla tres condiciones generales de soporte para el diseño de pavimentos rígidos:

- SN: Suelo natural.
- BG: Base granular.

- BEC: Base estabilizada con cemento.

Considerando las condiciones geotécnicas identificadas en el corredor vial, asociadas a una subrasante de baja capacidad soporte (S2), altos contenidos de humedad y presencia de materiales finos, se definió la necesidad de incorporar una estructura granular de apoyo que permita mejorar las condiciones de soporte y uniformidad de la plataforma del pavimento.

Por lo tanto, para el presente proyecto se adopta la siguiente condición de soporte:

| Parámetro | Valor Adoptado |
|---|---|
| Tipo de soporte | BG |
| Descripción | Base Granular |
| Tipo de material proyectado | Base granular tipo C |

*Tabla 16: Material de soporte adoptado para diseño (Autor)*

La condición BG corresponde a una estructura de soporte conformada mediante capa granular compactada, utilizada para:

- Mejorar la distribución de cargas.
- Uniformizar las condiciones de apoyo.
- Reducir deformaciones sobre la subrasante.
- Minimizar riesgos de bombeo de finos.
- Proporcionar una plataforma estable para la construcción de la losa de concreto.

La selección de una base granular tipo C se considera técnicamente viable para las condiciones del proyecto, debido a que el corredor corresponde a una vía urbana de bajo volumen de tránsito y bajas solicitaciones estructurales.

Adicionalmente, el diseño estructural contempla previamente una capa de mejoramiento de subrasante, orientada a incrementar la capacidad de soporte general de la plataforma y disminuir la influencia de los materiales finos identificados durante la exploración geotécnica.

La condición de soporte BG adoptada será utilizada como parámetro de entrada dentro del catálogo estructural del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito para la selección de espesores de la estructura de pavimento proyectada.

## 7.4. TRANSFERENCIA DE CARGA Y CONFINAMIENTO LATERAL

Dentro de la metodología establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, las condiciones de transferencia de carga

y confinamiento lateral constituyen variables fundamentales para la selección del espesor de la losa de concreto hidráulico.

La transferencia de carga corresponde al mecanismo mediante el cual las cargas aplicadas sobre una losa son parcialmente transmitidas hacia las losas adyacentes a través de las juntas transversales, permitiendo reducir esfuerzos diferenciales y mejorar el comportamiento estructural del pavimento.

Por su parte, el confinamiento lateral corresponde a la restricción horizontal proporcionada por elementos laterales como bermas, bordillos o andenes, contribuyendo a disminuir deformaciones en bordes y mejorar la estabilidad estructural de las losas de concreto.

De acuerdo con el manual de diseño, las condiciones de transferencia de carga y confinamiento lateral se identifican mediante las siguientes denominaciones:

| Denominación | Descripción |
|---|---|
| D | Pavimento con dovelas |
| ND | Pavimento sin dovelas |
| B | Pavimento con confinamiento lateral |
| NB | Pavimento sin confinamiento lateral |

*Tabla 17:Condiciones de transferencia de carga y confinamiento lateral Fuente: Adaptado de INVÍAS – ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.*

Considerando las características geométricas, operacionales y funcionales del proyecto, se adoptaron las siguientes condiciones de diseño:

| Parámetro | Condición Adoptada |
|---|---|
| Transferencia de carga | D – Con dovelas |
| Confinamiento lateral | B – Con bordillos en ambos costados |

*Tabla 18: Condiciones adoptadas para el proyecto (Autor)*

La adopción de una condición de transferencia de carga mediante dovelas (D) se considera técnicamente adecuada para el presente proyecto, debido a que los corredores corresponden a vías urbanas clasificadas dentro de la categoría de tránsito T1, con circulación en doble sentido y confinamiento lateral mediante bordillos, condiciones que favorecen un adecuado comportamiento estructural de la losa y una eficiente transferencia de cargas entre paños de concreto.

Adicionalmente, el proyecto contempla losas de dimensiones reducidas y una longitud de vía relativamente corta, condiciones que complementan la transferencia de carga entre losas y contribuyen al adecuado comportamiento estructural del pavimento.

Por otra parte, el proyecto sí contempla confinamiento lateral tipo B, debido a la incorporación de bordillos prefabricados en ambos costados de la vía, los cuales proporcionan restricción lateral y contribuyen a mejorar el comportamiento estructural de los bordes de las losas de concreto.

Las condiciones adoptadas para transferencia de carga y confinamiento lateral serán utilizadas como parámetros de entrada dentro del catálogo estructural del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito para la selección de la estructura de pavimento proyectada.

## 7.5. RESISTENCIA DEL CONCRETO – MODULO DE ROTURA (MR)

La resistencia del concreto hidráulico constituye uno de los principales parámetros estructurales dentro del diseño de pavimentos rígidos, debido a que determina la capacidad de la losa para resistir los esfuerzos de flexión generados por las cargas vehiculares durante el periodo de servicio de la vía.

De acuerdo con el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, la resistencia del concreto para pavimentos se expresa mediante el Módulo de Rotura (MR), correspondiente a la resistencia a flexotracción del concreto evaluada a los 28 días.

El manual clasifica las resistencias del concreto mediante diferentes categorías de MR, utilizadas como parámetro de entrada para la selección estructural del pavimento.

Las categorías establecidas corresponden a:

| Clasificación | Resistencia a flexotracción |
|---|---|
| MR1 | 3.8 MPa (≈ 38 kg/cm²) |
| MR2 | 4.0 MPa (≈ 40 kg/cm²) |
| MR3 | 4.2 MPa (≈ 42 kg/cm²) |
| MR4 | 4.4 MPa (≈ 44 kg/cm²) |

*Tabla 19: Clasificación de resistencias del concreto (MR). Fuente: Adaptado de INVÍAS – ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.*

Para el presente proyecto se evaluaron diferentes alternativas de resistencia del concreto considerando:

- Bajo volumen de tránsito.
- Condiciones geométricas del corredor.
- Longitud reducida de la vía.
- Condiciones de soporte proyectadas.
- Viabilidad técnica y económica de la solución estructural.

Con base en el análisis realizado, se adopta para el diseño estructural la siguiente resistencia de concreto:

| Parámetro | Valor Adoptado |
|---|---|
| Clasificación de concreto | MR1 |
| Resistencia a flexotracción | 3.8 MPa |
| Equivalencia aproximada | 38 kg/cm² |

*Tabla 20: Resistencia de concreto adoptada para diseño (Autor)*

La selección de un concreto tipo MR1 se considera técnicamente viable para las condiciones del proyecto, debido a que el corredor corresponde a una vía urbana de bajo volumen de tránsito clasificada dentro de la categoría T1, con bajas solicitaciones estructurales y condiciones de operación local.

Adicionalmente, el diseño estructural contempla una estructura de soporte conformada por capa de mejoramiento y base granular, condiciones que contribuyen a mejorar el comportamiento estructural del pavimento y permiten adoptar una solución de concreto compatible con las solicitaciones previstas.

La resistencia de concreto adoptada será utilizada como parámetro principal dentro del catálogo estructural del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito para la definición del espesor de la losa proyectada.

## 7.6. PERIODO DE DISEÑO Y CRITERIOS METODOLÓGICOS

El diseño estructural del pavimento rígido proyectado se desarrolló mediante la metodología establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, documento desarrollado bajo criterios derivados de las metodologías PCA 1984 y AASHTO 1993.

La metodología empleada corresponde a un sistema de catálogo estructural basado en la combinación de variables de diseño relacionadas con:

- Categoría de tránsito.

- Clasificación de subrasante.
- Tipo de soporte estructural.
- Transferencia de carga.
- Confinamiento lateral.
- Resistencia del concreto hidráulico.

De acuerdo con el manual de diseño, los análisis estructurales considerados para la elaboración del catálogo fueron desarrollados para un periodo de diseño de 20 años.

Por lo tanto, para el presente proyecto se adopta:

| Parámetro | Valor Adoptado |
|---|---|
| Metodología de diseño | INVÍAS – ICPC |
| Tipo de metodología | Catálogo estructural |
| Periodo de diseño | 20 años |

*Tabla 21: Criterios metodológicos adoptados para diseño (Autor)*

El manual establece que los espesores estructurales contenidos en el catálogo corresponden al análisis de múltiples escenarios de diseño desarrollados mediante modelos estructurales calibrados bajo criterios PCA y AASHTO, considerando diferentes combinaciones de tránsito, soporte y condiciones estructurales.

Adicionalmente, la metodología considera de forma implícita criterios de desempeño estructural, durabilidad y comportamiento funcional del pavimento durante el periodo de servicio proyectado.

Para el presente proyecto, la selección estructural se desarrollará considerando:

- Tránsito categoría T1.
- Subrasante tipo S2.
- Soporte tipo BG.
- Condición D y B.
- Concreto tipo MR1.

La combinación de las variables anteriores permitirá seleccionar la estructura de pavimento correspondiente dentro del catálogo estructural del manual de diseño.

Debido a que el presente proyecto corresponde a una vía urbana de bajo volumen de tránsito y longitud reducida, la metodología adoptada se considera técnicamente adecuada y compatible con las condiciones funcionales y estructurales del corredor vial proyectado.

## 8. DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

La estructura de pavimento proyectada fue definida mediante la metodología de catálogo establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, considerando las condiciones geotécnicas, operacionales y estructurales identificadas para el corredor vial objeto de estudio.

La selección estructural se realizó a partir de los parámetros de diseño previamente definidos para el proyecto, los cuales se resumen a continuación:

| Variable | Condición Adoptada |
|---|---|
| Categoría de tránsito | T1 |
| Clasificación de subrasante | S2 |
| Material de soporte | BG |
| Transferencia de carga | D |
| Confinamiento lateral | B |
| Resistencia del concreto | MR1 |

*Tabla 22: Variables adoptadas para selección estructural (Autor)*

Con base en las condiciones anteriores, se realizó la consulta de las tablas de diseño correspondientes al catálogo estructural para tránsito T1, obteniendo las alternativas de espesor compatibles con las condiciones del proyecto.

La estructura seleccionada contempla condiciones de soporte orientadas a mejorar el comportamiento de la subrasante debido a la baja capacidad portante identificada durante la exploración geotécnica, así como criterios de viabilidad constructiva y funcional acordes con el bajo volumen de tránsito proyectado para el corredor vial.

En los subcapítulos siguientes se presentan las alternativas estructurales evaluadas y la estructura de pavimento finalmente adoptada para el proyecto.

### 8.1. METODOLOGÍA DE SELECCIÓN ESTRUCTURAL

La selección de la estructura de pavimento rígido para el presente proyecto se realizó mediante la metodología de catálogo establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para

Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, desarrollado por el Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC y adoptado por el Instituto Nacional de Vías – INVÍAS.

La metodología empleada corresponde a un sistema de diseño basado en catálogos estructurales previamente calibrados mediante modelos de comportamiento de pavimentos rígidos, considerando diferentes combinaciones de tránsito, capacidad de soporte y condiciones estructurales.

El procedimiento general de selección consiste en definir las variables de diseño del proyecto y posteriormente identificar la combinación correspondiente dentro de las tablas de catálogo establecidas en el manual.

Para el presente proyecto, la selección estructural se desarrolló considerando:

- la categoría de tránsito,
- la clasificación de subrasante,
- el tipo de soporte estructural,
- las condiciones de transferencia de carga y confinamiento lateral,
- y la resistencia a flexotracción del concreto hidráulico.

Con base en las condiciones definidas para el corredor vial objeto de estudio, se realizó la consulta de las tablas correspondientes al catálogo estructural para tránsito bajo, obteniendo las alternativas de espesor compatibles con las condiciones del proyecto.

La metodología adoptada se considera técnicamente adecuada para el presente proyecto debido a que el corredor corresponde a una vía urbana de bajo volumen de tránsito, con condiciones geométricas y operacionales compatibles con los criterios de aplicación del manual de diseño utilizado.

## 8.2. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS Y SELECCIÓN ESTRUCTURAL

Con base en la consulta del catálogo estructural correspondiente a tránsito T1 del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, se evaluaron diferentes alternativas de espesor para la losa de concreto hidráulico, considerando variaciones en la resistencia a flexotracción del concreto (MR).

Las alternativas estructurales compatibles con las condiciones del proyecto corresponden a las siguientes:

| Alternativa | Resistencia del concreto | Espesor de losa |
|---|---|---|
| Alternativa 1 | MR1 | 22 cm |

| | | |
|---|---|---|
| Alternativa 2 | MR2 | 22 cm |
| Alternativa 3 | MR3 | 21 cm |

*Tabla 23:Alternativas estructurales evaluadas. Fuente: Adaptado de INVÍAS – ICPC, Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.*

Desde el punto de vista estructural, las tres alternativas evaluadas cumplen con las condiciones de solicitación previstas para el corredor vial proyectado. Sin embargo, considerando las características funcionales, geométricas y operacionales del proyecto, así como criterios de viabilidad constructiva y económica, se considera más conveniente la adopción de una solución con concreto tipo MR1.

La utilización de resistencias superiores permitiría reducciones mínimas en el espesor de la losa, del orden de 1 cm a 2 cm, situación que no representa una disminución significativa en los costos globales de construcción del proyecto, especialmente considerando la corta longitud del corredor vial.

Adicionalmente, la implementación de concretos de mayor resistencia implica:

- mayores controles de producción,
- incremento en costos de materiales,
- mayores exigencias de calidad,
- y menor flexibilidad constructiva en obra.

Considerando que el proyecto corresponde a una vía urbana de bajo volumen de tránsito y bajas solicitaciones estructurales, la alternativa con concreto MR1 proporciona un comportamiento estructural adecuado y compatible con las condiciones de servicio proyectadas.

Por otra parte, debido a las condiciones geotécnicas identificadas durante la exploración del corredor, la estructura de pavimento contempla la incorporación de una capa de mejoramiento de subrasante y una capa de base granular, orientadas a optimizar las condiciones de soporte y uniformidad de apoyo de la losa de concreto hidráulico.

La capa de mejoramiento fue definida considerando las condiciones de baja capacidad soporte de la subrasante y los criterios establecidos en el Artículo INV-230-07, adoptándose un espesor de 30 cm con el propósito de:

- incrementar la capacidad portante,
- reducir deformaciones,
- controlar variaciones volumétricas,
- y proporcionar una plataforma uniforme de apoyo para la estructura de pavimento.

Sobre la capa de mejoramiento se proyecta una base granular tipo C con espesor de 15 cm, la cual permitirá mejorar la distribución de cargas y optimizar el comportamiento estructural del pavimento rígido proyectado.

Con base en el análisis realizado, se adopta para el presente proyecto la siguiente estructura de pavimento:

| Capa | Espesor |
|---|---|
| Pavimento rígido en concreto hidráulico MR1 | 22 cm |
| Base granular tipo C | 15 cm |
| Mejoramiento de subrasante | 30 cm |

*Tabla 24: Estructura de pavimento adoptada para el proyecto. (Autor)*

La estructura seleccionada se considera técnicamente adecuada para las condiciones geotécnicas, hidráulicas y operacionales identificadas en el corredor vial, proporcionando condiciones apropiadas de capacidad estructural, soporte y durabilidad para el periodo de servicio proyectado.

## 9. VALIDACIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE “UNALOSA”

Con el propósito de verificar el comportamiento estructural de la estructura de pavimento seleccionada para el proyecto, se realizó una modelación analítica mediante el software UNALOSA para Windows 3.0, herramienta basada en la teoría clásica de losas sobre fundación elástica desarrollada por Westergaard e Ioannides.

La modelación permitió evaluar los esfuerzos y deformaciones generados en la losa de concreto hidráulico debido a cargas vehiculares y gradientes térmicos, verificando la compatibilidad estructural de la solución adoptada para las condiciones de tránsito, soporte y geometría del corredor vial proyectado.

El análisis se desarrolló considerando una estructura conformada por:

- losa de concreto hidráulico MR1,
- base granular tipo C,
- y mejoramiento de subrasante.

Los parámetros de entrada utilizados para la modelación estructural se presentan a continuación:

| Parámetro | Valor |
|---|---|

| | |
|---|---|
| Espesor de losa | 22 cm |
| Módulo de elasticidad del concreto | 24,000 MPa |
| Relación de Poisson | 0.15 |
| Módulo de reacción de subrasante (k) | 30 $MN/m^3$ |
| Carga de semieje | 40,000 N |
| Radio de contacto | 13.5 cm |
| Largo de losa | 3.50 m |
| Ancho de losa | 3.00 m |
| Coeficiente de dilatación térmica | $9 \times 10^{-6}$ /°C |
| Gradiente de temperatura | 1 °C |
| Densidad del concreto | 0.0236 $MN/m^3$ |
| Coeficiente de fricción losa/suelo | 0.65 |

*Tabla 25: Parámetros de entrada utilizados en UNALOSA (Autor)*

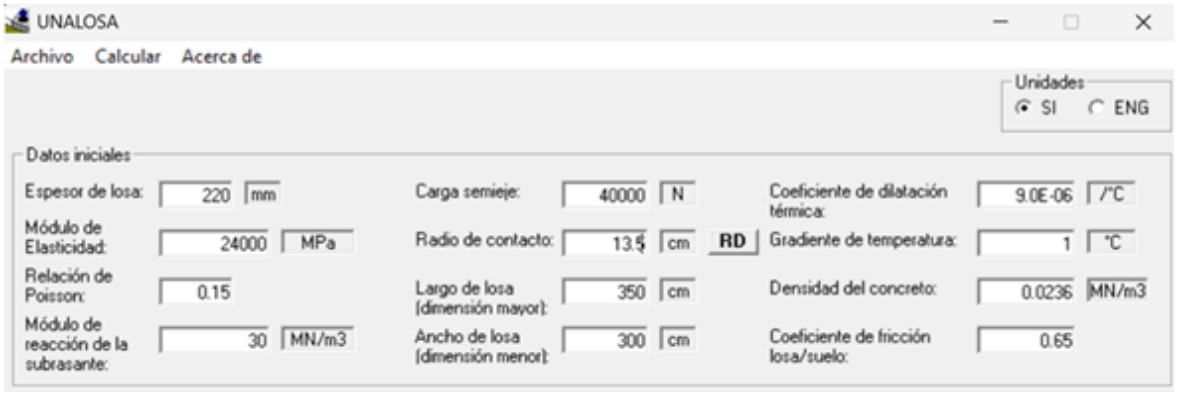



*Tabla 26: Interfaz Datos de entrada UNALOSA. (UNALOSA)*

A continuación, se describe el criterio técnico adoptado para cada uno de los parámetros utilizados en la modelación:

**Espesor de losa**

Corresponde al espesor estructural de la losa de concreto hidráulico seleccionado mediante el catálogo estructural INVÍAS – ICPC para la combinación de variables adoptadas en el proyecto.

El espesor definido corresponde a:

**h = 22 cm**

valor obtenido para la condición:

- tránsito T1,
- subrasante S2,
- soporte BG,
- condición D y B,
- y concreto MR1.

**Módulo de elasticidad del concreto**

El módulo de elasticidad representa la rigidez del concreto hidráulico frente a deformaciones elásticas inducidas por carga.

Para concretos hidráulicos utilizados en pavimentos rígidos, los valores típicos se encuentran en rangos aproximados entre 24,000 MPa y 30,000 MPa, dependiendo de la resistencia y composición del concreto.

Para el presente análisis se adoptó:

**E = 24,000 MPa**

valor compatible con concretos tipo MR1 utilizados en pavimentos de bajo volumen de tránsito.

**Relación de Poisson**

La relación de Poisson representa la relación entre deformación transversal y deformación longitudinal del concreto sometido a carga.

Para pavimentos rígidos, los valores típicamente adoptados oscilan entre 0.10 y 0.20. Para el presente proyecto se utilizó:

**μ = 0.15**

valor ampliamente utilizado en modelaciones de pavimentos de concreto hidráulico.

**Módulo de reacción de subrasante (k)**

El módulo de reacción de subrasante corresponde al parámetro que representa la rigidez del sistema de soporte bajo la losa de concreto, considerando el comportamiento combinado de:

- subrasante,
- mejoramiento,
- y capa granular de apoyo.

Debido a que el proyecto contempla:

- mejoramiento de subrasante de 30 cm,
- y base granular tipo C de 15 cm,

se adoptó un valor equivalente de:

**k = 30 MN/m³**

valor representativo para estructuras de pavimento apoyadas sobre capas granulares mejoradas y compatible con las condiciones de soporte proyectadas para el corredor vial.

**Carga de semieje**

La carga de semieje corresponde a la carga vertical transmitida por una de las ruedas del eje vehicular analizado.

Para la modelación se adoptó una carga equivalente correspondiente a:

**P = 40,000 N**

valor representativo de media carga de un eje estándar de diseño utilizado comúnmente en análisis estructural de pavimentos rígidos.

**Radio de contacto**

El radio de contacto corresponde al radio equivalente del área circular de contacto entre la llanta y la superficie del pavimento.

El valor utilizado en la modelación fue calculado mediante la expresión:

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}$$

Donde:

- $a$ = radio de contacto,
- $P$ = carga aplicada,
- $p$ = presión de contacto neumático-pavimento.

Considerando:

- carga aplicada $P = 40,000\ N$,
- presión de contacto aproximada $p = 0.7\ MPa$,

se obtiene:

$$a = \sqrt{\frac{40000}{\pi(700000)}} = 0.135\ m$$

Por lo tanto:

**a = 13.5 cm**

**Dimensiones de losa**

La modulación de losas utilizada para la modelación corresponde a paneles de:

**3.50 m × 3.00 m**

La selección de estas dimensiones considera:

- el ancho reducido de la vía,
- tránsito bajo,
- geometría urbana del corredor,
- y control de esfuerzos y deformaciones en bordes y esquinas.

La utilización de paneles de dimensiones reducidas contribuye favorablemente al comportamiento estructural del pavimento rígido.

**Coeficiente de dilatación térmica**

El coeficiente de dilatación térmica representa la variación dimensional del concreto debido a cambios de temperatura.

Para el análisis se adoptó:

**$\alpha = 9 \times 10^{-6}$ /°C**

valor típico utilizado para concretos hidráulicos en pavimentos rígidos.

**Gradiente de temperatura**

El gradiente térmico representa la diferencia de temperatura entre la cara superior e inferior de la losa, parámetro utilizado para evaluar esfuerzos por alabeo térmico.

Para la modelación se consideró:

**$\Delta T = 1$ °C**

valor representativo para condiciones normales de operación del pavimento.

**Densidad del concreto**

La densidad del concreto corresponde al peso unitario del material utilizado en la losa de pavimento.

Para el presente análisis se adoptó:

**$\gamma = 0.0236$ MN/m³**

valor típico para concretos hidráulicos convencionales.

**Coeficiente de fricción losa/suelo**

El coeficiente de fricción representa la resistencia al desplazamiento horizontal de la losa sobre la capa de apoyo.

Debido a que la estructura contempla apoyo sobre base granular y mejoramiento compactado, se adoptó:

**f = 0.65**

valor representativo para pavimentos rígidos apoyados sobre capas granulares compactadas, compatible con las condiciones proyectadas para el proyecto.

Los resultados principales obtenidos mediante la modelación estructural se presentan a continuación:

| Parámetro de verificación | Resultado |
|---|---|
| Radio de rigidez relativa | 92.31 cm |
| Esfuerzo esquina – Westergaard | 1.52 MPa |
| Esfuerzo esquina – Ioannides | 1.54 MPa |
| Esfuerzo interior | 1.17 MPa |
| Esfuerzo borde circular | 2.26 MPa |
| Esfuerzo borde semicircular | 2.67 MPa |
| Esfuerzo de alabeo – borde longitudinal | 0.05 MPa |
| Esfuerzo de alabeo – borde transversal | 0.03 MPa |
| Esfuerzo de alabeo – interior longitudinal | 0.05 MPa |
| Esfuerzo de alabeo – interior transversal | 0.04 MPa |
| Esfuerzo de fricción máximo teórico | 2.68 MPa |

*Tabla 27: Resultados principales de modelación estructural mediante UNALOSA. Fuente: Elaboración propia con base en resultados obtenidos en UNALOSA.*

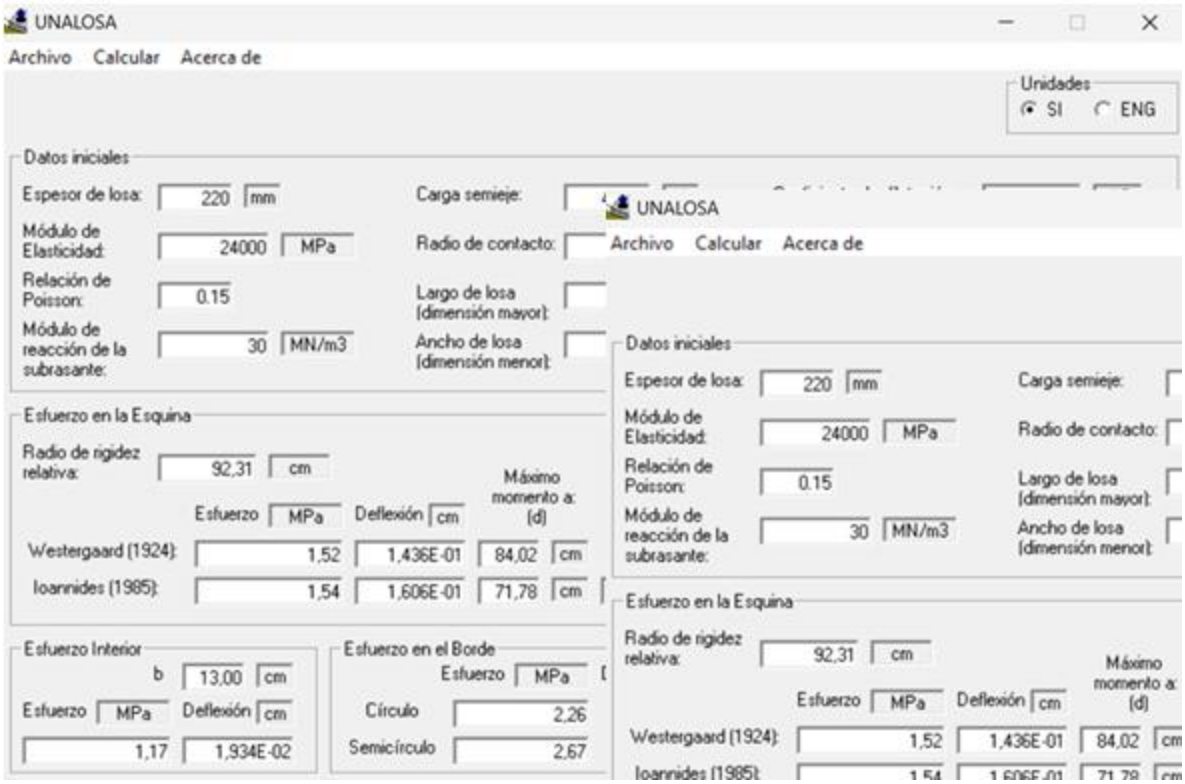



*Tabla 28: Resultados Calculo UNALOSA interfaz. (UNALOSA)*

A continuación, se describe el significado técnico de cada parámetro de verificación obtenido en la modelación:

**Radio de rigidez relativa**

El radio de rigidez relativa representa la interacción entre la rigidez de la losa de concreto y la capacidad de soporte de la fundación. Este parámetro permite evaluar la forma en que la losa distribuye las cargas hacia el sistema de apoyo.

Un mayor radio de rigidez relativa indica mayor capacidad de la losa para distribuir esfuerzos sobre un área más amplia. Para la estructura modelada se obtuvo:

$$\mathbf{l = 92.31\ cm}$$

Este valor es consistente con una losa de concreto hidráulico de 22 cm apoyada sobre una estructura de soporte conformada por base granular y mejoramiento.

**Esfuerzo en la esquina**

El esfuerzo en la esquina evalúa una de las condiciones más críticas en pavimentos rígidos, debido a que en esta zona la losa presenta menor confinamiento relativo y mayor susceptibilidad a deformaciones locales.

UNALOSA calcula este esfuerzo mediante las formulaciones de Westergaard e Ioannides, obteniéndose:

| Método | Esfuerzo |
|---|---|
| Westergaard | 1.52 MPa |
| Ioannides | 1.54 MPa |

Los valores obtenidos son similares entre sí, lo cual indica consistencia en la respuesta estructural calculada para la condición de carga en esquina.

**Esfuerzo interior**

El esfuerzo interior corresponde al esfuerzo generado cuando la carga actúa en una zona interna de la losa, alejada de bordes y esquinas. Esta condición suele presentar menores esfuerzos debido al mayor confinamiento estructural de la losa.

Para la estructura modelada se obtuvo:

**σ interior = 1.17 MPa**

Este resultado evidencia un comportamiento adecuado en la zona central de la losa, con esfuerzos inferiores a los obtenidos en borde y esquina.

**Esfuerzo en el borde**

El esfuerzo en el borde corresponde a una condición crítica de análisis en pavimentos rígidos, debido a que la losa presenta menor continuidad lateral y mayor concentración de esfuerzos frente a cargas aplicadas cerca del extremo.

UNALOSA evalúa esta condición mediante dos casos:

| Condición | Esfuerzo |
|---|---|
| Carga circular | 2.26 MPa |
| Carga semicircular | 2.67 MPa |

El mayor valor corresponde a la condición de carga semicircular, por lo cual este se adopta como el esfuerzo crítico de verificación estructural.

**Esfuerzos de alabeo**

Los esfuerzos de alabeo se producen por la diferencia de temperatura entre la cara superior e inferior de la losa, generando curvaturas y esfuerzos internos asociados a gradientes térmicos.

Para la modelación realizada se obtuvieron los siguientes valores:

| Condición | Esfuerzo |
|---|---|
| Borde longitudinal | 0.05 MPa |
| Borde transversal | 0.03 MPa |
| Interior longitudinal | 0.05 MPa |
| Interior transversal | 0.04 MPa |

Los valores obtenidos son bajos, lo cual indica que, para el gradiente térmico considerado, el efecto de alabeo no gobierna el diseño estructural de la losa.

**Esfuerzo de fricción**

El esfuerzo de fricción corresponde al esfuerzo inducido por la restricción al movimiento horizontal de la losa sobre la capa de apoyo, asociado principalmente a cambios volumétricos por temperatura y contracción.

Para la modelación realizada se obtuvo:

**σ fricción = 2.68 MPa**

Este valor corresponde al esfuerzo máximo teórico por fricción calculado por el programa y debe interpretarse como una condición complementaria de verificación asociada a la interacción losa–soporte.

**Verificación frente al módulo de rotura**

El concreto adoptado para el proyecto corresponde a MR1, con resistencia a flexotracción de:

**MR = 3.8 MPa**

El esfuerzo máximo obtenido en la modelación corresponde al esfuerzo en borde semicircular:

**σ máx = 2.67 MPa**

Por lo tanto, se verifica:

**2.67 MPa < 3.8 MPa**

La relación demanda/capacidad corresponde aproximadamente a:

**2.67 / 3.8 = 0.70**

Es decir, el esfuerzo máximo calculado representa cerca del 70 % de la resistencia a flexotracción adoptada para el concreto.

**Conclusión de la validación estructural**

Con base en los resultados obtenidos mediante UNALOSA, se concluye que la losa de concreto hidráulico MR1 de 22 cm presenta un comportamiento estructural adecuado frente a la carga de semieje considerada en la modelación. El esfuerzo crítico calculado se mantiene por debajo del módulo de rotura del concreto adoptado, por lo cual la estructura seleccionada verifica satisfactoriamente desde el punto de vista de esfuerzos en la losa.

Adicionalmente, los esfuerzos de alabeo resultan bajos para el gradiente térmico considerado, y la modulación de losas propuesta contribuye favorablemente al control de esfuerzos en borde, esquina e interior.

## 10. CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño estructural de un pavimento rígido para una vía urbana de bajo volumen de tránsito ubicada en el municipio de Chaguaní, Cundinamarca, considerando las condiciones geotécnicas, geométricas y operacionales identificadas para el corredor vial proyectado.

- La exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio realizados evidenciaron la presencia predominante de materiales finos asociados a depósitos aluviales recientes, con elevados contenidos de humedad y baja capacidad de soporte de la subrasante.

- Los ensayos CBR realizados sobre las muestras representativas del corredor presentaron valores comprendidos entre 1.72 % y 2.32 %, adoptándose para efectos de diseño un valor de CBR = 2.00 %, correspondiente a una subrasante tipo S2 conforme a la clasificación establecida en el Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.

- El corredor vial fue clasificado dentro de la categoría de tránsito T1, considerando un Tránsito Promedio Diario (TPD) de 348 vehículos por día, condición compatible con vías urbanas de bajo volumen de tránsito y diseño el valor crítico correspondiente al mayor Número de Ejes Equivalentes (NEE), en este caso $1.45\times10^{5}$.

- Debido a las condiciones deficientes de soporte identificadas en la subrasante, el diseño estructural contempló la incorporación de una capa de mejoramiento de 30 cm y una base granular tipo C de 15 cm, orientadas a mejorar la capacidad portante y uniformidad de apoyo de la estructura de pavimento.

- La selección estructural se realizó mediante el catálogo INVÍAS – ICPC, evaluando diferentes alternativas de espesor y resistencia del concreto hidráulico para las condiciones de tránsito y soporte definidas para el proyecto.

- Como resultado del análisis técnico y económico realizado, se adoptó una solución estructural conformada por:
    - losa de concreto hidráulico MR1 de 22 cm,
    - base granular tipo C de 15 cm,
    - mejoramiento de subrasante de 30 cm.

- La utilización de concreto tipo MR1 se considera técnicamente viable para las condiciones del proyecto, debido a que el corredor corresponde a una vía urbana de bajas solicitaciones estructurales y longitud reducida, permitiendo optimizar costos sin comprometer el comportamiento estructural del pavimento.

- La validación estructural realizada mediante el software UNALOSA permitió verificar el comportamiento de la estructura seleccionada frente a cargas vehiculares y gradientes térmicos, obteniéndose esfuerzos inferiores a la resistencia a flexotracción del concreto adoptado.

- El esfuerzo crítico obtenido en la modelación correspondió al esfuerzo de borde semicircular, con un valor de 2.67 MPa, el cual se mantiene por debajo del módulo de rotura adoptado para el concreto hidráulico MR1 de 3.8 MPa.

- Los resultados obtenidos evidencian que la estructura de pavimento seleccionada presenta un comportamiento estructural adecuado para las condiciones de tránsito, soporte y operación previstas para el proyecto.

- La modulación adoptada para las losas de concreto contribuye favorablemente al control de esfuerzos en borde, esquina e interior, así como a la reducción de deformaciones y efectos asociados al alabeo térmico.

- Con base en los análisis realizados, se concluye que la estructura de pavimento propuesta es técnicamente viable y compatible con las condiciones funcionales, geotécnicas e hidráulicas identificadas en el corredor vial objeto de estudio.

## 11. RECOMENDACIONES

- Se recomienda garantizar un adecuado control de calidad durante la construcción de las capas de mejoramiento, base granular y concreto hidráulico, verificando el cumplimiento de espesores, niveles de compactación y especificaciones técnicas definidas para el proyecto.
- La capa de mejoramiento deberá ejecutarse sobre una superficie previamente conformada y libre de materiales orgánicos o inadecuados, asegurando condiciones homogéneas de soporte a lo largo del corredor vial.
- Debido a las condiciones de baja capacidad soporte y presencia de humedad identificadas en la subrasante, se recomienda evitar la exposición prolongada del terreno de fundación a saturación o escorrentías superficiales durante la ejecución de las obras.
- Se recomienda realizar control permanente de humedad y compactación de las capas granulares, especialmente considerando la susceptibilidad de los materiales finos presentes en el corredor frente a cambios de humedad.
- La base granular tipo C deberá cumplir con las especificaciones granulométricas y de calidad establecidas por INVÍAS para materiales de soporte de pavimentos rígidos.
- Se recomienda garantizar un adecuado sistema de drenaje superficial y manejo hidráulico del corredor vial, con el fin de minimizar infiltraciones y pérdidas de capacidad soporte en la estructura de pavimento.
- Durante la construcción del pavimento rígido deberá realizarse control estricto de:
    - asentamiento del concreto,
    - tiempos de mezclado,
    - colocación,
    - vibrado,
    - acabado superficial,
    - proceso de curado.
- El proceso de curado del concreto deberá iniciarse inmediatamente después de finalizadas las actividades de acabado superficial, garantizando condiciones adecuadas de hidratación y control de fisuración temprana.
- Se recomienda ejecutar oportunamente los cortes de juntas para controlar la aparición de fisuras por retracción del concreto, respetando la modulación y profundidades definidas dentro del proyecto.
- Las juntas deberán mantenerse limpias y correctamente selladas para evitar infiltración de agua y deterioro prematuro de los bordes de las losas.
- Debido a la geometría reducida de la vía y a la presencia de bordillos laterales, se recomienda mantener estricto control de alineamiento y niveles durante la construcción del pavimento para garantizar adecuada confinación lateral y uniformidad superficial.
- Se recomienda restringir el tránsito vehicular sobre el pavimento hasta que el concreto alcance las resistencias mínimas requeridas para puesta en servicio.
- Cualquier modificación futura relacionada con incremento significativo del tránsito vehicular o incorporación de cargas pesadas deberá ser previamente evaluada mediante una nueva verificación estructural del pavimento.

- Se recomienda realizar mantenimiento preventivo periódico de juntas, bordillos y elementos hidráulicos asociados al corredor vial, con el fin de preservar las condiciones funcionales y estructurales del pavimento durante su vida útil proyectada.



**JOSE JAVIER BELTRAN QUIÑONEZ**
**C.C. No 1095726154**
**MP. 68202-414752 STD**

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


- Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC; Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. (2008). Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto para Vías con Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Manual de Drenaje para Carreteras.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Norma INV E-122. Determinación en laboratorio del contenido de agua de suelos y rocas.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Norma INV E-123. Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Norma INV E-125. Determinación del límite líquido de los suelos.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Norma INV E-126. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Norma INV E-148. Relación de soporte del suelo en laboratorio – CBR.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Norma INV E-414. Resistencia a la flexión del concreto. Método de la viga simple cargada en los tercios de la luz.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Artículo 230. Mejoramiento de subrasante.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. Artículo 330. Base granular.
- American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO. (1993). Guide for Design of Pavement Structures.
- AASHTO T193. Standard Method of Test for The California Bearing Ratio.
- ASTM International. ASTM D1883. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.
- ASTM International. ASTM C78. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete.
- Portland Cement Association – PCA. (1984). Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements.
- Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design. Pearson Prentice Hall.
- Westergaard, H. M. (1926). Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis. Public Roads.
- Ioannides, A. M. (1985). Analysis of Slabs-on-Grade for a Variety of Loading and Support Conditions.
- Das, B. M. (2010). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning.
- Bowles, J. E. (1996). Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill.
- Vásquez Varela, L. R. (2004). UNALOSA para Windows 3.0. Cálculo de esfuerzos y deformaciones en pavimentos rígidos debidos a carga y temperatura. Manizales, Colombia.

- Servicio Geológico Colombiano – SGC. Cartografía geológica oficial consultada para el área del proyecto