6. DOCUMENTOS TÉCNICOS QUE CONTENGAN LA DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS – INVIAS

VOLUMEN VI.
ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DISEÑO DEL PAVIMENTO
K13+250 – K22+350

CONTRATO 985 – 2022

OBJETO:
MEJORAMIENTO, MANTENIMIENTO, GESTIÓN PREDIAL, SOCIAL Y AMBIENTAL SOSTENIBLE DE LA CARRETERA VILLA GARZÓN SAN JOSÉ DE FRAGUA Y PUENTE SOBRE EL RÍO CAQUETÁ EN EL MARCO DE LA REACTIVACIÓN ECONÓMICA, MEDIANTE EL PROGRAMA DE VÍAS PARA LA CONEXIÓN DE TERRITORIOS, EL CRECIMIENTO SOSTENIBLE Y LA REACTIVACIÓN 2.0.

Contratista

CONSORCIO VÍAS COLOMBIA 055

VOLUMEN VI. ESTUDIO GEOTÉCNICO Y DISEÑO DEL PAVIMENTO
SECTOR K13+250-K22+350
CONTROL DE VERSIONES

Versión	Fecha	Descripción de Modificación	Folios
0.0	2022-12-09	Versión inicial.	219
1.0	2022-12-27	Atención observaciones de Interventoría mediante Oficio JASB-702-263	219

Consorcio Vías Colombia 055

CONSORCIO VÍAS COLOMBIA 055
ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

Elaborado por	Revisado por	Aprobado por
Néstor Bahos Canencio	Diego Armando Olaya	Neimar Castaño Peláez
Especialista en Pavimentos	Coordinador de Proyecto	Director de Proyecto

Responsable por Revisión	Aprobado por
Juan Pablo Huertas	Raúl Antonio Pérez Guaglianoni
Especialista en Pavimentos de Interventoría	Director de Interventoría

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN **10**
1 OBJETIVOS Y ALCANCES **11**
1.1 OBJETIVO GENERAL 11
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO 11
1.2.1 LOCALIZACIÓN 12
2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA **13**
2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO AASHTO-93 13
2.1.1 Período de análisis 15
2.1.2 Clima y temperatura 15
2.1.3 Tránsito 16
2.1.4 Confiabilidad 16
2.1.5 Error estándar (So) 17
2.1.6 Serviciabilidad 18
2.1.7 Características de las capas 18
2.1.8 Coeficiente de drenaje 25
2.1.9 Coeficiente de transferencia de carga (J) 27
2.1.10 Pérdida de soporte (Ls) 28
2.1.11 Módulo efectivo de la subrasante (E_{ef}) 28
2.1.12 Coeficientes adoptados -Pavimento flexible 29
2.1.13 Coeficientes adoptados -Pavimento rígido 29
2.2 DISEÑO EMPÍRICO-MECANICISTA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES 30
2.3 CALCULO DE ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS 33
2.3.1 Carga en la esquina de la losa 34
2.3.2 Westergaard (1926): 34
2.3.3 Ioannides (1985) 35
2.3.4 Esfuerzos y Deformaciones por Carga en el Borde. Westergaard (1926-48). Ioannides (1985)) 36
2.3.5 Esfuerzo de fricción: 37
2.3.6 Verificación de esfuerzos térmicos y de cargas de losa. 37
3 INFORMACIÓN EXISTENTE **39**
3.1 ANÁLISIS EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA EXISTENTE (CONTRATO INVIAS 2722 de 2019) 39
4 INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA **58**
5 TRABAJOS DE CAMPO **61**
5.1 ESTADO ACTUAL DEL CORREDOR 61
5.2 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA COMPLEMENTARIA 64
6 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS **78**
6.1 CAPACIDAD SOPORTE MATERIALES EXISTENTES 78
6.2 MÓDULO RESILIENTE DE LOS MATERIALES GRANULARES EXISTENTES 79
6.3 DEFINICIÓN DEL CBR CARACTERÍSTICO DE LA SUBRASANTE 80
6.4 POTENCIAL DE EXPANSIÓN 82
7 ANÁLISIS INTERDISCIPLINAR **93**
7.1 COMPONENTE GEOMÉTRICO 93
8 ESTUDIO DE FUENTES DE MATERIALES **96**
9 ESTUDIO DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE **98**
9.1 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL 99
9.2 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL 99
9.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES 99
10 DISEÑO DE PAVIMENTOS **104**
10.1 MATERIALES 104
10.2 CAPACIDAD ESTRUCTURAL ACTUAL 104
10.3 ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN 105
10.3.1 Alternativa 1: Estructura de pavimento flexible (periodo de diseño: 10 años). 106
10.3.2 Alternativa 2: Estructura de pavimento rígido (periodo de diseño: 20 años). 109
10.4 MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE PARA SECCIONES EN CORTE 132

10.5 DISEÑO DE ESPACIO PÚBLICO – ANDENES....135
11 ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS DE INTERVENCIÓN....138
11.1 ANÁLISIS AMBIENTAL....138
11.1.1 CONCEPTOS PRELIMINARES....138
11.1.2 MEZCLA ASFÁLTICA....139
11.1.3 DOSIFICADORA DE CONCRETO....141
11.2 COSTO CONSTRUCTIVO....143
11.3 COMPARATIVO ETAPA DE MANTENIMIENTO....144
11.3.1 Manejadores de datos....145
11.3.2 Configuración....145
11.3.3 Herramientas de análisis....146
11.3.4 Modelos del hdm-4....147
11.3.5 Insumos....148
11.3.6 Condición inicial....150
11.3.7 Estrategias de intervención (Reconstrucción y Mantenimientos)....152
11.3.8 Resultados....155
11.4 SELECCIÓN ALTERNATIVA ÓPTIMA DE INTERVENCIÓN....165
12 INTERPRETACIÓN DISEÑO GEOMÉTRICO E INCORPORACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO....166
12.1 ADECUACIÓN DE LA PLATAFORMA DE TRABAJO PARA UN MÓDULO EQUIVALENTE DE 100 MPa 189
13 SECCIONES TRANSVERSALES TIPO....194
13.1 ADECUACIÓN PLATAFORMA DE TRABAJO: Incorporación de material mejoramiento (Art. 230-22)....194
13.2 ADECUACIÓN PLATAFORMA DE TRABAJO: Ampliaciones de terraplén....196
13.3 IMPLANTACIÓN SOBRE OBRAS HIDRÁULICAS....198
14 PROCESO CONSTRUCTIVO....199
14.1 ADECUACIÓN DE LA PLATAFORMA DE TRABAJO (RAJÓN O CRUDO DE RÍO (ART. 230-22) O MATERIAL GRANULAR PARA CONFORMACIÓN DE TERRAPLENES (ART. 220-22)....199
14.2 INSTALACIÓN DE CAPAS DE SUBBASE GRANULAR CLASE A....200
14.3 INSTALACIÓN CONCRETO HIDRÁULICO MR45....201
15 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....203
15.1 ESTUDIO DE TRÁNSITO....203
15.2 CAPACIDAD DE SOPORTE DE LOS MATERIALES EXISTENTES....203
15.3 ALTERNATIVA DE INTERVENCIÓN RECOMENDADA....204
15.3.1 RECOMENDACIONES TÉCNICAS A CONSIDERAR....207
15.3.2 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA IMPLEMENTACIÓN DE GEOTEXTIL....211
16 VALIDACIÓN CAPACIDAD ESTRUCTURAL....214
17 LIMITACIONES....217
18 FUENTES DE CONSULTA....218

LISTA DE ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1-1. Localización específica de la zona de intervención entre el K13+250 al K22+350. 12
Ilustración 2-1. Coeficiente de aporte para Mezclas asfálticas. 20
Ilustración 2-2. Coeficiente de aporte para Base granular. 21
Ilustración 2-3. Coeficiente de aporte para subbase granular Clase A nueva. 22
Ilustración 2-4. Delimitación de unidades de análisis por el método de las diferencias. 24
Ilustración 2-5. Esquema del modelo de carga a utilizar para las validaciones empírico – mecanicistas. 33
Ilustración 2-6. Carga en el borde de la losa. 36
Ilustración 2-7. Curva de Bradbury para determinar los factores de corrección C. 38
Ilustración 3-1. Variabilidad del material granular existente a lo largo del corredor en estudio. 55
Ilustración 4-1. Localización municipio cercano para toma de información climatológica. 58
Ilustración 4-2. Climograma del municipio de Villagarzón, Putumayo. 59
Ilustración 5-1. Estado superficial actual del corredor. K13+250 a K22+350. 61
Ilustración 5-2. Ausencia de obras hidráulicas. 62
Ilustración 5-3. Estado superficial generalizado a lo largo del corredor en estudio. 63
Ilustración 5-4. Vista satelital de exploración geotécnica complementaria vs exploración geotécnica existente. 64
Ilustración 5-5. Perfil estratigráfico identificado K13+225 a K15+700. 69
Ilustración 5-6. Perfil estratigráfico identificado K15+950 a K18+520. 70
Ilustración 5-7. Perfil estratigráfico identificado K18+770 a K20+850. 71
Ilustración 5-8. Perfil estratigráfico identificado K21+020 a K22+750. 72
Ilustración 5-9. Evidencia fotográfica material granular identificado. 73
Ilustración 5-10. Variabilidad espesor material granular a lo largo del K13+250 al K22+350. 74
Ilustración 5-11. Cambios de rasante proyectados vs Espesores de material granular existente. 75
Ilustración 6-1. Variabilidad CBR inalterado a lo largo del corredor. 82
Ilustración 6-2 Carta de diseño de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973) para determinación del porcentaje de expansión. 84
Ilustración 6-3. Cartas de Abduljauwad & Al Sulaimani (1993). Potencial de expansión. 85
Ilustración 7-1. Perfil longitudinal K13+000 al K20+000. 93
Ilustración 7-2. Sección Transversal K14+710. 94
Ilustración 10-1. Predimensionamiento estructura de pavimento flexible. MDC-19 / MDC-25: 15cm + BG-A: 20cm + Adecuación plataforma de trabajo 100MPa 106
Ilustración 10-2. Estructuras de pavimento flexible. 109
Ilustración 10-3. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, superando una profundidad infinita. 112
Ilustración 10-4. Nomograma para determinar el deterioro relativo, Ur. 113
Ilustración 10-5. Módulo efectivo del paquete estructural afectado por pérdida de soporte. 114
Ilustración 10-6. Estimación módulo equivalente mínimo para suplir un módulo efectivo igual o mayor a 18.6MPa/m. 117
Ilustración 10-7. Espesores constructivos recomendados para la estructura de pavimento rígido. Secciones en terraplenes mayores a 0.5metros. 124
Ilustración 10-8. Distribución refuerzo para losas irregulares o especiales. 126
Ilustración 10-9. Detalle de construcción de las juntas. 128
Ilustración 10-10. Esquema de junta de expansión – Sin pasador. 130
Ilustración 10-11. Esquemas de Barras de transferencia de Carga – Pasajuntas. 131
Ilustración 10-12. Esquema de junta transversal de transferencia. 132
Ilustración 10-13. Validación numérica AASHTO-93. Pavimento flexible en zonas de corte. 135
Ilustración 11-1. Estándar de conservación. 145
Ilustración 11-2. Sección tipo pavimento flexible. 149
Ilustración 11-3. Sección tipo pavimento rígido 149
Ilustración 11-4. Variabilidad espesor material granular a lo largo del K13+250 al K22+350. 151
Ilustración 11-5. Variabilidad del IRI por alternativa de intervención. 164
Ilustración 12-1. Cambios de rasante proyectados. 168
Ilustración 12-2. Cambios de rasante y espesores de material granular existente. Considerando la implantación de la estructura de pavimento rígido de 21cm (21cm MR45 + Adecuación plataforma de trabajo 100MPa en zonas de lleno o 45MPa en zonas de corte con inclusión de 20cm de Subbase Granular Clase A entre la adecuación de la plataforma de trabajo y losa de concreto). 188
Ilustración 12-3. Módulo equivalente y material granular adicional para garantizar cambios de rasante para garantizar un módulo equivalente entre 45MPa y 100MPa. 192

Ilustración 13-1. Sección transversal tipo sobre zonas de corte o ausencia de material granular existente. 195
Ilustración 13-2. Implantación estructura de pavimento propuesta sobre materiales existentes y conformación de llave de empalme donde el ancho de calzada proyectada por diseño geométrico genere un pequeño sobre ancho con respecto a las condiciones topográficas del terraplén existente. 197
Ilustración 13-3. Sección trasversal tipo sobre obras hidráulicas. 198
Ilustración 15-1. Sección tipo de la estructura de pavimento recomendada - Conformación de terraplenes. Entre el K13+250 al K22+350. 205
Ilustración 15-2. Sección tipo de la estructura de pavimento recomendada – Zonas de Corte o cambios de rasante menores a 41cm. Entre el K13+250 al K22+350. 206
Ilustración 15-3. Rampas de aproximación a pontones. 211
Ilustración 16-1. Ensayo plato de carga. 215

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1. Regiones climáticas según la temperatura y precipitación. 15
Tabla 2-2. Precipitación y condiciones de humedad para el ensayo. 16
Tabla 2-3. Niveles de confiabilidad sugeridos de acuerdo con la clasificación funcional del camino. 17
Tabla 2-4. Desviación estándar So. 18
Tabla 2-5 Valores de coeficientes estructurales ai 19
Tabla 2-6. Solución tabulada de la aproximación sucesiva de las diferencias acumuladas 24
Tabla 2-7. Calidad del drenaje. 25
Tabla 2-8. Valores recomendados coeficiente de drenaje 25
Tabla 2-9. Determinación tiempo de exposición a lluvias 26
Tabla 2-10. Valores del coeficiente de drenaje (mi). 27
Tabla 2-11. Coeficiente de transferencia de carga (J). 27
Tabla 2-12. Factor de pérdida de soporte. 28
Tabla 2-13. Valores de los coeficientes estructurales y de Drenaje. 29
Tabla 2-14. Parámetros de diseño pavimento rígido. 29
Tabla 3-1. Relación Listado Apiques, Abscisa y Coordenadas. 39
Tabla 3-2. Consolidados resultados de laboratorio. Contrato INVIAS 2722 de 2019. 42
Tabla 3-3 Resultados CBR's Inalterados 56
Tabla 4-1 Datos históricos de temperatura y precipitaciones – Villagarzón, Putumayo. 60
Tabla 5-1. Relación Listado Apiques, Abscisa y Coordenadas. 64
Tabla 5-2. Consolidados resultados de laboratorio. Se hace importante aclarar que no en todas las capas se tienen ensayos de laboratorio teniendo en cuenta que son ensayos de verificación a la exploración existente. 67
Tabla 5-3. Sectores que requieren excavaciones para implantación de obras hidráulicas, estructuras o ampliaciones significativas del corredor. 75
Tabla 5-4. Agrupación cambios de rasante a lo largo del corredor. 77
Tabla 6-1 Valores de CBR para distintos grados de compactación. 78
Tabla 6-2. Resultados densidades de campo. 79
Tabla 6-3 Resultados CBR's Inalterados 80
Tabla 6-4 Relación de potencial de expansión con el Límite Líquido. 83
Tabla 6-5 Relación de potencial de expansión con el IP. 83
Tabla 6-6 Sistema de clasificación de suelos expansivos (Al Sulaimi 1993). 83
Tabla 6-7. Análisis potencial de expansión. 86
Tabla 8-1. Validación calidad producción Subbase Granular Clase A (SBG-A 50). 96
Tabla 9-1. Factores de Equivalencia de Carga. 98
Tabla 9-2. Factor de distribución por carril según NCHRP. 99
Tabla 9-3. TPD proyectado 2023 a 2042. 101
Tabla 9-4. Ejes equivalentes de diseño – Pavimento flexible. 102
Tabla 9-5. Ejes equivalentes de diseño – Pavimento rígido. 103
Tabla 10-1. Módulo representativo para la capa de granular existente. 105
Tabla 10-2. Validaciones empírico - mecanicistas. Predimensionamiento: MDC-19: 12cm + BG-A: 20cm + Adecuación plataforma de trabajo 100MPa. 107
Tabla 10-3. Parámetros de diseño - Pavimento rígido. 109
Tabla 10-4. Estructura de pavimento rígido. 115
Tabla 10-5. Estructura de pavimento rígido. Determinación módulo de reacción mínimo. 116
Tabla 10-6. Parámetros de entrada para validación de esfuerzos – Pavimento rígido. 118
Tabla 10-7. Cálculo de esfuerzos generados por fricción, alabeo y tránsito. 119
Tabla 10-8. Validación de porcentajes de consumo. 120
Tabla 10-9. Costo por m2 según tipo de concreto. 120
Tabla 10-10. Validación esfuerzos máximos – Con dispositivos de amarre a berma. 122
Tabla 10-11. Validación esfuerzos máximos – Sin dispositivos de amarre a berma. 123
Tabla 10-12. Diseño juntas transversales. 125
Tabla 10-13 Recomendaciones para la selección de pasadores de carga. 126
Tabla 10-14. Recomendaciones sobre varillas de anclaje grado 60 en las juntas longitudinales de pavimentos rígidos. 127
Tabla 10-15. Cálculo del módulo combinado de la subrasante y granular existente. Metodología de Ivanov. 134
Tabla 10-16. Mejoramiento del suelo de subrasante según condiciones existentes. 136
Tabla 10-17. Estructura de pavimento para espacio público. 136

Tabla 10-18. Granulometría para la arena de sello. 137
Tabla 11-1. Calificaciones alternativas. Impacto ambiental. 143
Tabla 11-2. Calificaciones alternativas. Costo constructivo 144
Tabla 11-3. Composición vehicular 150
Tabla 11-4. Condición inicial para el recibo de obra de cada alternativa. 152
Tabla 11-5. Características de la plataforma de trabajo generalizada. 153
Tabla 11-6. Estándares de mantenimiento para análisis de intervenciones. 153
Tabla 11-7. Cronograma actividades de mantenimiento - Pavimento flexible. 156
Tabla 11-8. Cronograma actividades de mantenimiento – Pavimento rígido. 159
Tabla 11-9. Consolidados costos aproximados de mantenimiento por alternativa. 162
Tabla 11-10. Calificaciones alternativas. Costo mantenimientos. 163
Tabla 11-11. Matriz de selección de alternativa de intervención. 165
Tabla 12-1. Espesor del material granular a lo largo del K13+250 al K22+350. 166
Tabla 12-2. Listado obras hidráulicas proyectadas. 168
Tabla 12-3. Modificaciones geométricas por fuera del trazado existente. 170
Tabla 12-4. Cálculo del módulo combinado de la subrasante y granular existente. Metodología de Ivanov. Módulo 100 MPa o 45MPa. 190
Tabla 12-5 Sectorización del corredor en función de los espesores requeridos para conformación de la plataforma de trabajo. 193
Tabla 13-1. Sectores que requieren mejoramiento con adición de materiales. 196
Tabla 15-1. CBR representativo por tipo de material 203
4Tabla 15-2. Estructura de pavimento para espacio público. 209
Tabla 15-3. Granulometría para la arena de sello. 210
Tabla 16-1. Módulo de reacción para validación en obra. 216

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Recorrido
Anexo 2. Información secundaria
Anexo 3. Exploración geotécnica complementaria
Anexo 4. Resultados de laboratorio
Anexo 5. Estudio de Tránsito
Anexo 6. Memorias de cálculo
Anexo 7. Fuentes de materiales
Anexo 8. Diseño geométrico
Anexo 9. Soportes HDM IV
Anexo 10. Modulación losas

INTRODUCCIÓN

El contrato 0985 de 2022 fue adjudicado al CONSORCIO VÍAS COLOMBIA 055 cuyo objeto comprende la MEJORAMIENTO, MANTENIMIENTO, GESTIÓN PREDIAL, SOCIAL Y AMBIENTAL SOSTENIBLE DE LA CARRETERA VILLA GARZÓN SAN JOSÉ DE FRAGUA Y PUENTE SOBRE EL RÍO CAQUETÁ EN EL MARCO DE LA REACTIVACIÓN ECONÓMICA, MEDIANTE EL PROGRAMA DE VÍAS PARA LA CONEXIÓN DE TERRITORIOS, EL CRECIMIENTO SOSTENIBLE Y LA REACTIVACIÓN 2.0 entre el K2+750 al K22+350 de la vía El Porvenir - Cruce El Jauno - Puerto Guzmán sobre la Ruta Nacional 6501. Para efectos del presente documento, se analizará el sector comprendido entre el K13+250 al K22+350 de acuerdo con los requerimientos del cliente y entregas programadas a la Entidad.

En este contexto, el enfoque del presente documento corresponde al dimensionamiento de la estructura de pavimento y recomendaciones constructivas, basado principalmente en las siguientes consideraciones y lineamientos metodológicos:

- Mejorar los niveles de servicio, para de esta forma ofrecer a la comunidad ubicada en el área de influencia una infraestructura vial moderna, de alta calidad y capaz de estimular el crecimiento económico sostenido y la equidad social.

- Ofrecer una infraestructura vial en buenas condiciones, que permita disminuir los costos de operación de los vehículos, reducir los tiempos de viaje, mejorar la comodidad para la circulación vehicular y reducir los índices de accidentalidad.

- Plantear recomendaciones generales en cuanto a la conformación de una adecuada plataforma de trabajo, con el fin de garantizar el correcto desempeño de la estructura de pavimento propuesta.

1 OBJETIVOS Y ALCANCES

1.1 OBJETIVO GENERAL

Elaboración el estudio vial fase III para el componente pavimentos con la finalidad de proporcionar un adecuado desempeño de la estructura acorde con el periodo de diseño establecido, tránsito e información geotécnica (existente y complementaria) recopilada para el Proyecto.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO

La ejecución del proyecto busca, entre otros, los siguientes objetivos:

- Analizar la información geotécnica y estudio de pavimento reportado en el marco del Contrato 2722 de 2019[1] con el fin de conocer las características físico-mecánicas de los materiales presentes en la zona objeto de estudio y parámetros de diseño inicialmente contemplados para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento.

- Efectuar, de ser necesario, mediante técnicas de exploración y muestreo, la evaluación geotécnica complementaria de los materiales existentes con el objeto de validar la información reportada inicialmente durante la ejecución del Contrato 2722 de 2019 y con los cuales se establecerá el perfil estratigráfico a lo largo del corredor en estudio.

- Determinar el número de ejes equivalentes a partir de las solicitaciones del tránsito futuro y proyectado para un periodo de operación entre el 2023 al 2032 (10 años) para el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible y entre el 2023 al 2042 (20 años) para el dimensionamiento de la estructura de pavimento rígido. Esta información se basa en la información primaria suministrada en el Estudio de Transporte.

[1] Consultor J.A.M. Ingeniería y Medio Ambiente S.A.S., en el marco del Contrato 2722 de 2019, ESTUDIOS Y DISEÑOS DE MEJORAMIENTO Y/O PAVIMENTACIÓN DE LA VÍA EL PORVENIR - CRUCE EL JAUNO - PUERTO GUZMÁN, DEL DEPARTAMENTO DE PUTUMAYO.

- Realizar el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible (periodo de diseño 10 años) y rígido (periodo de diseño 20 años), cuyas metodologías y variables que intervienen en las modelaciones numéricas se encuentran enmarcadas dentro de la normatividad vigente y en lo concerniente a la AASHTO-93 y Método Empírico Mecanicistas.

- Revisión del perfil longitudinal y transversal proyectado del diseño geométrico considerando imperativamente la conservación de los materiales granulares existentes en función del nivel de confiabilidad del comportamiento a largo plazo. Lo anterior aunado al análisis interdisciplinar con los componentes de geotecnia, hidráulica, tránsito, estructuras y presupuestos.

1.2.1 LOCALIZACIÓN

La zona de estudio se encuentra localizada entre el K13+250 al K22+350 de la vía El Porvenir - Cruce El Jauno - Puerto Guzmán sobre la Ruta Nacional 6501, cuya localización como se observa en la Ilustración 1-1.

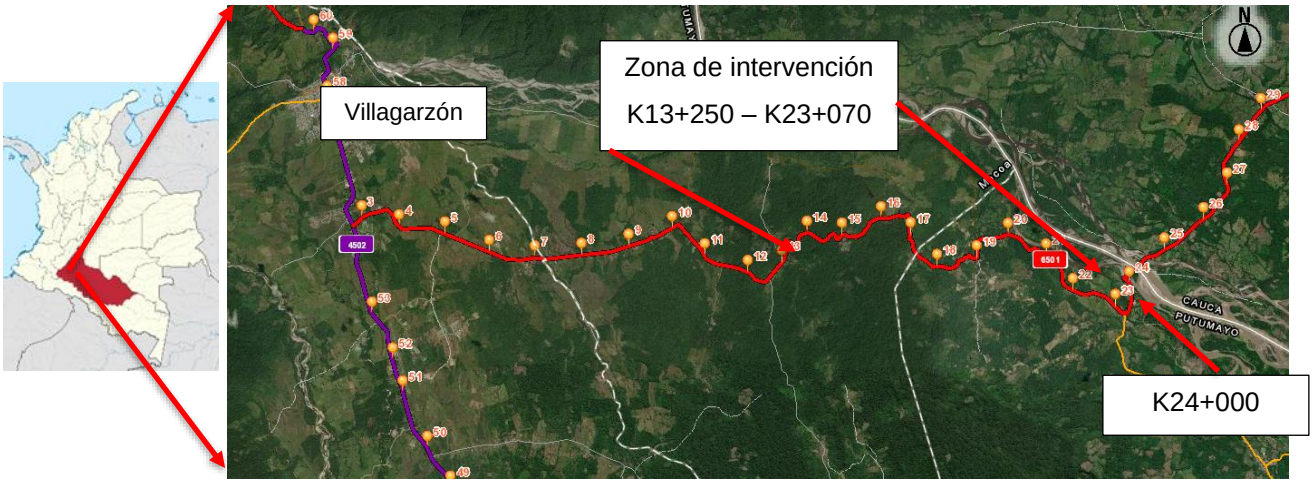


Ilustración 1-1. Localización específica de la zona de intervención entre el K13+250 al K22+350.

Fuente: Elaboración propia.

2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para el dimensionamiento y posterior validación de las alternativas en pavimento flexible y rígido a proponer durante el desarrollo del presente documento; se hará uso inicialmente de la metodología de diseño propuesta por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en el año 1993; cuyo insumo principal corresponderá al número de repeticiones equivalentes de un eje de 8.2 toneladas para el periodo de diseño de 10 años (Pavimento flexible) y 20 años (Pavimento rígido) y la capacidad de soporte de la subrasante o plataforma de trabajo identifica en la zona de estudio.

De igual forma, obtenido el predimensionamiento de los espesores de las distintas capas que conformarán las estructuras de pavimento a proponer; se procederá a validar mediante modelos empíricos – mecanicistas que los esfuerzos, deformaciones y deflexiones sean acordes con los valores máximos que puede soportar la estructura de pavimento en función del tránsito de diseño y la capacidad de soporta de la plataforma de trabajo.

A continuación, se realiza una descripción detallada de los distintos parámetros que serán utilizados para el dimensionamiento y validación de las alternativas de pavimento flexible a proponer durante el desarrollo del presente documento.

2.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO AASHTO-93

El método de diseño de la AASHTO/93, dimensiona las estructuras en función del número de ejes equivalentes en el período de diseño, el número estructural, la pérdida de serviciabilidad en el tiempo y del módulo de resiliencia.

La ecuación básica de diseño de la AASHTO-93 es la siguiente:

- Para pavimentos flexibles

$$\text{Log } N = Z_R S_o + 9.36 \log (SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \log M_R - 8.07$$

Ecuación 1

- Para pavimentos rígidos

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 7.35 \times \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22-0.32p_t)\times\log_{10}\left[\frac{(S'_c)(C_d)(D^{0.75}-1.132)}{215.63(J)\left(D^{0.75}-\frac{18.42}{\left(E_c/k\right)^{0.25}}\right)}\right]$$

Ecuación 2

Dónde:

N = Número de ejes equivalentes de 8.2 t (80 kN).
ZR = Desviación estándar normal.
SO = Error estándar combinado de la predicción del tránsito y de la predicción del comportamiento.
∆PSI = Pérdida de serviciabilidad = 2.0
MR = Módulo de resiliencia de la subrasante (lb / pulg²).
J = Coeficiente de transferencia de carga
D = Espesor de la losa de concreto (mm)
S'c = Módulo del concreto hidráulico
SN = Número estructural determinado por:

$$\mathbf{SN} = a_1D_1+a_2D_2m_2+a_3D_3m_3$$

Ecuación 3

Siendo:
ai = Coeficiente estructural de la capa i
Di = Espesor de la capa i (pulg)
mi = Coeficiente de drenaje de la capa granular i

Para el proyecto del corredor en estudio se consideran los siguientes parámetros de acuerdo a la Guía para diseño de estructuras de pavimento de AASHTO/1993:

2.1.1 Período de análisis

El período de análisis para el diseño de las estructuras de pavimento es de 10 años para el pavimento flexible y 20 años para el pavimento rígido.

2.1.2 Clima y temperatura

El clima y la humedad que predominan en la región donde es presentada la propuesta de intervención de la estructura de pavimento tienen gran importancia en el funcionamiento de éste. Las condiciones climáticas de la región en que se encuentra la carretera en estudio son:

- Temperatura promedio de 23.1 °C para la zona de influencia del Municipio de Villagarzón (ver numeral 4).
- Las precipitaciones medias anuales indicaron valores de 2,486 mm/año (ver numeral 4).

Teniendo en cuenta el manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS, se considera que la zona de diseño se encuentra en una región R5 – Cálido húmedo, como se muestra en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Regiones climáticas según la temperatura y precipitación.

No	Región	Temperatura TMAP (°C)	Precipitación media anual (mm)
R1	Fría seca y fría semihúmeda	< 13	< 2.000
R2	Templado seco y templado semihúmedo	13-20	< 2.000
R3	Cálido seco y cálido semihúmedo	20-30	< 2.000
R4	Templado húmedo	13-20	2.000-4.000
R5	Cálido húmedo	20-30	2.000-4.000
R6	Cálido muy húmedo	20-30	> 4.000

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS.

Partiendo de esta región, el manual de diseño recomienda las condiciones de humedad para el ensayo de CBR, parámetro fundamental de diseño. En este caso, la tabla 5.8 del manual, recomienda que el ensayo se realice en una condición "*Sumergida".* (ver Tabla 2-2):

Tabla 2-2. Precipitación y condiciones de humedad para el ensayo.

No	REGIÓN	TEMPERATURA TMAP (°C)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)	CONDICIONES DE HUMEDAD PARA EL ENSAYO
R1	Fría seca	< 13	< 1000	Con humedad y densidad de equilibrio. Norma I.N.V. E-146
	Fría semihúmeda	< 13	1000 – 2000	Sumergido
R2	Templado seco	13 – 20	< 1000	Con humedad y densidad de equilibrio Norma I.N.V. E-146
	Templado semihúmedo	13 – 20	1000 – 2000	Sumergido
R3	Cálido seco	20 – 30	< 1000	Con humedad y densidad de equilibrio Norma I.N.V. E-146
	Cálido semihúmedo	20 – 30	1000 – 2000	Sumergido
R4	Templado húmedo	13 – 20	2000 – 4000	Sumergido
R5	Cálido húmedo	20 – 30	2000 – 4000	Sumergido
R6	Cálido muy húmedo	20°C - 30°C	> 4000	Sumergido

Tiempo de inmersión: *4 días para suelos limosos poco plásticos*
8 días para suelos arcillosos y limosos plásticos

Fuente: Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVIAS.

2.1.3 Tránsito

La variable tránsito definida como la carga que soportará la estructura de pavimento durante el período de intervención, es determinada mediante diferentes metodologías, donde es preciso relacionar un tránsito inicial, una proyección al período de análisis y la determinación de equivalencias de carga de los vehículos comerciales (FECE - factores daño).

Esta variable se analizará en el numeral 9 ESTUDIO DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE del presente documento.

2.1.4 Confiabilidad

De acuerdo con la tabla 2.2 del AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993, se adopta un nivel de confiabilidad del 90%, obteniendo mediante la

Tabla 4.1 del mismo manual una desviación estándar normal (Z_R) de -1.282 como se indica a continuación:

Tabla 2-3. Niveles de confiabilidad sugeridos de acuerdo con la clasificación funcional del camino.

Clasificación funcional	Nivel de Confiabilidad, R, recomendado	
	Urbana	Rural
Interestatales y vías rápidas	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

(Tabla 2.2 AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993).

Al respecto se hace pertinente aclarar que el nivel de confiabilidad (90%) seleccionado obedece a la proyección del mejoramiento del corredor entre Villapinzón (Putumayo) y Florencia (Caquetá) el cual a su vez contempla la construcción de un puente vehicular de dos carriles (sentido de circulación bidireccional) sobre el río Caquetá a la altura del corregimiento de Puerto Limón. Dicha obra proporcionará un mejoramiento significativo de la conectividad en la región y, por lo tanto, se requiere que los espesores de las estructuras de pavimento se diseñen con un grado de confiabilidad adecuado con el objeto de no incurrir en un sub-dimensionamiento de la estructura dadas las características de los flujos vehiculares actuales.

Este contexto y teniendo en cuenta la proyección espacial que se tiene para la vía en estudio, es posible clasificar este corredor como vía Colectora o Arterial principal, situación que conlleva a definir un umbral de confiabilidad entre 75% y 95%, considerando conforme el valor adoptado por esta Consultoría según las características futuras del sector.

2.1.5 Error estándar (So)

Para pavimentos flexibles dicho parámetro oscila entre 0.40 y 0.50, en este caso particular se empleará 0.45 equivalente a una construcción nueva. Respecto al pavimento rígido, se empleará a su vez un valor de 0.35 con el fin de obtener el valor del SN Requerido. Lo anterior, basado en los valores recomendados en la guía AASHTO-93 y adjuntos en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Desviación estándar So.

Proyecto de Pavimento	Desviación estándar So	
	Flexible	Rígido
	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Construcción Nueva	0.45	0.35
Sobrecapas	0.50	0.40

(AASHTO GUIDE FOR DESIGN OF PAVEMENT STRUCTURES 1993).

2.1.6 Serviciabilidad

El índice de Servicio presente (PSI) varía entre 0 (carretera imposible) y 5 (Carretera perfecta). Teniendo en cuenta lo anterior, y acorde a lo establecido por la metodología de diseño se adopta:

- Pavimento flexible: P0 = 4.2 y Pt =2.2 para obtener un ΔPSI de 2.0.
- Pavimiento rígido: P0 = 4.5 y Pt =2.5 para obtener un ΔPSI de 2.0.

Lo anterior, de acuerdo a la recomendación de la Guía para diseño de estructuras de pavimento de AASHTO/1993 numeral 2.2.1 página II-10.

2.1.7 Características de las capas

En aplicación a la metodología de diseño adoptada (AASHTO/93), se presenta a continuación los coeficientes estructurales de los materiales asfálticos y granulares, empleados para la modelación de la estructura de pavimento, los cuales tienen como referencia la Guía para diseño de estructuras de pavimento de AASHTO/93 numeral 2.3.5 y son:

2.1.7.1 Mezcla asfáltica MDC-19 / MDC-25, a=0.30

Para el coeficiente de aporte de la mezcla asfáltica, tomando como referencia el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con medios y altos volúmenes de tránsito del INVÍAS, incorporó en su desarrollo un valor diferencial del coeficiente estructural de las capas asfálticas en función de la temperatura del sitio, en términos de la temperatura del aire (ver Tabla 2-5).

Tabla 2-5 Valores de coeficientes estructurales ai

Mezcla densa en caliente	MDC a_i = 0.44 MDC a_i = 0.37 MDC a_i = 0.30	TMAP < 13 ºC 13 ºC ≤ TMAP < 20 ºC 20 ºC ≤ TMAP ≤ 30 ºC
Mezcla densa en frío	MDF a_i =0.8 * 0.44 MDF a_i =0.8 * 0.37 MDF a_i =0.8 * 0.33	TMAP < 13 ºC 13 ºC ≤ TMAP < 20 ºC 20 ºC ≤ TMAP ≤ 30 ºC
Base estabilizada con emulsión asfáltica	BEE-1 a_i = 0.20 BEE-2 a_i = 0.20 BEE-3 a_i = 0.14	Agregado grueso Agregado medio Suelo
Base estabilizada con cemento	BEC-1 a_i = 0.16 BEC-2 a_i = 0.14 BEC-3 a_i = 0.13	A-1-a; A-1-b A-3; A-2-4; A-2-5 A-2-6; A-2-7; A-4 A-5; A-6; A-7
Base granular	BG-1, BG-2	a_i = 0.14
Sub-base granular	SBG-1, SBG-2	a_i = 0.12

Fuente. Manual de diseño de pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito, INVIAS 1998.

Considerando la temperatura media anual ponderada de la zona de estudio (23.1°C) (ver numeral 4), se tomará un valor de 0.30 como coeficiente de aporte estructural para el diseño de la estructura del pavimento flexible.

Para la determinación del módulo de la mezcla asfáltica, se hace el uso del coeficiente de aporte de la mezcla asfáltica, tomando como referencia lo establecido en la Guía para el diseño de pavimentos - AASHTO/93, numeral 2.3.5, El coeficiente de aporte de la capa se obtuvo haciendo uso de la Ilustración 2-1.

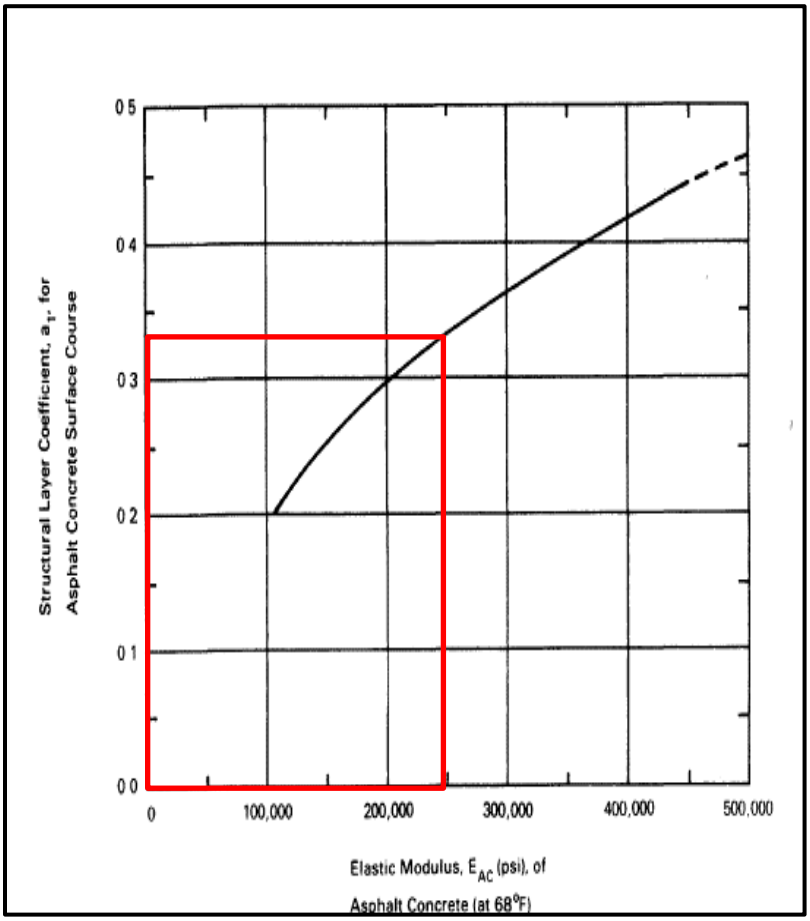


Ilustración 2-1. Coeficiente de aporte para Mezclas asfálticas.

Fuente: Figure 2.5 Chart for Estimating Structural Layer Coefficient of Dense-Graded Asphalt Concrete Based on the Elastic (Resilient)

De acuerdo a lo anterior, para un coeficiente de aporte estructural de 0.30 corresponde a un módulo de la carpeta asfáltica de 1,380 MPa.

2.1.7.2 Concreto hidráulico MR42 o MR45

En función de las características particulares de producción de concreto a cargo del Contratista, se considerará que la resistencia a la flexotracción (INV E 414) a veintiocho (28) días deberá ser mínimo de 4.5 MPa.

No obstante, lo anterior, se realizará un análisis adicional considerando el valor de resistencia a la flexotracción de 4.2 MPa establecido en el Artículo 500-22.

2.1.7.3 Base Granular (BG-A) a= 0.14

Acorde a lo establecido en el numeral 330.2.2 *"Requisitos de calidad para los agregados"* de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2022, se considerará un CBR mínimo de 95% para la Base Granular a implementar. Por lo tanto, para la obtención del coeficiente de aporte estructural (0.14) módulo resiliente del material (210 MPa) se hace uso de la Figura 2.6 de la Guía AASHTO como se evidencia en la Ilustración 2-2.

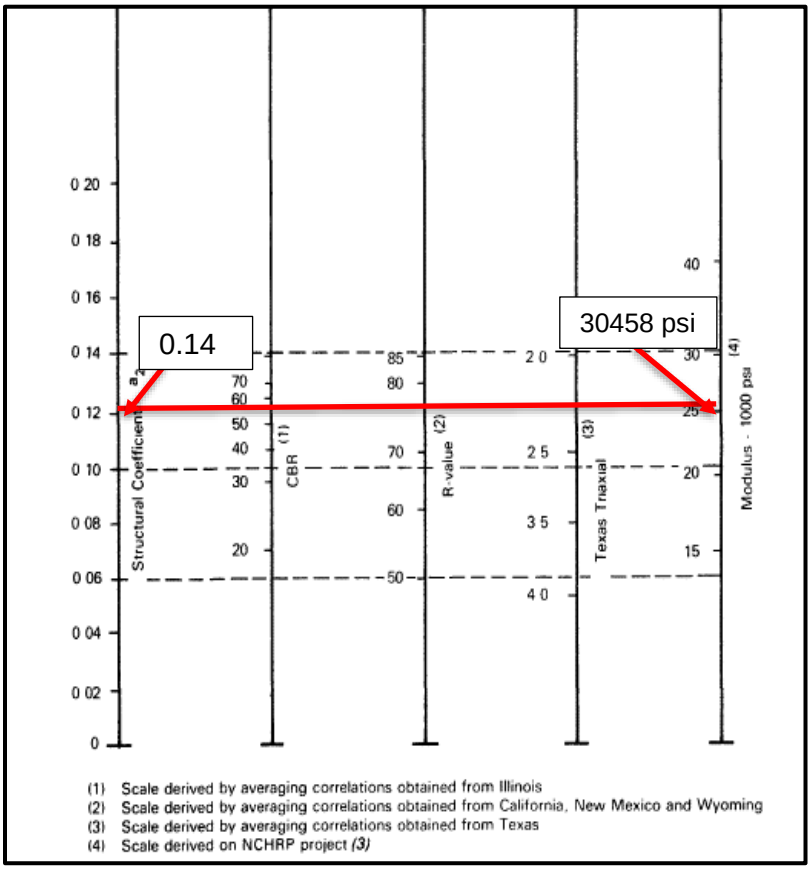


Ilustración 2-2. Coeficiente de aporte para Base granular.

Fuente: Figure 2.6 Variation in Granular Base Layer Coefficient (a2) with Various Base Strength Parameters.

2.1.7.4 Subbase Granular (SBG-A), a= 0.12

Acorde a lo establecido en el numeral 320.2.2 *"Requisitos de calidad para los agregados"* de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS-2012, se considerará un CBR mínimo de 40% para la Subbase Granular a implementar. Por lo tanto, para la obtención del coeficiente de aporte estructural (0.12) módulo resiliente del material (115 MPa) se hace uso de la Figura 2.7 de la Guía AASHTO como se evidencia en la Ilustración 2-3.

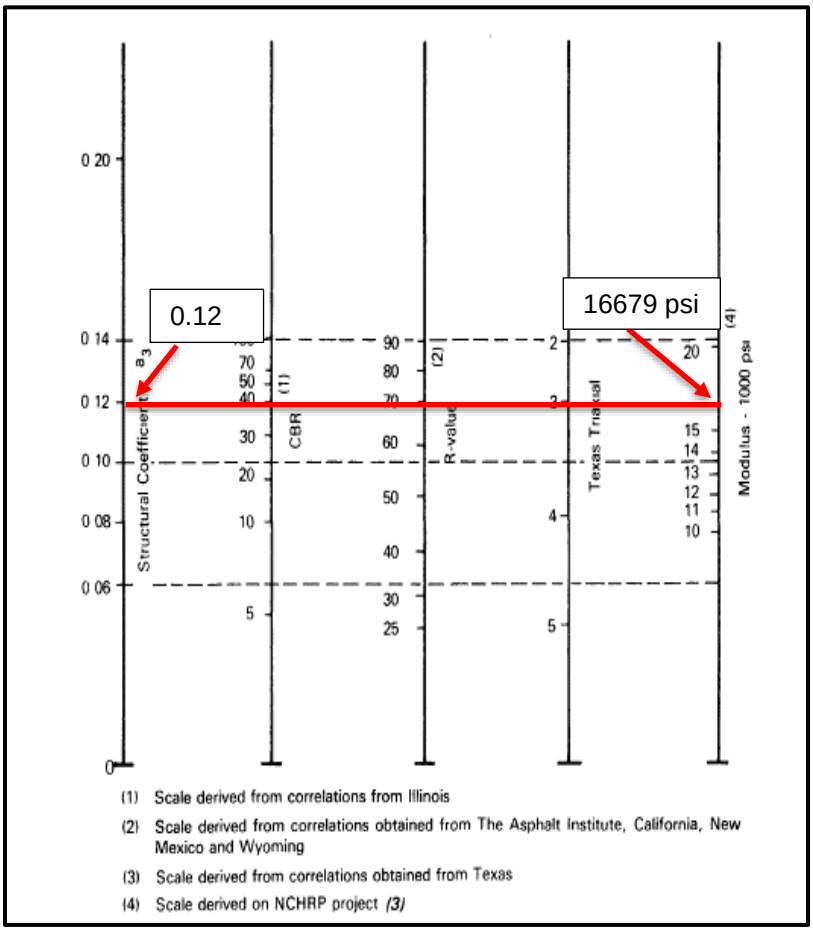


Ilustración 2-3. Coeficiente de aporte para subbase granular Clase A nueva.
Fuente: Figure 2.7 Variation in Granular Subbase Layer Coefficient (a3) with Various Subbase Strength Parameters.

2.1.7.5 Módulo Resiliente de subrasante

El Módulo Resiliente de la Subrasante – Mr, a utilizar para el predimensionamiento de las estructuras de pavimento a utilizar, corresponderá a la capacidad portante representativa del suelo y la cual se definirá en el numeral 6.1 CAPACIDAD SOPORTE MATERIALES EXISTENTES del presente documento.

Con el fin de corroborar la homogeneidad del sector; se realizará una sectorización del tramo en estudio por medio del método de las diferencias acumuladas con base en lo descrito en el Anexo E de la Guía Metodológica para el Diseño de Obras de Pavimentos Asfalticos de Carreteras y en el apéndice J de la guía de diseño de pavimentos AASHTO 1993 que describe el procedimiento de la siguiente manera.

El procedimiento es de tipo estadístico, se basa en el hecho matemático simple de que cuando la variable Zx (definida como la diferencia entre el área bajo la curva de respuesta a cualquier distancia y el área total desarrollada por la respuesta promedio de todo el proyecto hasta la misma distancia) se dibuja como función de la distancia a lo largo del proyecto, los límites de los tramos homogéneos ocurren en los puntos donde la pendiente de la línea que representa la variación de Zx con la longitud, cambia de signo. los pasos necesarios para el cálculo de Zx se presentan en la Tabla 2-6 y a modo de ejemplo en la Ilustración 2-4 se observa la representación gráfica de la solución que permite detectar las extensiones de los tramos donde los valores de CBR presenten un comportamiento homogéneo.

Tabla 2-6. Solución tabulada de la aproximación sucesiva de las diferencias acumuladas

(1) Estacion (KM)	(2) Valor de Respuesta del pavimento (r_i)	(3) Numero de Intervalo (n)	(4) Distancia del intervalo (Δx_i)	(5) Distancia acumulada ($\Sigma\Delta x_i$)	(6) Valor de respuesta Promedio ($\bar{r}_i$)	(7) Area del Intervalo Real (a_i)	(8) Area Acumulada (Σa_i)	(9) Zx $Zx = (8) - F^*(5)$
1	r_1	1	Δx_1	Δx_1	$\bar{r}_1 = r_1$	$a_1 = \bar{r}_1 \cdot \Delta x_1$	a_1	$Zx_1 = a_1 - F^*\Delta x_1$
		2	Δx_2	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\bar{r}_2 = (r_1+r_2)/2$	$a_2 = \bar{r}_2 \cdot \Delta x_2$	$a_1 + a_2$	$Zx_2 = (a_1 + a_2) - F^*(\Delta x_1 + \Delta x_2)$
2	r_2							
		3	Δx_3	$\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3$	$\bar{r}_3 = (r_2+r_3)/2$	$a_3 = \bar{r}_3 \cdot \Delta x_3$	$a_1 + a_2 + a_3$	.
3	r_3							.
		N_t	Δx_{nt}	$\Delta x_1 + \cdots + \Delta x_{nt}$	$\bar{r}_{nt} = (r_{n-1}+r_n)/2$	$a_{nt} = \bar{r}_{nt} \cdot \Delta x_{nt}$	$a_1 + \cdots + a_{nt}$	$Zx_{nt} = (a_1 + \cdots + a_{nt}) - F^*(\Delta x_1 + \cdots + \Delta x_{nt})$
L_p	r_n							

$$A_t = \sum_{i=1}^{nt} a_i$$

$$F = A_t / L_p$$

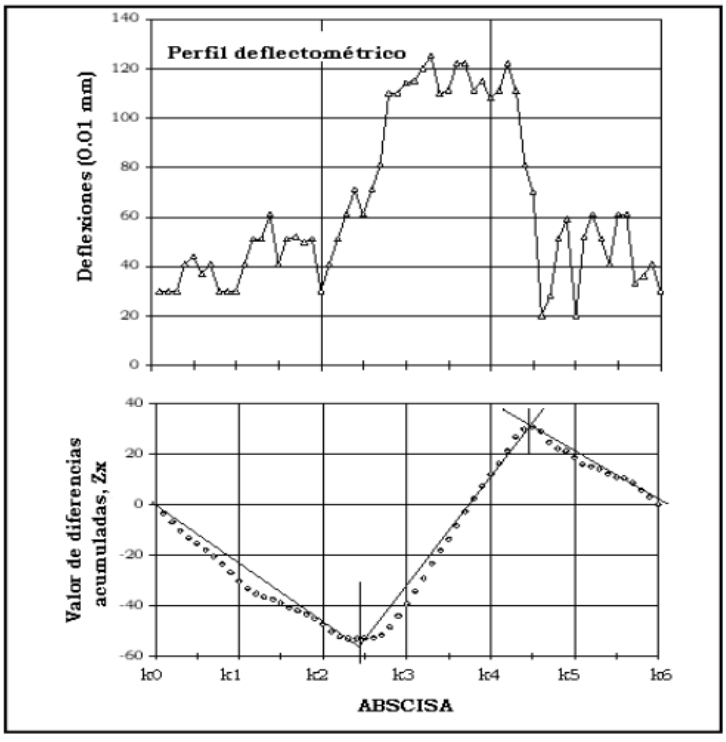


Ilustración 2-4. Delimitación de unidades de análisis por el método de las diferencias.

2.1.8 Coeficiente de drenaje

El método de diseño de la AASHTO/93, dimensiona las estructuras en función del número de ejes equivalentes en el período de diseño, el número estructural, la pérdida de serviciabilidad en el tiempo y del módulo de resiliencia de la subrasante. El valor de 'm' se determina en función de la calidad de drenaje y del tiempo en que se mantienen condiciones cercanas a la saturación, según la Tabla 2-7, de calidad de drenaje "*Capítulo 2.4.1, Drenaje -AASHTO-1993*", mostrada a continuación:

Tabla 2-7. Calidad del drenaje.

Calidad de drenaje	Agua removida en
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Medio	1 semana
Pobre	1 mes
Muy pobre	No drena

Fuente: Metodología AASHTO/93.

A continuación, se presenta la tabla de "*valores (mi) recomendados para modificar los coeficientes de capas estructurales de materiales de base y subbase no tratados en pavimentos flexibles*" Tabla 2.4. de AASHTO-1993, que reporta los valores recomendados de coeficiente de drenaje, en términos de calidad y tiempo de drenaje:

Tabla 2-8. Valores recomendados coeficiente de drenaje.

Calidad de drenaje	Porcentaje del tiempo que la estructura está expuesta a contenidos de humedad cercanos a la saturación			
	Menos 1%	1 – 5%	5 – 25%	Mayor 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 -1.15	1.15 – 1.00	1.00
Medio	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 -1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Valores recomendados de m para materiales no tratados en pavimentos flexibles.

Fuente: Metodología AASHTO/93 Tabla 2.4.

Ahora bien, considerando la información histórica (entre el año 1999 al 2019) consolidada en el numeral 4), se identifica que la zona de estudio está expuesta a lluvias un 48% del tiempo como se evidencia en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9. Determinación tiempo de exposición a lluvias

Mes	Días lluviosos
Enero	12
Febrero	12
Marzo	16
Abril	17
Mayo	18
Junio	17
Julio	16
Agosto	12
Septiembre	11
Octubre	14
Noviembre	17
Diciembre	15
Total	177
Porcentaje respecto a 365 días	**48%**

Fuente: Elaboración propia a partir de información climatológica consolidada entre el año 1999 al 2019.

En función de lo anterior, y considerando una calidad de drenaje en la vía entre bueno y excelente durante el periodo de servicio, para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento flexible y rígido se considerará un coeficiente de drenaje mi de 0.90.

Es de anotar que, lo anterior concuerda con la recomendación dada por el INVIAS para precipitaciones anuales entre 2000mm/año a 4000mm/año y en la cual se enmarca el municipio de Villagarzón (2486 mm/año descrito en el numeral 4) como se evidencia en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10. Valores del coeficiente de drenaje (mi).

Precipitación mm/año	mi
<2000	1.0
2000-4000	0.9
>4000	0.8

Fuente: Manual de diseño de pavimentos flexibles para medios y altos volúmenes de tránsito (1998).

2.1.9 Coeficiente de transferencia de carga (J)

La efectividad de la transferencia de carga entre losas adyacentes depende de varios factores:

- Cantidad de tráfico.
- Utilización de pasajuntas.
- Soporte lateral de las losas.

Mientras más efectiva sea la transferencia de carga entre losas mejor será el comportamiento del pavimento a lo largo de su vida útil. Una manera de transferir la carga de una losa a otra es mediante la trabazón de agregados que se genera en la grieta debajo del corte de la junta, sin embargo, esta forma de transferir carga solamente se recomienda para vías con tráfico ligero. En la Tabla 2-11, se presentan los rangos para los coeficientes de transferencia de cargas recomendados en la metodología.

Tabla 2-11. Coeficiente de transferencia de carga (J).

Efecto berma	Concreto asfáltico		Concreto de cemento Pórtland	
Dispositivos de transmisión de carga	Sí	No	Sí	No
Pavimentos con juntas de concreto simple o concreto reforzado	3.2	3.8 – 4.4	2.5 - 3.1	3.6 - 4.2
Pavimento de concreto continuamente reforzado	2.9 – 3.2	NA	2.3 – 2.9	NA

Fuente: Guía AASHTO-93.

Considerando que se trata de un pavimento de concreto con juntas y a su vez se considera el efecto de "confinamiento" proporcionado por una berma cemento portland, se toma un coeficiente de transmisión de cargas de 2.70.

2.1.10 Pérdida de soporte (Ls)

Este parámetro indica la pérdida de apoyo potencial de las losas de concreto, debido a la erosionabilidad de la subbase o a los asentamientos diferenciales de la subrasante, y aunque no aparece de forma explícita en la fórmula de diseño, si interviene de forma directa a través de una reducción del módulo de reacción efectivo de la superficie en las que se apoya la losa.

Tabla 2-12. Factor de pérdida de soporte.

TIPO DE BASE O SUBBASE	FACTOR DE PÉRDIDA DE SOPORTE (Ls)
Bases granulares tratadas con cemento (E= 7,000 a 14,000 MPa)	0.0 – 1.0
Subbases tratadas con cemento (E= 73,500 a 7,000 MPa)	0.0 – 1.0
Bases asfálticas (E=2,500 a 7,000 MPa)	0.0 – 1.0
Subbases estabilizadas con asfalto (E= 300 a 2,000 MPa)	0.0 – 1.0
Estabilización con cal (E=150 a 1,000 MPa)	1.0 – 3.0
Materiales granulares sin tratar (E= 100 a 300 MPa)	1.0 – 3.0
Suelos finos y subrasantes naturales (E= 20 a 300 MPa)	2.0 – 3.0

Fuente: Guía AASHTO-93.

Como se trata de materiales granulares sin tratar, se considera una pérdida de soporte Ls, con un factor de 1.0.

2.1.11 Módulo efectivo de la subrasante (E_{ef})

Para conformar las estructuras de pavimento rígido, se propone la implementación de una base adicional a la capa de rodadura, para esto se halla el módulo efectivo que va a tener el suelo de subrasante o material granular existente y el de la subbase granular, de esta manera tener en cuenta el espesor de esta capa en el diseño.

El módulo de reacción de la superficie en que se apoya el pavimento de concreto, es el valor de la capacidad soporte del suelo, la cual depende del módulo resiliente de la subrasante (Mr), así como el módulo de elasticidad de la subbase (Esb), estos módulos se obtendrán haciendo uso del software ASMOD.

2.1.12 Coeficientes adoptados -Pavimento flexible

En función de lo anterior, en la Tabla 2-13, se presentan los valores de coeficientes estructurales y de drenaje adoptados para el diseño del pavimento del corredor en estudio.

Tabla 2-13. Valores de los coeficientes estructurales y de Drenaje.

TIPO DE MATERIAL	SIMBOLOGÍA	MÓDULO	COEFICIENTE ESTRUCTURAL	COEFICIENTE DE DRENAJE
Mezcla Asfáltica Densa en Caliente Nueva	MDC-19	1,380	0.30	1.00
	MDC-25	1,380		
Base Granular	BG-A	210	0.14	0.90
Subbase Granular	SBG-A	115	0.12	0.90

(*) Para la obtención del coeficiente de aporte de la mezcla asfáltica, se recurre a las recomendaciones establecidas en el Manual de Diseño de Pavimentos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito INVIAS, tabla 8.1 (Valores de Coeficientes Estructurales) para una temperatura ambiente entre 20°C y 30°C.

2.1.13 Coeficientes adoptados -Pavimento rígido

En función de lo anterior, en la Tabla 2-13, se presentan los parámetros de diseño a considerar para el dimensionamiento de la estructura de pavimento rígido.

Tabla 2-14. Parámetros de diseño pavimento rígido.

R (%)	90	Confiabilidad del diseño
Zr	-1.282	Desviación estándar normal
So	0.35	Desviación normal del error estándar combinado
pi	4.5	Nivel de serviciabilidad inicial
pt	2.5	Índice de serviciabilidad terminal del diseño
ΔPSI	2.0	Delta de serviciabilidad

MR (MPa)	4.5	Resistencia del concreto a la flexotracción
Cd	0.9	Coeficiente de drenaje establecido en la Tabla 2.4. de la Guía AASHTO-1993 para una condición de drenaje “aceptable” y más del 25% del tiempo expuesto a “lluvias”
J	2.7	Coeficiente de transferencia de carga recomendado para pavimentos con juntas
Ls	1.0	Coeficiente pérdida de soporte materiales granulares sin tratar

Fuente: Elaboración propia.

2.2 DISEÑO EMPÍRICO-MECANICISTA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Para el diseño y análisis de espesores por medio del Método Mecanicista, se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones. Para la deformación admisible a tracción en la fibra asfáltica inferior existente, se considera la ecuación de Shell.

Shell $\varepsilon_t = (0.856V_b + 1.08)\, E^{-0.36}\, (N/K)^{-0.20}$

Ecuación 4

Donde:

εt: Deformación admisible por tracción en la fibra inferior de la mezcla asfáltica.
Vb: Porcentaje del Volumen de Asfalto en la Mezcla
N: Número de ejes equivalentes de 8.2 t.
K: Factor de Calage.
E: Módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica (MPa).

Se debe tener en cuenta que, para el cálculo de la resistencia a la fatiga de los materiales asfálticos, el valor de la deformación a tracción en la fibra inferior de la capa debe ser afectado por el factor de Calage (K) de acuerdo con el nivel de confiabilidad del proyecto y definido según la Tabla 4 de AUSTROADS (Technical basis of Austroads pavement design guide, Publication No. AP-T33/04, 2004):

Desired Project Reliability				
80%	85%	90%	95%	97.5%
2.5	2.0	1.5	1.0	0.67

Fuente: Tabla 4 2004 Guide Suggested Reliability Factors (RF) for Asphalt Fatigue. Austroads, 2004.
Texto sombreado, tomado como referencia para el diseño.

Este factor de desplazamiento (K) se considera con la finalidad de tener en cuenta las siguientes premisas de diseño:

- En el campo existe un periodo de reposo aleatorio entre aplicaciones sucesivas de carga que le permite al material asfáltico recuperarse.

- Después del paso de cada carga pueden permanecer esfuerzos residuales en la capa asfáltica de rodadura causados por la rueda en movimiento. Estos esfuerzos se relajan con el tiempo y después de cierto lapso, quedan esfuerzos remanentes muy pequeños.

- Otra consideración importante es la variación lateral del tránsito. Las huellas de las ruedas difieren de un vehículo a otro.

- Las mezclas asfálticas tienen la capacidad de auto reparación del bitumen.

En Deformación admisible a compresión en la fibra superior de la subrasante, se considera la ecuación de Shell:

Shell $\varepsilon_z = 0.0280 * N^{-0.25}$ (Confiabilidad 50%)

Ecuación 5

Shell $\varepsilon_z = 0.0210 * N^{-0.25}$ (Confiabilidad 85%)

Ecuación 6

Shell $\varepsilon_z = 0.0179 * N^{-0.25}$ (Confiabilidad 95%)

Ecuación 7

Donde:

εz: Deformación admisible por compresión en la fibra superior de la capa de subrasante.

N: Número de ejes equivalentes de 8.2 t.

Las constantes adoptadas anteriormente para los modelos $Nfat=a*\varepsilon t^{-b}*E^{-c}$ y $Ndef=a*\varepsilon z^{-b}$, corresponden a las mismas indicadas a continuación:

Fuente	Fatiga (Nfat)			Ahuellamiento (Ndef)	
	a	b	c	a	b
Shell Bitumen	(0.856*Vb+1.08)	5	1.8	$1.94x10^{-7}$ (R=85) $1.05x10^{-7}$ (R=95)	4

Para deflexión admisible en la mezcla, se considera la ecuación de Ivanov y Yang H. Huang:

Ivanov $wT\ (mm) = 5.248 * N^{-0.12}$

Ecuación 8

Yang H. Huang $\sigma Zadm\ (mm) = 26.322 * N^{-0.2438}$

Ecuación 9

Donde:

wT, σZadm: Deflexión vertical máxima admisible.

N: Número de ejes equivalentes de 8.2 t.

Para el esfuerzo admisible a compresión en la fibra superior de la subrasante Kerhoven y Dormon

Kerhoven y Dormon $\sigma_z = 0.007MR / (1+0.7Log(N))$ en kg/cm^2

Ecuación 10

Donde:

σz: Esfuerzo admisible a compresión en la capa de subrasante.

N: Número de ejes equivalentes de 8.2 t.

MR: Módulo resiliente de la subrasante (kg/cm^2).

Para los materiales granulares se utilizará el valor del módulo resiliente definido en el procedimiento de AASHTO. El valor del volumen de asfalto efectivo para las mezclas a analizar corresponde a:

- Mezcla densa en caliente (MDC-19 / MDC-25): Volumen de asfalto 11%

En función de lo expuesto anteriormente, el modelo de carga a implementar para las validaciones empírico – mecanicistas corresponderán a un semi eje estándar de 4.1 toneladas y presión de contacto de 80 PSI. Cabe anotar que el modelo de carga requiere información correspondiente a los espesores, módulos elásticos y coeficientes de poisson

de las distintas capas que compondrán la estructura de pavimento como se evidencia en la Ilustración 2-5.

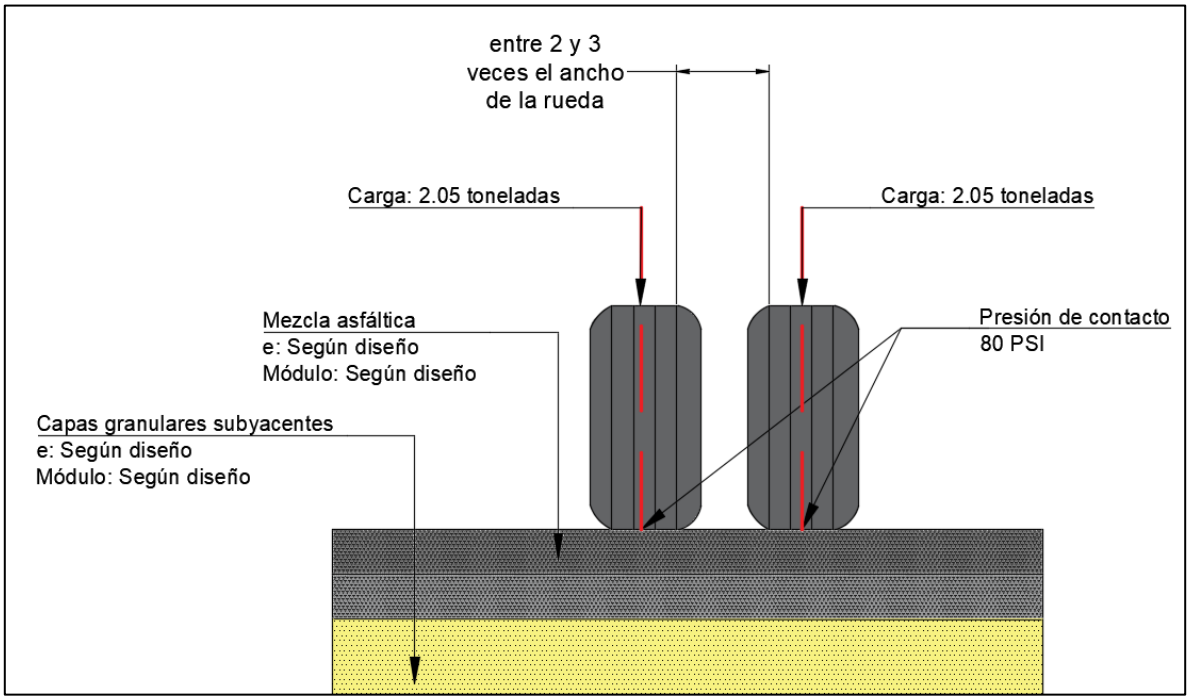


Ilustración 2-5. Esquema del modelo de carga a utilizar para las validaciones empírico – mecanicistas.

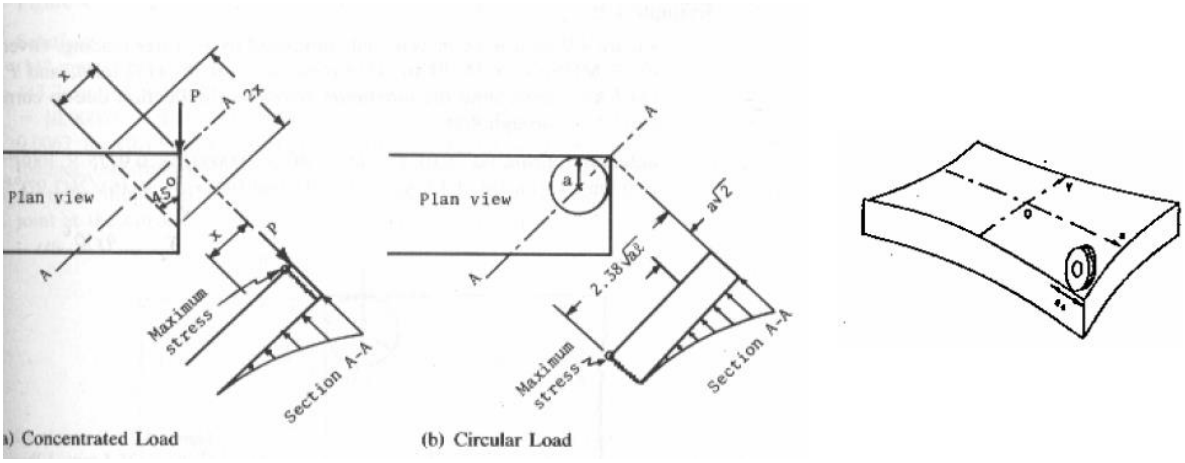
Fuente: Elaboración propia.

2.3 CALCULO DE ESFUERZOS Y DEFLEXIONES EN PAVIMENTOS RÍGIDOS

Se efectuará un análisis mecanicista de las respuestas críticas (esfuerzos, deformaciones, deflexiones). Para la obtención de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, se empleará el programa Unalosa.

Para el análisis de los esfuerzos y deformaciones debidas a carga se tiene el siguiente procedimiento:

2.3.1 Carga en la esquina de la losa



Fuente: Carga en la esquina de la losa (Huang, 1993)

2.3.2 Westergaard (1926):

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

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

Ecuación 11

Donde:

σc: Esfuerzo producido por carga en la esquina.
P: Carga del semieje.
h: Espesor de la losa.
a: Radio del área cargada.
ℓ: Radio de rigidez relativa de la losa.
Δc: Deformación producida por carga en la esquina.
k: Módulo de reacción de la subrasante.

El momento máximo se presenta a una distancia $2.38\sqrt{al}$ del vértice de la losa.

2.3.3 Ioannides (1985)

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2}\left[1-\left(\frac{c}{l}\right)^{0.72}\right]$$

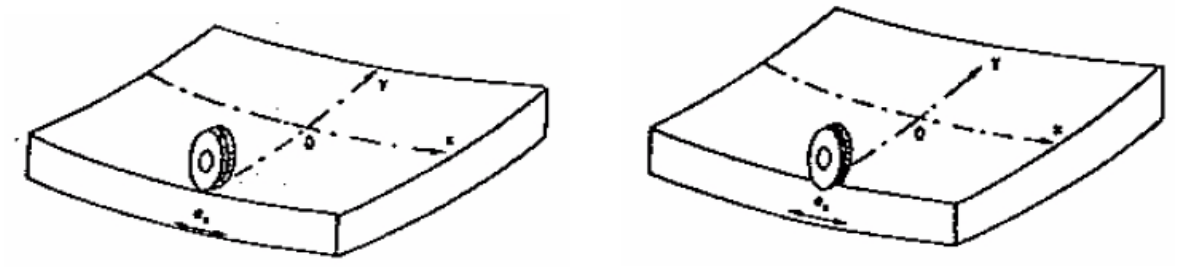
$$\Delta_c = \frac{P}{kl^2}\left[1.205-0.69\left(\frac{c}{l}\right)\right]$$

Ecuación 12

σc: Esfuerzo producido por carga en la esquina.
P: Carga del semieje.
h: Espesor de la losa.
c: Lado del cuadrado del área cargada equivalente. *c = 1.772a*.
ℓ: Radio de rigidez relativa de la losa.
Δc: Deformación producida por carga en la esquina.
k: Módulo de reacción de la subrasante.

El momento máximo se presenta a una distancia $1.80c^{0.32}\,l^{0.59}$ del vértice de la losa.

2.3.4 Esfuerzos y Deformaciones por Carga en el Borde. Westergaard (1926-48). Ioannides (1985))



(a) Carga aplicada sobre un área circular

(b) Carga aplicada sobre un área semicircular

Ilustración 2-6. Carga en el borde de la losa.

$$\sigma_{e(circulo)} = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2}\left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right)+1.84-\frac{4\mu}{3}+\frac{1-\mu}{2}+\frac{1.18(1+2\mu)a}{l}\right]$$

Ecuación 13

$$\Delta_{e(circulo)} = \frac{\sqrt{2+1.2\mu}\times P}{\sqrt{Eh^3k}}\left[1-\frac{(0.76+0.4\mu)a}{l}\right]$$

Ecuación 14

$$\Delta_{e(semicirculo)} = \frac{\sqrt{2+1.2\mu}\times P}{\sqrt{Eh^3k}}\left[1-\frac{(0.323+0.17\mu)a}{l}\right]$$

Ecuación 15

Donde:

σe: Esfuerzo producido por carga (circular y semicircular) en el borde.
μ: Relación de Poisson del concreto.
P: Carga del semieje.
h: Espesor de la losa.
ℓ: Radio de rigidez relativa de la losa.
Δe: Deformación producida por carga (circular y semicircular) en el borde.
k: Módulo de reacción de la subrasante.

2.3.5 Esfuerzo de fricción:

$$\sigma_{fricción} = \frac{\chi_c \times L \times f_a}{2}$$

Ecuación 16

Donde:

σ fricción: Esfuerzo de tensión en la losa por fricción con el apoyo.
*X*c: Densidad del concreto. δc = 0.08680556 pci = 0.0236 MN/m^3.
L: Longitud de la losa.
Fa: Coeficiente promedio de fricción entre la losa y el apoyo. Puede adoptarse un valor de 1.5.

2.3.6 Verificación de esfuerzos térmicos y de cargas de losa.

Con el fin de verificar los esfuerzos al interior del centro geométrico de las losas y validar las dimensiones, se calculan los esfuerzos máximos por alabeo en las dos direcciones [2].

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

Ecuación 17

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

Ecuación 18

Donde

σ_x: Esfuerzo interior máximo por alabeo en la dirección x (lb/pulg^2)
σ_y: Esfuerzo interior máximo por alabeo en la dirección y (lb/pulg^2)
E: Módulo de elasticidad del concreto (lb/pulg^2)
α_t: Coeficiente de expansión térmica del concreto (pulg/°F)
Δt: Diferencia de temperatura entre la cara superior y la inferior de la losa (°F)
μ: Relación de Poisson del concreto
C_x y C_y: Factores de corrección por losa finita

Los factores C en cada dirección se determinan con la curva desarrollada por Bradbury y que se presenta en la Ilustración 2-7.

2 Sandoval H, Carlos H. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Vol II. UPTC Tunja 2011.

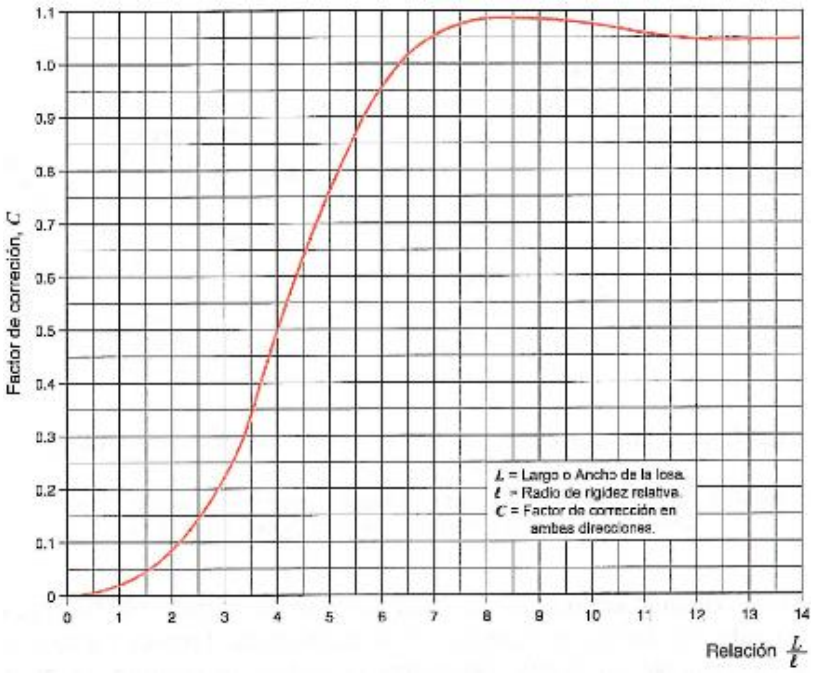


Ilustración 2-7. Curva de Bradbury para determinar los factores de corrección C.

Las consideraciones de Bradbury contemplan que los coeficientes C son inversamente proporcionales al módulo de reacción de la subrasante (k), por lo tanto, los esfuerzos por alabeo se incrementan cuando el soporte es muy rígido ya que este no puede asumir el contorno del pavimento.

Por otro lado, los coeficientes C son directamente proporcional a la longitud de la losa, por lo tanto, el incremento de ésta aumenta los esfuerzos por alabeo térmico.

Los coeficientes C dependen de la relación C/l donde l es radio de rigidez relativa (pulg) expresado como se presenta a continuación.

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

Ecuación 19

Con

h: Espesor de la losa (pulg)

k: Módulo de reacción de la subrasante (pci)

3 INFORMACIÓN EXISTENTE

Para el presente documento se toma como información base la relacionada en la exploración geotécnica y ensayos de laboratorios ejecutados durante el desarrollo del Contrato INVIAS 2722 de 2019, donde el Consultor JAM Ingeniería y Medio Ambiente llevó a cabo una campaña de exploración geotécnica con el fin de reconocer el perfil estratigráfico a lo largo del K13+250 al K22+350.

3.1 ANÁLISIS EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA EXISTENTE (CONTRATO INVIAS 2722 de 2019)

Durante el desarrollo del Contrato INVIAS 2722 de 2019, el Consultor JAM Ingeniería y Medio Ambiente llevó a cabo una campaña de exploración geotécnica con el fin de reconocer el perfil estratigráfico a lo largo del K13+250 al K22+350, ejecutando un total de 40 apiques hasta una profundidad de 1.5 – 2.0 metros y respectiva recuperación de muestras y ensayos. Con lo anterior se define un espaciamiento entre puntos de exploración de aproximadamente 250m e intercalados entre carril (tres bolillos), adecuados para generar una caracterización total de los materiales existentes. En la Tabla 5-1 se relaciona la lista de apiques, abscisa y coordenadas de ejecución de los mismos.

Tabla 3-1. Relación Listado Apiques, Abscisa y Coordenadas.

APIQUE	ABSCISA	ABSCISA PROYECTO	LATITUD	LONGITUD
AP43	K10+500	K13+225	1° 0'3.80"N	76°31'49.75"O
AP44	K10+750	K13+470	1° 0'11.02"N	76°31'47.45"O
AP45	K11+000	K13+720	1° 0'11.44"N	76°31'41.61"O
AP46	K11+250	K13+985	1° 0'16.80"N	76°31'36.34"O
AP47	K11+500	K14+220	1° 0'13.70"N	76°31'29.28"O
AP48	K11+750	K14+380	1° 0'12.53"N	76°31'24.83"O
AP49	K12+000	K14+720	1° 0'14.88"N	76°31'16.40"O
AP50	K12+250	K14+950	1° 0'15.83"N	76°31'11.21"O
AP51	K12+500	K15+200	1° 0'14.40"N	76°31'3.47"O
AP52	K12+750	K15+450	1° 0'17.93"N	76°30'56.66"O

APIQUE	ABSCISA	ABSCISA PROYECTO	LATITUD	LONGITUD
AP53	K13+000	K15+700	1° 0'24.48"N	76°30'52.09"O
AP54	K13+250	K15+950	1° 0'26.87"N	76°30'44.52"O
AP55	K13+500	K16+200	1° 0'27.88"N	76°30'36.63"O
AP56	K13+750	K16+430	1° 0'28.47"N	76°30'28.85"O
AP57	K14+000	K16+600	1° 0'24.03"N	76°30'26.51"O
AP58	K14+250	K16+840	1° 0'16.00"N	76°30'25.66"O
AP59	K14+500	K17+050	1° 0'9.57"N	76°30'24.15"O
AP60	K14+750	K17+300	1° 0'2.43"N	76°30'20.69"O
AP61	K15+000	K17+550	0°59'57.69"N	76°30'14.32"O
AP62	K15+250	K17+800	0°59'54.17"N	76°30'7.77"O
AP63	K15+500	K18+045	0°59'53.10"N	76°30'0.07"O
AP64	K15+750	K18+300	0°59'55.66"N	76°29'52.98"O
AP65	K16+000	K18+520	1° 0'0.44"N	76°29'47.58"O
AP66	K16+250	K18+770	0°59'59.66"N	76°29'40.68"O
AP67	K16+500	K19+050	1° 0'7.10"N	76°29'39.44"O
AP68	K16+750	K19+300	1° 0'13.12"N	76°29'35.42"O
AP69	K17+000	K19+550	1° 0'13.60"N	76°29'27.37"O
AP70	K17+250	K19+810	1° 0'15.36"N	76°29'19.54"O
AP71	K17+500	K20+040	1° 0'13.71"N	76°29'11.76"O
AP72	K17+750	K20+270	1° 0'7.80"N	76°29'6.42"O
AP73	K18+000	K20+450	1° 0'5.70"N	76°29'2.19"O
AP74	K18+250	K20+770	1° 0'1.80"N	76°28'53.24"O
AP75	K18+500	K21+020	0°59'56.92"N	76°28'46.78"O
AP76	K18+750	K21+275	0°59'50.78"N	76°28'41.69"O
AP77	K19+000	K21+525	0°59'42.75"N	76°28'40.91"O

APIQUE	ABSCISA	ABSCISA PROYECTO	LATITUD	LONGITUD
AP78	K19+250	K21+770	0°59'38.00"N	76°28'34.70"O
AP79	K19+500	K22+030	0°59'35.03"N	76°28'27.19"O
AP80	K19+750	K22+270	0°59'36.05"N	76°28'19.31"O
AP81	K20+000	K22+510	0°59'33.12"N	76°28'11.81"O
AP82	K20+250	K22+750	0°59'27.52"N	76°28'5.96"O

Fuente: JAM Ingeniería y medio ambiente. Contrato INVIAS 2722 de 2019.

El KMZ y perfil estratigráfico de campo de la exploración geotécnica realizada se adjunta en el Anexo 2 "*Información secundaria".* Una vez ejecutados los apiques anteriormente relacionados, se realizó la ejecución sobre las muestras recuperadas los siguientes ensayos de las Normas de ensayo de materiales para carreteras del INVIAS:

- INV E-122 *"Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestra de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado*".
- INV E-125 "*Determinación del límite líquido de los suelos"*
- INV E-126 "*Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos"*
- INV E-123 "*Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos"*
- INV E-213 "*Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino"*
- INV E-148 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada"*

Es de anotar que, de la información secundaria existente, no se cuenta con evidencia de ejecución de ensayos de Proctor modificado para la determinación del CBR de los materiales granulares existentes mediante norma de ensayo INV E-142 "*Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación*"

De acuerdo con la información obtenida de los trabajos ejecutados, se cuenta con la estratigrafía o perfiles de campo de los apiques realizados. Lo anterior se presenta en el Anexo 2 "*Información secundaria"*. Ahora bien, a partir de las caracterizaciones resultado de los ensayos efectuados a las muestras extraídas, se establecen las condiciones predominantes de los suelos y/o materiales existentes, en cada una de las capas que conforman, ya sea la estructura o los suelos existentes En la Tabla 3-2 se presenta a modo resumen los resultados de laboratorio obtenidos durante la ejecución del contrato INVIAS 2722 de 2019.

Tabla 3-2. Consolidados resultados de laboratorio. Contrato INVIAS 2722 de 2019.

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP43	K13+225	0.00	0.45	Relleno arenoso grisáceo claro con gravas gruesas subredondeadas	77	33	45	GP-GC	12	48	40
AP43	K13+225	0.45	1.00	Arcilla grisácea verdosa de consistencia blanda a media.	96	44	52	MH	77	-	23
AP43	K13+225	1.20	1.50	No extrae muestra	-	-	-	-	-	-	-
AP43	K13+225	1.55	2.00	Arcilla habana verdosa con presencia de gravas angulares	-	-	-	-	-	-	-
AP44	K13+470	0.00	0.55	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas gruesas	-	-	-	-	-	-	-
AP44	K13+470	0.55	1.10	Arcilla limosa amarillenta rojiza fisurada de consistencia media	81	39	42	MH	84	-	16
AP44	K13+470	1.15	1.60	Arcilla limosa amarillenta parduzca	-	-	-	-	-	-	-
AP45	K13+720	0.00	0.15	Recebo arenoso con gravas	-	-	-	-	-	-	-
AP45	K13+720	0.15	1.10	Arcilla arenosa rojiza amarillenta	54	36	18	MH	-	-	-
AP45	K13+720	1.50	1.75	Arcilla carmelita claro rojiza de consistencia media de alta plasticidad	87	35	53	CH	87	-	13
AP46	K13+985	0.00	0.52	Relleno arenoso grisáceo con gravas gruesas subredondeadas	-	-	-	GW-GM	7	73	20
AP46	K13+985	0.52	1.10	Arcilla limosa amarillenta grisácea de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP46	K13+985	1.10	1.60	Arcilla limosa amarillenta grisácea fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP47	K14+220	0.00	0.35	Capa de relleno arenoso con gravas media a gruesas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP47	K14+220	0.35	1.00	Arcilla limosa amarillenta rojiza algo fisurada de consistencia media, grumosa	-	-	-	-	-	-	-
AP47	K14+220	1.05	1.50	Arcilla limosa rojiza ocre de consistencia media	93	43	50	MH	77	-	23
AP48	K14+380	0.00	0.35	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas y cantos rodados	-	-	-	-	-	-	-
AP48	K14+380	0.35	1.00	Arcilla rojiza con trazas amarillentas fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP48	K14+380	1.05	1.50	Arcilla limosa rojiza muy fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP49	K14+720	0.00	0.60	Recebo arenoso con gravas subangulares	42	24	17	GC	12	79	9
AP49	K14+720	0.60	1.50	Arcilla arenosa parduzca amarillenta	-	-	-	-	-	-	-
AP49	K14+720	1.50	1.75	Limo arcillo arenoso rojizo amarillento de consistencia media de alta plasticidad	88	40	48	MH	89	-	11
AP50	K14+950	0.00	0.40	Relleno arenoso con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP50	K14+950	0.40	1.00	Arcilla limosa rojiza de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP50	K14+950	1.05	1.50	Arcilla limosa rojiza de consistencia media fisurada	58	34	24	MH	13	-	-
AP50	K14+950	1.55	2.00	Arcilla limosa rojiza amarillenta ocre de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP51	K15+200	0.00	0.45	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas gruesas	113	50	62	GP-GM	9	60	32
AP51	K15+200	0.45	1.00	Arcilla limosa rojiza amarillenta ocre fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP51	K15+200	1.05	1.50	Arcilla amarillenta rojiza muy fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP51	K15+200	1.55	2.00	Arcilla limosa amarillenta rojiza con lentes grisáceas	-	-	-	-	-	-	-
AP51	K15+200	2.05	2.50	Arcilla limosa rojiza amarillenta de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP52	K15+450	0.00	0.40	Relleno con material de rio arenoso grisáceo con gravas subredondeadas grisáceas	-	-	-	-	-	-	-
AP52	K15+450	0.40	1.00	Arcilla limosa rojiza amarillenta fisurada	-	-	-	-	-	-	-
AP52	K15+450	1.05	1.50	Arcilla limosa rojiza clara de consistencia media	111	42	68	CH	62	-	38
AP53	K15+700	0.00	0.15	Recebo arenoso con gravas	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP53	K15+700	1.10	1.35	Arcilla arenosa rojiza amarillenta	-	-	-	-	-	-	-
AP53	K15+700	1.50	1.75	Arcilla arenosa rojiza amarillenta de consistencia media, de alta plasticidad	107	40	67	CH	92	-	8
AP54	K15+950	0.00	0.45	Relleno arenoso grisáceo con gravas gruesas subredondeadas y cantos rodados	-	-	-	-	-	-	-
AP54	K15+950	0.45	1.00	Arcilla limosa rojiza fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP54	K15+950	1.05	1.50	Arcilla limosa rojiza fisurada de consistencia media	69	40	29	MH	82	-	18
AP55	K16+200	0.00	0.45	Relleno arenoso grisáceo con gravas gruesas subredondeadas	-	-	-	SP-SM	8	42	50
AP55	K16+200	0.45	1.00	Arcilla limosa amarillenta ocre rojiza de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP55	K16+200	1.05	1.50	Arcilla limosa rojiza clara de consistencia media	62	38	23	MH	92	-	8
AP56	K16+430	0.00	0.40	Relleno con recebo arenoso grisáceo con gravas gruesas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP56	K16+430	0.40	1.05	Cantos rodados gruesos con gravas y arena media	-	-	-	-	-	-	-
AP56	K16+430	1.05	1.60	Arcilla limosa amarillenta de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP56	K16+430	1.65	2.10	Arcilla limosa amarillenta ocre fisurada de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP57	K16+600	0.00	0.15	Recebo arenoso con gravas	58	30	28	GC	22	65	14
AP57	K16+600	1.20	1.35	Arcilla arenosa rojiza amarillenta, presencia de pequeños bloques	87	39	48	MH	90	-	10
AP57	K16+600	1.50	1.75	Limo arcillo arenoso rojizo amarillento con presencia de bloques compactos	94	43	50	MH	80	-	20
AP58	K16+840	0.00	0.55	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas y cantos rodados	-	-	-	-	-	-	-
AP58	K16+840	0.55	1.10	Arcilla limosa amarillenta parduzca	69	41	28	MH	48	-	52
AP58	K16+840	1.15	1.60	Arcilla algo arenosa amarillenta grisácea con presencia de gravas	-	-	-	-	-	-	-
AP59	K17+050	0.00	0.75	Relleno con recebo arenoso con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP59	K17+050	0.75	1.20	Arena media a gruesa con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP59	K17+050	1.25	1.70	Arena media con gravas subredondeadas gruesas.	-	-	-	-	-	-	-
AP59	K17+050	2.50	3.10	Arcilla arenosa parduzca clara amarillenta de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP59	K17+050	3.15	3.60	Por material muy blando no se recobra	-	-	-	-	-	-	-
AP60	K17+300	0.00	0.55	Relleno con recebo arenoso (material de rio)) con gravas gruesas subredondeadas	-	-	-	GP-GM	6	66	28
AP60	K17+300	0.55	1.20	Arcilla algo arenosa amarilla grisácea de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP60	K17+300	1.20	1.70	Arcilla arenosa, no recobra	-	-	-	-	-	-	-
AP60	K17+300	2.00	2.60	Arcilla arenosa amarillenta grumosa de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP60	K17+300	2.65	3.10	Arcilla arenosa amarillenta ocre con trazas rojizas por oxidación	-	-	-	-	-	-	-
AP61	K17+550	0.00	0.60	Recebo arenoso con gravas subangulares	-	-	-	-	-	-	-
AP61	K17+550	0.60	1.20	Arcilla arenosa con gravas y pequeños bloques	-	-	-	-	-	-	-
AP61	K17+550	1.45	1.70	Limo arcillo arenoso amarillento ocre de alta plasticidad con presencia de gravas	56	34	22	MH	76	-	24
AP62	K17+800	0.00	0.60	Relleno arenoso grisáceo con gravas gruesas y cantos rodados	-	-	-	GW-GM	9	69	22
AP62	K17+800	0.60	1.20	Arcilla limosa parduzca clara grumosa con lentes de arena	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP62	K17+800	1.25	1.70	No recobra muestra. Se amplía hasta 1,80 m	-	-	-	-	-	-	-
AP62	K17+800	1.80	2.20	Arcilla arenosa amarillenta parduzca de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP62	K17+800	2.25	2.70	Arcilla arenosa amarillenta grisácea de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP63	K18+045	0.00	0.60	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP63	K18+045	0.60	1.10	Arcilla algo arenosa habana grisácea de consistencia media a blanda	-	-	-	-	-	-	-
AP63	K18+045	1.15	1.60	Arcilla arenosa amarillenta grisácea	51	35	16	MH	61	-	39
AP63	K18+045	1.60	2.10	Arcilla arenosa grumosa amarillenta de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP64	K18+300	0.00	1.10	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas gruesas y cantos rodados gruesos	-	-	-	-	-	-	-
AP64	K18+300	1.10	1.70	Arcilla habana grisácea de consistencia media a blanda	-	-	-	-	-	-	-
AP64	K18+300	1.75	2.20	Arcilla habana grisácea de consistencia blanda a media	37	19	19	CL	88	-	12
AP65	K18+520	0.00	0.00	Capa de pasto	-	-	-	-	-	-	-
AP65	K18+520	0.00	0.15	Arcilla arenosa parduzca con gravas	68	28	40	CH	95	-	6

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP65	K18+520	0.15	0.70	Arcilla amarillenta ocre con gravas	-	-	-	-	-	-	-
AP65	K18+520	0.70	0.90	Arcilla arenosa amarillenta con gravas	-	-	-	-	-	-	-
AP65	K18+520	1.50	1.75	Arcilla arenosa amarillenta de alta plasticidad de consistencia media con gravas	98	32	66	CH	97	-	3
AP66	K18+770	0.00	0.60	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP66	K18+770	0.60	1.20	Arcilla limosa grisácea clara parduzca de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP66	K18+770	1.25	1.70	Arcilla habana grisácea clara de consistencia media	55	23	32	CH	96	-	4
AP66	K18+770	1.75	2.20	Residual de arcillolita grisácea clara con vetas rocosa	-	-	-	-	-	-	-
AP67	K19+050	0.00	0.67	Relleno con recebo arenoso grisáceo con gravas subredondeadas y cantos rodados	-	-	-	GP-GM	10	61	29
AP67	K19+050	0.67	1.20	Arcilla limosa amarillenta ocre de consistencia media	-	-	-	-	-	-	-
AP67	K19+050	1.25	1.70	Arcilla limosa amarillenta ocre de consistencia un poco más firme	-	-	-	-	-	-	-
AP68	K19+300	0.00	0.73	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP68	K19+300	0.73	0.90	Gravas con arena arcillosa amarillenta de consistencia media	74	29	44	GC	28	45	27
AP69	K19+550	0.00	0.20	Recebo gravo arenoso	-	-	-	-	-	-	-
AP69	K19+550	0.20	0.60	Recebo arenoso algo arcilloso con gravas	NL	NP	NP	SM	15	41	43
AP69	K19+550	0.60	1.40	Arcilla arenosa parduzca oscuro	-	-	-	-	-	-	-
AP69	K19+550	1.50	1.75	Arcilla arenosa amarillenta parduzca de consistencia media de alta plasticidad	54	20	34	CH	71	-	29
AP70	K19+810	0.00	0.40	Relleno arenoso grisáceo con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP70	K19+810	0.40	1.00	Arcilla limosa amarillenta ocre de consistencia media	87	33	54	CH	74		26
AP70	K19+810	1.05	1.50	Arcilla amarillenta ocre grisácea de consistencia media a firme	-	-	-	-	-	-	-
AP71	K20+040	0.00	0.45	Capa de relleno arenoso grisáceo con gravas gruesas subredondeadas	-	-	-	GM	12	51	37
AP71	K20+040	0.45	1.00	Residual de arcillolita grisácea clara algo arenosa fisurada de consistencia firme	52	18	35	CH	94	-	6
AP71	K20+040	1.05	1.50	Residual de arcillolita grisácea dura de consistencia muy firme	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP71	K20+040	1.55	2.00	Arcillolita grisácea de consistencia firme	-	-	-	-	-	-	-
AP72	K20+270	0.00	0.50	Relleno recebo arenoso grisáceo con gravas gruesas y cantos rodados	-	-	-	-	-	-	-
AP72	K20+270	0.50	0.70	Residual de arcillolita habana grisácea clara fisurada de consistencia firme	-	-	-	-	-	-	-
AP72	K20+270	0.75	1.20	Residual de arcillolita grisácea fisurada, deleznable	43	19	24	CL	99	-	1
AP72	K20+270	1.25	1.50	Arcillolita grisácea clara de consistencia firme	-	-	-	-	-	-	-
AP73	K20+450	0.00	0.25	Capa de limo arenoso con raíces	79	50	29	MH	-	-	-
AP73	K20+450	0.25	0.65	Arcilla arenosa parduzca amarillenta	89	40	49	MH	79	-	21
AP73	K20+450	1.00	1.20	Arena arcillosa parduzca	-	-	-	-	-	-	-
AP73	K20+450	1.40	1.70	Arena algo arcillosa parduzca	-	-	-	-	38	-	62
AP74	K20+770	0.00	0.50	Relleno con recebo arenoso grisáceo con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP74	K20+770	0.50	1.00	Arena muy fina limo arcillosa muy deleznable	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP74	K20+770	1.05	1.50	Arena muy fina arcillo limosa amarillenta ocre muy deleznable	-	-	-	-	-	-	-
AP74	K20+770	1.55	1.75	Arena fina similar a la muestra anterior con gravas en la punta	31	24	7	SM	43	12	45
AP75	K21+020	0.00	0.45	Relleno arenoso con gravas subredondeadas	-	-	-	GP-GM	6	49	45
AP75	K21+020	0.45	1.00	Arena fina algo limosa parduzca amarillenta muy deleznable	-	-	-	-	-	-	-
AP75	K21+020	1.05	1.50	Arena limosa muy fina deleznable	29	24	5	ML	44	-	56
AP75	K21+020	1.55	2.00	Arena muy fina limosa amarillenta parduzca muy deleznable	-	-	-	-	-	-	-
AP76	K21+275	0.00	0.45	Relleno con recebo arenoso con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP76	K21+275	0.45	1.00	Arena muy fina limosa parduzca suelta deleznable	-	-	-	SM	18	3	79
AP76	K21+275	1.05	1.15	Arena deleznable con gravas, presencia de bloques compacto	-	-	-	-	-	-	-
AP77	K21+525	0.00	0.50	Relleno arenoso con gravas subredondeadas gruesas	-	-	-	GP-GM	5	59	36
AP77	K21+525	0.50	0.90	Arcilla limo arenosa parduzca amarillenta, de consistencia media, de baja plasticidad	45	25	21	CL	-	-	-
AP77	K21+525	0.95	1.40	Arena fina algo limosa parduzca clara grisácea muy deleznable	-	-	-	-	-	-	-

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP77	K21+525	1.45	1.52	Arcilla limo arenosa parduzca amarillenta, de consistencia media, de baja plasticidad	-	-	-	-	-	-	-
AP78	K21+770	0.00	0.30	Relleno con recebo arenoso con gravas. Se perfora hasta 60 cm	-	-	-	-	-	-	-
AP78	K21+770	0.65	1.10	Arena fina arcillosa muy deleznable	30	23	7	ML	-	-	-
AP78	K21+770	1.15	1.52	Arena fina arcillosa parduzca clara amarillenta, con gravas gruesas en la parte inferior	34	26	8	ML	44	5	52
AP79	K22+030	0.00	0.35	Capa de relleno areno gravoso grisáceo con cantos rodados	-	-	-	-	-	-	-
AP79	K22+030	0.35	0.90	Arena arcillosa parduzca clara con presencia de gravas subangulares	-	-	-	-	-	-	-
AP79	K22+030	0.90	1.05	Gravas subangulares grisáceas con arena arcillosa fina	-	-	-	-	-	-	-
AP80	K22+270	0.00	0.35	Capa de relleno arenoso grisáceo con gravas gruesas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP80	K22+270	0.35	0.90	Arena fina arcillosa parduzca grisácea muy deleznable	30	26	4	ML	-	-	-
AP80	K22+270	0.90	1.40	Arena fina grisácea parduzca con gravas subangulares grises en la punta	-	-	-	-	8	21	71

APIQUE	ABSCISA PROYECTO	PROFUNDIDAD (m)		Descripción	Límites de consistencia			SUCS	Granulometría (%)		
		Inicio	Fin		LL	LP	IP		P. Finos	Gravas	Arenas
AP81	K22+510	0.00	0.45	Capa de recebo arenoso grisáceo con gravas subredondeadas	-	-	-	-	-	-	-
AP81	K22+510	0.45	0.80	Arcilla arenosa parduzca clara amarillenta de consistencia media, de baja plasticidad	38	23	15	CL	-	-	-
AP81	K22+510	1.05	1.50	Arcilla arenosa parduzca grisácea en la parte inferior más arenosa	-	-	-	-	-	-	-
AP81	K22+510	1.55	2.00	Arena muy fina arcillosa grisácea parduzca muy deleznable	-	-	-	-	7	53	40
AP81	K22+510	2.05	2.50	Arena muy fina grisácea parduzca deleznable	-	-	-	-	-	-	-
AP81	K22+510	2.55	3.00	Arena arcillosa muy fina densa deleznable	-	-	-	-	-	-	-
AP82	K22+750	0.00	0.80	Relleno arenoso con gravas gruesas y canto rodados	-	-	-	-	-	-	-
AP82	K22+750	0.85	1.30	Arena arcillosa saturada amarillenta parduzca deleznable	30	26	4	ML	-	-	-
AP82	K22+750	1.35	1.72	Arena arcillo limosa amarillenta parduzca con presencia de gravas en la punta	30	23	7	-	58	2	40

Fuente: JAM Ingeniería y medio ambiente. Contrato INVIAS 2722 de 2019.

En función de lo anterior, se evidencia en general un material granular (Relleno) superficial a lo largo del corredor con espesores que oscilan entre los 15cm a 115cm seguido de una subrasante (Arcillas / Limos). Por lo anterior para la proyección de la estructura de pavimento se considerarán dos aspectos:

1. Aprovechamiento del material granular (Relleno) identificado como primera capa a lo largo del corredor y el cual se encuentra con un alto grado de consolidación (compactación) debido al paso vehicular sobre el mismo. De igual forma, en la Ilustración 3-1 se presenta de esquemáticamente la variabilidad del material granular con potencial de aprovechamiento en función de la información geotécnica existente.

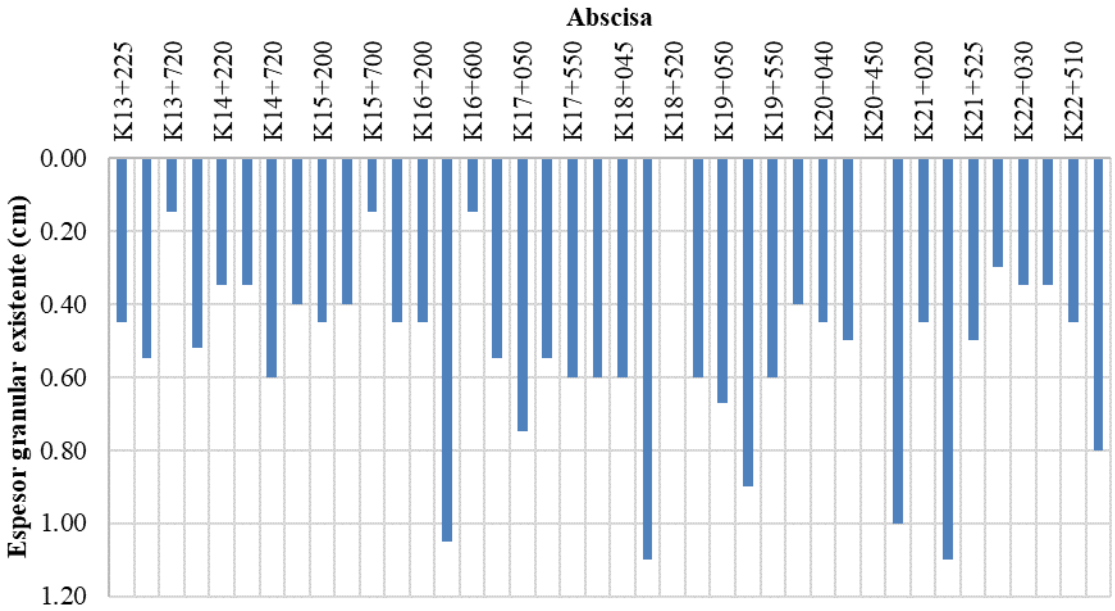


Ilustración 3-1. Variabilidad del material granular existente a lo largo del corredor en estudio.
Fuente: Elaboración propia a partir de información recolectada por JAM Ingeniería y medio ambiente. Contrato INVIAS 2722 de 2019.

2. A partir del diseño geométrico a proyectar, se desarrollará la lectura de los cambios de rasante proyectados (principalmente producto de la cota de inundación), por lo cual, se determinarán CBR's equivalentes a lo largo del corredor con el objeto de delimitar los sectores que serán objeto del aprovechamiento del granular existentes

y/o remoción parcial y/o total del mismo para dar lugar a la construcción de los terraplenes o demás obras complementarias para la adecuación de la plataforma de trabajo.

Como bien se ha evidenciado, se cuenta con un total 40 apiques, de los cuales fue posible la extracción de diez (10) muestras inalteradas que a su vez se utilizarán para la determinación del CBR acorde a los procedimientos técnicos establecidos en la norma de ensayo INVE 148-22[3] y cuyos resultados se encuentran adjuntos en el Anexo 2 "*Información secundaria*". Por lo anterior, en la Tabla 3-3 se presenta el listado de los CBR utilizados para la determinación del valor representativo anteriormente mencionado.

Tabla 3-3 Resultados CBR's Inalterados

APIQUE	ABSCISA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)		CLASIFICACIÓN	CBR INALTERADO (%)					
			DESDE	HASTA	USCS	ANTES DE INMERSIÓN		DESPUÉS DE INMERSIÓN		EXPANSIÓN TOTAL	Valor CBR
						0.1"	0.2"	0.1"	0.2"		
AP45	K13+750	3	1.50	1.75	CH	3.09	2.72	0.99	1.32	0.10	1.32
AP49	K14+750	3	1.50	7.50	MH	3.17	2.82	1.98	2.20	0.06	2.20
AP53	K15+750	3	1.50	1.75	CH	2.82	2.82	1.76	2.25	0.02	2.25
AP57	K16+750	3	1.50	1.75	MH	3.97	3.43	1.21	1.54	0.02	1.54
AP61	K17+750	3	1.45	1.70	MH	2.06	1.86	1.18	1.47	0.02	1.47
AP65	K18+750	3	1.50	1.75	CH	3.20	3.16	2.09	2.50	0.04	2.50
AP69	K19+750	4	1.50	1.75	CH	2.35	2.20	1.62	1.62	0.04	1.62
AP73	K20+750	4	1.45	1.70	MH	6.17	6.47	3.97	5.29	0.00	5.29
AP77	K21+750	2	0.65	0.90	CL	1.76	2.50	1.25	2.30	0.20	2.30
AP81	K22+750	1	0.55	0.80	CL	4.04	5.14	1.47	2.06	0.14	2.06

Fuente: Elaboración propia a partir de información recolectada por JAM Ingeniería y medio ambiente. Contrato INVIAS 2722 de 2019.

[3] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS. INV E-148-22 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada".*

Nótese que los valores de CBR en una condición saturada obtenidos para los suelos de subrasante durante el Contrato INVIAS 2722 de 2019 varían entre 1.32% a 5.29%.

Ahora bien, a partir de la exploración geotécnica existente y con el objeto de validar la información allí consignada se proyecta una exploración geotécnica complementaria correspondiente a la ejecución de 11 apiques con separación entre sí de 250 metros lineales de igual forma, se adelantarán ensayos Proctor Modificado y CBR compactado en laboratorio en dos apiques que corresponderán a aquellos sectores en los cuales se identifique una la altura del terraplén proyectado menor a 1 metro.

4 INFORMACIÓN CLIMATOLÓGICA

Para la definición del módulo de la carpeta asfáltica y condición de ensayo para los moldes de CBR inalterados recuperados durante la exploración geotécnica ejecutada; se hace uso de la información climatológica disponible para el municipio de Villagarzón (Putumayo) localizado en el área de influencia indirecta del proyecto objeto de estudio (entre el K2+750 al PR21+000 de la vía El Porvenir - Cruce El Jauno - Puerto Guzmán sobre la Ruta Nacional 6501).

La localización del municipio de Villagarzón se adjunta en la Ilustración 4-1.

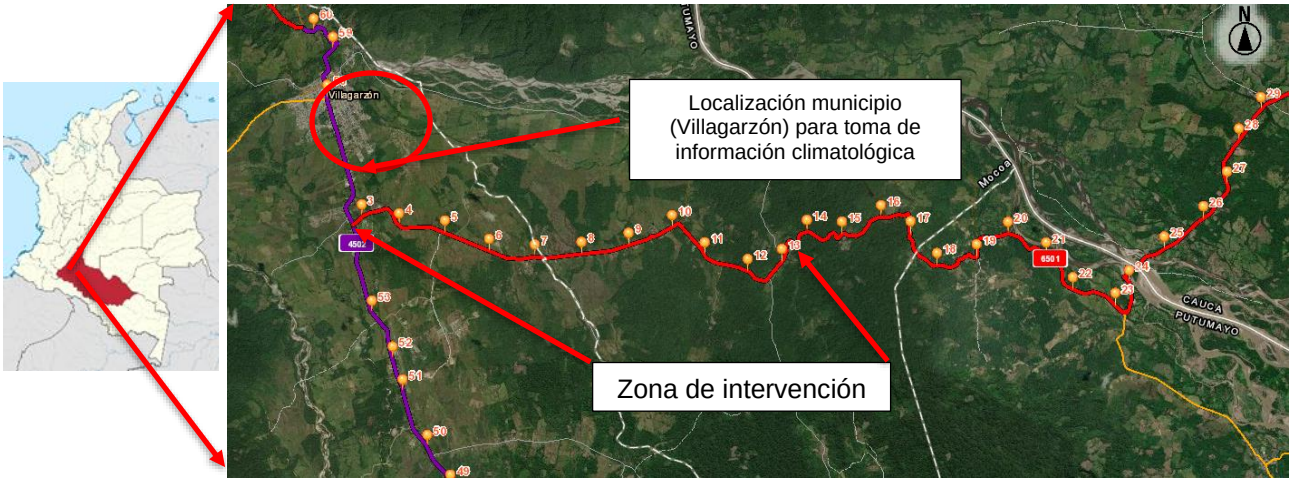


Ilustración 4-1. Localización municipio cercano para toma de información climatológica.
Fuente: Elaboración propia.

El municipio de Villagarzón, Putumayo se encuentra a 426 metros sobre el nivel del mar. El clima de está clasificado como tropical. Registrando una precipitación anual de 2,486mm. El mes de agosto es el de menores precipitaciones (en promedio 123 mm) y agosto el mes con mayor precipitación registrando en promedio 296 mm de lluvia. En la Ilustración 4-2, se presenta la variabilidad durante el último de los registros de temperatura y precipitaciones en el municipio de Villagarzón, Putumayo.

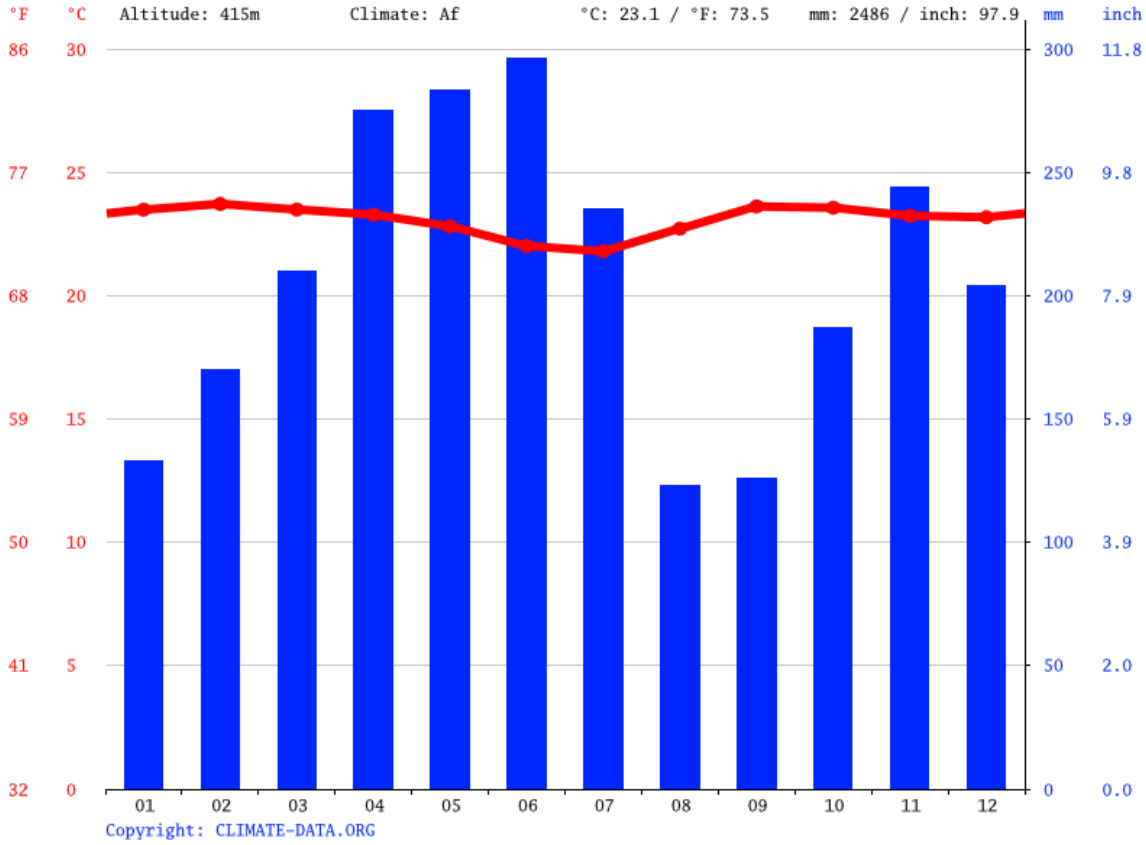


Ilustración 4-2. Climograma del municipio de Villagarzón, Putumayo.

Fuente: Climate-data.org [Consultado: 24 de octubre de 2022] en https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/putumayo/villagarzon-49633/

La diferencia en las precipitaciones entre meses más secos y más húmedos es 173 mm.

La temperatura media anual ponderada (TMAP) es de 23.1°C siendo febrero el mes más caluroso del año registrando una temperatura media de 23.7°C, el mes más frío del año es julio con temperatura media de 21.8 °C, las temperaturas medias varían durante el año en un 1.9°C.

En la Tabla 4-1, se presentan los datos históricos de temperatura y precipitaciones registrados durante entre el año 1999 al 2019 en el municipio de Villagarzón, Putumayo.

Tabla 4-1 Datos históricos de temperatura y precipitaciones – Villagarzón, Putumayo.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	23.5	23.7	23.5	23.3	22.8	22	21.8	22.7	23.6	23.6	23.2	23.2
Temperatura min. (°C)	19.6	19.7	19.7	19.6	19.3	18.6	18.3	18.6	19	19.5	19.5	19.4
Temperatura máx. (°C)	27.9	28.3	27.9	27.7	26.8	26	25.8	27.3	28.6	28.1	27.4	27.4
Precipitación (mm)	133	170	210	275	283	296	235	123	126	187	244	204
Humedad(%)	82%	81%	84%	85%	87%	87%	86%	80%	77%	82%	87%	86%
Días lluviosos (días)	12	12	16	17	18	17	16	12	11	14	17	15
Horas de sol (horas)	8.9	8.9	8.9	8.6	7.9	7.7	8.2	9.5	9.8	9.3	8.5	8.6

Fuente: Climate-data.org [Consultado: 24 de octubre de 2022] en https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/putumayo/villagarzon-49633/

De igual forma, cabe anotar que la humedad relativa más baja del año es en septiembre (77%) y que los meses con mayor humedad es mayo, junio y noviembre (87%). La menor cantidad de días lluviosos se espera en septiembre (11 días), mientras que los días más lluviosos se presentan en Mayo (18 días).

5 TRABAJOS DE CAMPO

En el presente numeral, se expone el estado actual del corredor objeto de estudio y posteriormente se adjunta la exploración geotécnica ejecutada para la caracterización de este mismo.

5.1 ESTADO ACTUAL DEL CORREDOR

En función de los recorridos de campo que se han desarrollado a lo largo del corredor entre el K13+250 – K22+350, se logra identificar que el corredor en estudio presenta una superficie en material granular de tipo aluvial con sobre tamaños y arenas como se evidencia en la Ilustración 5-1.



Ilustración 5-1. Estado superficial actual del corredor. K13+250 a K22+350.
Fuente: Archivo digital propio.

De igual forma, se evidencia sectores en los cuales se evidencia la ausencia de obras hidráulicas, por ende, se presenta la infiltración de agua hacia el material granular y reduciendo su vez la capacidad estructural como se evidencia en la Ilustración 5-2..

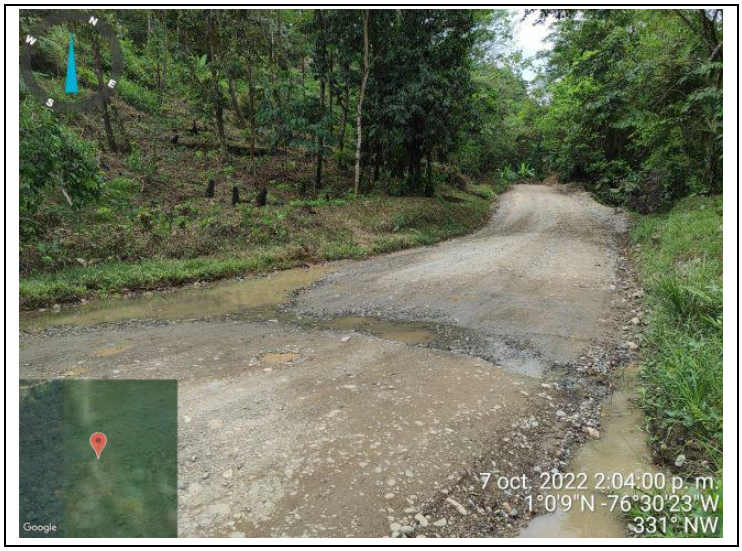


Ilustración 5-2. Ausencia de obras hidráulicas.
Fuente: Archivo digital propio.

Es de anotar que, dada la proyección geométrica para el mejoramiento del corredor vial, se hace necesario el aumento del ancho efectivo de la calzada existente y a su vez realizar un aumento de rasante para garantizar los recubrimientos mínimos de las obras hidráulicas a disponer a lo largo del corredor. Por lo cual, con el desarrollo del presente informe se busca validar los sectores que pueden presentar un aprovechamiento parcial o total de los materiales granulares existentes en función de la capacidad estructural del mismo y espesores existentes que se encuentran delimitados por la exploración geotécnica desarrollada.

En el Anexo 1 "*Recorrido"* se presenta el KMZ con la localización del registro fotográfico obtenido a lo largo del K13+250 al K22+350 y cuyas imágenes representativas se relacionan a continuación.



Ilustración 5-3. Estado superficial generalizado a lo largo del corredor en estudio.
Fuente: Archivo digital propio.

5.2 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA COMPLEMENTARIA

Con el fin de complementar el perfil estratigráfico identificado durante el desarrollo del Contrato INVIAS 2722 de 2019; se proyectan 11 apiques hasta una profundidad media de 1.5 metros para la extracción de muestras y posterior ensayo de estas. Con lo anterior se define un espaciamiento entre puntos de exploración complementaria de aproximadamente 250m e intercalados entre carril (tres bolillos), adecuados para complementar los 40 apiques existentes del Contrato INVIAS 2722 de 2019 y los presentan una separación entre sí de 250 metros lineales como se evidencia de forma general en la Ilustración 5-4.

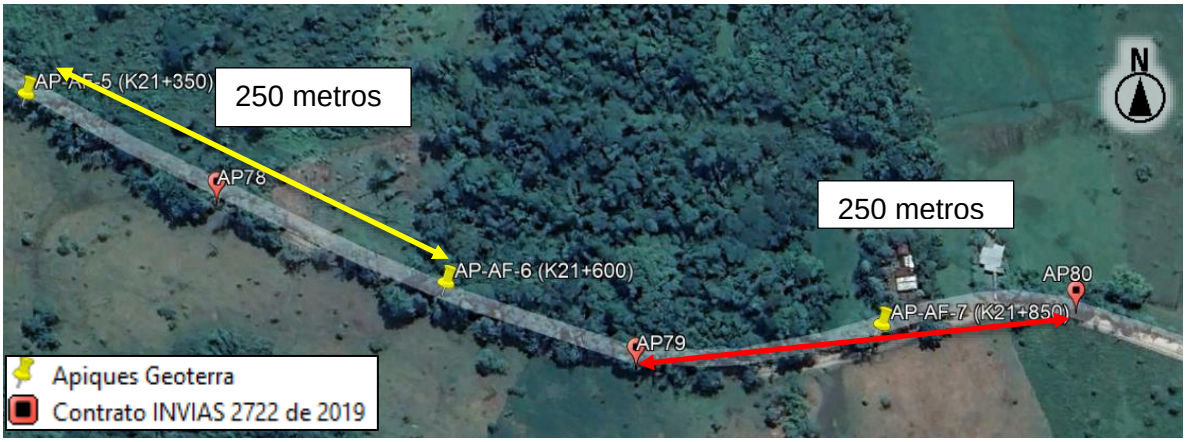


Ilustración 5-4. Vista satelital de exploración geotécnica complementaria vs exploración geotécnica existente.

Fuente: Elaboración propia a partir de imagen satelital de Google Earth.

De igual forma, en la Tabla 5-1 se relaciona la lista de apiques, abscisa y coordenadas de ejecución de los mismos.

Tabla 5-1. Relación Listado Apiques, Abscisa y Coordenadas.

Nomenclatura	Abscisa	Costado	Latitud	Longitud	Tipo	Superficie
AP-22	K13+275	Izquierdo	1°0'7.82"	76°41'39.77"	Apique	Afirmado
AP-AF-01	K20+350	Izquierdo	1°0'4.10"	76°28'56.36"	Apique	Afirmado
AP-AF-02	K20+600	Derecho	0°59'59.14"	76°28'50.04"	Apique	Afirmado
AP-AF-03	K20+850	Izquierdo	0°59"53.95"	76°28'43.73"	Apique	Afirmado

Nomenclatura	Abscisa	Costado	Latitud	Longitud	Tipo	Superficie
AP-AF-04	K21+080	Derecho	0°59'46.71"	76°28'41.83"	Apique	Afirmado
AP-AF-05	K21+350	Izquierdo	0°59'39.74"	76°28'30.67"	Apique	Afirmado
AP-AF-06	K21+600	Derecho	0°59'36.35"	76°28'30.67"	Apique	Afirmado
AP-AF-07	K21+850	Izquierdo	0°59'35.60"	76°28'22.86"	Apique	Afirmado
AP-TN-01	K22+250	Ampliación	0°99'34.1"	76°47'8.3"	Apique	Terreno Natural
AP-TN-02	K22+500	Ampliación	0°99'33.5"	76°46'8.71"	Apique	Terreno Natural
AP-TN-03	K22+750	Ampliación	0°99'50.3"	76°46'7.15"	Apique	Terreno Natural

Fuente: Elaboración propia.

El KMZ y perfil estratigráfico de campo de la exploración geotécnica realizada se adjunta en el Anexo 3 "*Exploración geotécnica complementaria".* Una vez ejecutados los apiques anteriormente relacionados, se realizó la ejecución sobre las muestras recuperadas los siguientes ensayos de las Normas de ensayo de materiales para carreteras del INVIAS:

- INV E-161 "*Densidad y peso unitario del suelo en el terreno por el método del cono y arena"*
- INV E-125 "*Determinación del límite líquido de los suelos"*
- INV E-126 "*Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos"*
- INV E-213 "*Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino"*
- INV E-142 "*Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación"*
- INV E-148 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada"*

Es de anotar que, los ensayos anteriormente relacionados son únicamente de validación y por lo tanto la ejecución de los mismo se desarrolló únicamente en los siguientes apiques:

- Clasificación, Proctor y CBR de laboratorio en las muestras de material granular de los apiques AP-AF-03 (K20+850) y AP-AF-06 (K21+600)

- Clasificación, CBR sobre muestra inalterada en las muestras de los materiales cohesivos identificados en los apiques AP-22 (K13+275), AP-AF-01 (K20+350), AP-AF-04 (K21+080), AP-AF-07 (K21+850) y AP-TN-02 (K22+500)

De acuerdo con la información obtenida de los trabajos ejecutados, se cuenta con la estratigrafía o perfiles de campo de los apiques realizados. Lo anterior se presenta en el Anexo 4 "*Resultados de laboratorio"*. Ahora bien, a partir de las caracterizaciones resultado de los ensayos efectuados a las muestras extraídas (relacionadas anteriormente), se validan y establecen las condiciones predominantes de los suelos y/o materiales existentes, en cada una de las capas que conforman. En la Tabla 5-2 se presenta a modo resumen los resultados de laboratorio obtenidos tras la extracción de muestras durante la campaña de exploración geotécnica complementaria. Es de recalcar que el objetivo de dicha campaña de exploración se enfoca en la validación de espesores, determinación del módulo de los materiales granulares y validación del CBR inalterado reportado para los suelos cohesivos.

Tabla 5-2. Consolidados resultados de laboratorio. Se hace importante aclarar que no en todas las capas se tienen ensayos de laboratorio teniendo en cuenta que son ensayos de verificación a la exploración existente.

APIQUE	ABSCISA	ESPESOR (m)		DESCRIPCIÓN CAMPO	CLASIFICACIÓN		GRANULOMETRÍA (%)			LIMITES DE CONSISTENCIA (%)		
		INICIO	FIN		USCS	AASHTO	GRAVAS	ARENAS	PASA 200	LL	LP	IP
AP-22	K13+275	0.00	0.40	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	-	-	-	-	-	-	-	-
AP-22	K13+275	0.40	1.50	Limo Arcillo Arenoso	CH	A-7-5	8	24	68	82	32	50
AP-AF-01	K20+350	0.00	0.40	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	GP-GM	A-1-a	50	42	8	NL	NP	NP
AP-AF-01	K20+350	0.40	1.50	Limo arenoso amarillo	ML	A-4	0	44	56	NL	NP	NP
AP-AF-02	K20+600	0.00	0.60	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	-	-	-	-	-	-	-	-
AP-AF-02	K20+600	0.60	1.50	Arena limosa	-	-	-	-	-	-	-	-
AP-AF-03	K20+850	0.00	0.60	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	GP-GM	A-2-7	58	33	9	NL	NP	NP
AP-AF-03	K20+850	0.60	1.10	Limo Arcillo Arenoso	CL	A-6	0	13	87	37	22	15
AP-AF-03	K20+850	1.10	1.50	Arena limosa	SM	A-4	4	53	43	NL	NP	NP
AP-AF-04	K21+080	0.00	0.76	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	GP-GM	A-1-a	50	41	9	NL	NP	NP

APIQUE	ABSCISA	ESPESOR (m)		DESCRIPCIÓN CAMPO	CLASIFICACIÓN		GRANULOMETRÍA (%)			LIMITES DE CONSISTENCIA (%)		
		INICIO	FIN		USCS	AASHTO	GRAVAS	ARENAS	PASA 200	LL	LP	IP
AP-AF-04	K21+080	0.76	1.10	Limo arenoso	SM	A-4	1	54	45	NL	NP	NP
AP-AF-04	K21+080	1.10	1.50	Arena limosa	ML	A-4	0	36	64	32	24	8
AP-AF-05	K21+350	0.00	0.60	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	-	-	-	-	-	-	-	-
AP-AF-05	K21+350	0.60	0.80	Limo arenoso	-	-	-	-	-	-	-	-
AP-AF-05	K21+350	0.80	1.50	Limo arcilloso	-	-	-	-	-	-	-	-
AP-AF-06	K21+600	0.00	0.60	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	GP-GM	A-1-a	55	35	10	NL	NP	NP
AP-AF-06	K21+600	0.60	1.50	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	SM	A-1-b	37	46	17	NL	NP	NP
AP-AF-07	K21+850	0.00	0.40	Material granular gris oscuro, gravas de rio y arenas	GP-GM	A-1-a	55	33	12	NL	NP	NP
AP-AF-07	K21+850	0.40	1.50	Arena limosa	ML	A-4	0	38	62	NL	NP	NP

Fuente: Elaboración propia.

En función de lo anterior, y considerando la exploración geotécnica existente del Contrato INVIAS 2722 de 2019 (Ver numeral 3.1), en las siguientes ilustraciones se presenta esquemáticamente los perfiles estratigráficos identificados entre el K13+250 al K22+350 de la

vía El Porvenir - Cruce El Jauno - Puerto Guzmán sobre la Ruta Nacional 6501. De igual forma, los apiques que presentan el siguiente recuadro corresponden a los perfiles estratigráficos identificados durante la exploración geotécnica complementaria.

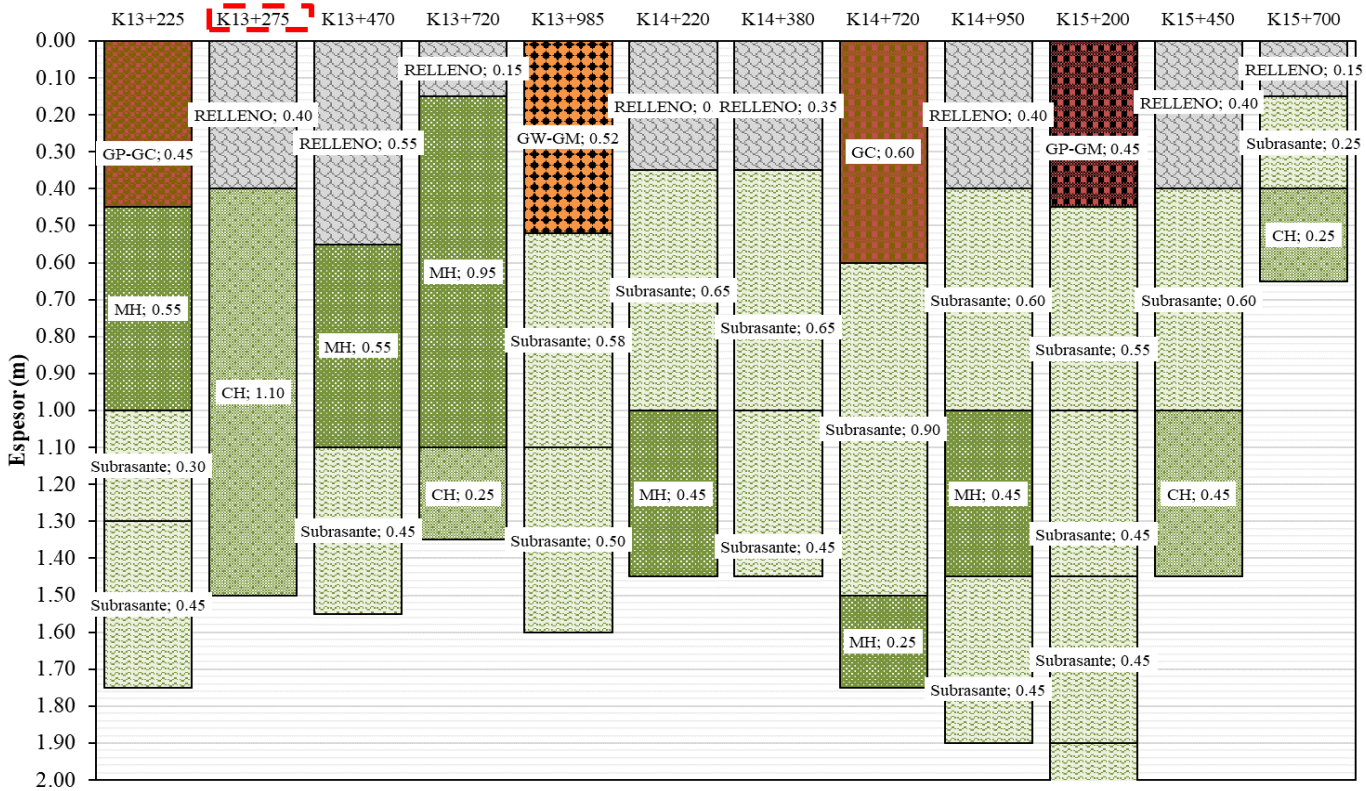


Ilustración 5-5. Perfil estratigráfico identificado K13+225 a K15+700.
Fuente: Elaboración propia.

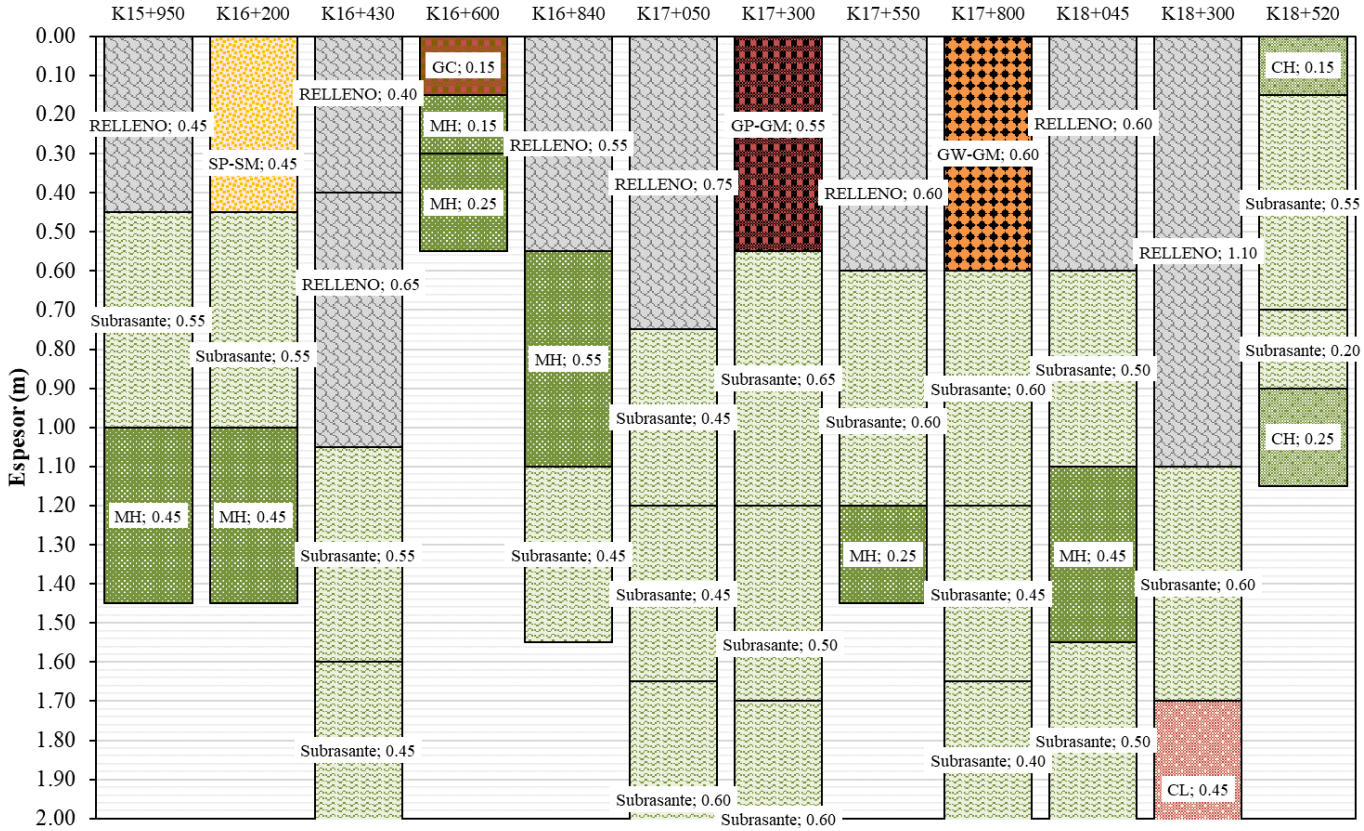


Ilustración 5-6. Perfil estratigráfico identificado K15+950 a K18+520.
Fuente: Elaboración propia.

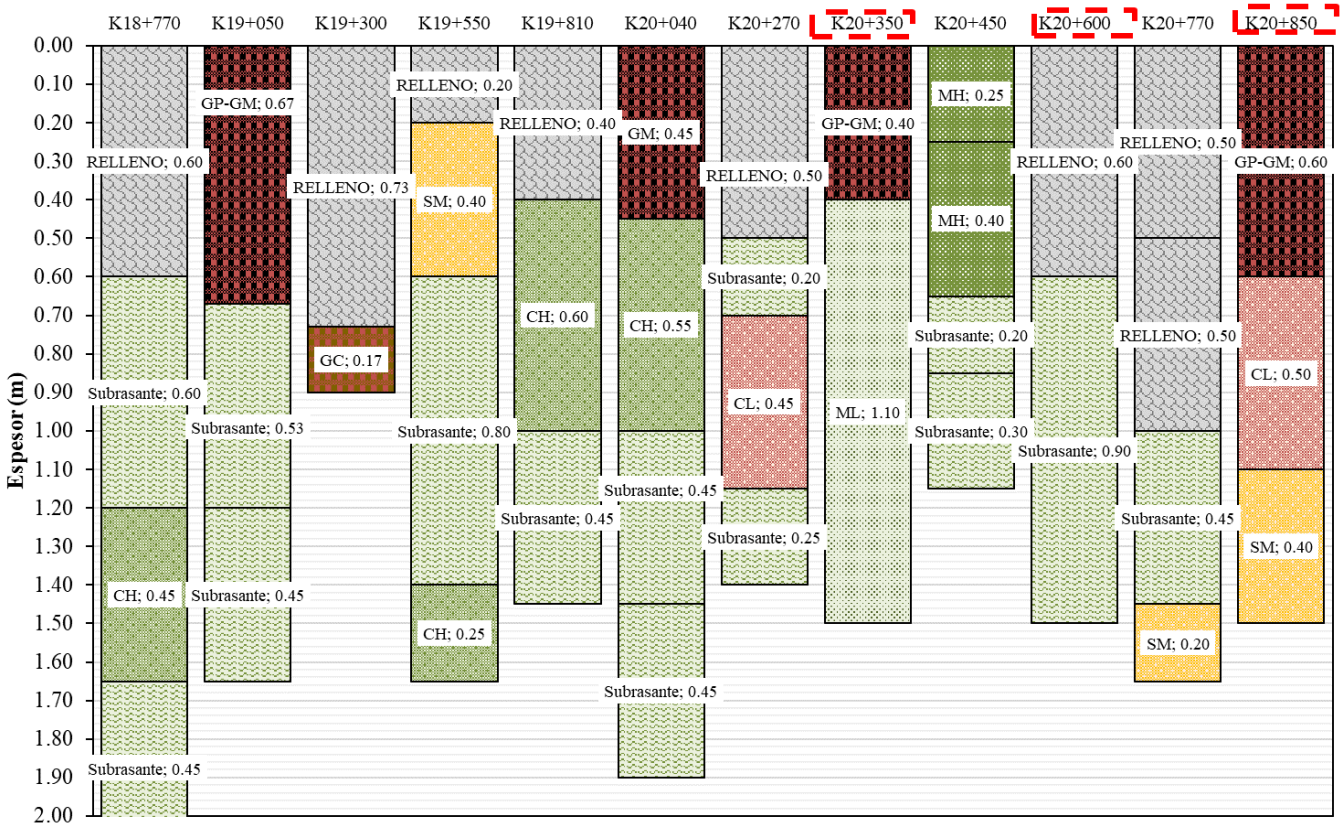


Ilustración 5-7. Perfil estratigráfico identificado K18+770 a K20+850.
Fuente: Elaboración propia.

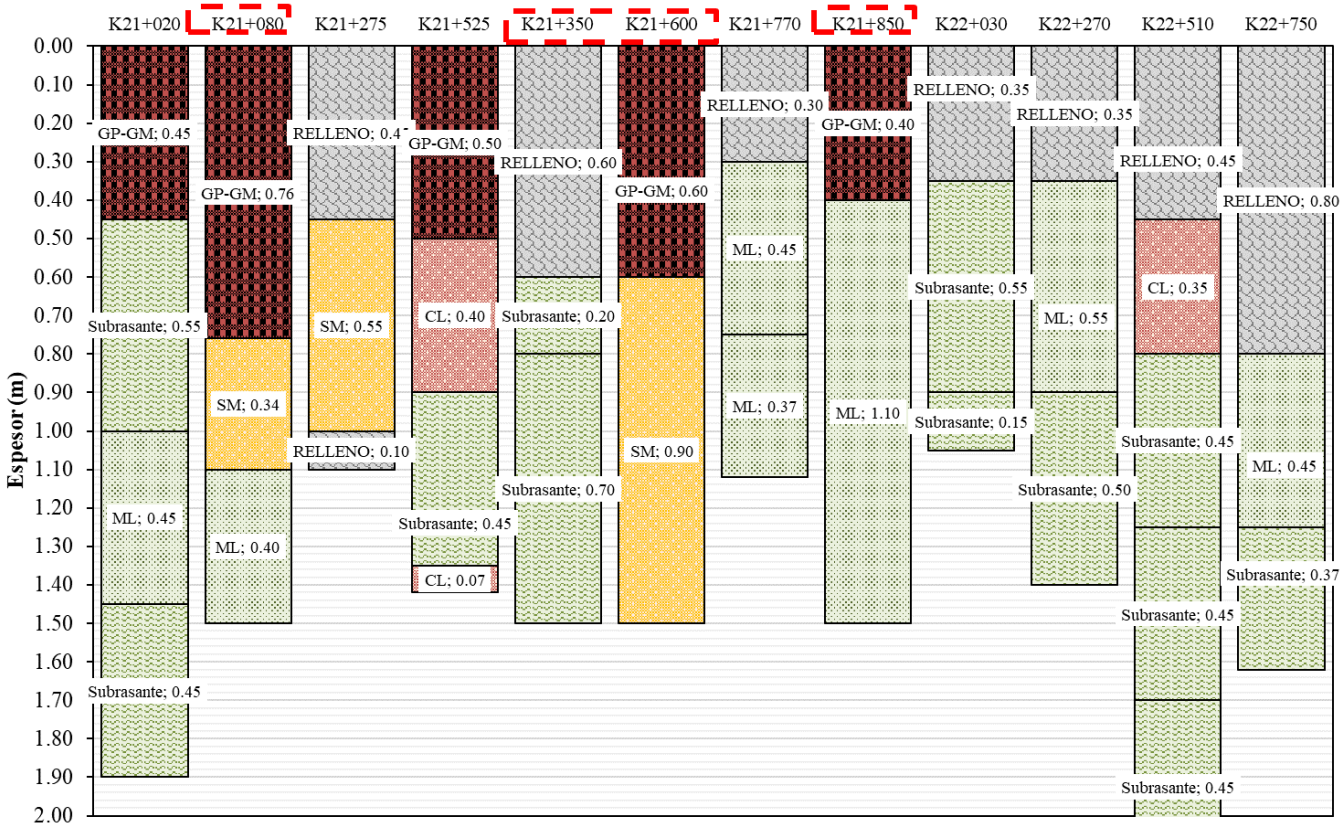


Ilustración 5-8. Perfil estratigráfico identificado K21+020 a K22+750.
Fuente: Elaboración propia.

En función de lo anterior, se concluye lo siguiente:

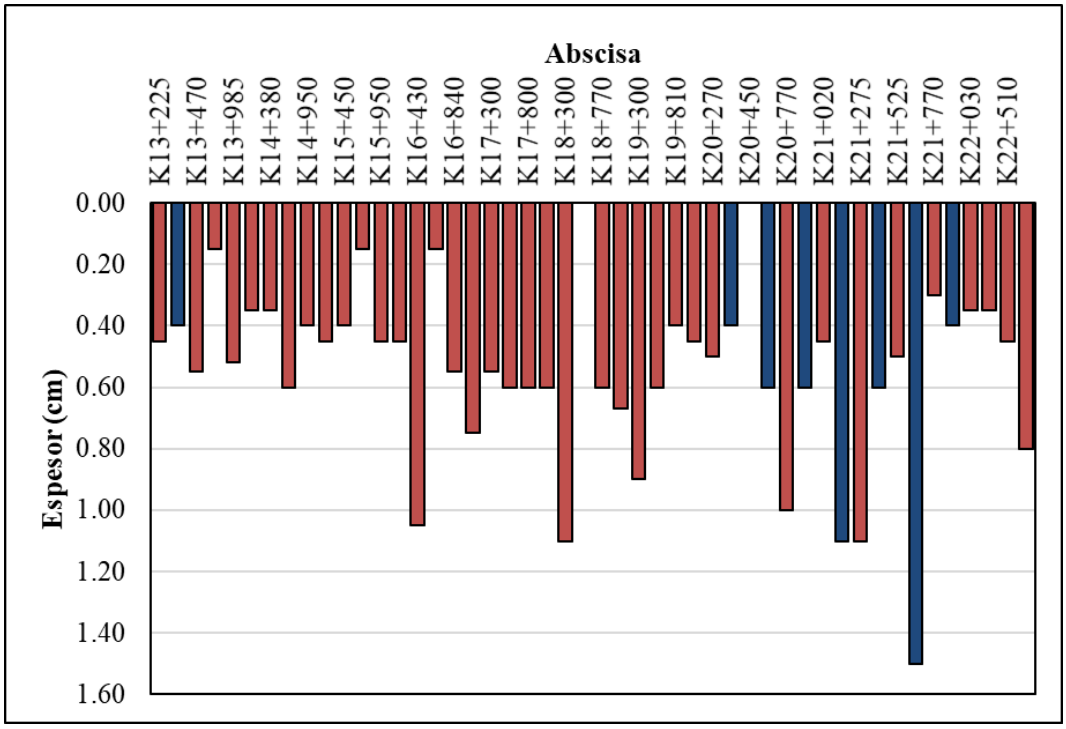
1. El material granular que sirve como rodadura actualmente corresponde a gravas aluviales con presencia de arcillas y limos (GW-GM, GP-GM, GP, GM y GP-GC) como se evidencia en la Ilustración 5-9.



Ilustración 5-9. Evidencia fotográfica material granular identificado.
Fuente: Archivo digital propio.

2. Se aclara que con base en la interpretación de los materiales reportados en la exploración no se evidencia la presencia de materiales granulares tipo capa de Base y/o Subbase Granular que permitan indicar que el corredor presente materiales de altas prestaciones (Valores de CBR's elevados) para la fundación de la futura estructura de pavimento a proyectar.

3. Respecto a los espesores de las gravas aluviales identificadas que sirven como superficie de rodadura, se evidencia que estos varían entre los 15 cm a 110cm y valor promedio de 54cm como se evidencia en la Ilustración 5-10 Si bien, se presenta en casos particulares variación en los espesores identificados en la exploración complementaria (Color azul) y existente del Contrato INVIAS 2722 de 2019 (Color Naranja), es de anotar que la evaluación de los mismos a lo largo del corredor se desarrollará en función del perfil geométrico a proyectar.



Nota: En color azul se presentan los espesores de granular identificado durante la campaña de exploración complementaría ejecutada en el año 2022. En color naranja, se presenta los espesores de granular identificados durante la campaña de exploración realizada en el marco del Contrato INVIAS 2722 de 2019.

Ilustración 5-10. Variabilidad espesor material granular a lo largo del K13+250 al K22+350.

Fuente: Elaboración propia.

4. Como bien se indicó anteriormente, la determinación de los sectores con aprovechamiento del material granular existente estará en función del análisis de rasantes realizado al considerar el diseño geométrico a implementar y la evaluación de los materiales desde el punto de vista geotécnico (Espesor y CBR) desarrollado en el numeral 6 del presente documento. En este orden de ideas y considerando los cambios de rasante proyectados (ver numeral 12 INTERPRETACIÓN), se consideró la ejecución de los ensayos de modificados de compactación para la determinación de la capacidad del material granular existente en los apiques AP-AF-03 (K20+850) y AP-AF-06 (K21+600) los cuales concuerdan con los sectores que presentan cambios de rasante menores a 1.0 metro como se evidencia en la Ilustración 5-11.

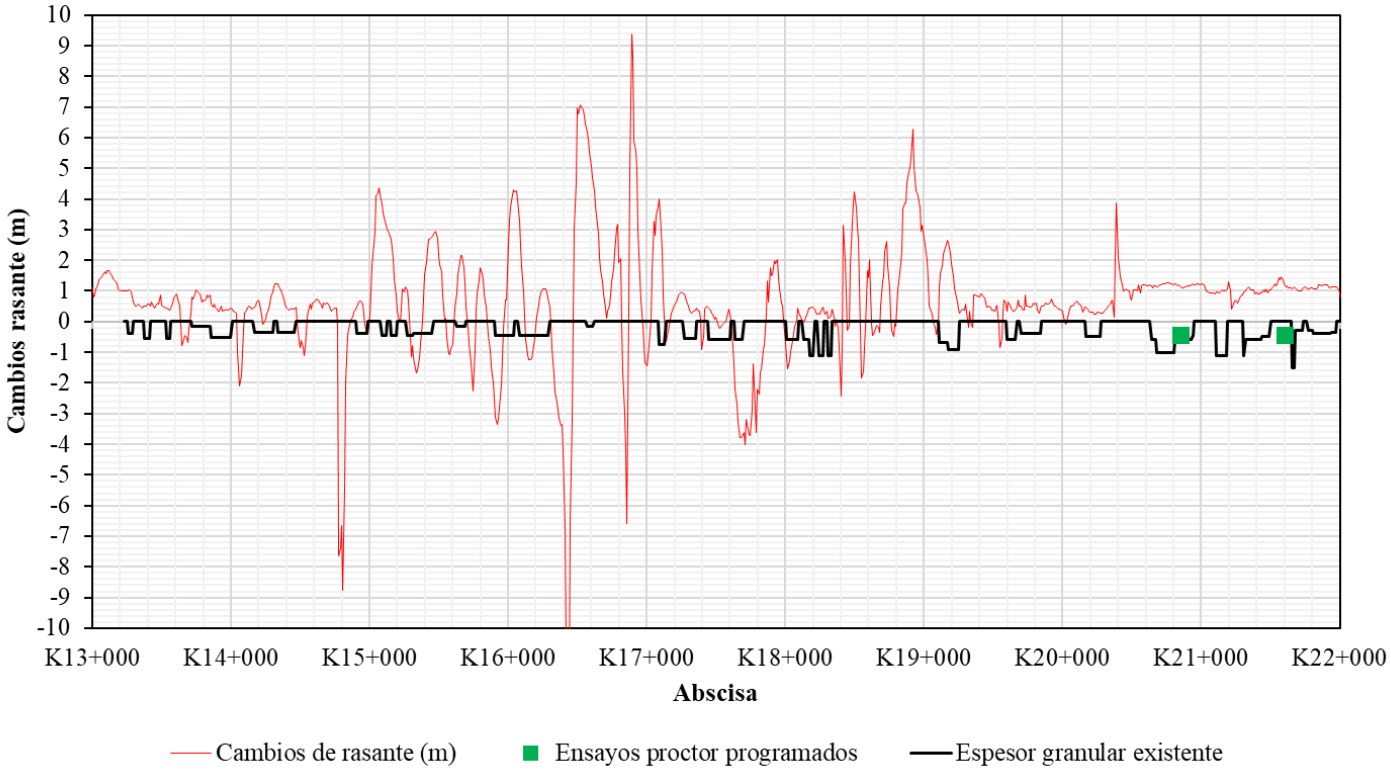


Ilustración 5-11. Cambios de rasante proyectados vs Espesores de material granular existente.

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior, es de anotar que, se considera como espesor 0 de granular todos aquellos sectores que requieren excavaciones significativas para la implantación de obras hidráulicas, estructuras o ampliaciones significativas que no permiten el aprovechamiento de los materiales granulares existentes. Los sectores que presentan dicha condición se relacionan en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Sectores que requieren excavaciones para implantación de obras hidráulicas, estructuras o ampliaciones significativas del corredor.

Inicio	Fin	Longitud (m)	Comentario
K13+230	K13+260	30	Obra hidráulica
K13+300	K13+380	80	Ampliación
K13+420	K13+480	60	Ampliación
K13+480	K13+510	30	Obra hidráulica

Inicio	Fin	Longitud (m)	Comentario
K13+510	K13+540	30	Ampliación
K13+570	K13+720	150	Ampliación
K14+010	K14+140	130	Ampliación
K14+140	K14+170	30	Obra hidráulica

Inicio	Fin	Longitud (m)	Comentario
K14+310	K14+340	30	Obra hidráulica
K14+470	K14+910	440	Ampliación
K14+990	K15+050	60	Ampliación
K15+050	K15+090	40	Obra hidráulica
K15+130	K15+160	30	Obra hidráulica
K15+200	K15+270	70	Ampliación
K15+460	K15+490	30	Obra hidráulica
K15+490	K15+630	140	Ampliación
K15+700	K15+910	210	Ampliación
K16+050	K16+080	30	Obra hidráulica
K16+300	K16+330	30	Obra hidráulica
K16+330	K16+500	170	Ampliación
K16+500	K16+530	30	Obra hidráulica
K16+530	K16+570	40	Ampliación
K16+620	K16+640	20	Ampliación
K16+640	K16+670	30	Obra hidráulica
K16+670	K16+880	210	Ampliación
K16+880	K16+940	60	Puente
K16+940	K17+090	150	Ampliación
K17+140	K17+270	130	Ampliación
K17+360	K17+450	90	Ampliación
K17+610	K17+640	30	Obra hidráulica
K17+700	K17+860	160	Ampliación
K17+860	K17+890	30	Obra hidráulica
K17+890	K18+010	120	Ampliación
K18+100	K18+130	30	Obra hidráulica

Inicio	Fin	Longitud (m)	Comentario
K18+210	K18+240	30	Obra hidráulica
K18+280	K18+310	30	Obra hidráulica
K18+340	K18+600	260	Ampliación
K18+600	K18+630	30	Obra hidráulica
K18+630	K18+900	270	Ampliación
K18+900	K18+930	30	Obra hidráulica
K18+930	K19+000	70	Ampliación
K19+000	K19+030	30	Obra hidráulica
K19+030	K19+110	80	Ampliación
K19+260	K19+400	140	Ampliación
K19+400	K19+430	30	Obra hidráulica
K19+430	K19+500	70	Ampliación
K19+500	K19+530	30	Obra hidráulica
K19+530	K19+600	70	Ampliación
K19+670	K19+700	30	Obra hidráulica
K19+850	K20+140	290	Ampliación
K20+140	K20+170	30	Obra hidráulica
K20+280	K20+310	30	Obra hidráulica
K20+310	K20+430	120	Ampliación
K20+430	K20+460	30	Obra hidráulica
K20+460	K20+610	150	Ampliación
K20+610	K20+640	30	Obra hidráulica
K20+950	K21+110	160	Ampliación
K21+190	K21+220	30	Obra hidráulica
K21+220	K21+310	90	Ampliación
K21+500	K21+660	160	Ampliación

Inicio	Fin	Longitud (m)	Comentario
K21+740	K21+770	30	Obra hidráulica
K21+980	K22+120	140	Ampliación

Inicio	Fin	Longitud (m)	Comentario
K22+120	K22+150	30	Obra hidráulica

Fuente: Elaboración propia en función de lectura de diseño geométrico.

5. Es de anotar que el 60.3% del corredor en estudio se proyecta con cambios de rasante mayores 0.5 metros y el 39.7% restante contempla cambios de rasante inferiores a 1.0 metro como se evidencia en la Tabla 5-4. Por lo cual, la capacidad estructural actual (en términos de CBR) del material granular existente influirá en la determinación de los espesores de material de adecuación de solamente el 21.3% del corredor (Cambios de rasante entre 0 y 0.5metros).

Tabla 5-4. Agrupación cambios de rasante a lo largo del corredor.

Cambio de rasante (m)	Longitud (m)	Porcentaje
Menor a -1.0	840	8.5%
Entre -1 a 0	970	9.9%
Entre 0 a +0.5	2,090	21.3%
Mayor a +0.5	5,930	60.3%
Total	9,830	

Fuente: Elaboración propia.

6. De igual forma, es de anotar que, dados los cambios de rasante, el diseño se enmarcará inicialmente en determinar una estructura de pavimento apropiada para los sectores con llenos superiores a 0.5metros (módulos equivalentes de la adecuación de plataforma de trabajo elevados) y posterior a ello, en función de los espesores de la estructura como tal (capa de rodadura y granulares intermedios) se procederá a determinar los espesores de mejoramiento mínimos a contemplar en las zonas de corte con el objeto de obtener una estructura de pavimento única a lo largo del corredor y únicamente variar los espesores de adición de material para la adecuación de la plataforma de trabajo.

6 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Como se logra evidenciar en la información secundaria recolectada y adjunta en el numeral 3.1 e información de laboratorio de la exploración geotécnica complementaria desarrollada en el numeral 5 TRABAJOS DE CAMPO los materiales granulares existentes no presentan un potencial de expansión que signifique un problema de estabilidad para el aprovechamiento de los mismos y posterior implantación de la estructura de pavimento a proyectar.

6.1 CAPACIDAD SOPORTE MATERIALES EXISTENTES

Con el objeto de determinar la capacidad de soporte (CBR) de los materiales existentes, se ejecutó el procedimiento descrito en la norma INV E-142 "*Relaciones humedad – peso unitario seco en suelos (Ensayo modificado de compactación*)" con el fin de determinar la humedad y grado de compactación óptima para la posterior determinación de la capacidad portante de los suelos haciendo uso del procedimiento descrito en la norma INVIAS INV E-148 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestras inalteradas*".

En función de lo anterior, en la Tabla 6-1 se presenta a modo resumen los resultados de CBR obtenidos con un grado de compactación del 95%.

Tabla 6-1 Valores de CBR para distintos grados de compactación.

APIQUE	SUCS	Prof (m)		DENSIDAD SECA MÁXIMA	DENSIDAD (kN/m3)			CBR (%)		
		inicio	fin	(kN/m3)	98%	95%	93%	98%	95%	93%
AP-20 (K12+350)	GP-GM	0.00	0.55	21.93	21.5	20.8	20.4	48.0	8.1	-
AP-AF-3 (K20+850)	GP-GM	0.00	0.60	21.92	21.5	20.8	20.4	107.8	64.8	36.2
AP-AF-6 (K21+600)	GP-GM	0.00	0.60	21.48	21.1	20.4	20.0	66.0	29.6	5.3
Promedio								73.9	34.2	20.7
Desviación estándar								30.7	28.6	21.8
Percentil 87.5%								52.5	13.5	9.2

Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, de los ensayos de caracterización adjuntos en el Anexo 4 "*Resultados de laboratorio"*, se validan los valores de resistencia mecánica (CBRs Método I) para los

materiales granulares (GW-GM, GP-GM, GP, GM, GC y GP-GC) resaltando un valor característico de 13.5 % a partir de un grado de compactación del 95 % del ensayo Proctor obtenido durante la ejecución de tomas de densidades de campo relacionadas en el Anexo 4 "*Resultados de laboratorio"* y Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Resultados densidades de campo.

Apique	Densidad (%)
AP-22 K13+275	91.6%
AP AF1 K20+350	93.7%
AP AF2 K20+600	96.2%
AP AF3 K20+850	95.5%
AP AF4 K21+080	94.3%

Apique	Densidad (%)
AP AF5 K21+350	93.2%
AP AF6 K21+600	99.2%
AP AF7 K21+850	95.3%
Promedio	94.9%

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior, pará efectos de desarrollo del diseño, se considera pertinente adoptar un valor característico de CBR de 14% granulares (GW-GM, GP-GM, GP, GM, GC y GP-GC) que sirven actualmente como capa de rodadura a lo largo del corredor.

6.2 MÓDULO RESILIENTE DE LOS MATERIALES GRANULARES EXISTENTES

Debido a que se identifica un estrato de materiales granulares con capacidad de soporte característica en términos de CBR de 14%; se considerará que el módulo resiliente del material se determina considerando la siguiente ecuación y obteniendo como resultado 95.4MPa:

$$E = 2555CBR^{0.64}\ (psi)$$

Ecuación 20

Donde:
E= Módulo del granular, (psi)
CBR = Capacidad de soporte del material, (%)

Teniendo en cuenta el valor de soporte de los materiales granulares representativos a lo largo del corredor, en términos de CBR, el tránsito de diseño y espesores de materiales

granulares existentes; se considera como premisa de diseño la conservación de los mismos para la conformación de la plataforma de trabajo.

6.3 DEFINICIÓN DEL CBR CARACTERÍSTICO DE LA SUBRASANTE

Como bien se ha indicado anteriormente se cuenta con un total de 51 apiques (11 apiques de exploración complementaria y 44 apiques extraídos del Contrato INVIAS 2722 de 2019), de los cuales fue posible la extracción de 15 muestras inalteradas 5 muestras de la exploración complementaria y 10 muestras del Contrato INVIAS 2722 de 2019) que a su vez se utilizarán para la determinación del CBR acorde a los procedimientos técnicos establecidos en la norma de ensayo INVE 148[4] y cuyos resultados se encuentran adjuntos en el Anexo 4 "*Resultados de laboratorio*". Por lo anterior, en la Tabla 3-3 se presenta el listado de los CBR utilizados para la determinación del valor representativo anteriormente mencionado.

Tabla 6-3 Resultados CBR's Inalterados

APIQUE	ABSCISA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN	CBR INALTERADO					
					ANTES DE INMERSIÓN		DESPUÉS DE INMERSIÓN		EXPANSIÓN TOTAL	Valor CBR
					0.1"	0.2"	0.1"	0.2"		
AP45 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K13+750	3	1.50	CH	3.09	2.72	0.99	1.32	0.10	1.32
AP49 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K14+750	3	1.50	MH	3.17	2.82	1.98	2.20	0.06	2.20
AP53 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K15+750	3	1.50	CH	2.82	2.82	1.76	2.25	0.02	2.25
AP57 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K16+750	3	1.50	MH	3.97	3.43	1.21	1.54	0.02	1.54
AP61 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K17+750	3	1.45	MH	2.06	1.86	1.18	1.47	0.02	1.47
AP65 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K18+750	3	1.50	CH	3.20	3.16	2.09	2.50	0.04	2.50
AP69 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K19+750	4	1.50	CH	2.35	2.20	1.62	1.62	0.04	1.62
AP73 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K20+750	4	1.45	MH	6.17	6.47	3.97	5.29	0.00	5.29

[4] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS. INV E-148 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada".*

APIQUE	ABSCISA	MUESTRA	PROFUNDIDAD (m)	CLASIFICACIÓN	CBR INALTERADO					
					ANTES DE INMERSIÓN		DESPUÉS DE INMERSIÓN		EXPANSIÓN TOTAL	Valor CBR
					0.1"	0.2"	0.1"	0.2"		
AP77 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K21+750	2	0.65	CL	1.76	2.50	1.25	2.30	0.20	2.30
AP81 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K22+750	1	0.55	CL	4.04	5.14	1.47	2.06	0.14	2.06
AP-22 (Contrato INVIAS 2722 de 2019)	K13+275	-	0.40	CH	3.30	2.80	3.10	2.60	0.04	3.10
AP-AF-01 (Geoterra 2022)	K20+350	-	0.40	ML	1.70	2.00	1.20	1.00	0.04	1.20
AP-AF-04 (Geoterra 2022)	K21+080	-	1.10	ML	1.50	1.80	1.40	1.50	0.00	1.50
AP-AF-07 (Geoterra 2022)	K21+850	-	0.40	ML	15.40	16.10	5.10	5.60	0.07	5.60
AP-TN-02 (Geoterra 2022)	K22+500	-	0.30	ML	1.60	1.20	1.50	1.20	0.04	1.50

Fuente: Elaboración propia a partir del Contrato INVIAS 2722 de 2019 y exploración geotécnica complementaria.

De acuerdo con lo anterior se identifica en primera instancia que los materiales de la subrasante identificados a lo largo del corredor en estudio corresponden al tipo arcillas y limos de alta plasticidad con valores de CBR en condición saturada que entre 1.2% hasta 5.6%.

Ahora bien, con el objeto homogenizar la subrasante a lo largo del corredor, se procedió a realizar un análisis mediante diferencias acumuladas bajo la metodología descrita en el numeral 2.1.7.5 Módulo Resiliente de subrasante, concluyendo lo siguiente:

- Entre las abscisas K13+250 a K16+250 el CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.65%.

- Entre las abscisas K16+250 a K20+550 el CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.34%.

- Entre las abscisas K20+550 a K22+350 CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.50%.

Lo anterior, se evidencia de forma esquemática en la Ilustración 6-1.

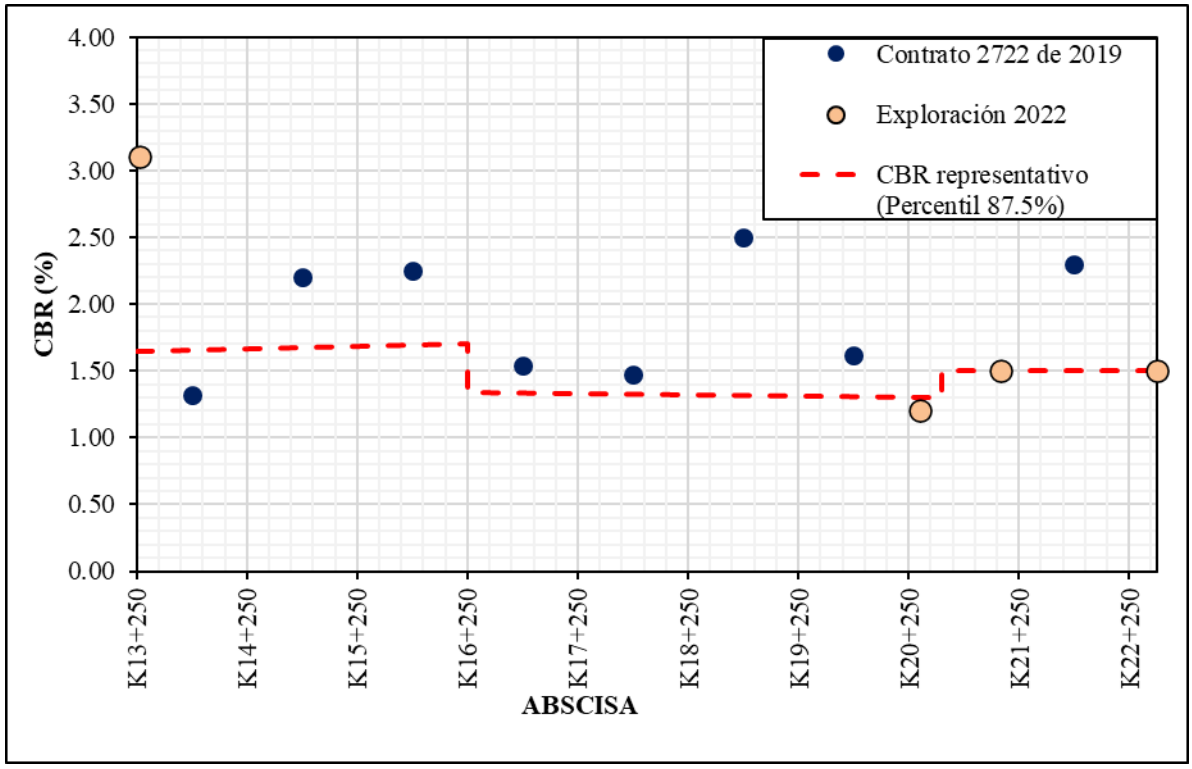


Ilustración 6-1. Variabilidad CBR inalterado a lo largo del corredor.
Fuente: Elaboración propia.

6.4 POTENCIAL DE EXPANSIÓN

Esta consultoría presenta el análisis del potencial de expansión en función de los datos primarios de límites de consistencia de forma acoplada con la humedad de equilibrio y de la expresión de presión de expansión teórica consignada en la NSR 98 (documento bibliográfico), la cual se basa en análisis de Jennings & Knight (1973) y Chen (1984).

Holz & Gibbs (1956) demostraron que el Índice de Plasticidad y el Límite Líquido son índices de utilidad para determinar las características de expansión de la mayoría de las arcillas. El potencial de expansión se define como el porcentaje de aumento de volumen en una muestra confinada lateralmente, el cual se satura bajo una sobrecarga de 0,07 kg/cm² después de ser compactada a su peso específico máximo en la humedad óptima. Debido a que el límite líquido y el potencial de expansión están íntimamente relacionados con la cantidad de agua absorbida, éstas dos variables se encuentran correlacionadas intrínsecamente tal y como se propone en la Tabla 6-4.

Tabla 6-4 Relación de potencial de expansión con el Límite Líquido.

Grado de Expansión	LL (%)	
	Chen	IS 1498
Bajo	< 30	20 - 35
Medio	30 - 40	35 - 50
Alto	40 - 60	50 - 70
Muy Alto	> 60	70 - 90

Fuente: Tomado directamente de Sridharan & Prakash, 2000, “Classifications Procedures for Expansive Soils

A su vez, y de acuerdo con Holz & Gibbs, el IP también se correlaciona con el Potencial del grado de expansión esperado.

Tabla 6-5 Relación de potencial de expansión con el IP.

Potencial de expansión	IP (%)		
	Holtz &Gibbs	Chen	IS 1498
Bajo	< 20	0 - 15	< 12
Medio	12 -34	.10 - 35	.12 - 23
Alto	23 - 45	20 - 55	23 - 32
Muy Alto	> 32	> 35	> 32

Fuente: Tomado de Sridharan, 2000

Con base en la conjunción y análisis acoplado de LL, LP, LC y el porcentaje de expansión en el odómetro, se presenta la siguiente tabla de clasificación de potencial de suelos expansivos. La siguiente tabla, coincide con la tabla H.6.1 de la NSR 98, excepto por la columna de expansión libre (EL) medida en probeta.

Tabla 6-6 Sistema de clasificación de suelos expansivos (Al Sulaimi 1993).

Potencial de expansión	Partículas menores 1µ (%)	Límite de contracción (%)	Índice de contracción (%)	Expansión libre en probeta (%)	Expansión Consolidómetro (%) Holtz and Gibbs	Expansión Consolidómetro (%) Holtz and Gibbs
Bajo	< 17	< 50	< 15	< 50	< 10	0 - 1.5
Medio	12 - 37	50 - 100	15 - 30	50 – 100	10 – 20	1.5 - 5

Potencial de expansión	Partículas menores 1μ (%)	Límite de contracción (%)	Índice de contracción (%)	Expansión libre en probeta (%)	Expansión Consolidómetro (%) Holtz and Gibbs	Expansión Consolidómetro (%) Holtz and Gibbs
Alto	18 - 37	100 - 200	30 - 60	100 – 200	20 – 30	5.0 - 25.0
Muy Alto	> 37	> 100	> 60	> 100	> 30	> 25.0

Vijayvergiya & Ghazzaly (1973) prepararon una carta de diseño para determinación del potencial de expansión libre correlacionando LL y contenido de humedad natural. Así las cosas, determinan que para humedades naturales entre 10 y 20% y 40%<LL<70%, se presentan los mayores porcentajes de expansión.

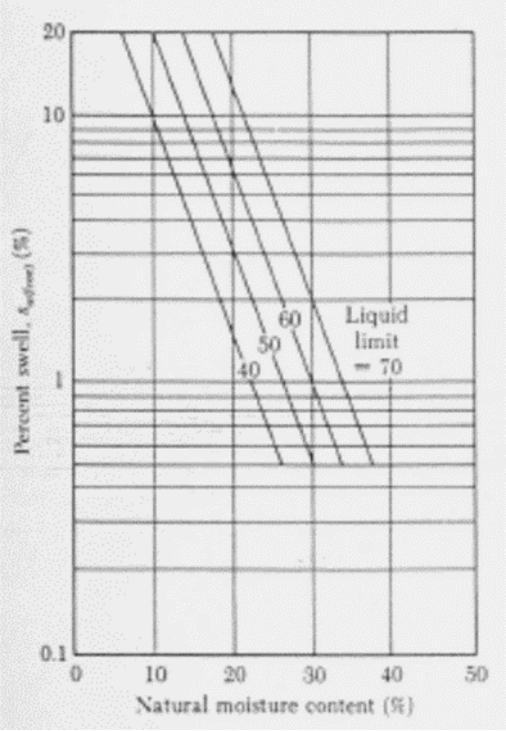


Ilustración 6-2 Carta de diseño de Vijayvergiya & Ghazzaly (1973) para determinación del porcentaje de expansión.

Abduljauwad & Al Sulaimani (1993) compendian gráficamente los potenciales de expansión comúnmente empleados en labores de clasificación de suelos susceptibles al cambio volumétrico al contacto con el agua, lo cual coincide perfectamente con la tabla H.6.1 de las NSR 98.

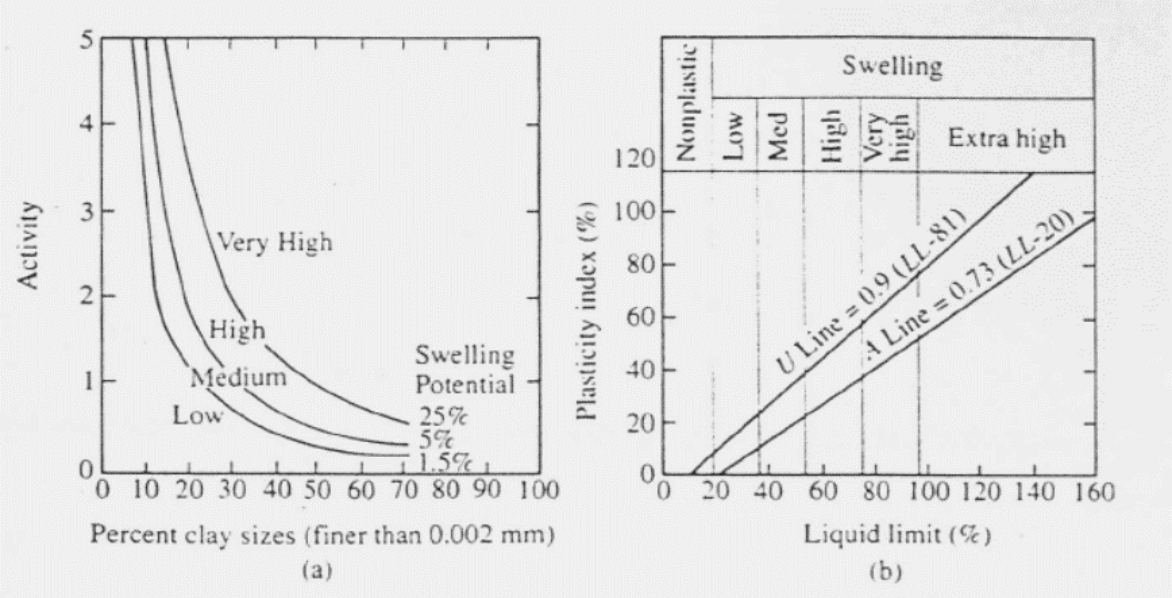


Ilustración 6-3. Cartas de Abduljauwad & Al Sulaimani (1993). Potencial de expansión.

Con el propósito de determinar indicios de expansividad en los suelos del área directa de influencia, se ha optó en primera instancia, por establecer mediante la correlación a partir del LL y el IP. Considerando los altos valores que puedan presentarse de límites líquidos (>60%) y de índice de plasticidad (>30%) se considera que en el perfil de diseño se pueden presentar materiales cohesivos que presenten alto potencial al cambio volumétrico, por ello por se presentan los resultados del análisis de potencial de expansión en función de las propiedades índice.

Con los resultados de los ensayos de límites de consistencia, los cuales no deben tomarse como un indicador directo y concluyente de la expansión, se calculó la humedad de equilibrio, si la humedad natural está por debajo de dicho valor, el material buscará satisfacer la demanda de agua hasta llegar a este valor generando así procesos de expansión para encontrar el valor complementario.

De acuerdo con lo anterior y considerando los resultados de laboratorio adjuntos en el Anexo 4 "*Resultados laboratorio"*, en la Tabla 6-7 se presentan el análisis del potencial de expansión en las distintas muestras recuperadas.

Tabla 6-7. Análisis potencial de expansión.

Apique	Abscisa	Profundidad (m)	Descripción	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Potencial de expansión NSR 10		LÍMITE LÍQUIDO		ÍNDICE DE PLASTICIDAD			NOTA
					LL	LP	IP	Humedad	Potencial de expansión	CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	
AP-22	K13+275	1.5	Limos arcillosos rojizo humedad media consistencia baja	CH	82	32	50	42	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Geoterra 2022
AP-AF-03	K20+850	1.1	Arcilla de baja compresibilidad con presencia de arena, color gris	CL	37	22	15	21	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Geoterra 2022
AP-AF-04	K21+080	1.5	Limo de baja compresibilidad arenoso, color marrón oscuro con vetas de oxidación	ML	32	24	8	19	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Geoterra 2022
AP43	K13+250	1.0	Arcilla grisácea verdosa de consistencia blanda a media.	MH	96	44	52	49	Muy Alto	Muy alto		Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP44	K13+500	1.1	Arcilla limosa amarillenta rojiza fisurada de consistencia media	MH	81	39	42	42	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP45	K13+750	1.1	Arcilla arenosa rojiza amarillenta	MH	54	36	18	29	N.A	Alto	Alto	Bajo	Medio	Medio	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP45	K13+750	1.8	Arcilla carmelita claro rojiza de consistencia	CH	87	35	53	45	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Apique	Abscisa	Profundidad (m)	Descripción	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Potencial de expansión NSR 10		LÍMITE LÍQUIDO		ÍNDICE DE PLASTICIDAD			NOTA
					LL	LP	IP	Humedad	Potencial de expansión	CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	
			media de alta plasticidad												
AP47	K14+250	1.5	Arcilla limosa rojiza ocre de consistencia media	MH	93	43	50	47	Muy Alto	Muy alto	-	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP49	K14+750	1.8	Limo arcillo arenoso rojizo amarillento de consistencia media de alta plasticidad	MH	88	40	48	45	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP50	K15+000	1.5	Arcilla limosa rojiza de consistencia media fisurada	MH	58	34	24	31	Alto	Alto	Alto	Medio	Medio	Alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP52	K15+500	1.5	Arcilla limosa rojiza clara de consistencia media	CH	111	42	68	56	Muy Alto	Muy alto	-	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP53	K15+750	1.8	Arcilla arenosa rojiza amarillenta de consistencia media, de alta plasticidad	CH	107	40	67	54	Muy Alto	Muy alto	-	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP54	K16+000	1.5	Arcilla limosa rojiza fisurada de consistencia media	MH	69	40	29	36	N.A	Muy alto	Alto	Medio	Medio	Alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP55	K16+250	1.5	Arcilla limosa rojiza clara de consistencia media	MH	62	38	23	33	Alto	Muy alto	Alto	Medio	Medio	Alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Apique	Abscisa	Profundidad (m)	Descripción	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Potencial de expansión NSR 10		LÍMITE LÍQUIDO		ÍNDICE DE PLASTICIDAD			NOTA
					LL	LP	IP	Humedad	Potencial de expansión	CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	
AP57	K16+750	1.4	Arcilla arenosa rojiza amarillenta, presencia de pequeños bloques	MH	87	39	48	45	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP57	K16+750	1.8	Limo arcillo arenoso rojizo amarillento con presencia de bloques compactos	MH	94	43	50	48	Muy Alto	Muy alto	-	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP58	K17+000	1.1	Arcilla limosa amarillenta parduzca	MH	69	41	28	36	N.A	Muy alto	Alto	Medio	Medio	Alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP61	K17+750	1.7	Limo arcillo arenoso amarillento ocre de alta plasticidad con presencia de gravas	MH	56	34	22	30	N.A	Alto	Alto	Medio	Medio	Medio	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP63	K18+250	1.6	Arcilla arenosa amarillenta grisácea	MH	51	35	16	28	N.A	Alto	Alto	Bajo	Medio	Medio	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP64	K18+500	2.2	Arcilla habana grisácea de consistencia blanda a media	CL	37	19	19	21	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP65	K18+750	0.2	Arcilla arenosa parduzca con gravas	CH	68	28	40	35	Muy Alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP65	K18+750	1.8	Arcilla arenosa amarillenta de alta plasticidad de	CH	98	32	66	50	Muy Alto	Muy alto	-	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Apique	Abscisa	Profundidad (m)	Descripción	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Potencial de expansión NSR 10		LÍMITE LÍQUIDO		ÍNDICE DE PLASTICIDAD			NOTA
					LL	LP	IP	Humedad	Potencial de expansión	CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	
			consistencia media con gravas												
AP66	K19+000	1.7	Arcilla habana grisácea clara de consistencia media	CH	55	23	32	29	Alto	Alto	Alto	Medio	Medio	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP69	K19+750	1.8	Arcilla arenosa amarillenta parduzca de consistencia media de alta plasticidad	CH	54	20	34	29	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP70	K20+000	1.0	Arcilla limosa amarillenta ocre de consistencia media	CH	87	33	54	44	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP71	K20+250	1.0	Residual de arcillolita grisácea clara algo arenosa fisurada de consistencia firme	CH	52	18	35	28	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP72	K20+500	1.2	Residual de arcillolita grisácea fisurada, deleznable	CL	43	19	24	24	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	Alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP73	K20+750	0.3	Capa de limo arenoso con raíces	MH	79	50	29	41	N.A	Muy alto	Muy alto	Medio	Medio	Alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP73	K20+750	0.7	Arcilla arenosa parduzca amarillenta	MH	89	40	49	45	Muy Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Apique	Abscisa	Profundidad (m)	Descripción	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Potencial de expansión NSR 10		LÍMITE LÍQUIDO		ÍNDICE DE PLASTICIDAD			NOTA
					LL	LP	IP	Humedad	Potencial de expansión	CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	
AP74	K21+000	1.8	Arena fina similar a la muestra anterior con gravas en la punta	SM	31	24	7	18	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP75	K21+250	1.5	Arena limosa muy fina deleznable	ML	29	24	5	17	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP77	K21+750	0.9	Arcilla limo arenosa parduzca amarillenta, de consistencia media, de baja plasticidad	CL	45	25	21	25	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP78	K22+000	1.1	Arena fina arcillosa muy deleznable	ML	30	23	7	18	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP78	K22+000	1.5	Arena fina arcillosa parduzca clara amarillenta, con gravas gruesas en la parte inferior	ML	34	26	8	20	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP80	K22+500	0.9	Arena fina arcillosa parduzca grisácea muy deleznable	ML	30	26	4	18	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP81	K22+750	0.8	Arcilla arenosa parduzca clara amarillenta de consistencia media, de baja plasticidad	CL	38	23	15	21	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Apique	Abscisa	Profundidad (m)	Descripción	Clasificación USCS	Límites de consistencia %			Potencial de expansión NSR 10		LÍMITE LÍQUIDO		ÍNDICE DE PLASTICIDAD			NOTA
					LL	LP	IP	Humedad	Potencial de expansión	CHEN	NORMA IS 1498	HOLTZ Y GIBBS	CHEN	NORMA IS 1498	
AP82	K23+000	1.3	Arena arcillosa saturada amarillenta parduzca deleznable	ML	30	26	4	18	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019
AP82	K23+000	1.7	Arena arcillo limosa amarillenta parduzca con presencia de gravas en la punta	ML	30	23	7	18	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, se puede evidenciar que, los suelos cohesivos de la subrasante a lo largo del corredor, presentan una condición de potencial de hinchamiento (expansión) entre medio y alto (límite líquido mayor a 40% e Índice plástico mayor a 35%.

Lo anterior permite concluir inicialmente que los suelos de subrasante identificados presentarán cambios volumétricos representativos en función de los cambios de humedad que se puedan llegar a presentar por la infiltración de agua a la estructura de pavimento a proyectar. Sin embargo, lo anterior, puede ser contrarrestada o controlada con el peso de la estructura de pavimento proyectada (presión impuesta alrededor de 2.5 ton/m^2) o por los siguientes escenarios:

- En caso que las excavaciones lleguen a dicho punto (capas Arcillosas o limosas), se debe implementar el mejoramiento del material de subrasante con la adición de Rajón o Suelo Tipo Seleccionado o Crudo de río.

- En caso que el material se encuentre por debajo del material aprovechable, no se deberán intervenir o modificar los suelos con potencial de expansión alto; debido a que el confinamiento propio que ya posee la estructura y adición de materiales para el aumento de rasante permite contrarrestar las presiones ejercidas por los materiales inicialmente mencionados.

Adicionalmente y en función de los análisis presentados, para disminuir el potencial de expansión de los suelos de subrasante; como medida preventiva se debe implementar un adecuado drenaje alrededor de las estructuras, cunetas revestidas y canalización adecuada de las aguas lluvias a través de sumideros, al igual que el drenaje subterráneo para impedir el ingreso de agua a la estructura de pavimento y un posible contacto con el material potencialmente expansivo. Se aclara que, en función de la exploración geotécnica adelantada se concluye que los materiales granulares podrán ser utilizados como parte de la estructura de pavimento a proyectar debido a que estos presentan un alto grado de consolidación producto del paso vehicular. De igual forma, dadas las particularidades del diseño geométrico (ver numeral 12 INTERPRETACIÓN) se proyectan cambios de rasante significativos que permitirán dar un mayor aprovechamiento a los materiales granulares existentes y a su vez se presentan los espesores mínimos de mejoramiento a contemplar en aquellos sectores en los cuales no sea posible el aprovechamiento de los materiales granulares.

7 ANÁLISIS INTERDISCIPLINAR

A continuación, presentan los hallazgos más relevantes a tener en cuenta dentro de la información recolectada de las demás áreas que interrelacionan con el componente de pavimentos. Se aclara que la información consignada en este numeral se extrae de manera textual y directa de los documentos respectivos por cada una de las áreas relacionadas.

7.1 COMPONENTE GEOMÉTRICO

El corredor en estudio presenta algunos sectores con topografía abrupta, como es el caso del K13+000 al K20+000, los cuales también coinciden con zonas de alta vegetación, lo que conllevaría a cortes de gran magnitud e impactos ambientales considerables, como se evidenció en los diseños entregados por el INVIAS realizados bajo el contrato 2722 de 2019 cuyo objeto fue: “Estudios y Diseños de Mejoramiento y/o Pavimentación de la Vía El Porvenir - Cruce El Jauno - Puerto Guzmán, Departamento del Putumayo.

Las condiciones del terreno originaron que en este sector se proyectaron pendientes longitudinales mayores al 8.0%, y cortes en cajón que alcanzan los 20 metros de altura, como se aprecia en las siguientes figuras tomadas de los Estudios y diseños entregados por el INVIAS.

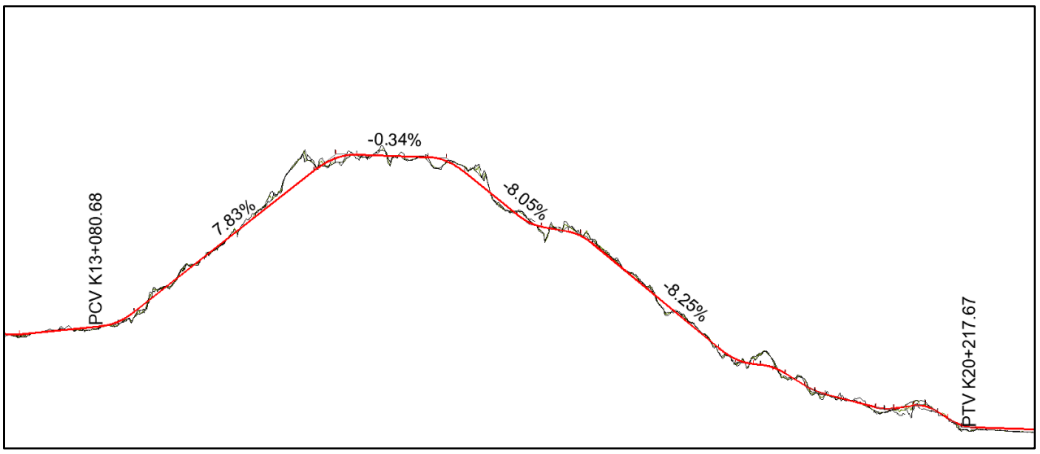


Ilustración 7-1. Perfil longitudinal K13+000 al K20+000.
Fuente: Estudios y Diseños Contrato 2722 de 2019

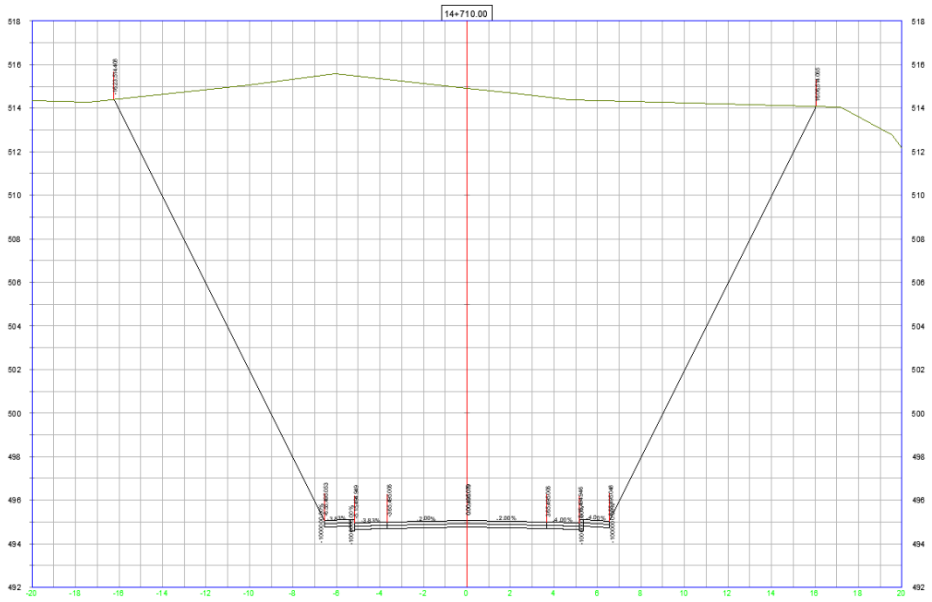


Ilustración 7-2. Sección Transversal K14+710.
Fuente: Estudios y Diseños Contrato 2722 de 2019

Considerando las altas precipitaciones en la zona, y la magnitud de los cortes, es muy probable la existencia procesos geomorfológicos, condiciones morfodinámicas y/o tectónicas, y la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

En comité realizado con los representantes del contratista, la interventoría y el INVIAS, el 9 de septiembre de 2022, la entidad solicitó expresamente, ajustarse al corredor existente cumpliendo con las especificaciones técnicas, tener claro que el objetivo es lograr la conectividad (MEPI-MN1-IN-14-FR-1 ACTA COMITÉ DE OBRA 4); lo anterior, demanda la necesidad de evaluar la velocidad de diseño en algunos tramos del corredor.

En estas condiciones, son perfectamente aplicables los casos a, b, c, d, e, g, i, k, establecidos en la resolución; lo que nos permite utilizar como mínimo, los parámetros de diseño geométrico, reduciendo en una sola clasificación, el grado de especificaciones del corredor en estudio, conforme la clasificación de carreteras de acuerdo a su funcionalidad, indicada en el capítulo 1 del manual de Diseño Geométrico de Carreteras, por lo que para este caso, en el que la vía es de primer orden, se podrán emplear parámetros para una vía de segundo orden

La geometría en planta está enmarcada dentro de los parámetros establecidos para la velocidad de diseño, en algunos sectores no es posible cumplir con la relación de radios para curvas consecutivas, debido a la adaptación al corredor existente; para cumplir con este parámetro, debemos alejarnos de la vía existente, lo que llevaría a incrementar el movimiento de tierras, la adquisición predial, afectación ambiental y por consiguiente un aumento considerable del presupuesto.

Al comparar los volúmenes de movimiento de tierras desde el K13+100 hasta el K21+950 con los volúmenes obtenidos en los Estudios y diseños entregados por el INVIAS, tomados del anexo 04 CARTERA DE VOLUMENES.XLS, (Corte = 256.638 m^3 Terraplén = 156.145 m^3) se evidencia una disminución del 45% en el corte y del 30% en los terraplenes, con la nueva propuesta geométrica, eso tan solo en este Ítem, lo anterior valida que se puede lograr optimizar considerablemente el proyecto aplicando las consideraciones especiales establecidas en la Resolución Número 20213040041135 del 13 de septiembre de 2021.

A pesar que la propuesta geométrica consideró la presencia de diferentes tuberías, las inconsistencias en el sistema de coordenadas de la TZ LÍNEAS DE FLUJO JUANAMBU-TOROYACO, y la escasa información hasta el K21+500, hacen necesario un levantamiento detallado por parte del operador, de todas las líneas existentes, la cuales deben ser contrastadas con la geometría para determinar las diferentes inferencias con el corredor y las medidas de protección a implementar en cada caso.

La estructura de pavimento definitiva, las consideraciones geotécnicas, el urbanismo, el diseño hidráulico, el diseño estructural y la señalización, deben ser consultados en el informe y/o planos correspondientes.

Los taludes del terraplén proyectados, 1.5:1.0, son muy pendientes; lo que hace que estos sean críticos, debido a que no son taludes recuperables o traspasables; entiéndase por traspasable aquellos taludes que no permiten el volcamiento de los vehículos errantes. Por lo anterior, se recomienda que en aquellas zonas en donde terraplén alcanza alturas mayores a 2.0 metros y en los box culvert, se deberán incluir defensas metálicas que impidan la salida de los vehículos de la vía. Para el caso de los pontones estos deberán estar provisto de barrera rígida tipo New Jersey o tipo “F”

8 ESTUDIO DE FUENTES DE MATERIALES

Cabe anotar que, previo a la instalación de las distintas capas propuestas para la estructura de pavimento a construir, se debe proceder a realizar la validación y verificación de la caracterización física y mecánica de los materiales propuestos en función de los parámetros de calidad establecidos en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del INVIAS (2022).

Como primera aproximación el Consorcio Vías Colombia 055 adelantó una primera caracterización del material granular proveniente de la fuente de material denominada *Balastrera El Muelle – Puerto Caicedo* con coordenadas 76°27’53.46” O; 0°59’34.97”N y la cual se adjunta de forma resumida en la Tabla 8-1 y Anexo 7 “*Fuentes de materiales”* se presentan los resultados

Tabla 8-1. Validación calidad producción Subbase Granular Clase A (SBG-A 50).

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito		El Muelle M#1 SBG-50	
		mínimo	máximo	Resultado	Validación
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo -500 revoluciones %	E-218	-	50	28	Cumple
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo %	E-238	-	30	12	Cumple
Pérdida en ensayo de solidez en sulfatos, máximo %	E-220	-			
- Sulfato de sodio		-	12	1.14	Cumple
-Sulfato de magnesio		-	18	-	No aplica
Límite líquido, máximo %	E-125	-	25	NL	Cumple
Índice de plasticidad, máximo %	E-126	-	6	NP	Cumple
Equivalente de arena, mínimo %	E-133	25	-	76.38	Cumple
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo %	E-211	-	2	0.15	Cumple
CBR de laboratorio, mínimo % 95%	E-148	40	-	64.5	Cumple

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito		El Muelle M#1 SBG-50	
		mínimo	máximo	Resultado	Validación
Gradación SBG-50	2" (50mm)	100	100	100.0	Cumple
	1 1/"2 (37.5mm)	70	95	91.3	Cumple
	1" (25 mm)	60	90	75.5	Cumple
	1/2" (12.5mm)	45	75	62.4	Cumple
	3/8" (9.5mm)	40	70	57.4	Cumple
	No. 4 (4.75mm)	25	55	48.0	Cumple
	No. 10 (2.0mm)	15	40	38.7	Cumple
	No. 40 (0.425mm)	6	25	11.8	Cumple
	No. 200 (0.075mm)	2	15	3.1	Cumple

Fuente: Elaboración propia a partir de reportes del Laboratorio Oscar Fernando Arévalo Peralta.

Nótese que el material granular caracterizado como SBG-A 50 cumple a cabalidad con los requerimientos de calidad establecidos en el Artículo 320-22 "*Subbase granular"* de las Especificaciones INVIAS 2022.

De igual forma, durante la etapa de producción e instalación de dicho material se deberá cumplir a cabalidad con las tolerancias indicadas en la Tabla 320-3 "*Franjas granulométricas del material de subbase granular"* y demás requerimientos indicados en el numeral 320.4 "*Ejecución de los trabajos"* y 320.5 "*Condiciones para el recibo de los trabajos"* del Artículo 320-22 "*Subbase granular"* de las Especificaciones INVIAS 2022.

9 ESTUDIO DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE

La información consignada en este Capítulo se extrae del concepto técnico MT-0851-C187, realizado por el especialista de Tránsito. Las metodologías de diseño de pavimentos relacionan dentro de las variables del proyecto y como parámetro de evaluación de las solicitaciones de carga, lo correspondiente al número de ejes equivalentes de 80 kN, interpretado como la equivalencia de los vehículos que circulan sobre el corredor, a un vehículo estándar de eje simple de 80 kN.

Para tal fin, se recurre a los factores de equivalencia por tipo de camión para vehículos comerciales determinados a partir de lo establecido en el manual de diseño INVIAS de 1998, tal como se indica en la Tabla 9-1. Factores de Equivalencia de Carga.

Tabla 9-1. Factores de Equivalencia de Carga.

TIPO DE VEHÍCULO	(Manual INVIAS 1998)
Autos	0.00
Buses	1.00
C2P	1.14
C2G	3.44
C3	3.90
C5	4.40
>C5	4.72

Fuente. Manual de diseño de pavimentos flexibles para medios y altos volúmenes de tránsito (1998).

En función de los factores daño expuestos anteriormente, se procede a determinar el número de ejes equivalentes para ambos escenarios y a su vez se seleccionará la condición más crítica obtenida.

9.1 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL

El factor de distribución direccional (Fd), corresponde a la distribución porcentual de los vehículos comerciales en cada sentido de circulación, obtenidos de los resultados de un conteo o por observación directa en campo. Generalmente en el país se asume un 50%.

9.2 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL

Este parámetro corresponde a la distribución de camiones entre los carriles con el mismo sentido. En carreteras de dos carriles, con un carril por sentido, el valor del factor de distribución direccional es de 1, mientras que, para carreteras de dos sentidos, con múltiples carriles por sentido, los valores del factor de distribución por carril (Fca) adoptados son los recomendados por la guía National Cooperative Higway Research Program (NCHRP), y que se muestran en la Tabla 9-2.

Tabla 9-2. Factor de distribución por carril según NCHRP.

Número Total de carriles en cada sentido	Factor de distribución para el carril de diseño (Fca.)
1	1.00
2	0.90
3	0.60
4 o más	0.45

Fuente: ARA, 2004.

9.3 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES

Para determinar el número de solicitaciones esperadas del eje sencillo equivalente a 8.2 Toneladas, que se presenta en el carril de diseño durante el período de diseño, y tomando como año base el 2023 y el periodo de análisis (10 años), se obtiene el tránsito de diseño teniendo en cuenta los factores y ecuaciones presentadas a continuación:

$$\boldsymbol{W18} = 365 * TPD´s * \%Vc * Fcg * Fd * Fca * \frac{(1+r)^n - 1}{Ln\,(1+r)}$$

Ecuación 21

$$\boldsymbol{N} = Nivel\ de\ Confianza * W18$$

Ecuación 22

$$\boldsymbol{Ndis}_{\mathbf{8.2\ Ton}} = N\ + (N * Ta) + (N * Tg)$$

Ecuación 23

$$Fcc = \frac{\sum \%camion * F.equivalencia}{\sum \% \ camiones}$$

Ecuación 24

$$Fcg = \frac{\%\ camiones * Fcc + \%\ buses * Fb}{\%camiones + \%\ buses}$$

Ecuación 25

Dónde:

- **N 8.2 Ton:** Número acumulado de ejes equivalentes.
- **TPD's:** Tránsito promedio diario semanal.
- **%Vc:** Porcentaje de vehículos comerciales (%B y %C).
- **Fcg:** Factor camión global.
- **Fd:** Factor de distribución por sentido.
- **Fca:** Factor de distribución por carril de diseño.
- **Fp:** Factor de Proyección.
- **r:** Tasa anual de crecimiento del tránsito.
- **n:** Período de diseño, años.
- **Nc:** Nivel de confianza.
- **Ta:** Tránsito atraído.
- **Tg:** Tránsito Generado.
- Factor de distribución direccional, F.D.D=0.50
- Factor de distribución por carril, F.D.C=1.00
- **Fcc:** Factor camión D. D

Conociendo los errores de pronóstico de cada año y asumiendo una distribución normal para la diferencia del tránsito real con el estimado, se puede establecer el coeficiente de la curva normal estandarizada (Zr) que asegure el nivel de confianza deseado en la determinación del tránsito futuro. Para este proyecto, al tránsito se le va a dar un nivel de confianza del 90% (acorde con la confiabilidad del diseño establecida en el numeral 2.1.4 Confiabilidad del presente documento), y la expresión para proporcionar la confianza requerida en la variable tránsito se presenta en la siguiente ecuación:

$$N' = 10^{0.05 * Zr} * N$$

Ecuación 26

Donde N' es el tránsito equivalente corregido para una confianza del 90% y Zr corresponde a una distribución normal a una confiablidad de 90%, por lo que Zr = 1.282. Por lo tanto, el valor final de los ejes equivalentes se dará por la siguiente ecuación.

$$N' = 10^{0.05*1.282} * N$$

Ecuación 27

De acuerdo con el procedimiento ilustrado anteriormente, en la Tabla 9-3 se presentan las proyecciones de tránsito suministrados por el Especialista en cuestión y los cuales se determinaron a partir de estaciones de conteo propias y estaciones dispuestas por el INVIAS.

Tabla 9-3. TPD proyectado 2023 a 2042.

AÑO No.	AÑO	TIPO DE VEHÍCULO								VEHÍC. MIX
		AUTOS	BUSES	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5	
0	2022	779	6	100	43	17	17	1	9	973
1	2023	809	6	104	45	18	18	2	9	1,010
2	2024	840	6	108	46	19	19	2	9	1,048
3	2025	871	6	112	48	19	19	2	10	1,088
4	2026	905	7	117	50	20	20	2	10	1,129
5	2027	939	7	121	52	21	21	2	10	1,172
6	2028	975	7	126	54	22	22	2	11	1,217
7	2029	1,012	7	130	56	22	22	2	11	1,263
8	2030	1,050	8	135	58	23	23	2	12	1,311
9	2031	1,090	8	140	60	24	24	2	12	1,361
10	2032	1,131	8	146	62	25	25	2	12	1,413
11	2033	1,174	9	151	65	26	26	2	13	1,466
12	2034	1,219	9	157	67	27	27	2	13	1,522
13	2035	1,265	9	163	70	28	28	2	14	1,580
14	2036	1,313	10	169	72	29	29	2	14	1,640
15	2037	1,363	10	176	75	30	30	3	15	1,702

AÑO No.	AÑO	TIPO DE VEHÍCULO								VEHÍC. MIX
		AUTOS	BUSES	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5	
16	2038	1,415	10	182	78	31	31	3	16	1,767
17	2039	1,469	11	189	81	32	32	3	16	1,834
18	2040	1,525	11	196	84	34	34	3	17	1,904
19	2041	1,583	12	204	87	35	35	3	17	1,976
20	2042	1,643	12	212	91	36	36	3	18	2,051

Fuente: Geoterra Consultores Geotécnicos S.A.S. MT-0851-C187-2022. Determinación de número de ejes equivalentes sector K2+750 al PR 24+000 vía Villa Garzón-San José de Fragua. Septiembre 26 del 2022.

En función de lo anterior, en la Tabla 9-4 se presenta el número de ejes equivalentes a considerar para el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible.

Tabla 9-4. Ejes equivalentes de diseño – Pavimento flexible.

Periodo	Años	AUTOS	BUSES	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5
2023-2032	10	10,401	77	1,340	574	230	230	19	114
FD	-	0.00	1.00	1.14	3.44	3.76	3.42	4.40	4.72
S TDP x FD	-	0	77	1,528	1,975	864	786	86	539
FC	-	0.5							
NESE (8.2 ton) 10 años		**1,068,421**							
NESE (8.2 ton) confiabilidad 90%		**1,228,684**							

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Tránsito suministrada por el Especialista de Tránsito.

En función de lo anterior, para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento flexible se contemplará **1,228,684 ejes equivalentes de 8.2t en un periodo de 10 años.**

Para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento rígido, se considerará un periodo de diseño correspondiente a 20 años, obteniendo como resultados las estimaciones adjuntas en la Tabla 9-5.

Tabla 9-5. Ejes equivalentes de diseño – Pavimento rígido.

Periodo	Años	AUTOS	BUSES	C2P	C2G	C3	C4	C5	>C5
2023-2042	20	24,371	180	3,140	1,345	539	539	46	268
FD		0.00	1.00	1.14	3.44	3.76	3.42	4.40	4.72
S TDP x FD		0	180	3,580	4,627	2,025	1,842	201	1,264
FC		0.5							
NESE (8.2 ton) 20 años		**2,503,561**							
NESE (8.2 ton) confiabilidad 90%		**2,879,096**							

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Tránsito suministrada por el Especialista de Tránsito.

En función de lo anterior, para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento rígido se contemplará **2,879,096 ejes equivalentes de 8.2t en un periodo de 20 años**.

Los soportes de los cálculos relacionados anteriormente se adjuntan en el Anexo 5 "*Estudio de tránsito"* y Anexo 6 "*Memorias de cálculo".*

10 DISEÑO DE PAVIMENTOS

Como fue indicado en el alcance del documento, este informe busca definir la propuesta de intervención a nivel de pavimento, por lo que a continuación se describe la metodología y las consideraciones a seguir considerando las condiciones particulares del corredor vial en estudio, en cuanto a condiciones de diseño geométrico y capacidad portante del suelo existente.

Al presentar una propuesta de diseño del pavimento, es necesario considerar tres variables fundamentales, como lo son:

- La exploración geotécnica (determinar las características del perfil estratigráfico existente)
- La evaluación funcional y estructural del pavimento
- Diseño geométrico (rasante)
- Las cargas de tránsito proyectadas en el período de intervención.

10.1 MATERIALES

Los materiales deberán cumplir con las especificaciones INVIAS-2022, resolución 1524 del 6 de mayo de 2022 de la siguiente manera:

- Mezcla asfáltica (MDC-19 / MDC-25): ART. 400-450, INV-2022.
- Concreto hidráulico (MR42 o MR45): Art. 500, INV-2022.
- Base granular Clase A: ART. 330, INV-2022.
- Subbase granular Clase A: ART. 320, INV-2022.

10.2 CAPACIDAD ESTRUCTURAL ACTUAL

Ahora bien, respecto a la capacidad de soporte de los materiales granulares existentes entre el K13+250 al K22+350 se hace uso de los ensayos de laboratorio (Proctor modificado) que a su vez fueron analizados el numeral 6.2 del presente documento, en la Tabla 10-1 se adjunta a modo resumen los módulos representativos para cada una de las capas granulares existentes.

Tabla 10-1. Módulo representativo para la capa de granular existente.

Material	Comentario
Material granular existente (GW-GM, GP-GM, GP, GM, GC y GP-GC)	$E = 2555CBR^{0.64}\ (psi)$ Para las modelaciones numéricas se adopta un módulo de 95.4 MPa equivalente a un CBR de 14%

Fuente: Elaboración propia.

10.3 ESTRATEGIAS DE INTERVENCIÓN

A partir de las consideraciones técnicas establecidas anteriormente (caracterización geotécnica, tránsito y parámetros de diseño), en los siguientes numerales se procede a establecer los espesores constructivos óptimos para la implementación en obra de la estructura de pavimento flexible o rígido

1. **Alternativa 1:** Se proyecta una estructura de pavimento flexible considerando un periodo de diseño a 10 años compuesta por: Como rodadura, Mezcla asfáltica en caliente tipo MD-19 o MDC-25 (Art. 450-22), apoyada sobre una Base Granular Clase A (Art. 330-22).

2. **Alternativa 2:** Se proyecta una estructura de pavimento rígido considerando un periodo de diseño a 20 años compuesta por: Como rodadura, Concreto hidráulico con resistencia a la flexotracción a los 28 días de 4.2MPa o 4.5 MPa (Art. 500-22), apoyada sobre una Subbase Granular Clase A (Art. 320-22).

Es de anotar que, para ambas alternativas de intervención se plantea como premisa de diseño que la plataforma de trabajo presente un módulo equivalente mínimo de 100MPa (CBR 10%) obtenido tras la adecuación de la misma con Material granular existente y/o Subbase Granular Clase A (Art. 320-22) basados en las alturas de los terraplenes proyectados mayores a 0.5m en el 60.3% de la longitud del corredor (ver Tabla 5-4).

De igual forma, para los demás casos donde se presenta secciones en corte o cambios de rasante menores a 0.5m (es decir en 62.7% del corredor ver Tabla 5-4) se presenta el numeral 10.4 con el efecto de mantener un mismo espesor de losa en los dos tipos de secciones (Cortes o terraplén). A partir de lo anterior, en los siguientes numerales se procede a realizar el dimensionamiento y posterior validación mecanicista de las alternativas de intervención indicadas.

A partir de lo anterior, en los siguientes numerales se procede a realizar el dimensionamiento y posterior validación mecanicista de las alternativas de intervención indicadas.

10.3.1 Alternativa 1: Estructura de pavimento flexible (periodo de diseño: 10 años).

A partir de las consideraciones técnicas establecidas anteriormente (caracterización geotécnica, tránsito y parámetros de diseño), en la Ilustración 10-1 se adjunta el predimensionamiento de la estructura de pavimento bajo la metodología AASHTO-93; cuya premisa de diseño corresponde a obtener un número estructural (SN) mayor o igual al requerido por el tránsito y capacidad de soporte de la subrasante ($SN_{Requerido}$).

MEMORIA DE CÁLCULO - METODOLOGÍA AASHTO 1993

NESE (8.2 ton)	1,228,684	TRÁNSITO DE DISEÑO
Log(NESE)	6.089	
R (%)	90	*NIVEL DE CONFIABILIDAD*
Zr	-1.282	*DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL*
So	0.45	*DESVIACIÓN NORMAL DEL ERROR ESTÁNDAR COMBINADO*
pi	4.2	*NIVEL DE SERVICIALIDAD INICIAL*
pt	2.2	*INDICE DE SERVICIALIDAD TERMINAL DE DISEÑO*
ΔPSI	2.0	*DELTA DE SERVICIABILIDAD*

Confiabilidad, R, en	Desviación estándar
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
95	-1.645
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

$$Log_{10}(W_{18}) = Z_R(S_o) + 9.36Log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{Log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.31Log_{10}(MR) - 8.07$$

(100 MPa)

Mr	14,504	psi

$SN = a_1d_1 + a_2m_2d_2 + a_3m_3d_3$

aca =0.184*ln(Eca)-1.9547

abg =0.249*log(Ebg)-0.977

asbg =0.227*log(Esbg)-0.839

E en psi

Número de capas 2

Capas	SN parciales	SN	logW18
MDC-19/MDC-25	SN1	*2.605*	6.089
SBG-A	SN2	*2.743*	6.089

	pulg	cm	cm asumido	pulg corregido
h1	8.68	22.06	***15.0***	5.91
h2	1.27	3.24	***0.0***	1.27

SN1*	1.772
SN2*	2.743
1.15SN requerido =	1,288,747.1

Capa		Módulo (MPa)	Módulo (psi)	Espesor cm	Espesor in	Espesor total (cm)	a_i	m_i	SN efectivo		SN requerido	Cumplimiento SNef > 1.0 SNreq
MDC-19/MDC-25		1,380	200,152	**15.0**	5.91	85.0	0.300	1.0	1.77	2.76	2.74	Ie= 1.01 (Cumple)
BG-A		210	30,458	**20.0**	7.87		0.140	0.9	0.99			

Ilustración 10-1. Predimensionamiento estructura de pavimento flexible. MDC-19 / MDC-25: 15cm + BG-A: 20cm + Adecuación plataforma de trabajo 100MPa

Fuente: Archivo propio.

Una vez realizado el predimensionamiento de la estructura de pavimento mediante la metodología AASHTO-93; se procede a realizar las validaciones empírico – mecanicistas que permitan validar la resistencia a la fatiga y deformación de la misma (Daño relativo).

Obteniendo como resultado que la estructura predimensionada está en la capacidad de soportar las deformaciones máximas por tracción inducidas por un semi - eje estándar y presión de contacto de 80 psi (ver Tabla 10-2). Lo anterior, se ve reflejado en consumos (daño relativo) superiores al 100% respecto a las deformaciones admisibles determinadas en función del tránsito de diseño.

Tabla 10-2. Validaciones empírico - mecanicistas. Predimensionamiento: MDC-19: 12cm + BG-A: 20cm + Adecuación plataforma de trabajo 100MPa.

Estructura:	**Flexible, nueva**

NESE (8.2 ton):	1.23E+06	Número de ejes equivalentes de 8.2 t.
MR (kg/cm2):	1019.7	Módulo resiliente de la subrasante
K:	1.50	Factor de Calage

Datos de Entrada

Capa No.	Material	Espesor (m)	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de poisson (-)
1	MDC-19/MDC-25	15.0	1380.0	0.35
2	BG-A	20.0	210.0	0.40
3	SBG-A		115.0	0.40
4	Plataforma de trabajo		100.0	0.42

Capa No.	Material	% asfalto (en peso)	% asfalto, %Vb (en volumen)	% asfalto adoptado
1	MDC-19/MDC-25	5.50	11.0	11.0

Verificación Daño relativo (Dr) por fatiga

Material	εt (m/m) diseño:	Según Estructura (admisible) εt (m/m) admisible:	NESE admisible:	Daño relativo ($Dr=N_{diseño}/N_{admisible}$) Cumplimiento si Dr<100%
MDC-19/MDC-25	3.53E-04	2.86E-04	3.55E+06	**34.58%**

Donde:

Parámetro	Descripción	Metodología empleada:
εt:	Deformación admisible por tracción en la fibra inferior de la mezcla asfáltica	Shell

Verificación deformación permanente

(A) (B)

Parámetro	Diseño	Admisible (por estructura)	NESE admisible:	Deformación Permanente, Ahuellamiento (Ndiseño/Nadmisible) Cumplimiento si <100%
DZadm (mm):	8.62E-01	4.24E-01	2.26E+07	**5.44%**
ωT (mm):	9.76E-01	4.24E-01	1.27E+09	**0.10%**
εz (Confiabilidad 50%)	8.41E-04	3.15E-04	6.28E+07	**1.96%**
εz (Confiabilidad 85%)	5.83E-04	3.15E-04	1.45E+07	**8.49%**
εz (Confiabilidad 95%)	5.38E-04	3.15E-04	1.05E+07	**11.71%**
σz (MPa):	1.33E-01	3.23E-02	3.47E+29	**0.00%**

Fuente: Archivo propio.

Como bien se observa, un espesor de 15 cm para la mezcla asfáltica es suficiente (en términos de consumo por fatiga) para soportar las deformaciones máximas por tracción inducidas por un semi - eje estándar y presión de contacto de 80 psi. Lo anterior, se ve reflejado en consumos (daño relativo) inferiores al 100% respecto a las deformaciones admisibles determinadas en función del tránsito de diseño.

Por lo tanto, las estructuras de pavimento de construcción recomendadas se adjuntan en la Ilustración 10-2.

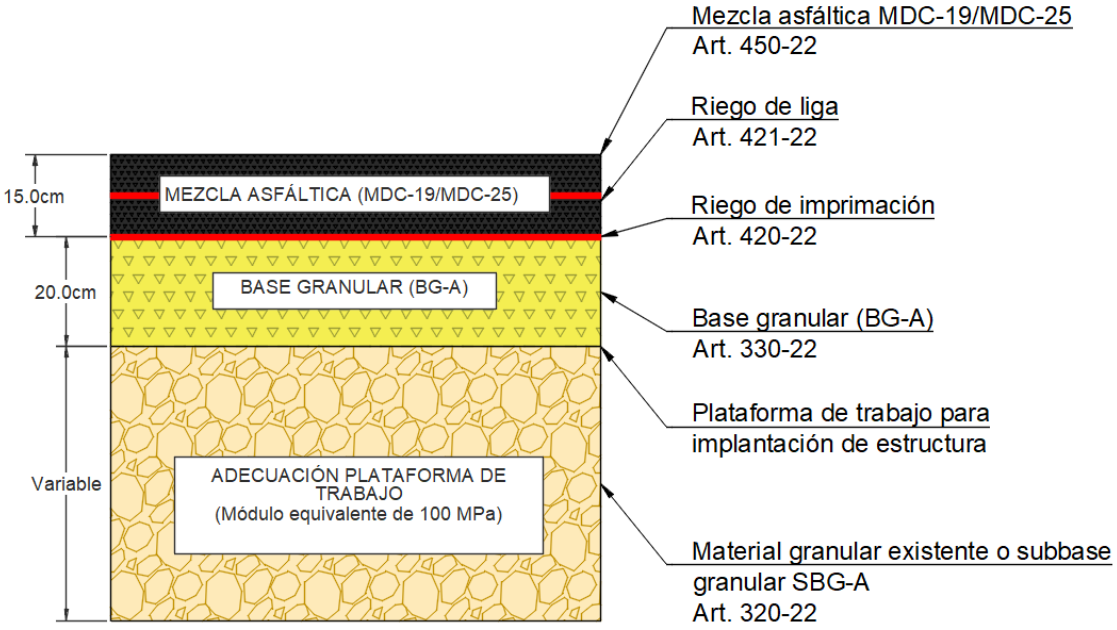


Ilustración 10-2. Estructuras de pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia.

10.3.2 Alternativa 2: Estructura de pavimento rígido (periodo de diseño: 20 años).

Para pavimento rígido se considerará la metodología AASHTO-93, en el cual se tendrá en cuenta los siguientes parámetros de diseño.

Tabla 10-3. Parámetros de diseño - Pavimento rígido.

NESE (8.2 ton)	2,879,096	Tránsito de diseño para un periodo de 20 años	Ver numeral 9
Log (NESE)	6.399		

R (%)	90	Confiabilidad del diseño	Ver numeral 2.1.4
Zr	-1.282	Desviación estándar normal	Ver numeral 2.1.4
So	0.35	Desviación normal del error estándar combinado	Ver numeral 2.1.5
pi	4.5	Nivel de serviciabilidad inicial	Ver numeral 2.1.6
pt	2.5	Índice de serviciabilidad terminal del diseño	Ver numeral 2.1.6
ΔPSI	2.0	Delta de serviciabilidad	Ver numeral 2.1.6
MR (MPa)	4.2 y 4.5	Resistencia del concreto a la flexotracción	Ver numeral 2.1.7.2
Cd	0.9	Coeficiente de drenaje establecido en la Tabla 2.4. de la Guía AASHTO-1993 para una condición de drenaje “aceptable” y más del 25% del tiempo expuesto a “lluvias”	Ver numeral 2.1.8
J	2.7	Coeficiente de transferencia de carga recomendado para pavimentos con juntas	Ver numeral 2.1.9
Ls	1.0	Pérdida de soporte	Ver numeral 2.1.10

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al módulo de reacción combinado del paquete estructural, se consideran los siguientes aspectos.

1. El módulo equivalente de la plataforma de trabajo establecido para la premisa de diseño corresponderá a 100 MPa. Teniendo en cuenta que la mayoría del corredor se desarrolla en una sección de tipo terraplén (ver Tabla 5-4).

2. Para garantizar una plataforma de apoyo homogénea y adecuada para la losa de concreto a proyectar, se considera pertinente que la conformación del terraplén sea mediante el uso de Subbase Granular Clase A (Art. 320-22). Al respecto se precisa que, si se requiere de mejoramiento de la subrasante deberán emplearse los espesores recomendados en el numeral 10.4.

Es de anotar que, para efectos de simular la condición de conformación del terraplén con subbase granular se tendrá en cuenta lo siguiente:

1. Se contempla un espesor de 200mm de Subbase Granular y módulo de 115MPa.

2. El módulo equivalente de la plataforma de trabajo se establece en 86MPa (51.3MPa/m[5]). Lo anterior, debido a que se deben considerar los 200mm de Subbase Granular que será afectada por el factor de pérdida de soporte (Ls).

3. En función de lo anterior en la siguiente ilustración se procede a determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante haciendo uso del Nomograma recomendado por la AASHTO-93. Como parámetros de entrada se considera: Módulo de la subrasante 86MPa y 200mm de Subbase Granular con módulo de 115 MPa.

[5] Valor obtenido haciendo uso de la ecuación K(MPa/m) = 2.255+52.5Log(CBR) para un CBR de 8.6%.

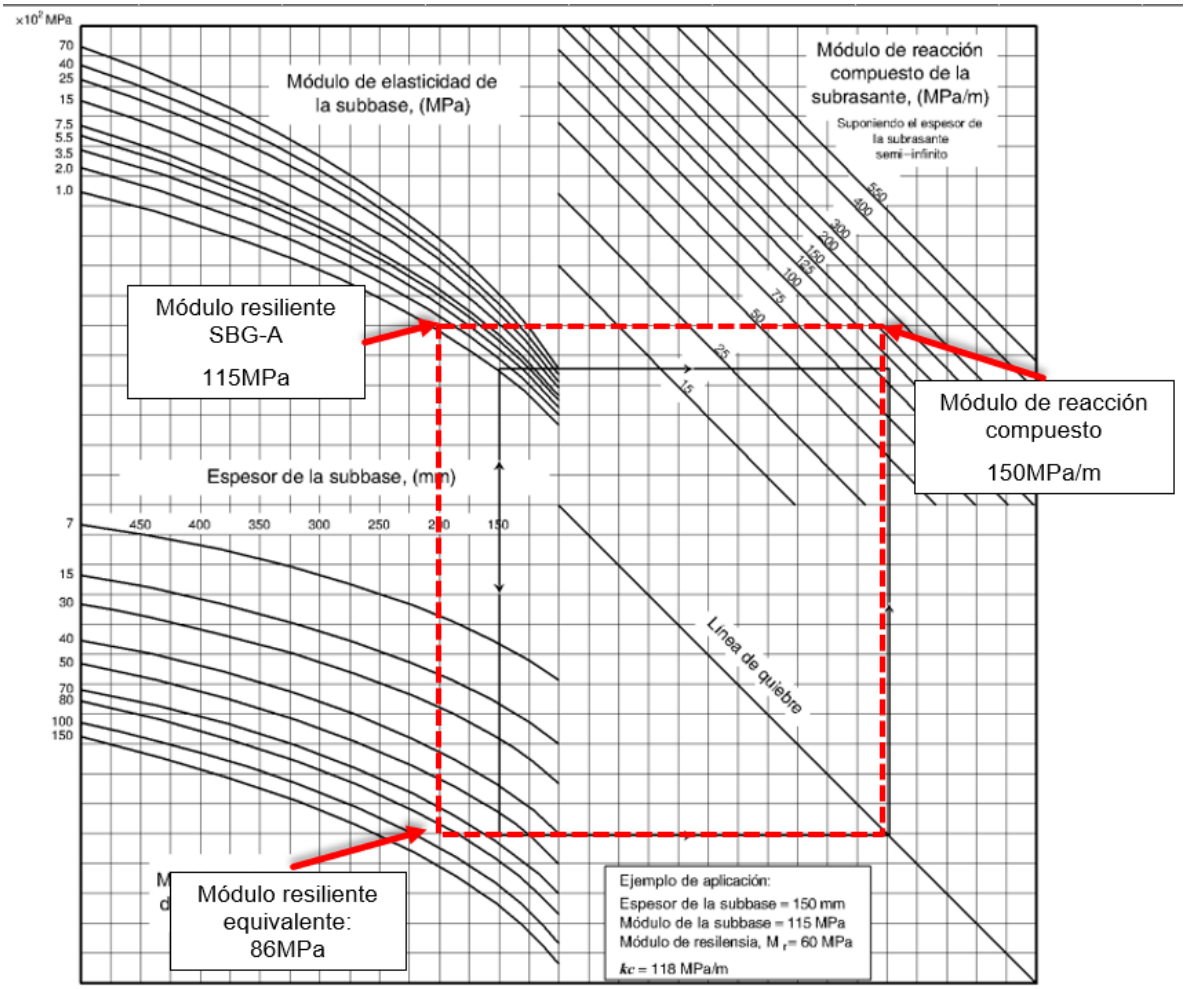


Ilustración 10-3. Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, superando una profundidad infinita.

Fuente: AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II-39.

Nótese que en función de los parámetros de entrada descritos anteriormente, se obtendría un módulo de reacción compuesto de 150MPa/m aproximadamente. De igual forma, es de anotar que no se identifican capas rígidas a menos de tres (3) metros de profundidad, por lo tanto, dicha corrección no se adelanta.

Finalmente, para la determinación del K compuesto del paquete estructural, se procede a hacer uso del siguiente nomograma, en el cual, se hará la lectura del deterioro relativo (Ur)

para los módulos de reacción de la subrasante (51.3 MPa/m) y módulo de reacción compuesto de la subrasante (150MPa/m) para un espesor de losa supuesto de 210mm.

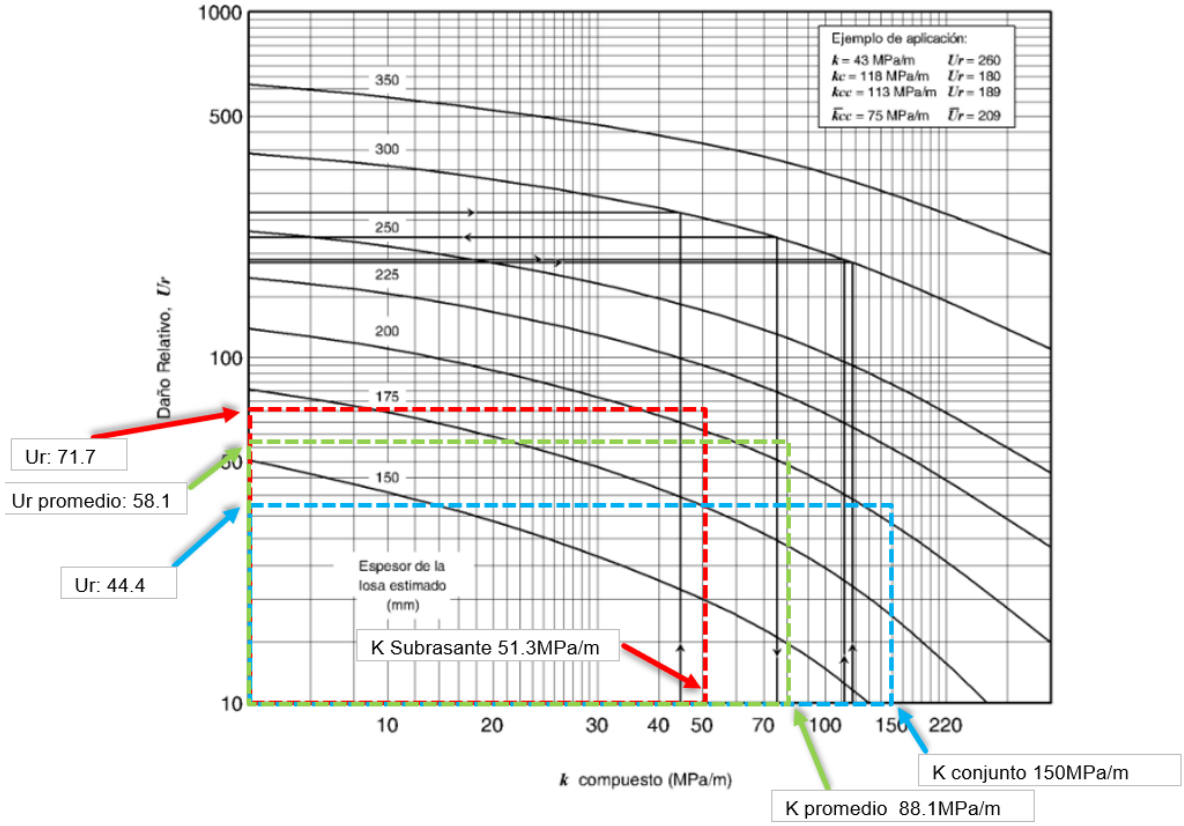


Ilustración 10-4. Nomograma para determinar el deterioro relativo, Ur.
Fuente: AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II-41.

A partir del módulo de reacción promedio (88.1MPa/m), se procede a realizar su afectación por la pérdida de soporte (Ls) y el cual será utilizado para el dimensionamiento de la estructura de pavimento rígido mediante la metodología AASHTO. Dicho procedimiento se encuentra adjunto en el nomograma de la Ilustración 10-5.

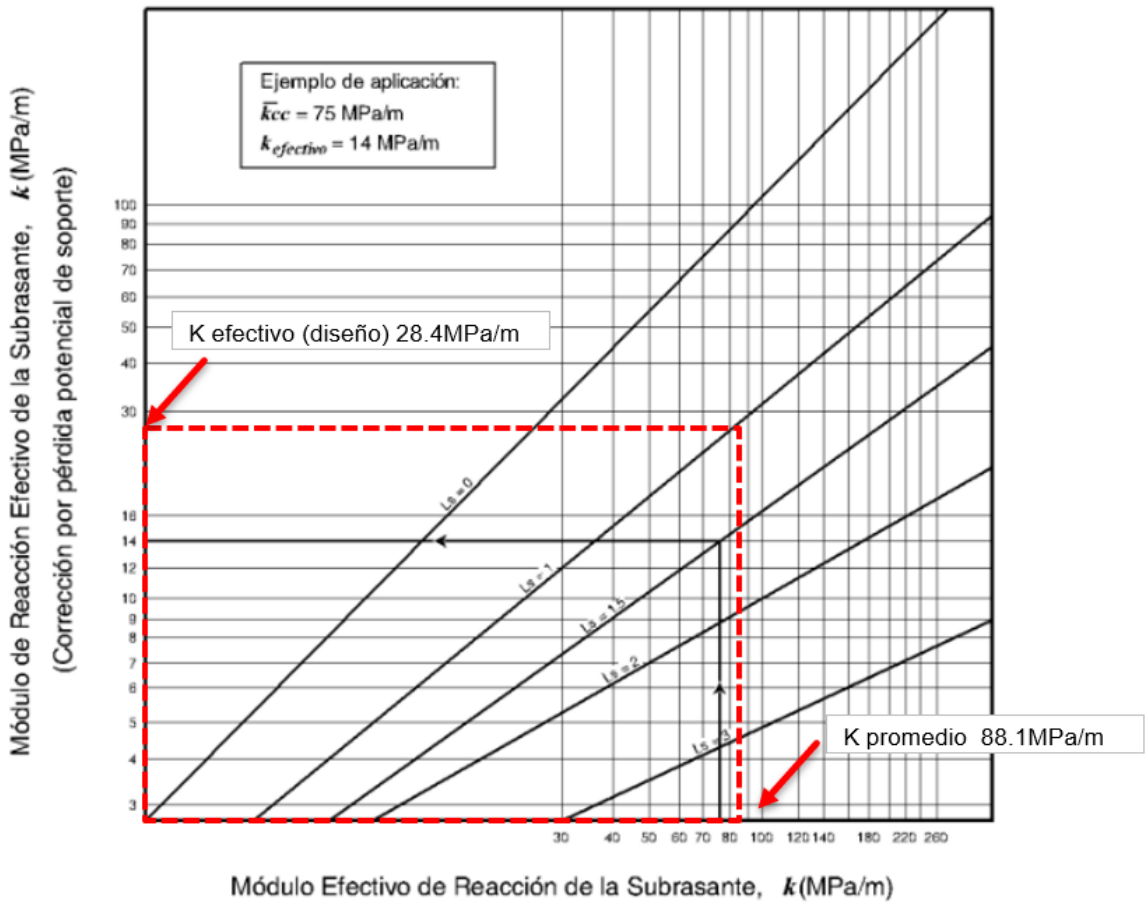


Ilustración 10-5. Módulo efectivo del paquete estructural afectado por pérdida de soporte.
Fuente: Software ASMOD.

En función de lo anterior, se evidencia que el módulo de reacción promedio Kc para un espesor de losa de Concreto de 21cm corresponderá a 88.1MPa/m. De igual forma, al afectar dicho valor con una pérdida de soporte (Ls) de 1.0 se obtendrá un valor de módulo de reacción efectivo de 28.4 MPa/m el cual a su vez será el parámetro de entrada a utilizar para el dimensionamiento final del espesor de la losa de concreto.

Ahora bien, para la determinación del espesor de la losa de concreto, se considera el módulo elástico para el Concreto MR42 y MR45 correspondiente a 23,819MPa y 25,028MPa respectivamente. En función de lo anterior y el número de ejes equivalentes

proyectados para un periodo de 20 años (ver numeral 9.3), la estructura de pavimento rígido recomendada se relaciona en la Tabla 10-4.

Tabla 10-4. Estructura de pavimento rígido.

Valores de Entrada para el Diseño Método de AASHTO.	MR4.2	MR4.5
NESE (8.2 ton)	2,879,096	2,879,096
Log (NESE)	6.459	6.459
R (%)	90	90
Zr	-1.282	-1.282
So	0.35	0.35
D (mm)	213	206
pi	4.5	4.5
pt	2.5	2.5
ΔPSI	2.0	2.0
MR (MPa)	4.2	4.5
Cd	0.9	0.9
J	2.7	2.7
Ec (MPa)	23,819.5	25,027.6
k Modulo de Reacción Combinado (MPa/m)	28.4	28.4
Espesor de Losa D* (cm)	**22**	**21**
Subbase Granular (cm)	**20**	**20**
Módulo de la plataforma de trabajo (MPa)	**86**	**86**

Fuente: Elaboración propia.

Se hace importante mencionar que el los espesores de 22cm (obtenido con un MR42) y 21cm (Obtenido con un MR45) satisface los requerimientos de diseño establecidos en la Metodología AASHTO-93.

De igual forma, es de anotar que, a partir de los espesores definidos para la losa de concreto, se procede a hacer la validación del módulo de reacción mínimo requerido para dichos espesores, obteniendo como resultado lo adjunto en la Tabla 10-5.

Tabla 10-5. Estructura de pavimento rígido. Determinación módulo de reacción mínimo.

Valores de Entrada para el Diseño Método de AASHTO.	MR4.2	MR4.5
NESE (8.2 ton)	2,879,096	2,879,096
Log (NESE)	6.459	6.459
R (%)	90	90
Zr	-1.282	-1.282
So	0.35	0.35
D (mm)	220	210
pi	4.5	4.5
pt	2.5	2.5
ΔPSI	2.0	2.0
MR (MPa)	4.2	4.5
Cd	0.9	0.9
J	2.7	2.70
Ec (MPa)	23,819.5	25,027.6
k Modulo de Reacción Combinado (MPa/m)	**14.3**	**18.6**
Espesor de Losa D* (cm)	**22**	**21**
Subbase Granular (cm)	**20**	**20**

Fuente: Elaboración propia.

Nótese que, para el caso de un espesor de losa de 21cm (Mr45) y 20cm de Subbase Granular, se requiere como mínimo que la plataforma de trabajo presente un módulo de reacción combinado de 18.6MPa/m contemplando una pérdida de soporte Ls de 1.0. Es decir, un módulo equivalente de la plataforma de trabajo de mínimo 45MPa cuya validación se realiza con el software ASMOD y soporte adjunto en la Ilustración 10-6.

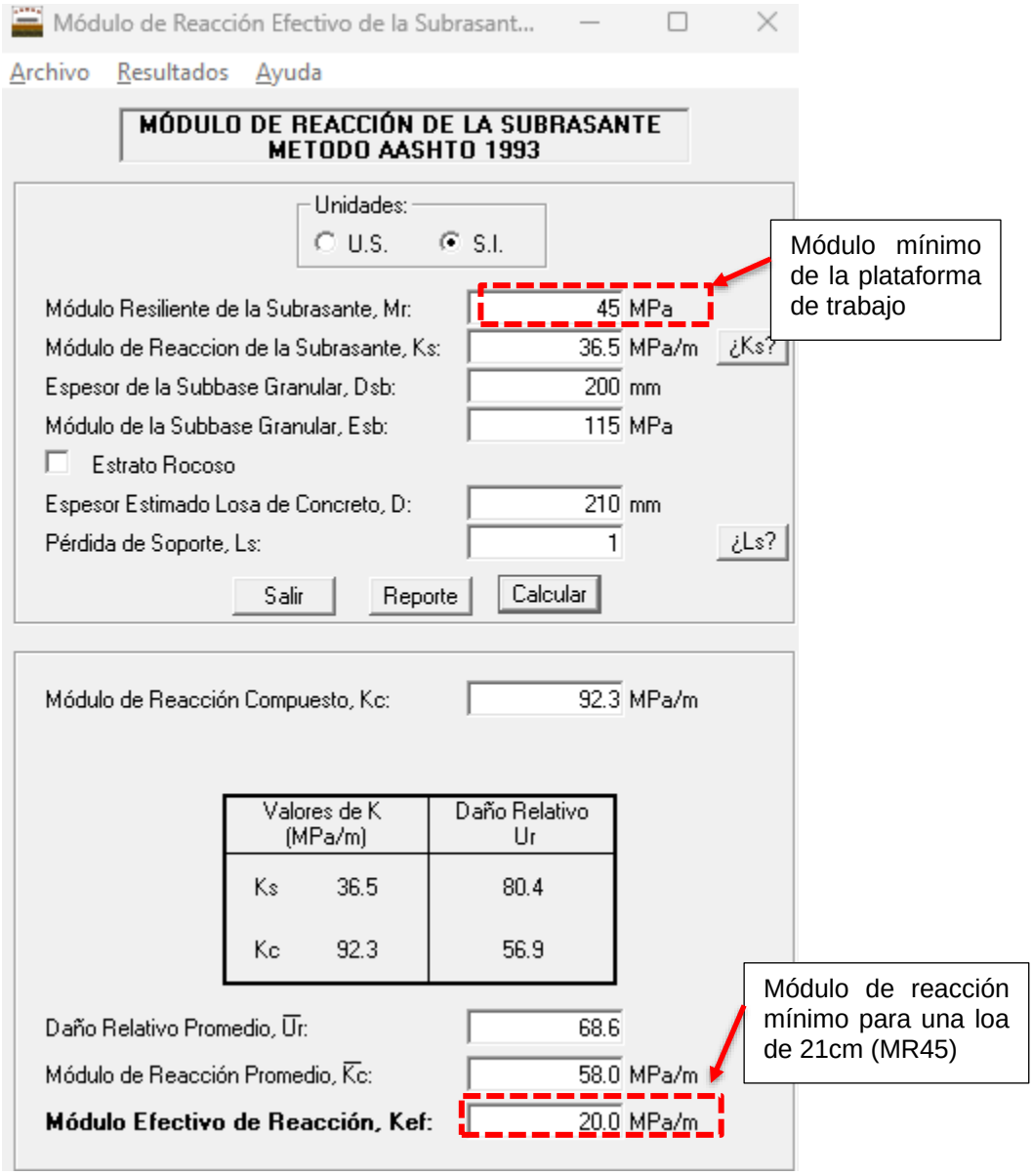


Ilustración 10-6. Estimación módulo equivalente mínimo para suplir un módulo efectivo igual o mayor a 18.6MPa/m.

10.3.2.1 Cálculo de esfuerzos y deflexiones en pavimentos rígidos

De acuerdo con las metodologías vigentes de diseño y validación, se efectuará un análisis mecanicista de las respuestas críticas (esfuerzos, deformaciones, deflexiones). Para la obtención de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones, se empleará el programa Unalosa. Con base en lo anterior en la Tabla 10-6 se presenta los parámetros de entrada para la determinación de los esfuerzos en el borde, esquina e interior de la losa de concreto hidráulico más crítica a analizar con dimensiones de 400cm de largo, 365cm de ancho, 22cm (módulo de rotura 4.2MPa) y 21cm (módulo de rotura 4.5MPa) y a su vez un módulo de reacción de la capa de apoyo de 28.4 MPa/m (afectado por perdida de soporte de Ls: 1.0).

Tabla 10-6. Parámetros de entrada para validación de esfuerzos – Pavimento rígido.

ÍTEM	Valor	Unidades
Peso eje	8,200	kg
FSC	1.10	
FSR	1.00	
Peso ajustado	9,020	kg
No. Ruedas	4.00	
Peso por rueda	2,706.00	kg
Presión de inflado	80.00	PSI
Área de contacto	5.62	Kg/cm^2
	481.10	cm^2
Radio de carga	12.37	cm
Largo de la huella	30.34	cm
Módulo de rotura del concreto	4.2 / 4.50	MPa
Módulo elástico	23,819 / 25,028	MPa
Densidad del concreto	2,400	kg/cm^3
Módulo reacción	28.4	MPa/m
Espesor losa	21 / 22	cm
Largo losa	400.0	cm
Ancho Losa	365.0	cm

Nota: Dadas las características operacionales del corredor, se considera un factor de seguridad de carga de 1.1 y factor de seguridad de repeticiones de 1.

El cálculo de los esfuerzos de tensión debidos a cambios uniformes de temperatura (fricción), la determinación de los esfuerzos de tensión debidos a cambios no uniformes de temperatura (Alabeo) y el esfuerzo debido a la carga del tránsito para el borde, esquina e interior de la losa se presentan en la Tabla 10-7.

Tabla 10-7. Cálculo de esfuerzos generados por fricción, alabeo y tránsito.

1. ESFUERZOS DE TENSIÓN DEBIDOS A CAMBIOS UNIFORMES DE TEMPERATURA – FRICCIÓN	**Alternativa MR42**	**Alternativa MR45**	**Unidades**
Esfuerzo de tensión generado por retracción de concreto (Largo)	10.63	10.63	lb/pulg^2
Esfuerzo de tensión generado por retracción de concreto (Ancho)	9.70	9.70	lb/pulg^2
2. ESFUERZOS DE TENSIÓN DEBIDOS A CAMBIOS NO UNIFORMES DE TEMPERATURA – ALABEO	**Alternativa MR42**	**Alternativa MR45**	**Unidades**
Radio de rigidez relativa	36.7	35.9	pulg^2
Lx/l	4.29	4.38	
Ly/l	3.91	4.00	
Cx	0.62	0.62	
Cy	0.51	0.54	
2.1 ESFUERZOS EN EL BORDE DE LA LOSA DE CONCRETO	**Alternativa MR42**	**Alternativa MR45**	**Unidades**
Esfuerzos en el borde de la losa de concreto dirección x	233.7	234.7	Lb/pulg^2
Esfuerzos en el borde de la losa de concreto dirección y	193.9	203.9	Lb/pulg^2
2.2 ESFUERZOS EN EL INTERIOR DE LA LOSA DE CONCRETO	**Alternativa MR42**	**Alternativa MR45**	**Unidades**
Esfuerzos en el interior de la losa de concreto dirección x	268.82	271.35	Lb/pulg^2
Esfuerzos en el interior de la losa de concreto dirección y	234.24	244.62	Lb/pulg^2
2.3 ESFUERZOS EN LA ESQUINA DE LA LOSA DE CONCRETO	**Alternativa MR42**	**Alternativa MR45**	**Unidades**
Esfuerzos en la esquina de la losa de concreto	103.18	104.66	Lb/pulg^2
3. ESFUERZOS DEBIDOS A LAS CARGAS DEL TRANSITO	**Alternativa MR42**	**Alternativa MR45**	**Unidades**
3.1 ESFUERZOS DE TENSIÓN EN LA ESQUINA DE LA LOSA (Westergaard (1924))	129.859	141.492	Lb/pulg^2
b	4.48	4.42	
3.2 ESFUERZOS DE TENSIÓN EN EL INTERIOR DE LA LOSA	98.92	108.23	Lb/pulg^2
3.3 ESFUERZO DE TENSIÓN EN EL BORDE DE LA LOSA (Circulo)	197.7	214.8	Lb/pulg^2

La verificación de esfuerzos de alabeo, y esfuerzos de borde con el software Unalosa, ratifica las dimensiones y espesores propuestos para los tramos a intervenir, donde los esfuerzos actuantes por el fenómeno de alabeo y esfuerzo de borde son menores al esfuerzo a la flexo-tracción del concreto (relación porcentual σc / sc menor al 100%).

Tabla 10-8. Validación de porcentajes de consumo.

VALIDACIÓN	Alternativa MR42 (22cm)		Alternativa MR45 (21cm)	
PUNTO	VALOR DE SERVICIO (lb/pulg^2)	% CONSUMO	VALOR DE SERVICIO (lb/pulg^2)	% CONSUMO
Sumatoria esfuerzos en la Esquina de la losa	343.23	56%	353.52	54%
Sumatorias de esfuerzos en el Interior de la losa	378.37	62%	390.21	60%
Sumatoria de esfuerzos en el Borde de la losa	441.99	73%	460.07	70%
Valor admisible	609.1596		652.671	

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior, se evidencia que los espesores obtenidos para las resistencias de concreto analizadas (MR42 y MR45) están en la capacidad de soportar los esfuerzos debidos a la carga vehicular, obteniendo inclusive resultados de consumo similares. Dicho lo anterior y con el objeto de reducir los espesores constructivos, se recomienda la implementación de una losa de 21cm y cuyo concreto deberá garantizar como mínimo una resistencia a los 28 días a la flexotracción de 4.5MPa teniendo en cuenta el factor y criterio económico.

Tabla 10-9. Costo por m2 según tipo de concreto.

Tipo de concreto	Ítem	Descripción	Costo Directo	Costo Directo (m3)	Espesor (m)	Costo Directo (m2)
MR42	500.1.2	PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO - NT2	$ 566,403.24	$ 566,403.24	0.22	$ 124,609
MR45	500.1.1	PAVIMENTO DE CONCRETO HIDRÁULICO - NT3	$ 584,807.61	$ 584,807.61	0.21	$ 122,810

Fuente: Elaboración propia a partir de APU's Cauca Sur.

De igual forma, se procede a validar considerando la fatiga del concreto y la cual se mide con vigas de concreto simplemente apoyadas, sometidas a ensayo de carga repetida en

los tercios de la luz libre, el tiempo de iniciación de la fisura depende en gran medida de la magnitud del esfuerzo, cuando el esfuerzo aplicado es inferior al módulo de rotura del concreto no se produce la falla por fatiga. Se ha definido que esto ocurre con una relación de esfuerzo de 0.5, que es el cociente del esfuerzo aplicado y el módulo de rotura del concreto[6].

Por lo tanto, el análisis por fatiga de las losas de concreto realiza utilizando la ecuación recomendada por la Portland Cement Association - PCA.

$$Log\, N_f = 11.737 - 12.077\left(\frac{\sigma}{S_c}\right) \quad para \quad \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 \qquad (1)$$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325}\right)^{3.268} \qquad para \quad 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55 \qquad (2)$$

$$N_f = Ilimitado \qquad para \quad \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.45 \qquad (3)$$

Donde:

Nf: Número de repeticiones de carga permitidas

σ: Es el esfuerzo de tensión aplicado

Sc: Es el módulo de rotura del concreto

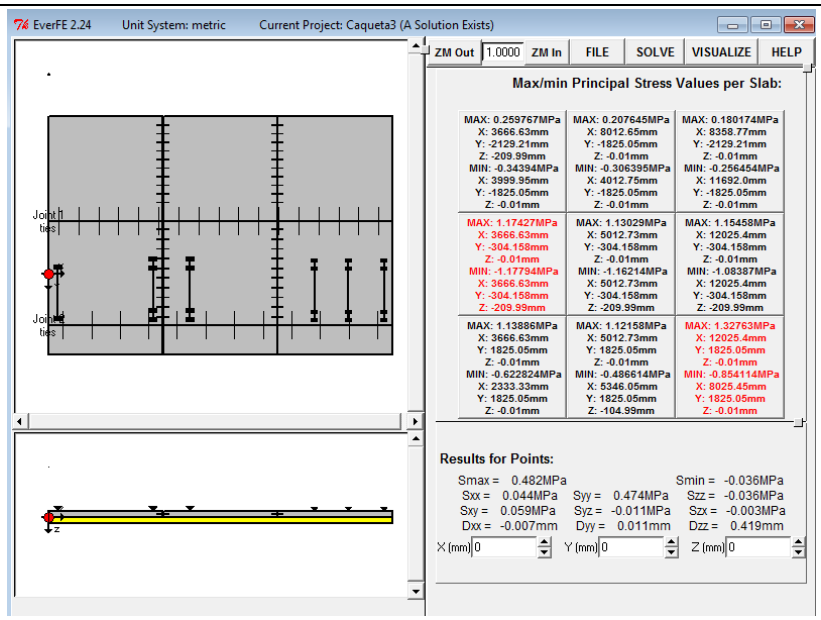
$\frac{\sigma}{S_c}$: Relación de esfuerzo

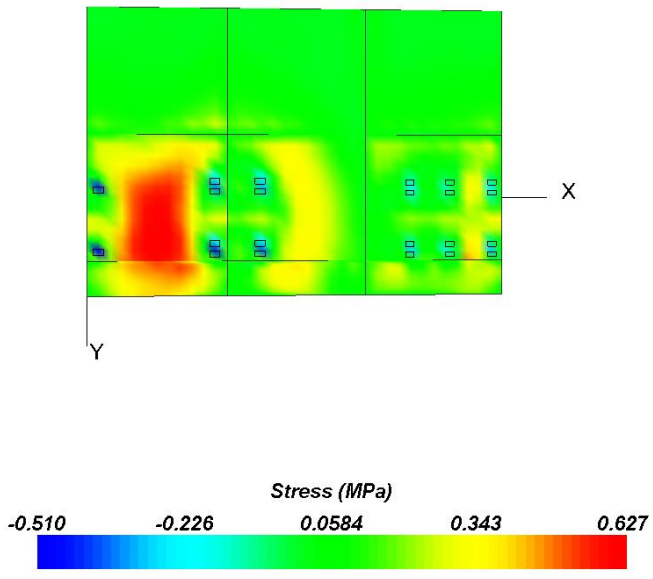
Para la determinación de los esfuerzos de tensión, se hace uso de la herramienta computacional EVERFE y simulando el paso del vehículo crítico (3S3 tractomula) cuyo soporte se adjunta en la Tabla 10-10 y Tabla 10-11 . Se consideran dos escenarios de análisis: El primero con dispositivos de amarre entre la losa y la berma; y el Segundo escenario no contempla el amarre de los elementos mencionados.

[6] Huang, Y.H., Pavement analysis and design, Pearson/Prentice Hall, 2004.

Tabla 10-10. Validación esfuerzos máximos – Con dispositivos de amarre a berma.

Sc Mpa (Módulo rotura)	4.50 MPa Losas
Espesor losa (cm)	21.0 (berma 15cm de resistencia concreto 3000psi)
Esfuerzo máximo (MPa) (σ)	1.32763
Relación (σ/sc)	0.295
Criterio de evaluación	3
Criterio 1 (Nf)	149,257,481
Criterio 2 (Nf)	Ilimitado
Criterio 3 (Nf)	Ilimitado
Repeticiones admisibles (Nf)	Ilimitado
Ejes de diseño	2,800,000
Condición	**Cumple**

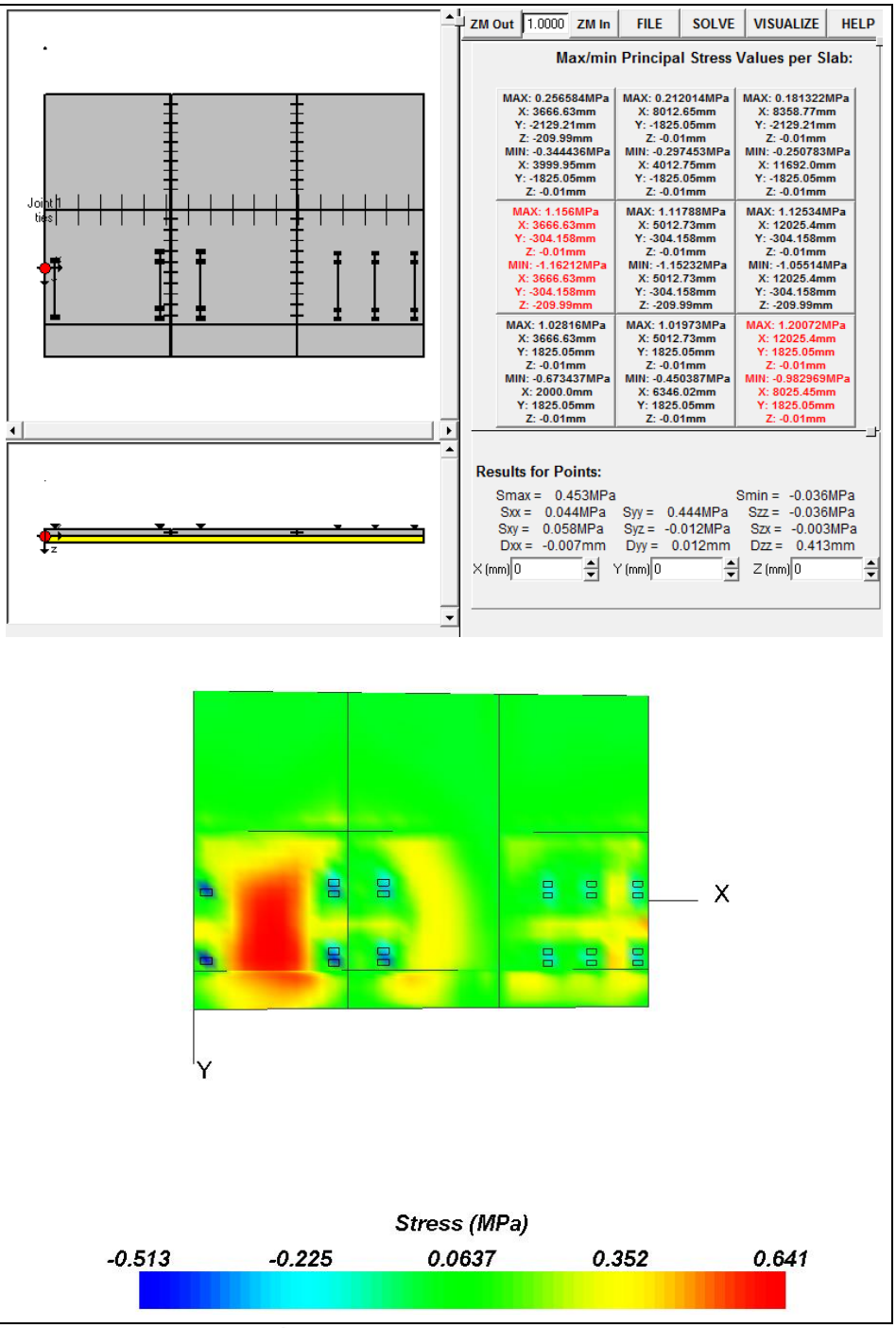




Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10-11. Validación esfuerzos máximos – Sin dispositivos de amarre a berma.

Sc MPa (Módulo rotura)	4.50 MPa Losas
Espesor losa (cm)	21.0 (berma 15cm de resistencia concreto 3000psi)
Esfuerzo máximo (MPa) (σ)	1.20072
Relación (σ/sc)	0.267
Criterio de evaluación	3
Criterio 1 (Nf)	326,989,906
Criterio 2 (Nf)	Ilimitado
Criterio 3 (Nf)	Ilimitado
Repeticiones admisibles (Nf)	Ilimitado
Ejes de diseño	2,800,000
Condición	**Cumple**



Fuente: Elaboración propia.

Como bien se observa, la concentración de esfuerzos crítica a presentar en las losas corresponde al borde de las mismas, no obstante lo anterior, y dados los dispositivos de transferencia de carga dispuestos entre losa los esfuerzos máximos que se producen son inferiores a los 4.5MPa (resistencia del concreto recomendado) y por ende se concluye que el espesor de 21cm es apropiado para soportar el paso de los vehículos proyectados y a su vez no se requieren dispositivos de amarre entre las losas y las bermas.

En consecuencia, los espesores para la implantación de la estructura de pavimento rígido corresponderán a los adjuntos en la Ilustración 10-7.

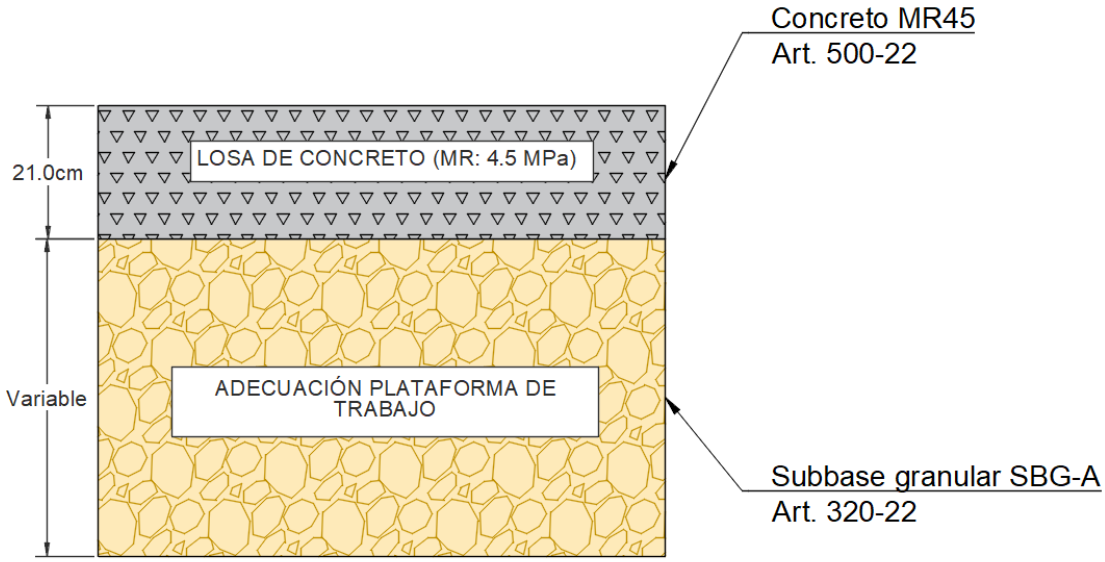


Ilustración 10-7. Espesores constructivos recomendados para la estructura de pavimento rígido. Secciones en terraplenes mayores a 0.5metros.
Fuente: Elaboración propia.

10.3.2.2 Diseño de juntas, modulación de losas y detalles constructivos

En la construcción del pavimento, la junta longitudinal debe ser marcada con una ranura que separe los carriles y proporcione alojamiento para el sellado, unida por barras de anclaje corrugadas, que se encarguen de asegurar que no haya desplazamiento relativo de las losas. Las características de las barras de anclaje se establecerán de acuerdo con los dimensionamientos de la losa y estas deben instarse a menos de 40cm de la junta trasversal para evitar que interfieran con el movimiento propio de las juntas.

Las juntas transversales o juntas de contracción son juntas de alabeo (Tipo B), es decir, controlan las grietas causadas por la retracción de fraguado del hormigón y por las acciones climáticas (temperatura y humedad) cumpliendo una función mecánica esencial constituyendo un medio de transferencia de la carga, de igual manera se debe tener el espesor de la losa con la cual se tienen las siguientes recomendaciones en la literatura técnica que se puede considerar en este proyecto:

a) Criterio 1: Losas cuadradas (Relación e 1.0)
b) Criterio 2: El espaciamiento entre juntas sea veintiún veces el espesor de la losa.
c) Criterio 3: Que la máxima relación de esbeltez de la losa sea de 1.3 veces (se enfatiza que es deseable cumplir con una relación máxima de 1.25).
d) Criterio 4: La longitud de la losa debe ser máximo 5 veces la relación de la rigidez de la losa y la rigidez del suelo de soporte.

De acuerdo con los criterios de diseño anteriormente expuestos, en la Tabla 10-12 se presenta la longitud de losa obtenida en función de un ancho de losa variable entre 2m y 4m acorde a los distintos escenarios geométricos que se presenten.

Tabla 10-12. Diseño juntas transversales.

Ancho (m)	Criterio 1		Criterio 2		Criterio 3		Criterio 4		
	Largo (m)	Esbeltez	Largo (m)	Esbeltez	Largo (m)	Esbeltez	l (pulg)	Largo (m)	Esbeltez
2.00	2.00	1.00	4.41	2.21	2.50	1.25	50.67	6.44	3.22
2.50	2.50	1.00	4.41	1.76	3.13	1.25	50.67	6.44	2.57
3.00	3.00	1.00	4.41	1.47	3.75	1.25	50.67	6.44	2.15
3.25	3.25	1.00	4.41	1.36	4.06	1.25	50.67	6.44	1.98
3.35	3.35	1.00	4.41	1.32	4.19	1.25	50.67	6.44	1.92
3.45	3.45	1.00	4.41	1.28	4.31	1.25	50.67	6.44	1.87
3.55	3.55	1.00	4.41	1.24	4.44	1.25	50.67	6.44	1.81
3.65	3.65	1.00	4.41	1.21	4.56	1.25	50.67	6.44	1.76
3.80	3.80	1.00	4.41	1.16	4.75	1.25	50.67	6.44	1.69
3.90	3.90	1.00	4.41	1.13	4.88	1.25	50.67	6.44	1.65
4.00	4.00	1.00	4.41	1.10	5.00	1.25	50.67	6.44	1.61

Fuente: Elaboración propia.

En función de lo anterior y con el objeto de realizar la modulación de losas adecuada, se recomienda que las losas sean cuadradas (Largo = Ancho) o presenten una relación de esbeltez no mayor a 1.25 y un largo no mayor a 420cm.

De igual forma, para losas irregulares o con relación de esbeltez mayor a 1.25, se debe considerar el refuerzo en ambos sentidos en acero corrugado, con barras diámetro 1/2", separadas cada 0.20 m y colocadas en el tercio inferior de la losa, tal y como se evidencia en la Ilustración 10-8.

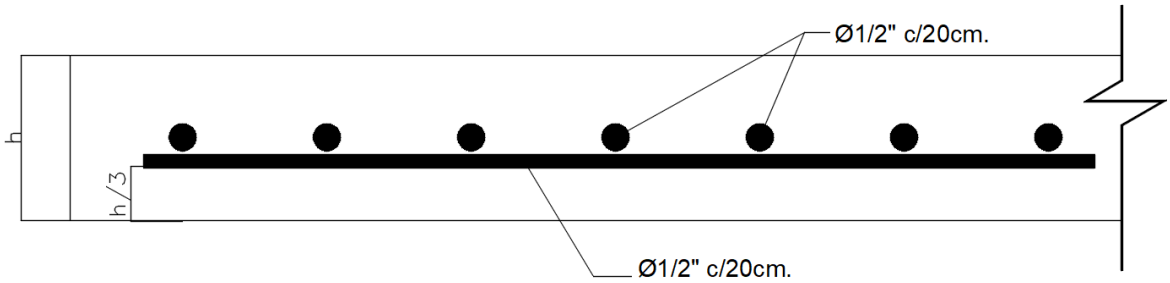


Ilustración 10-8. Distribución refuerzo para losas irregulares o especiales.

10.3.2.3 Diseño barras de transferencia de carga

Debido al tráfico de la vía en estudio es necesario implementar una transferencia de carga mecánica mediante la disposición de dovelas (barras de acero lisas insertadas en las juntas) que buscan transferir cargas sin restringir el movimiento horizontal.

Considerando las recomendaciones dadas por el INVIAS[7], para una losa con espesor de 21cm, es necesaria la instalación de pasadores con diámetro de 1 1/8" con longitud de 400mm y separación entre centros de 300 mm tal como se presenta en la Tabla 10-13.

Tabla 10-13 Recomendaciones para la selección de pasadores de carga.

Espesor del pavimento (mm)	Diámetro del pasador		Longitud	Separación entre centros
	mm	pulgada	mm	mm
0 – 100	13	½	250	300
110 – 130	16	5/8	300	300

[7] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Espesor del pavimento (mm)	Diámetro del pasador		Longitud	Separación entre centros
	mm	pulgada	mm	mm
140 – 150	19	¾	350	300
160 – 180	22	7/8	350	300
190 – 200	25	1	350	300
210 – 230	29	1 1/8	400	300
240 – 250	32	1 ¼	450	300
260 – 280	35	1 3/8	450	300
290 – 300	38	1 ½	500	300

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

De igual forma para garantizar el amarre de las losas y evitar los movimientos laterales, el INVIAS[8] recomienda la distribución adjunta en la Tabla 10-14.

Tabla 10-14. Recomendaciones sobre varillas de anclaje grado 60 en las juntas longitudinales de pavimentos rígidos.

Espesor de losa (mm)	Barras de ø12.7mm (1/2")			
	Longitud (m)	Separación entre barras según el ancho del carril (m)		
		3.05 (m)	3.35 (m)	3.65 (m)
150	0.85	1.20	1.20	1.20
175		1.20	1.20	1.20
200		**1.20**	**1.20**	**1.20**
225		**1.20**	**1.20**	**1.20**
250		1.20	1.15	1.10

No se debe colocar varillas de anclaje a menos de 38 cm de la junta transversal.
Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

Por lo anterior, se recomienda para una losa de 21 cm la instalación de barras de acero corrugado de diámetro de ½" con una longitud de 850mm, separadas entre centros cada 1.20m. Las barras no se deben colocar a menos de 38 cm de la junta transversal. No

[8] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

obstante, lo anterior, se considera pertinente que la separación de dichas barras no sea mayor a 0.70m.

10.3.2.4 Sellado de juntas

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

- Corte inicial de 1/3 del espesor de la losa, medido desde la superficie, con un ancho máximo de 3 mm. Corte de ensanche de 3 mm de ancho máximo y una profundidad de 30 mm medido desde la superficie de la losa.
- El ancho total de la junta transversal debe tener 6 mm (±1.5 mm) de ancho, incluido el corte inicial y el corte de ensanche.

Se deben ejecutar los cortes de las juntas transversales y el sello de las juntas de acuerdo con el detalle de la Ilustración 10-9.

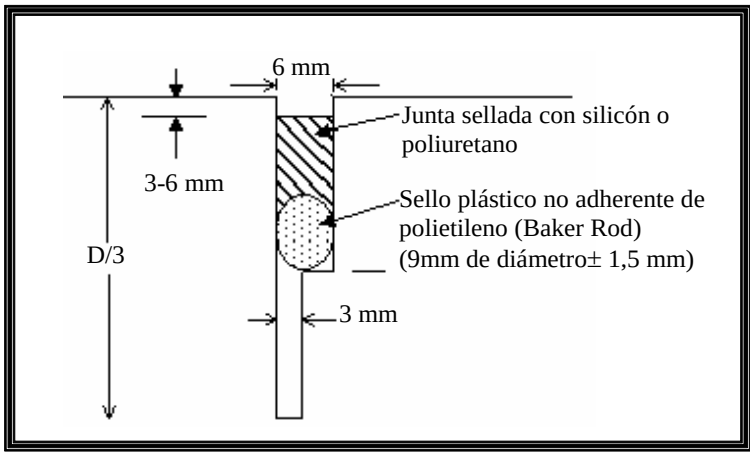


Ilustración 10-9. Detalle de construcción de las juntas.

Se realizará la colocación del sello plástico (cordón de respaldo) para mantener el factor de forma apropiado para las masillas de sello aplicadas. Para la instalación del material de sello con silicón o poliuretano se debe tener especial cuidado en la adecuada limpieza de los bordes de la junta para evitar el desprendimiento prematuro, en el tiempo, del sello. En el momento de colocación del sello, la junta debe estar seca, limpia, libre de partículas. También para evitar el desprendimiento prematuro, el material de sello debe quedar de 3 a 6 mm por debajo de la rasante de las calzadas.

Para el sellado de junta debe cumplirse lo siguiente:

- La tirilla de respaldo debe tener un diámetro de 9 mm ±1,5 mm.

- La relación ancho/profundidad del sellador de silicón deberá ser como mínimo 1:1 y máximo 2:1.

- La ranura inicial de 3 mm para debilitar la sección deberá realizarse en el momento oportuno para evitar el agrietamiento de la losa, la pérdida de agregados en la junta, o el desportillamiento. El corte adicional para formar el depósito de la junta deberá efectuarse cuando menos 72 horas después del vaciado.

- La superficie del sello debe quedar entre 3.0 y 6.0 mm por debajo de la superficie de la losa.

- La cavidad de la junta deberá estar limpia y libre de cualquier material, antes de la colocación del sello. A este respecto es importante anotar que dicha cavidad debe protegerse para que no ingrese polvo y partículas incompresibles, antes de colocar el sello, porque al paso del tránsito se produce desportillamiento de los bordes de las juntas, como efectivamente ha venido ocurriendo en las losas nuevas.

10.3.2.5 Juntas de expansión

Cuando el pavimento rígido empalme con pavimento flexible se construirá una junta en la cual se aumente el espesor de la losa con la finalidad de absorber los esfuerzos de borde ocasionados por el tráfico, ésta se conoce como junta de expansión y se presenta de forma esquemática en la Ilustración 10-10.

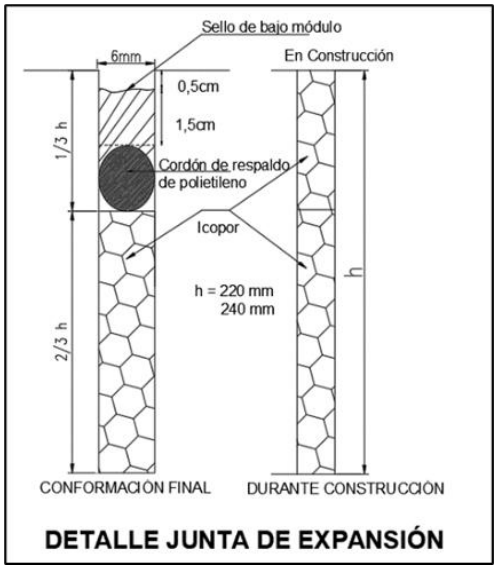
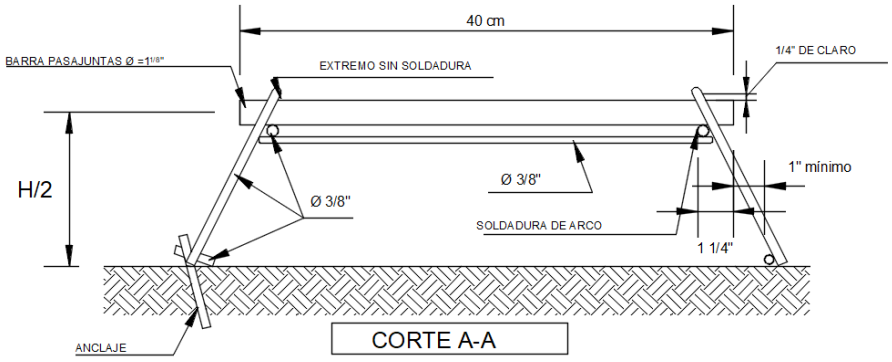


Ilustración 10-10. Esquema de junta de expansión – Sin pasador.

10.3.2.6 Armado de las barras de transferencia.

En la Ilustración 10-11, se indican los esquemas de armado para las barras de transferencia de carga o pasajuntas.



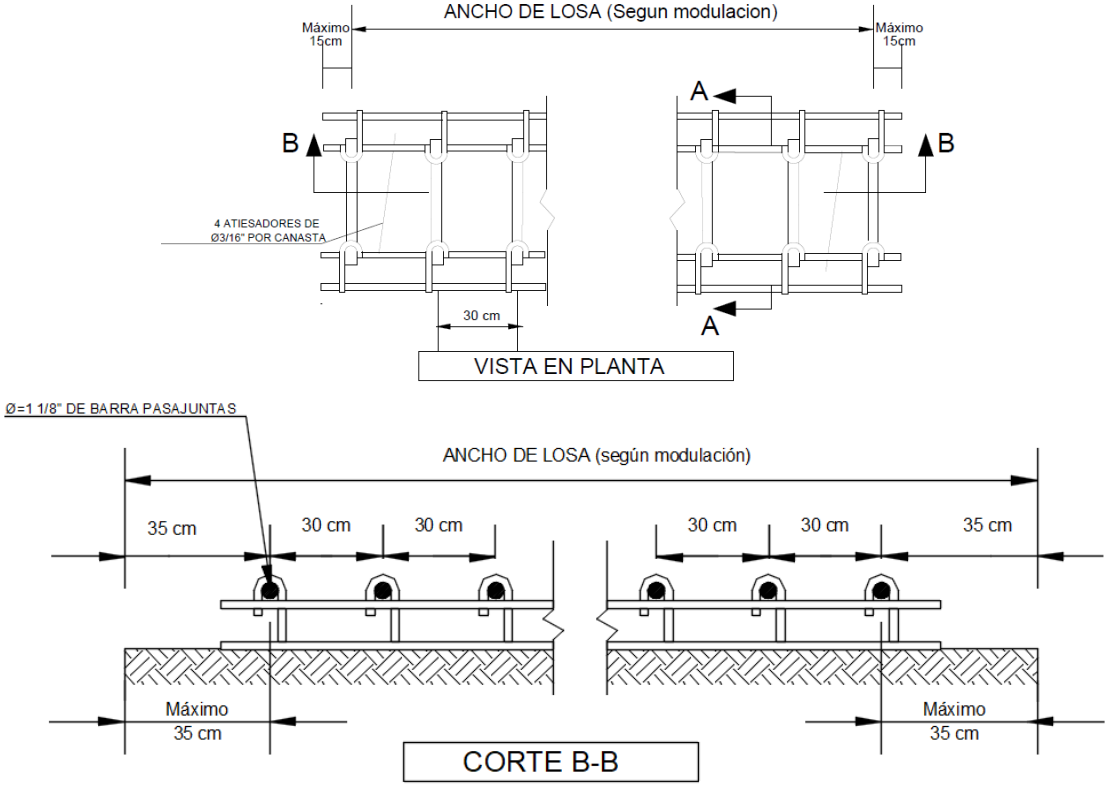
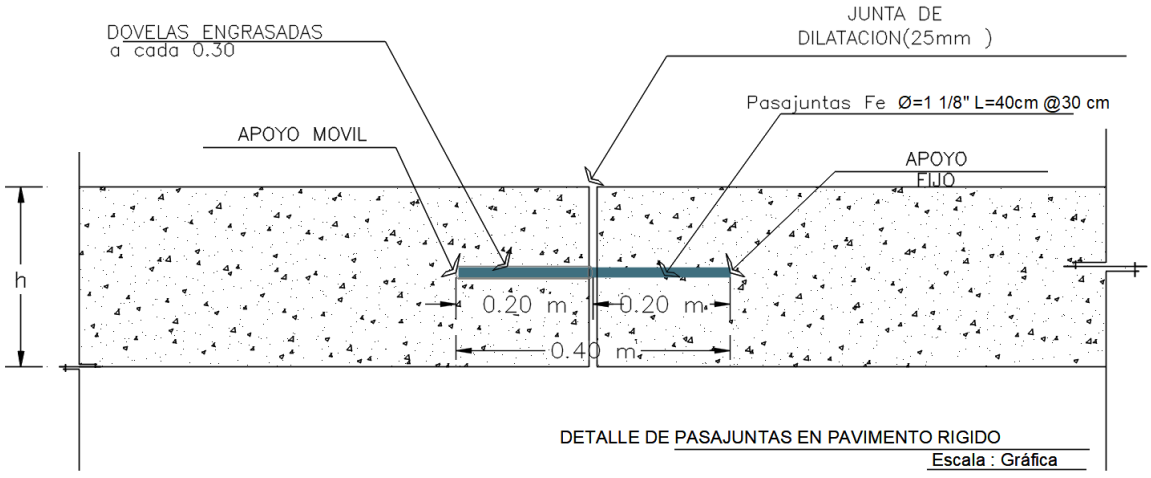


Ilustración 10-11. Esquemas de Barras de transferencia de Carga – Pasajuntas.



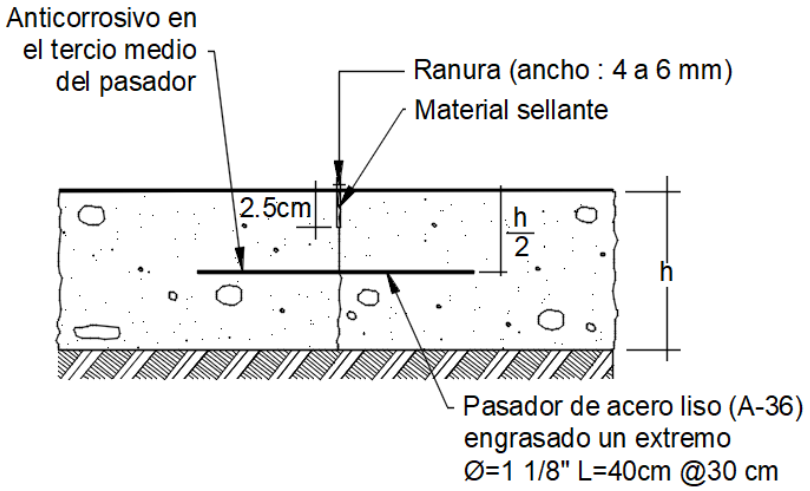


Ilustración 10-12. Esquema de junta transversal de transferencia.

10.4 MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE PARA SECCIONES EN CORTE

Teniendo en cuenta que, aproximadamente el 18.4% del corredor se desarrolla en zonas de corte (ver Tabla 5-4. Agrupación cambios de rasante a lo largo del corredor.), se requeriría la implantación de mejoramientos de la subrasante con adición de material (Art. 230-22) que permita a su vez proporcionar una plataforma de trabajo estable para la implantación de la estructura de pavimento.

Para lo cual, se toma como parámetro de entrada los CBR's característicos de la subrasante identificado para los distintos sectores establecidos en el numeral 6.3 DEFINICIÓN DEL CBR CARACTERÍSTICO DE LA SUBRASANTE y adjuntos a continuación:

- Entre las abscisas K13+250 a K16+250 el CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.65%.

- Entre las abscisas K16+250 a K20+550 el CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.34%.

- Entre las abscisas K20+550 a K22+350 CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.50%.

De igual forma, es de anotar que, para el caso de la estructura de pavimento rígido se establece que módulo equivalente mínimo a alcanzar en las adecuaciones de la plataforma de trabajo debe corresponder a 45MPa y la estructura de pavimento flexible garantizar un Índice estructural mayor a 1.0.

Este análisis se realiza con el fin de encontrar el espesor mínimo requerido a nivel de granulares que se requiere con el fin de alcanzar un módulo combinado igual al módulo de dicha capa, en otras palabras, se ha determinado el espesor mínimo del material granular con el fin de denominarse subrasante (Superficie superior de todos los cortes y rellenos, a partir de este nivel se coloca la estructura de pavimento).

Para dicho análisis se emplea la metodología de Ivanov, la cual se resume a continuación.

$$E_{eq} = \frac{E_{sbr}}{1 - \frac{2}{\pi}\left(1 - \frac{1}{n^{3.5}}\right) tan^{-1}\left(n\frac{e_{mej}}{2a}\right)} \qquad n = \sqrt[2.5]{E_{mej} / E_{sbr}}$$

Ecuación 28

Donde:

E_{eq} = Módulo elástico equivalente del sistema, kg/cm²
E_{sbr} = Módulo elástico de la subrasante, kg/cm²
e_{mej} = Espesor de la capa de mejoramiento, cm
a = Radio del área de carga, 15.05cm
n = Parámetro adimensional determinado con la expresión

Es de anotar que, el valor máximo que puede alcanzar el módulo del material para la adecuación de la plataforma de trabajo (Mejoramiento Art. 230-22 o conformación de terraplén Art. 220-22) se limita a 77MPa considerando un CBR mínimo de 10 % (S. Seleccionado o Mejoramiento de la subrasante o Conformación de terraplén) a partir de la siguiente ecuación:

$$E = 2555 CBR^{0.64}\ (psi)$$

Ecuación 29

Donde:

E= Módulo del granular, (psi)
CBR = Capacidad de soporte del material, (%)

De igual forma, para la determinación del módulo de los suelos cohesivos se hará uso de la siguiente ecuación:

$$E: 10*CBR$$

Ecuación 30

Donde:

E= Módulo de la subrasante, (MPa)

$CBR =$ Capacidad de soporte del material, (%)

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 10-15 se presenta, a modo de ejemplo, el cálculo del módulo equivalente considerando un espesor de mejoramiento de 40cm y un CBR de la subrasante entre 1.34% y 1.65% (para la obtención del módulo de materiales finos se emplea la ecuación E(MPa)=100xCBR).

Tabla 10-15. Cálculo del módulo combinado de la subrasante y granular existente. Metodología de Ivanov.

Sector	CBR de subrasante	Módulo de subrasante	Módulo de mejoramiento	Espesor mejoramiento	Módulo combinado de Subrasante+ Mejoramiento
		Esr (MPa)	Ege (MPa)	Hge (cm)	Eeq (MPa)
K13+250 a K16+250	1.65	16.5	76.9	40	49.2
K16+250 a K20+550	1.34	13.4	76.9	40	45.1
K20+550 a K22+350	1.50	15.0	76.9	40	47.3

Fuente: Elaboración propia.

En función de lo anterior, para la obtención de un módulo equivalente de 45MPa mínimo para la implementación de las estructuras de pavimento Rígido y Flexible se debe implementar como mínimo lo siguiente:

- En el caso de pavimento rígido, la adecuación de la plataforma de trabajo consiste en la implementación de 40cm de material con CBR igual o mayor al 10% tipo S. Seleccionado (Art. 220-22) o Mejoramiento de la subrasante (Art. 230-22).

- En el caso de pavimento flexible, la adecuación de la plataforma de trabajo se divide en dos: Una etapa inicial que contempla la instalación de 40cm de material con CBR igual o mayor al 10% tipo S. Seleccionado (Art. 220-22) o Mejoramiento de la subrasante (Art. 230-22) y sobre este la incorporación de 25cm de Subbase

Granular Clase A con el objeto de garantizar un índice estructural superior a 1.0 como se evidencia en la Ilustración 10-13.

MEMORIA DE CÁLCULO - METODOLOGÍA AASHTO 1993

NESE (8.2 ton)	1,228,684	TRÁNSITO DE DISEÑO
Log(NESE)	6.089	
R (%)	90	*NIVEL DE CONFIABILIDAD*
Zr	-1.282	*DESVIACIÓN ESTÁNDAR NORMAL*
So	0.45	*DESVIACIÓN NORMAL DEL ERROR ESTÁNDAR COMBINADO*
pi	4.2	*NIVEL DE SERVICIALIDAD INICIAL*
pt	2.2	*INDICE DE SERVICIALIDAD TERMINAL DE DISEÑO*
ΔPSI	2.0	*DELTA DE SERVICIABILIDAD*

Confiabilidad, R. en	Desviación estándar
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
95	-1.645
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

$$Log_{10}(W_{18}) = Z_R(S_o) + 9.36Log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{Log_{10}\left[\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.31Log_{10}(MR) - 8.07$$

(45 MPa)

Mr	6,527	psi

Módulo equivalente tras adecuación de plataforma de trabajo

$SN = a_1d_1 + a_2m_2d_2 + a_3m_3d_3$

aca =0.184*ln(Eca)-1.9547

abg =0.249*log(Ebg)-0.977

asbg =0.227*log(Esbg)-0.839

E en psi

Número de capas 3

Capas	SN parciales	SN	logW18		pulg	cm	cm asumido	pulg corregido
MDC-19/MDC-25	SN1	*2.078*	6.089	h1	6.93	17.59	***15.0***	5.91
BG-A	SN2	*2.605*	6.089	h2	6.62	16.81	***20.0***	6.62
SBG-A	SN3	*3.659*	6.089	h3	9.75	24.78	***25.0***	9.75

SN1*	1.772
SN2*	2.605
SN3*	3.659
1.15SN requerido =	1,654,058.1

Capa		Módulo (MPa)	Módulo (psi)	Espesor cm	Espesor in	Espesor total (cm)	a_i	m_i	SN efectivo		SN requerido	Cumplimiento SNef > 1.0 SNreq
MDC-19/MDC-25		1,380	200,152	15.0	5.91	60.0	0.300	1.0	1.77	3.83	3.66	Ie= 1.05 (Cumple)
BG-A		210	30,458	20.0	7.87		0.140	0.9	0.99			
SBG-A		115	16,679	25.0	9.84		0.12	0.9	1.06			

Ilustración 10-13. Validación numérica AASHTO-93. Pavimento flexible en zonas de corte.

10.5 DISEÑO DE ESPACIO PÚBLICO – ANDENES

En el tramo de estudio se presentan puntos particulares donde se requiere de la intervención de pasos urbanos (elementos urbanos y en general, un conjunto de espacios destinados al uso de todas las personas, sin distinción alguna).

Para el dimensionamiento de las estructuras de pavimento destinadas al espacio público se toma como referencia los lineamientos y recomendaciones establecidos en la CARTILLA DE ANDENES BOGOTÁ D.C., adoptada mediante Decreto No. 308 del 06 de junio de 2018.

Basados en ello, los suelos que se analizan como plataforma de cimentación de los elementos que conforman el espacio público, se clasifican en dos tipos de suelos de

subrasante, en correspondencia con la resistencia de estos, lo que poseen una resistencia en condición de inmersión ≥ 3.0% (S1) y los que presentan una condición de resistencia menor de 3.0% (S2). No obstante, previo a la implantación de cualquier estructura que conformará los respectivos espacios a diseñar, se deberá como mínimo garantizar una resistencia de los suelos que servirán como plataforma de apoyo de estos elementos, no menor a 3.0%, valores que se logran al implementar los espesores de mejoramiento o llenos con material granular a desarrollar en el numeral 12.1 del presente documento.

De acuerdo con la Tabla 10-16, se establece el proceso a seguir para el mejoramiento de los suelos de acuerdo con el tipo de suelo existente en la subrasante.

Tabla 10-16. Mejoramiento del suelo de subrasante según condiciones existentes.

Tipo de Suelo existente en la Subrasante	Clasificación AASHTO	Clasificación AASHTO	CBR	Proceso a seguir
Suelos Granulares (Gravas y Arenas)	Tipos A1,A2, A3	Excelenta a buena	> 3%	Rectificar y compactar hasta obtener la densidad especificada por el diseñador
Suelos Finos (Arcillas y limos de baja plasticidad)	Tipos A4	Regular a Mala	> 3%	Perfilar
Suelos Finos (Arcillas y limos de baja plasticidad)	Tipos A4 y A5	Regular a Mala	< 3%	Remplazar 20 cm con material de relleno de CBR mínimo de 10% (Sección 320 de IDU - ET-2011 o vigente)
Suelos Finos (Arcillas y limos de alta plasticidad)	Tipos A6 y A7	Regular a Mala	< 3%	Mejorar 20 cm con algún proceso químico* o cal viva (Sección 230 de IDU ET-2011 o vigente)

Fuente: Cartilla de Andenes Bogotá D.C. Decreto Distrital 308 del 06 de junio de 2018, segunda tabla de la pág. 78.

Para el espacio público peatonal a nivel de andén, por donde no circula ningún tipo de vehículo pesado, se propusieron espesores mínimos de construcción, con subbase granular tipo SBG_PEA, según Especificación IDU-ET-2011 y cuya equivalente en Especificaciones INVIAS corresponderá a un material tipo SBG-C (Art. 320-22).

Tabla 10-17. Estructura de pavimento para espacio público.

Tipo estructura	Clasificación subrasante	Mejoramiento	Geotextil	SBG-C (Art.320-22) (cm)	Arena o Mortero 1:5 nivelación (cm)	Material superficie (adoquín de arcilla) (NTC 3 829) (cm)
Andenes	S1	Mejoramientos o rellenos según diseño geométrico y analizado en el numeral 12.1 del	Geotextil NT2500 (Entre el material granular para la adecuación de la plataforma de trabajo y SBG-C)	15*	4	6

Tipo estructura	Clasificación subrasante	Mejoramiento	Geotextil	SBG-C (Art.320-22) (cm)	Arena o Mortero 1:5 nivelación (cm)	Material superficie (adoquín de arcilla) (NTC 3 829) (cm)
		presente documento				

Fuente: Elaboración propia.

Es de anotar que el material de superficie (adoquines en arcilla) deberán cumplir con las especificaciones técnicas de la NTC 3 829. La Arena de sello entre juntas se utiliza para cubrir las juntas o espacios libres entre los adoquines, ayudando a dar confinamiento a los elementos individualmente, y estructuralmente para conformar un conjunto compacto para la distribución de cargas. Sirve a la vez para disminuir la filtración de agua hacia la subbase, lo cual mejora la estabilidad del conjunto. Se deberá utilizar una arena cuya procedencia sea de origen natural o de trituración, no deberá contener: materiales sólidos, residuos vegetales, ni materia orgánica. Deberá estar completamente seca para que pueda penetrar por las juntas. El proceso de tamizado debe asegurar el retiro de sobretamaños y otros materiales sólidos contaminantes. Su granulometría se especifica en la Tabla 10-18.

Tabla 10-18. Granulometría para la arena de sello.

Tamiz		Porcentaje que pasa
Icontec	Alterno	
2.36mm	No. 8	100
1.18mm	No. 16	90-100
600um	No. 30	60-90
300um	No. 50	30-60
150um	No. 100	5-30
75um	No. 200	0-5

11 ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE ALTERNATIVAS DE INTERVENCIÓN

En función de las propuestas de diseño planteadas (pavimento flexible y rígido), se procede a realizar la descripción del impacto ambiental, costos de construcción, espesores constructivos y mantenimiento mínimo a desarrollar para la implantación de las alternativas de intervención anteriormente dimensionadas.

Dentro de las consideraciones de diseño se plantearon tres niveles de calificación, donde:

- Una calificación de 1 corresponde a la situación menos favorable desde el punto de vista técnico y económico.

- Una calificación de 3 corresponde a la situación más favorable desde el punto de vista técnico y económico.

11.1 ANÁLISIS AMBIENTAL

Inicialmente, se procede a evaluar los impactos ambientales derivados de los procesos de producción e instalación de las mezclas asfálticas y concretos hidráulicos.

11.1.1 CONCEPTOS PRELIMINARES

- **Asfalto:** Son los betunes sólidos y semisólidos de color negro o castaño que desarrollan propiedades ligantes y cuya consistencia disminuye al ser calentados. Proceden de yacimientos naturales o como residuo de la refinación de determinados crudos pétreos.

- **Uso del asfalto:** El asfalto por sus cualidades aglutinantes y por sus propiedades físicas y químicas, es apto para un sinnúmero de aplicaciones se emplea en pavimentos es llamado “cemento asfáltico”.

- **Mezcla asfáltica:** Se define como la combinación de unos áridos minerales y un ligante bituminoso de manera que todas y cada una de las partículas del árido queden cubiertas de forma homogénea por una película ligante.

- **Concreto rígido:** Se define como la combinación de materiales pétreos, cemento y agua, el cual proporciona una superficie de rodadura rígida y cómoda.

Generalmente los proyectos de infraestructura vial utilizan mezcla asfáltica para la mayoría de sus obras, pero depende de las particularidades del sector y de la demora en los tramites ambientales se contempla la posibilidad de pavimento rígido o concreto.

11.1.2 MEZCLA ASFÁLTICA

A continuación, se describen las principales actividades necesarias para la elaboración de mezcla asfáltica.

- Recepción: Los materiales que ingresan para la producción de mezclas provienen de canteras debidamente certificadas, que cuentan con sus permisos ambientales de explotación.

- Almacenamiento: Los materiales nuevos que ingresan a las instalaciones para el almacenamiento, se disponen en acopios separados según el tipo de material.

- Dosificación: El sistema de dosificación de agregados en frío se compone tolvas, cada una con sus respectivos alimentadores de banda, los cuales están ubicados en cada tolva. La alimentación a las tolvas se realiza mecánicamente con el uso de un cargador.

- Secado: El material que proviene del sistema de alimentación en frio, ingresa al tambor secador de contraflujo, donde pierde la humedad para luego ingresar al sistema doble barril en donde se mezcla con el asfalto. El secador puede considerarse como el creador o descargador de los finos o polvo. Para asegurar que el asfalto líquido se adhiera a las partículas de polvo, es necesario secar y calentar el agregado a la temperatura deseada de la mezcla. Para realizar el proceso de secado, el agregado se alimenta a un tambor giratorio donde es recogido y lanzado en cascada a través de un chorro de gases calientes. El tamaño de las partículas de polvo que quedan en suspensión en el aire varía de acuerdo con la velocidad de los gases en el tambor (velocidad del gas en el tambor).

- Calentamiento del asfalto: para realizar el respectivo proceso se requiere que el asfalto líquido que se encuentra almacenado en tanques especiales se le realice el previo calentamiento.

- Recuperación de finos del secado: Este proceso se hace por medio del equipo de recuperación de polvos, donde ingresa el gas que es extraído del tambor y que pasa por una variedad de colectores de polvos para extraer las partículas de polvo.

- Salida de la mezcla: La mezcla proveniente del sistema mezclador (tambor doble barril), es transportada por el elevador a la tolva antisegregación.

Una vez identificado el proceso de elaboración de mezcla asfáltica o asfalto flexible, se realiza un análisis de los impactos ambientales generados:

- **Suelo:** Se deberá tener un sitio sin restricciones ambientales, es decir un área la cual requiere intervención previa en cuanto retiro de capa vegetal, aislamiento para evitar derrames de hidrocarburos. La contaminación del suelo ocurriría en especial en las fases de operación, mantenimiento, se producirá en el caso de que se presenten derrames de combustibles o de la mezcla asfáltica directamente al suelo.

- **Aire y Ruido:** Teniendo en cuenta que por su proceso de combustión requiere la instalación de una chimenea para su operación esta genera impactos negativos al ambiente los cuales están regulados y acarrean un permiso de emisiones atmosféricas.

  Este permiso tiene previo a su radicación a la autoridad ambiental un monitoreo de línea base en cual según el protocolo de calidad de aire del Ministerio de Medio ambiente debe durar aproximadamente 18 días con una intensidad horaria de 24 horas, para que su taza de representación sea válida.

  Así mismo, para este trámite ambiental es indispensable tomar la línea base de ruido y ruido ambiental del sitio en el cual se pretende instalar la planta de mezcla asfáltica.

  Por lo anterior previo al montaje y puesta en marcha de la zona industrial se requiere mínimo mes y medio para la toma de datos y radicación a la Autoridad Ambiental, por otro lado, una vez radicado el trámite, la Corporación tiene ochenta y cinco (85) días hábiles (dato tomado de Corpoamazonía) para su pronunciamiento.
  Dicho lo anterior, tramitar un permiso de emisiones acarrea aproximadamente 3 a 4 meses (tiempos ideales) para obtener el permiso ambiental.

- **Agua:** No requiere para su operación.

- **Operación:** Durante el montaje y operación del proyecto ocurrirán emisiones de material particulado provenientes de la construcción de la planta y en la fase de operación de la descarga del material pétreo y mezcla de agregados, de igual manera se producirá emisión de gases provenientes del secado, calentamiento de los agregados mezcla con asfalto, operación de la caldera y generador de energía. El ruido ocurrirá en especial en las fases de montaje y operación, se producirá por las actividades de construcción de vías, instalación de los equipos y por las labores de producción normal desde el momento que se inicia la puesta en marcha de la planta.

  La afectación a las aguas subterráneas podría ocurrir durante la limpieza de los tanques de asfalto al realizar mantenimiento, descargas de la mezcla asfáltica a los camiones o por mal manejo de los residuos sólidos y líquidos.

11.1.3 DOSIFICADORA DE CONCRETO.

A continuación, se describen las principales actividades necesarias para la elaboración de concreto.

- Stock y apilamiento del material: Todos los materiales procedentes de las áreas de explotación son acumulados cerca de la Planta, para de esta forma reducir el tiempo de las labores de carga y descarga.

- Clasificación: Se realiza la clasificación de los materiales esto con la finalidad de mejorar el proceso productivo, la clasificación de los materiales extraídos de las áreas de explotación se lo realiza vía seca, por medio de una criba fija montada a desnivel, en donde la volqueta descarga las rocas y por diferencia de diámetro se clasifica el material pétreo para posteriormente ser llevado al área de trituración.

- Elaboración de hormigón: La preparación de hormigón se lo realiza con la utilización de materiales triturados los cuales son llevados hacia una tolva y silos en donde se adiciona cemento a granel y se dosifica los materiales pétreos para obtener hormigón, el cual será utilizado en la vía, ya sea para la construcción de puentes, obras complementarias, entre otros.

- Transporte de Hormigón: Se lo realiza en vehículos especiales denominados Mixers, los cuales llevan su contenido manteniéndolo en forma de pasta para de esta forma evitar su fraguado hasta llegar a la obra donde sea necesario

- **Suelo:** Los impactos directos se deberán a la compactación de los suelos como consecuencia de la instalación de la planta, los impactos indirectos podrán deberse a la contaminación de posibles vertidos procedentes de la maquinaria o de las sustancias químicas utilizadas en la fabricación do concreto, estos impactos son de carácter local.

- **Aire y Ruido:** Teniendo en cuenta la estructura de una planta dosificadora de concreto no se requiere permisos ante la Autoridad ambiental puesto que se considera como la mezcla de agregados, adicional no se cuenta con una fuente fija de emisión (ducto y/o chimenea). Los materiales pétreos se encontrarán en acopios en el patio de trabajos y el cemento en un silo perfectamente cubierto que no genera emisión alguna.

  Por lo que las fuentes de contaminación atmosférica son los gases resultantes de la combustión de carburantes de la maquinaria, el polvo que genera el tránsito de la maquinaria y el generador eléctrico. No se utilizarán compuestos orgánicos volátiles, por lo que no se prevén afectaciones a la atmosfera debidas a las emisiones de gases procedentes de los mismos.

- **Agua:** Se requiere tramitar un permiso de concesión de aguas que funcionará para toda la zona industrial o se comprará en bloque, la cual puede reutilizarse con un buen desarenador que permita la circulación del agua.

- **Operación:** Al no requerir permiso de emisiones atmosféricas su montaje e instalación es muy rápida y su puesta en funcionamiento también lo es, permite la reutilización del recurso de manera sencilla y así optimizar los recursos naturales

En función de lo anterior, se evidencia que la actividad con mayor impacto ambiental por el uso de sustancias químicas, posibles contingencias ambientales por derrames de estas y generación de material particulado es la elaboración de mezcla asfáltica (pavimento flexible).

El tiempo para otorgamiento de los permisos retrasará el inicio de las actividades constructivas, la entidad ambiental con jurisdicción del proyecto corresponde a COORPOAMAZONÍA, la cual contempla 85 días hábiles para otorgar el permiso de emisiones atmosféricas, afectando la productividad del proyecto y el avance en los hitos contractuales.

Los impactos ambientales más significativos se encuentran en la instalación de un equipo de producción de mezcla asfáltica, por lo tanto y para garantizar la sostenibilidad del proyecto en cuanto a la reducción de aspectos negativos, se ve viable cambiar el tipo de mezcla en el corredor vial.

En consecuencia, en la Tabla 11-1, se presenta la calificación parcial entre alternativas de intervención en lo que respecta al impacto ambiental de producción e instalación.

Tabla 11-1. Calificaciones alternativas. Impacto ambiental.

Ítem	Calificación	
	Pavimento flexible	Pavimento rígido
Impacto ambiental	1.0	3.0
Otorgamiento de permisos ambientales	1.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

11.2 COSTO CONSTRUCTIVO

En función de los espesores constructivos, adecuación de terraplenes, implantación de obras hidráulicas, costos contractuales de materiales, por parte del Constructor se obtendrían los siguientes costos directos por kilómetro.

- Pavimento flexible: 2,651,082,351 Costo/km (97.8% del costo considerado para pavimento rígido

- Pavimento rígido: 2,709,035,095 Costo/km

En consecuencia, en la Tabla 11-2 se presenta la calificación parcial entre alternativas de intervención en lo que respecta al impacto ambiental de producción e instalación.

Tabla 11-2. Calificaciones alternativas. Costo constructivo

Ítem	Calificación	
	Pavimento flexible	Pavimento rígido
Costo de construcción	3.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

11.3 COMPARATIVO ETAPA DE MANTENIMIENTO

En función de lo resultados a obtener, se presentará el consolidado de los costos directos para un periodo de **20 años** en cada tipo de pavimento (este periodo aplica tanto para pavimento flexible como rígido con el fin ser equitativamente comparables), lo cual permitirá realizar al Contratista de obra un análisis comparativo y directo entre las estructuras propuestas.

Para el análisis del proyecto se emplea el software HDM Versión 4, donde a partir de la definición de los segmentos del corredor, parque vehicular, y estrategias de mantenimiento se formulan los calendarios de intervención del proyecto.

El modelo HDM es un modelo de simulación del comportamiento del ciclo de vida de las carreteras considerando las características medioambientales, tráfico y características propuestas de la estructura de pavimento.

La tasa de deterioro del pavimento está directamente afectada por los estándares de conservación aplicados para reparar defectos en la superficie de rodamiento, como grietas, desprendimiento de agregados, baches, etc., o para conservar la integridad estructural del pavimento (tratamientos superficiales, refuerzos, etc.,) permitiendo así que la vía soporte el tráfico para el que ha sido diseñada.

En la Ilustración 11-1 se pueden ver las tendencias previstas en rendimiento de pavimento representadas por el Índice Internacional de Irregularidad (IRI, por sus siglas en inglés). El IRI es un índice de desgaste de la carretera que representa la irregularidad promedio producida ya sea por desprendimientos, ahuellamientos, baches, agrietamientos, etc., y el HDM IV lo puede predecir de acuerdo con los datos de las características anteriormente descritas.

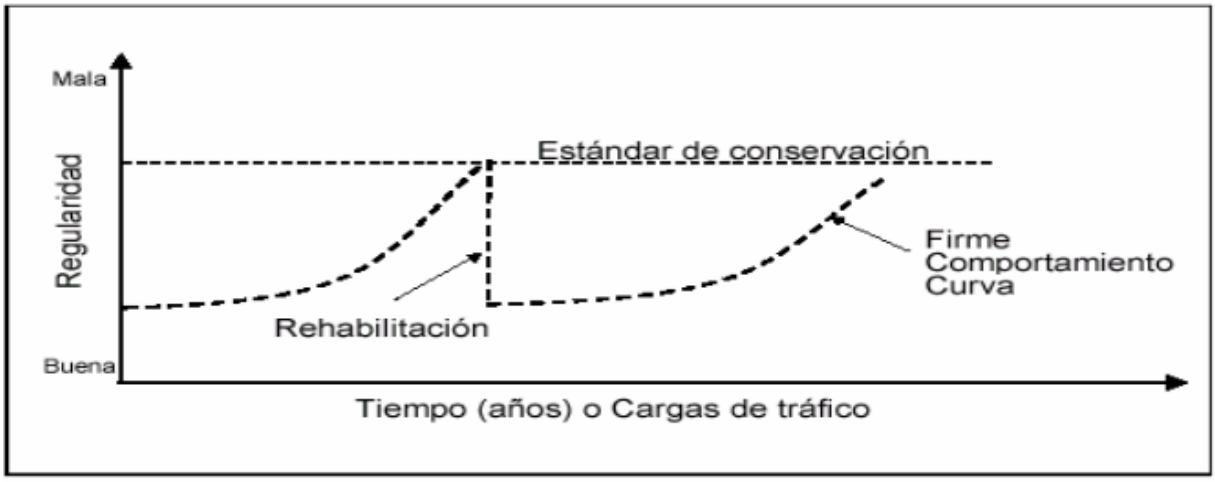


Ilustración 11-1. Estándar de conservación.

A continuación, se explica la estructura del HDM-4 por medio de la descripción general de los elementos que lo componen. Los elementos que conforman el HDM-4 se pueden agrupar en tres grandes grupos a saber: los manejadores de datos, las herramientas de análisis y los modelos.

11.3.1 Manejadores de datos

En el grupo de manejadores de datos se encuentran los módulos de configuración, flota vehicular, red de carreteras y estándares de trabajo. En estos módulos se realizan las adaptaciones de algunos componentes y parámetros como las condiciones del pavimento, las características de la flota vehicular y los estándares de trabajos que se pueden aplicar.

11.3.2 Configuración.

La configuración de HDM-4 proporciona funciones para personalizar la operación del sistema y para ajustar datos adaptados a las condiciones locales. El proceso de configuración requiere información de cinco componentes indispensables para la adaptación al entorno estudiado, a saber: los modelos de tráfico, los tipos de velocidad / capacidad, las zonas climáticas, la definición de la moneda y los datos globales.

11.3.2.1 Flota vehicular.

La flota vehicular define las características del parque de vehículos que operan en la red de carreteras que se va a analizar. Dentro de ella se proporcionan funciones para el almacenamiento y recuperación de las características de vehículo necesarias para calcular velocidades, costos de operación, costos de tiempos de viaje y otros efectos.

11.3.2.2 Red de carreteras

En la red de carreteras se definen las características físicas de tramos de carreteras en una red o subred que se va a analizar. En ella se proporcionan las funciones básicas para almacenar las características de uno o más tramos de carretera, permitiéndoles a los usuarios definir diferentes redes y subredes y definir tramos.

11.3.2.3 Estándares de trabajo

Los trabajos definen estándares de conservación y mejora (con sus costos unitarios) que serán aplicados a los distintos tramos de la carretera a analizar. Los trabajos están referidos a los objetivos o niveles de condiciones y respuesta que se propone conseguir en un sistema de gestión de carreteras.

11.3.3 Herramientas de análisis

En las herramientas de análisis se encuentran los módulos de proyectos, programas y estrategias los cuales operan sobre los datos definidos en los manejadores de datos.

11.3.3.1 Proyectos.

Un análisis de proyecto consiste en la evaluación de uno o más proyectos de carretera u opciones de inversión. HDM-4 analiza un tramo de carretera con unos tratamientos seleccionados, con los costos y beneficios asociados, proyectándolos anualmente a lo largo del periodo de análisis. Se puede usar el análisis del proyecto para estimar la viabilidad económica o técnica de los proyectos de inversión en carreteras.

11.3.3.2 Programas.

En el análisis de programa se realiza la asignación de prioridades a una larga lista definida de proyectos de carretera para un programa de obras de uno a más años bajo restricciones presupuestarias definidas.

11.3.3.3 Estrategias.

El análisis estratégico se puede usar para analizar una determinada red en su conjunto y preparar estimaciones para la planificación de necesidades de gasto para el desarrollo y la conservación de carreteras a mediano y largo plazo, bajo varios supuestos presupuestarios.

11.3.4 Modelos del hdm-4

La principal función de los modelos en HDM-4, es la de calcular la evolución del deterioro del pavimento, los costos del mantenimiento de una vía y los costos de usuario para un periodo de análisis especificado. Por lo tanto, los modelos son usados para buscar el diseño de un estándar de mantenimiento adecuado, para el cual los costos totales del transporte sean mínimos. El HDM-4 contiene básicamente los modelos internos RDWE (Road Deterioration and Works Effects), RUE (Road User Effects) y SEE (Safety, Energy and EnvironmentalEffects), para simular la interacción entre las características del pavimento, los estándares de mantenimiento, los efectos medioambientales y las solicitaciones del tráfico con el fin de predecir la evolución de la condición de la vía.

El modelo de deterioro y efectos de los trabajos (RDWE) pronostica cuál va a ser el deterioro del pavimento, en función del tráfico existente y proyectado, condiciones estructurales y funcionales del pavimento, y del medio ambiente. Las variables que se usan en este modelo están asociadas con:

- Clima y medio ambiente.
- Tráfico.
- Historia del pavimento.
- Características estructurales del pavimento.
- Propiedades de los materiales.

El modelo de efectos de trabajos (WE) simula los efectos de las obras definidas en el módulo de estándares de trabajo en el estado del pavimento y determina los costos correspondientes. Es usado por HDM-4 para estimar los recursos necesarios del administrador vial para preservar en buen estado las carreteras. Estos recursos se expresan en términos de cantidades físicas y costos monetarios de los trabajos que se deben realizar. HDM-4 incluye una relación para modelar el deterioro del pavimento (RD) y los efectos de los trabajos (WE) con el objetivo de predecir la condición anual del pavimento y poder evaluar la eficiencia de las estrategias de mantenimiento.

11.3.5 Insumos

A continuación, se presenta una breve descripción de los insumos necesarios y sus fuentes para la generación del análisis del proyecto con la herramienta HDM-IV.

11.3.5.1 Diseño geométrico

Se toman valores característicos de los tramos, a partir de la inspección de los planos de alineamientos horizontales y verticales del proyecto.

11.3.5.2 Meteorología

El clima y la humedad que predominan en la región donde es presentada la propuesta de intervención de la estructura de pavimento tienen gran importancia en el funcionamiento de éste. Las condiciones climáticas empleadas son las de la caracterización del proyecto en capítulos precedentes.

11.3.5.3 Pavimentos

De acuerdo con el diseño del pavimento desarrollado en el presente documento, se proyectan las estructuras relacionadas en las siguientes ilustraciones, siempre y cuando se garantice una plataforma de trabajo con módulo equivalente igual o mayor a 100MPa.

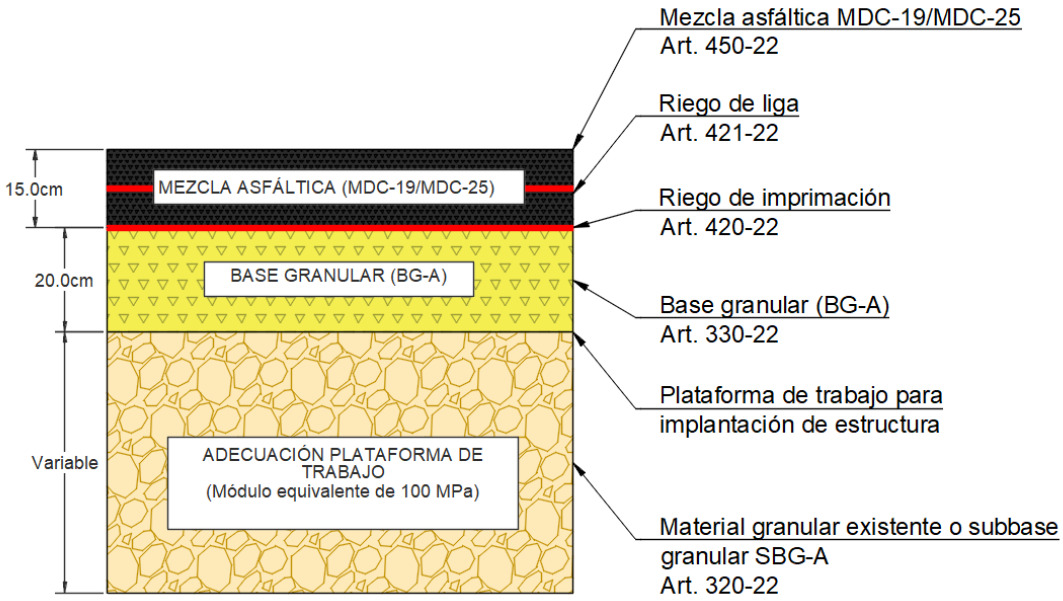


Ilustración 11-2. Sección tipo pavimento flexible.
Fuente: Elaboración propia.

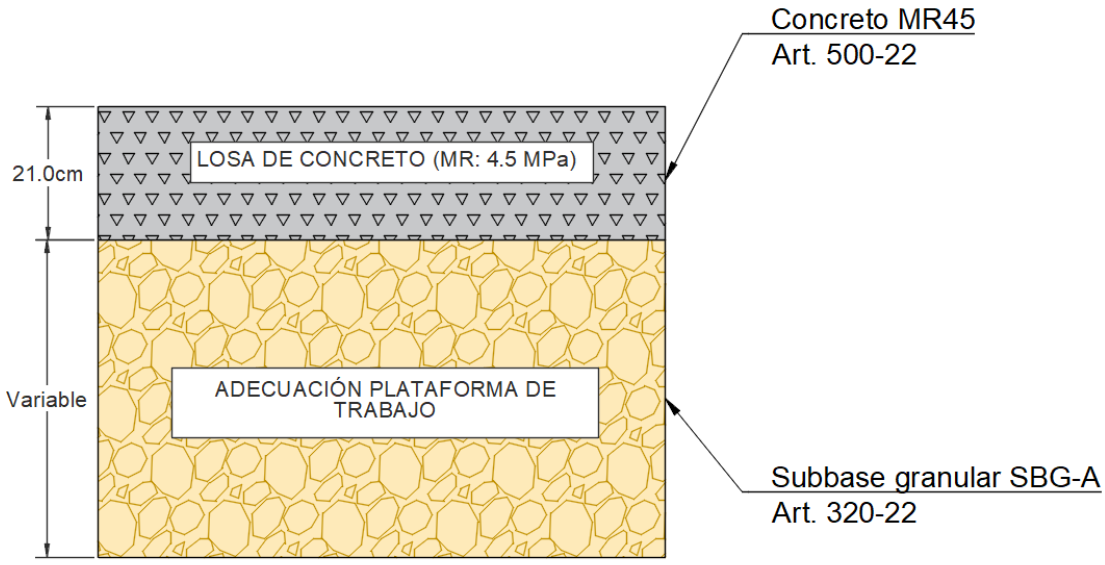


Ilustración 11-3. Sección tipo pavimento rígido
Fuente: Elaboración propia.

11.3.5.4 Tránsito

Para el Tránsito Promedio diario, hará uso del TPD del año base, la composición vehicular y tasas de crecimiento establecidas en el estudio de tránsito y resumidas en la Tabla 11-3.

Tabla 11-3. Composición vehicular

VEHÍCULOS	TPD año 2022	COMPOSICIÓN INICIAL %	% CRECIMIENTO ANUAL
Autos	973	80.09	3.80
Buses		0.59	3.80
Camión C2P		7.37	3.80
Camión C2G		7.38	3.80
Camión C3 y C4		3.54	3.80
Camión C5		0.15	3.80
Camión >C5		0.88	3.80

Fuente: Determinación de número de ejes equivalentes sector K2+750 al PR 24+000 vía Villa Garzón-San José de Fragua. Septiembre 26 de 2022.

11.3.6 Condición inicial

Dadas las características actuales del corredor objeto de estudio, se considera en el modelo lo siguiente:

- Tipo de rodadura: Sin pavimentar

- Característica del material de rodadura: Grava

- Espesor del material de rodadura: 300 mm (valor máximo permitido en el software y el cual es levemente inferior al valor promedio de material granular identificado a lo largo del corredor en estudio como se evidencia en la Ilustración 11-4).

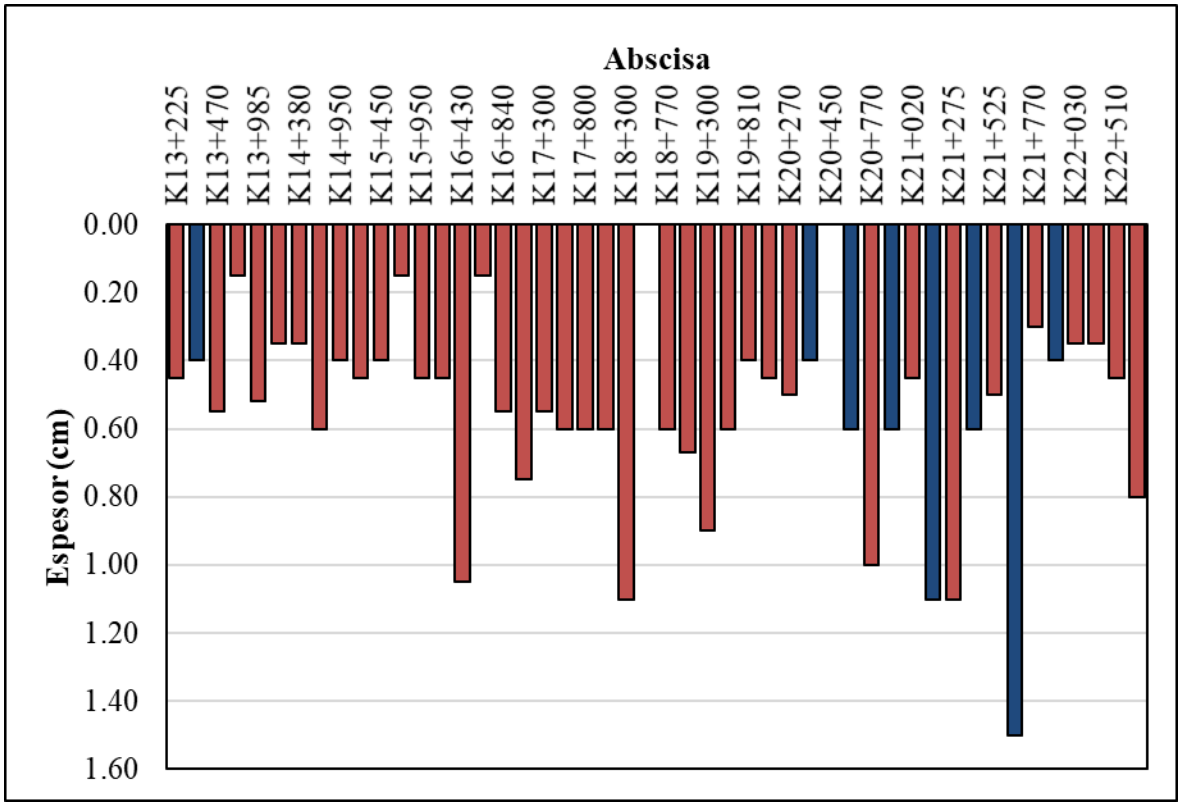


Ilustración 11-4. Variabilidad espesor material granular a lo largo del K13+250 al K22+350.
Fuente: Elaboración propia

- Ancho de la calzada: 6 metros
- Zona Climática: Húmeda / Tropical
- Regularidad IRI: 12 m/km (Valor asignado en función del material de rodadura que conforma la calzada actualmente)

A partir de lo anterior, y haciendo uso de la herramienta HDM IV se definirán los estándares de mejoramiento del corredor contemplando las estructuras de pavimento reflexible o rígido.

11.3.7 Estrategias de intervención (Reconstrucción y Mantenimientos)

Con base en los espesores de las estructuras de pavimento proyectadas (Pavimento rígido y Pavimento Flexible), y usando los modelos de deterioro incluidos en la herramienta de análisis se formulan los siguientes estándares de Reconstrucción y Mantenimiento).

11.3.7.1 Estándares de reconstrucción

Los estándares de reconstrucción proyectada a ejecutarse en el año 2023 corresponderán a las alternativas de intervención relacionadas en el numeral 11.3.5.3 Pavimentos y a las condiciones para el recibo de los trabajos establecidos en el numeral 450.5 del Artículo 450-22 "*Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua"* y Artículo 500-22 "*Pavimento de concreto hidráulico"* de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

Por lo cual, el estado inicial del corredor para cada tipo de intervención corresponderá a:

Tabla 11-4. Condición inicial para el recibo de obra de cada alternativa.

Parámetro	Pavimento flexible	Pavimento rígido
Mezcla asfáltica MDC-19 /MDC-25 (cm)	15.0	-
Concreto hidráulico MR45 (cm)	-	21.0
Base Granular Clase A	20.0	-
Adecuación plataforma de trabajo	Variable	Variable
Regularidad IRI (m/km)	3.00	3.00
Ahuellamiento (mm)	10.00	-
Textura (mm)	0.35	0.60
Resistencia al deslizamiento (mm)	0.50	0.50
Calidad del drenaje	Dada la pluviosidad que registra la región en la cual se desarrolla el proyecto, se considerará que la calidad del drenaje será "regular" con el objeto de simular el periodo en el cual las estructuras de pavimento estarán expuestas al agua	

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, se considerará que la plataforma de trabajo a adecuar para cada una de las alternativas de intervención (Pavimento flexible y pavimento rígido) corresponderán a los relacionados en la Tabla 11-5.

Tabla 11-5. Características de la plataforma de trabajo generalizada.

Inicio	Fin	Módulo Plataforma de trabajo (MPa)		SN requerido Pav Flexible
		Módulo equivalente promedio (MPa)	Módulo de reacción (MPa/m)	
K13+250	K22+350	100	88.3	2.74

Fuente: Elaboración propia.

11.3.7.2 Estándares de mantenimiento

Con el objeto de garantizar la transitabilidad del corredor vial a intervenir, se define una serie de tareas (actividades de mantenimiento) a adelantar de acuerdo con los modelos de deterioro incorporados en el programa de análisis, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 11-6. Estándares de mantenimiento para análisis de intervenciones.

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO APLICABLE	NOMBRE INTERVENCIÓN	SIGLAS	DESCRIPCIÓN	COSTO
Pavimento flexible	REPARACIÓN IRI	FR_IRI	Fresado y reposición de mezcla asfáltica en espesor de 7cm cuando el valor de IRI sea mayor a 4 m/km	$ 45,865 por m^2
Pavimento flexible	REP AHUELLAMIENTO	FR	Fresado y reposición de mezcla asfáltica en espesor de 7cm cuando el ahuellamiento sea mayor a 15mm	$ 45,865 por m^2
Pavimento flexible	PARCHEOS	PA	Ejecución de parcheos/bacheos cuando el área severamente daña	$ 94,901 por m^2

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO APLICABLE	NOMBRE INTERVENCIÓN	SIGLAS	DESCRIPCIÓN	COSTO
			sea igual o mayor al 1% del área total y el valor de IRI no sea mayor a 3.5m/km	
Pavimento flexible	SELLO FISURAS	SELLOF	Ejecución de sellos de fisuras cuando el porcentaje de fisuramientos de tipo estructural sea mayor o igual a 0.05% del área total y el IRI sea menor a 4m/km	$ 11,394 por ml
Pavimento rígido	LIMPIEZA Y SELLO (juntas)	SF_R	Reemplazo de sello de juntas cada 5 años	$ 6,592 por ml
Pavimento rígido	REEMPLAZO PARCIAL	Parcial	Intervención cuando el área afectada por el deterioro tipo “spalling” sea igual o mayor a 0.1% del área total	$ 636,022 por m^2
Pavimento rígido	REEMPLAZO LOSA	Losa	Intervención cuando la calzada totalmente agrietada represente el 0.4% del área total	$ 2,120,073 por losa

Fuente: Elaboración propia.

Es de anotar que, los costos relacionados con anterioridad para cada tipo de intervención y/o actividades de mantenimiento corresponden a los establecidos por el INVIAS para la territorial CAUCA SUR y los cuales se adjuntan en el Anexo 9 “*Soportes HDM IV”.*

De igual forma, se aclara que la herramienta de análisis no considere la necesidad de ejecución de la actividad desde el punto de vista estructural, pero que, por variabilidad de materiales, procesos constructivos, inestabilidades geotécnicas menores, asentamientos y/o clima sea necesaria su ejecución en cuantías mínimas, por lo cual se deberá prever una partida anual para la ejecución de dichas actividades si se llegaren a presentar.

11.3.8 Resultados

Una vez definidas las actividades de construcción y mantenimiento a emplear en el modelo, conviene destacar que la ejecución de las actividades de mantenimiento (de tipo correctivo) se asignan en función de los modelos internos RDWE (Road Deterioration and Works Effects), RUE (Road User Effects) y SEE (Safety, Energy and EnvironmentalEffects), para simular la interacción entre las características del pavimento, los estándares de mantenimiento, los efectos medioambientales y las solicitaciones del tráfico con el fin de predecir la evolución de la condición de la vía.

En consecuencia, como resultado, en la Tabla 11-7 y Tabla 11-8 se presenta el calendario de intervenciones para cada sector analizado y cuyos soportes de las simulaciones se encuentran adjuntos en el Anexo 9 “*Soportes HDM IV”.*

Tabla 11-7. Cronograma actividades de mantenimiento - Pavimento flexible.

ACTIVIDAD	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K2+750 A K3+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K3+750 A K4+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K4+750 A K5+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K5+750 A K6+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					

ACTIVIDAD	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K6+750 A K7+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%	3%					
Parcheos/bacheos												1%	1%								
Fresado y reposición 7cm							100%										100%				
K7+750 AK8+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%	3%					
Parcheos/bacheos												1%	1%								
Fresado y reposición 7cm							100%										100%				
K8+750 A K9+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	6%	3%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K9+750 A K10+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K10+750 A K11+750																					

ACTIVIDAD	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K11+750 A K12+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					
K12+750 A K13+750																					
Sello de fisuras						3%						1%	1%	7%	4%						1%
Parcheos/bacheos												1%	1%								1%
Fresado y reposición 7cm							100%									100%					

Fuente: Elaboración propia a partir de simulaciones desarrolladas en herramienta HDM IV.

Como bien se observa de lo anterior, al contemplar la estructura de pavimento flexible se requeriría en el año 6 la implementación de un fresado y reposición de mezcla asfáltica con el objeto de perseverar la rodadura a los niveles de servicio óptimos para la circulación vehicular (IRI menor a 4 m/km). Aproximadamente, a partir del cinco (5) año de instalación de la nueva capa de rodadura, se deben adelantar parcheos/bacheos de áreas altamente deterioradas o con pérdida de agregados; sin embargo, se recomienda que periódicamente (anualmente) se adelanten actividades de sellado de fisuras con el objeto de alargar la vida útil de la rodadura y postergar de cierta forma la necesidad de una nueva intervención.

Lo cual, a futuro, significaría un mayor costo de construcción y mantenimiento para la alternativa en pavimento flexible respecto a la propuesta de intervención en pavimento rígido cuyas actividades de mantenimiento se relacionan en la Tabla 11-8.

Tabla 11-8. Cronograma actividades de mantenimiento – Pavimento rígido.

ACTIVIDAD	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K2+750 A K3+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K3+750 A K4+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K4+750 A K5+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	1%	2%	2%	2%
K5+750 A K6+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	1%	2%	2%	2%
K6+750 A K7+750																					

ACTIVIDAD	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K7+750 AK8+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K8+750 A K9+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K9+750 A K10+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K10+750 A K11+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%
K11+750 A K12+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%

ACTIVIDAD	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
K12+750 A K13+750																					
Limpieza y sello de juntas						100%					100%					100%					100%
Reemplazo de losas								2%			2%		2%		2%		2%	2%	2%	2%	2%

Fuente: Elaboración propia a partir de simulaciones desarrolladas en herramienta HDM IV.

Complementario al calendario anteriormente relacionado para cada una de las alternativas de intervención a evaluar, en la Tabla 11-9 se presenta el consolidado de costos aproximados por año y totales para un periodo de 20 años que permiten realizar una comparativa directa entre dichas estructuras que a su vez presentan un periodo de diseño particular (10 años para pavimento flexible y 20 años para pavimento Rígido)

Es de anotar que el calendario adjunto corresponde al inicialmente presentado para el tramo K2+750 al K13+250, debido a que se están conservando las mismas premisas de diseño y por lo tanto los costos de mantenimiento no varían entre estos sectores.

Tabla 11-9. Consolidados costos aproximados de mantenimiento por alternativa.

Costos de mantenimiento		
Año	**Pav. Flexible**	**Pav. Rígido**
2022	-	-
2023	-	-
2024	-	-
2025	-	-
2026	-	-
2027	-	-
2028	$ 4,540,634,912	-
2029	-	$ 46,641,650
2030	-	-
2031	-	-
2032	-	$ 456,310,822
2033	$ 113,354,200	-

Costos de mantenimiento		
Año	**Pav. Flexible**	**Pav. Rígido**
2034	$ 116,903,827	$ 46,641,650
2035	$ 62,220,108	-
2036	$ 38,759,080	$ 46,641,650
2037	$ 3,719,815,349	$ 409,669,172
2038	$ 825,569,984	$ 46,641,650
2039	-	$ 46,641,650
2040	-	$ 46,641,650
2041	-	$ 46,641,650
2042	$ 92,743,647	$ 456,310,822
Total	**$ 9,510,001,107**	**$ 1,648,782,366**
xKm	**$ 905,714,391**	**$ 157,026,892**

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados extraídos de HDM IV.

En función de lo anterior, se obtendrían los siguientes costos directos de mantenimiento por kilómetro.

- Pavimento flexible: $ 905,714,391 Costo/km

- Pavimento rígido: $ 157,026,892 Costo/km (2% del costo considerado para pavimento flexible)

Se aclara que los costos anteriormente relacionados, podrán ser aplicado para los 50km del corredor, debido a que las alternativas de intervención partirán de las mismas premisas de diseño (plataforma de trabajo de 100MPa, tránsito y tipo de rodadura).

En consecuencia, en la Tabla 11-10 se presenta la calificación parcial entre alternativas de intervención en lo que respecta al impacto ambiental de producción e instalación.

Tabla 11-10. Calificaciones alternativas. Costo mantenimientos.

Ítem	Calificación	
	Pavimento flexible	Pavimento rígido
Costo de mantenimiento	1.0	3.0

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, en la Ilustración 11-5 se presenta la variabilidad promedio del IRI a lo largo del corredor y la afectación que este tendría durante el periodo de análisis en función de los mantenimientos programados.

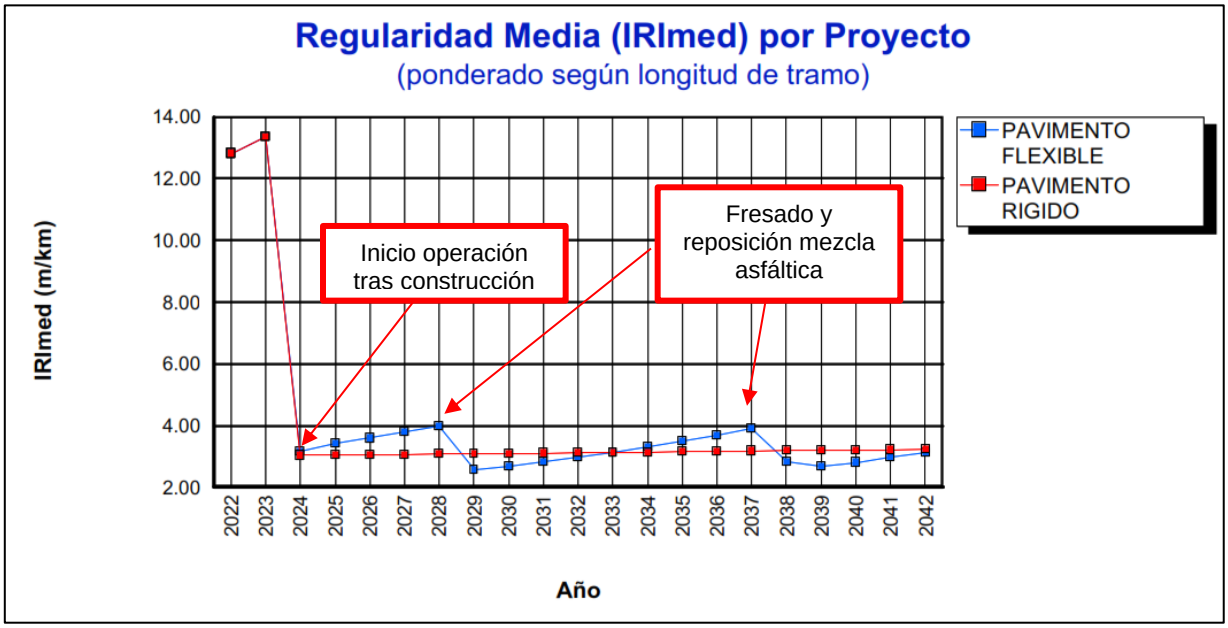


Ilustración 11-5. Variabilidad del IRI por alternativa de intervención.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados extraídos de HDM IV.

Como bien se observa, a nivel presupuestal, el impacto de los mantenimientos correctivos que requiere el pavimento asfáltico para garantizar valores de IRI entre 3.0m/km y 4m/km hacen que dicha alternativa sea económicamente más costosa en un periodo de 20 años respecto a la construcción de la estructura de pavimento rígido que requerirá para el mismo periodo de servicio (20 años), el reemplazo localizado de 2% de las losas (relacionadas en la tabla anterior a partir del año 7) y mantenimientos programados para la limpieza y resellado de las juntas (cada 5 años).

Si bien, la herramienta HDM IV permite simular la interacción entre las características del pavimento, estándares de mantenimiento, efectos medioambientales y solicitaciones del tráfico (con el fin de predecir la evolución de la condición de la vía), es de anotar que, en el modelo desarrollado no se considera la variabilidad de materiales, procesos constructivos, inestabilidades geotécnicas menores, asentamientos, componente social, derrames de combustibles y/o afectaciones externas que puedan afectar la estabilidad de la estructura de pavimento o estado superficial del mismo.

Por lo anterior, se recomienda adelantar inspecciones periódicas (entre 6 meses a 1 año) a lo largo del corredor con el objeto de identificar fallos (fisuramientos, pieles de cocodrilo o perdida de agregados) que permitan inicialmente proporcionar información real para la

calibración del modelo y a su vez la ejecución de actividades de mantenimiento necesarias para la corrección de los fallos en función del Manual de Rehabilitación de Vías del INVIAS.

11.4 SELECCIÓN ALTERNATIVA ÓPTIMA DE INTERVENCIÓN

En función de los análisis y comparativas relacionadas anteriormente, en la Tabla 11-11 se relacionan las calificaciones obtenidas en cada uno de los ítems evaluados.

Tabla 11-11. Matriz de selección de alternativa de intervención.

Ítem	Calificación	
	Pavimento flexible	**Pavimento rígido**
Impacto ambiental	1.0	3.0
Otorgamiento de permisos ambientales	1.0	2.0
Costo de construcción	3.0	2.0
Costo de mantenimiento	1.0	3.0
CALIFICACIÓN	**6.0**	**10.0**

Fuente: Elaboración propia.

Nótese que la alternativa de intervención con pavimento rígido presenta una mejor calificación principalmente por el poco impacto ambiental, bajos tiempos de instalación entrada en operación de la planta, espesores constructivos y costo de mantenimiento del mismo para un periodo de 20 años.

Por lo anterior, se evidencia que la alternativa de pavimento rígido es la que presenta los mayores beneficios técnicos, económicos y temporalidad para su implementación en obra.

12 INTERPRETACIÓN DISEÑO GEOMÉTRICO E INCORPORACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

Definidas las estructuras de pavimento (Flexible y rígido) que se recomiendan entre el K13+250 a K22+350 se procede a realizar la interpretación del diseño geométrico y perfil estratigráfico a detalle con el fin de definir las adecuaciones particulares de la plataforma de trabajo aplicables para cada alternativa de intervención garantizando siempre un módulo equivalente mínimo de 100MPa en las zonas de llenos o terraplén con alturas mayores a 0.5m y de 45MPa en las zonas de corte

Para adelantar el análisis se parte de seis insumos:

1. Los espesores de las gravas aluviales que sirven como superficie de rodadura relacionados en la Tabla 12-1 e identificados durante las campañas de exploración geotécnica adjuntas en el numeral 3.1 y 5.2.

Tabla 12-1. Espesor del material granular a lo largo del K13+250 al K22+350.

Abscisa	Espesores granular existente (m)	Referencia proyecto
K13+225	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K13+275	0.40	Geoterra (2022)
K13+470	0.55	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K13+720	0.15	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K13+985	0.52	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K14+220	0.35	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K14+380	0.35	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K14+720	0.60	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K14+950	0.40	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K15+200	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K15+450	0.40	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K15+700	0.15	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Abscisa	Espesores granular existente (m)	Referencia proyecto
K15+950	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K16+200	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K16+430	1.05	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K16+600	0.15	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K16+840	0.55	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K17+050	0.75	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K17+300	0.55	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K17+550	0.60	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K17+800	0.60	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K18+045	0.60	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K18+300	1.10	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K18+520	0.00	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Abscisa	Espesores granular existente (m)	Referencia proyecto
K18+770	0.60	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K19+050	0.67	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K19+300	0.90	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K19+550	0.60	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K19+810	0.40	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K20+040	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K20+270	0.50	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K20+350	0.40	Geoterra (2022)
K20+450	0.00	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K20+600	0.60	Geoterra (2022)
K20+770	1.00	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K20+850	0.60	Geoterra (2022)

Abscisa	Espesores granular existente (m)	Referencia proyecto
K21+020	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K21+080	1.10	Geoterra (2022)
K21+275	1.10	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K21+350	0.60	Geoterra (2022)
K21+525	0.50	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K21+600	1.50	Geoterra (2022)
K21+770	0.30	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K21+850	0.40	Geoterra (2022)
K22+030	0.35	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K22+270	0.35	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K22+510	0.45	Contrato INVIAS 2722 de 2019
K22+750	0.80	Contrato INVIAS 2722 de 2019

Fuente: Elaboración propia.

2. El módulo resiliente de los materiales granulares existentes presenta un valor de 95.4MPa o CBR de 14% cuyo soporte se encuentra adjunto en el numeral 6.1 y 6.2.

3. El CBR característico de los materiales cohesivos identificados bajo el material granular existente presenta los siguientes valores característicos cuyo soporte se desarrolló en el numeral 6.3.

   - Entre las abscisas K13+250 a K16+250 el CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.65%.
   - Entre las abscisas K16+250 a K20+550 el CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.34%.
   - Entre las abscisas K20+550 a K22+350 CBR presentativos (percentil 87.5%) corresponde a 1.50%.

4. Los cambios de rasante proyectados desde el componente de geometría se presentan de forma esquemática en la Ilustración 12-1 y a su vez en el Anexo 8 "*Diseño geométrico".*

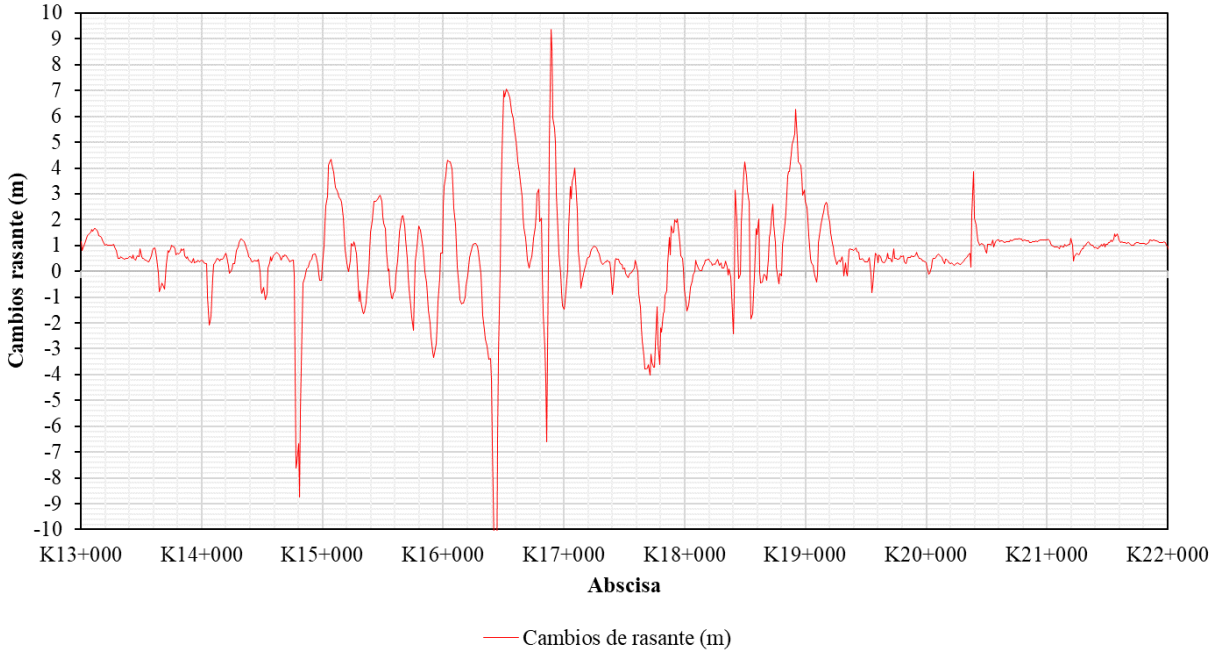


Ilustración 12-1. Cambios de rasante proyectados.
Fuente: Elaboración propia a partir de diseño geométrico proyectado.

5. Las obras hidráulicas proyectadas se encuentran localizadas en las abscisas relacionadas en la Tabla 12-2, por lo tanto, en dichas abscisas se considerará que el espesor de granular "remanente" será de cero (0) debido a los procesos constructivos que se deben adelantar para la adecuación de dichas obras hidráulicas.

Tabla 12-2. Listado obras hidráulicas proyectadas.

Estructura	Abscisa DG
Box Coulvert	K13+245
Box Coulvert	K13+488

Estructura	Abscisa DG
Box Coulvert	K14+153
Circular Simple	K14+317

Estructura	Abscisa DG
Box Coulvert	K15+071
Box Coulvert	K15+137

Estructura	Abscisa DG
Circular Simple	K15+469
Circular Simple	K16+061
Box Coulvert	K16+308
Circular Simple	K16+514
Circular Simple	K16+650
Circular Simple	K16+925
Circular Simple	K17+617
Circular Simple	K17+865

Estructura	Abscisa DG
Circular Simple	K18+114
Circular Simple	K18+218
Circular Simple	K18+288
Circular Simple	K18+613
Circular Simple	K19+012
Circular Simple	K18+910
Circular Simple	K19+414
Circular Simple	K19+514

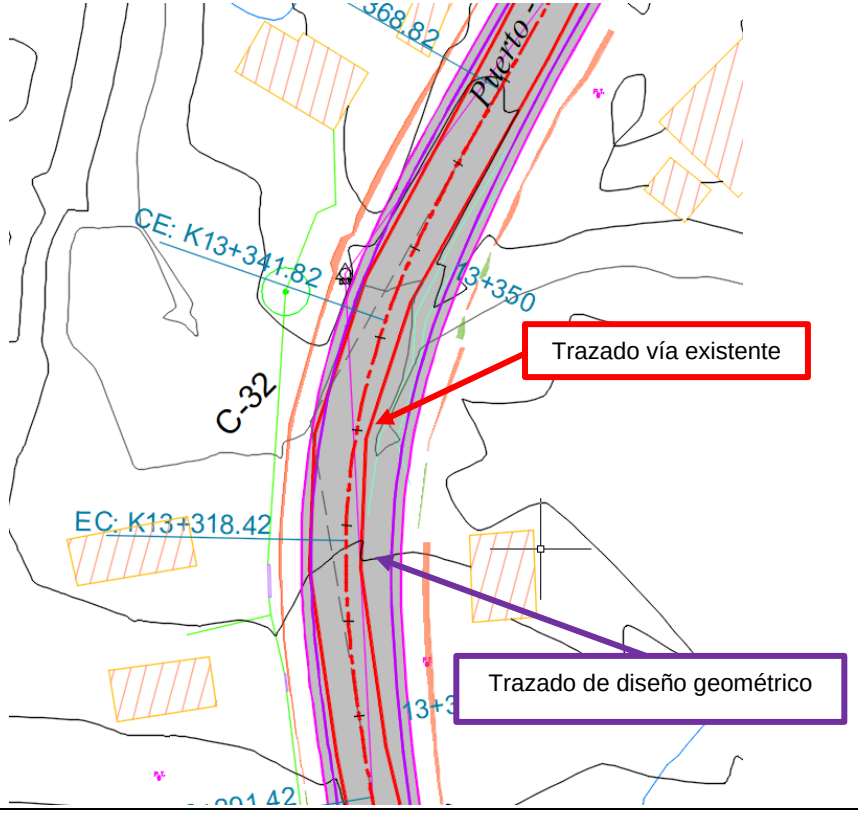
Estructura	Abscisa DG
Circular Simple	K19+682
Circular Simple	K20+150
Circular Simple	K20+290
Circular Simple	K20+441
Circular Simple	K20+614
Circular Simple	K21+200
Circular Simple	K21+750
Circular Simple	K22+130

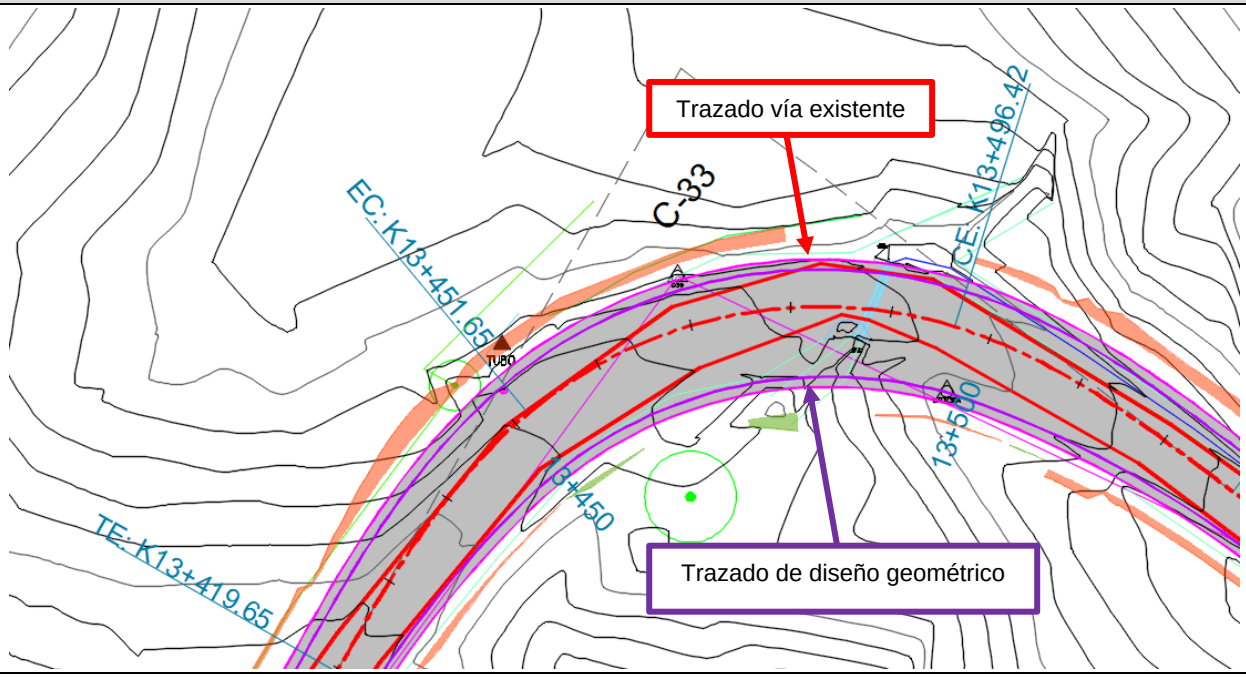
Fuente: Proyección de obras hidráulicas recomendadas por la Especialidad de Hidráulica.

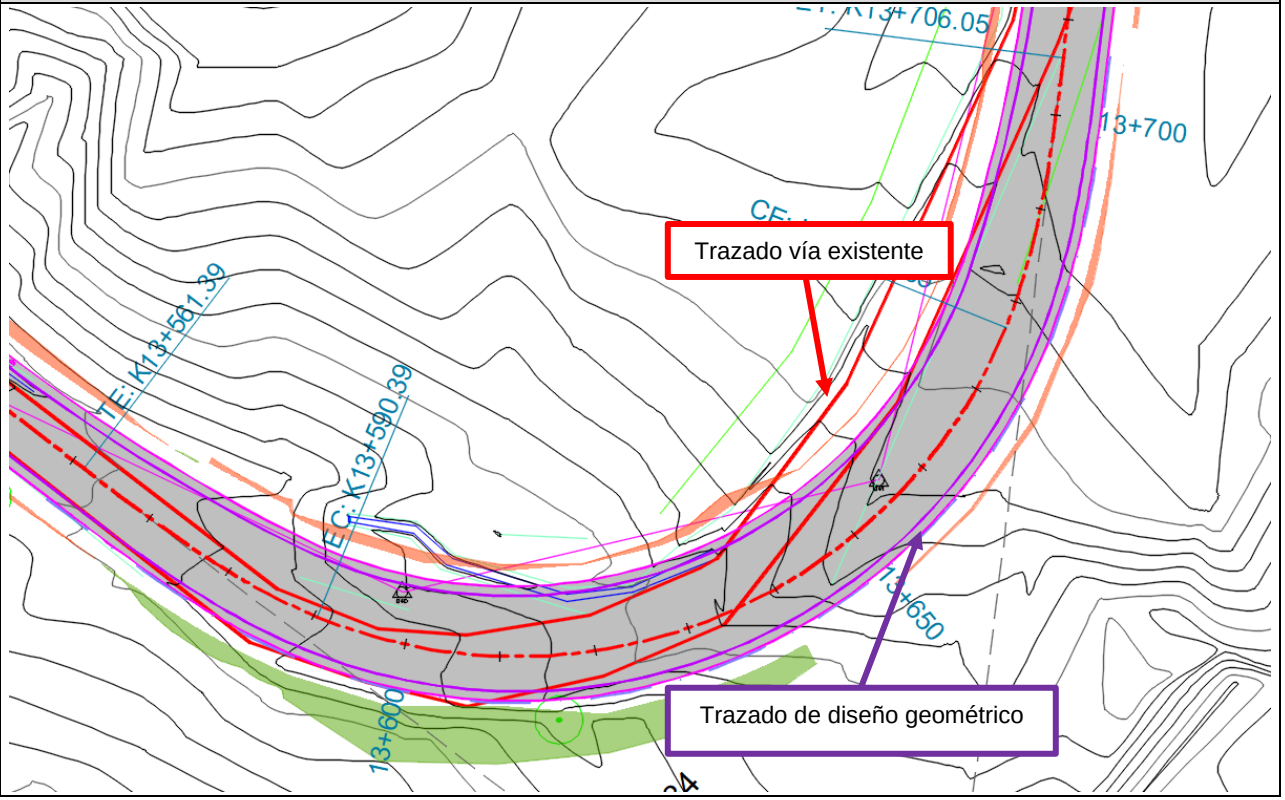
6. En función de los requerimientos topográficos y geométricos, se tienen proyectado un pontón con luz mínima de 250m sobre la abscisa K16+900.

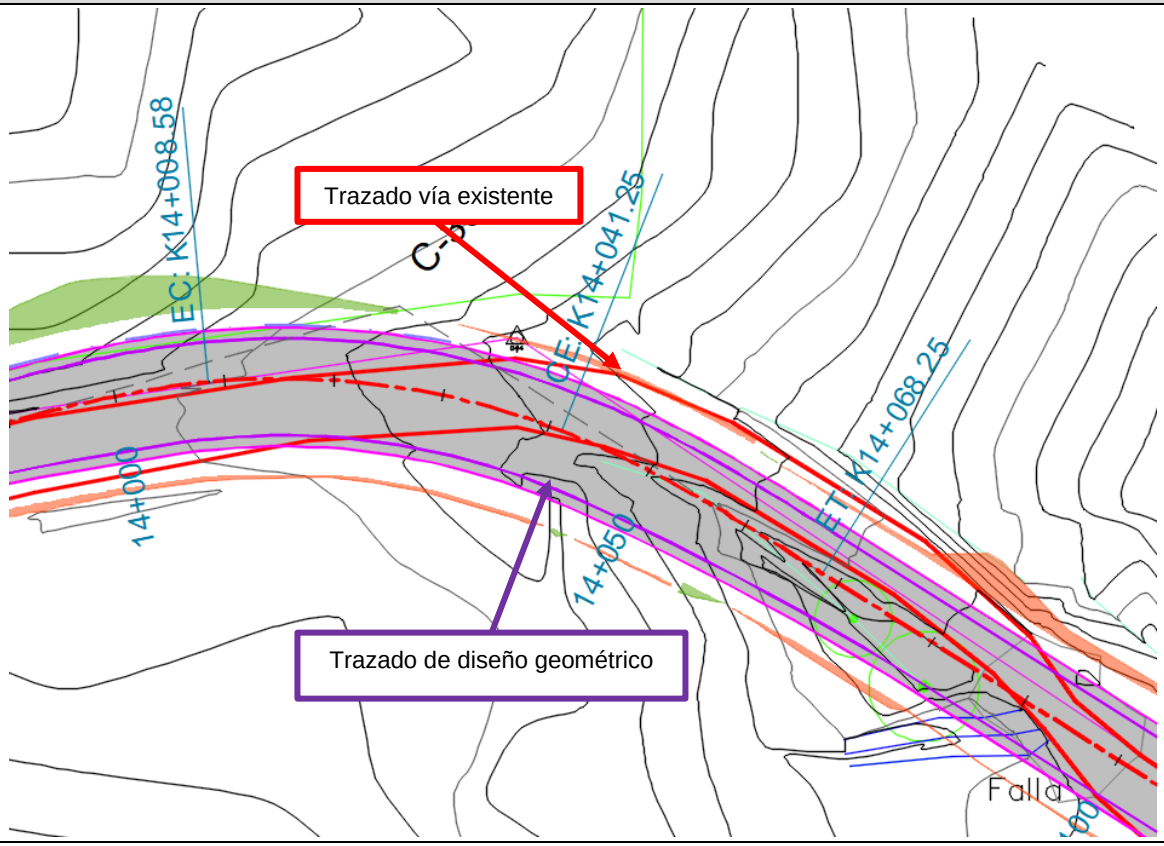
Respecto a los cambios de rasante proyectados se hace oportuno aclarar que, dados los requerimientos geométricos, se presentarán sectores en los cuales el planteamiento geométrico proyectado difiere significativamente del corredor vial exístete, y, por ende, se requiere la conformación de una plataforma de trabajo nueva en función de los lineamientos técnicos establecidos en el Art. 220-22 de las Especificaciones Generales de Construcción del INVIAS. Lo anterior, se presenta de forma ilustrativa en la Tabla 12-3.

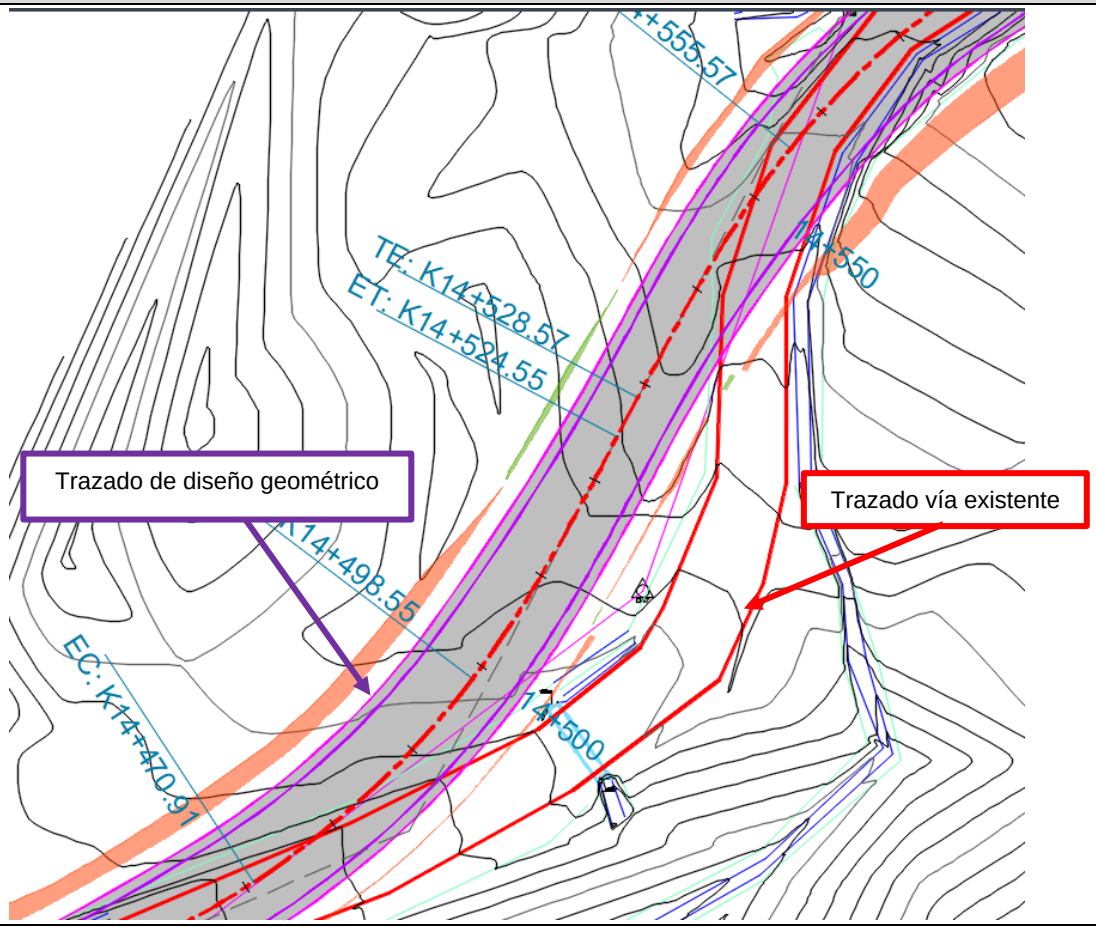
Tabla 12-3. Modificaciones geométricas por fuera del trazado existente.

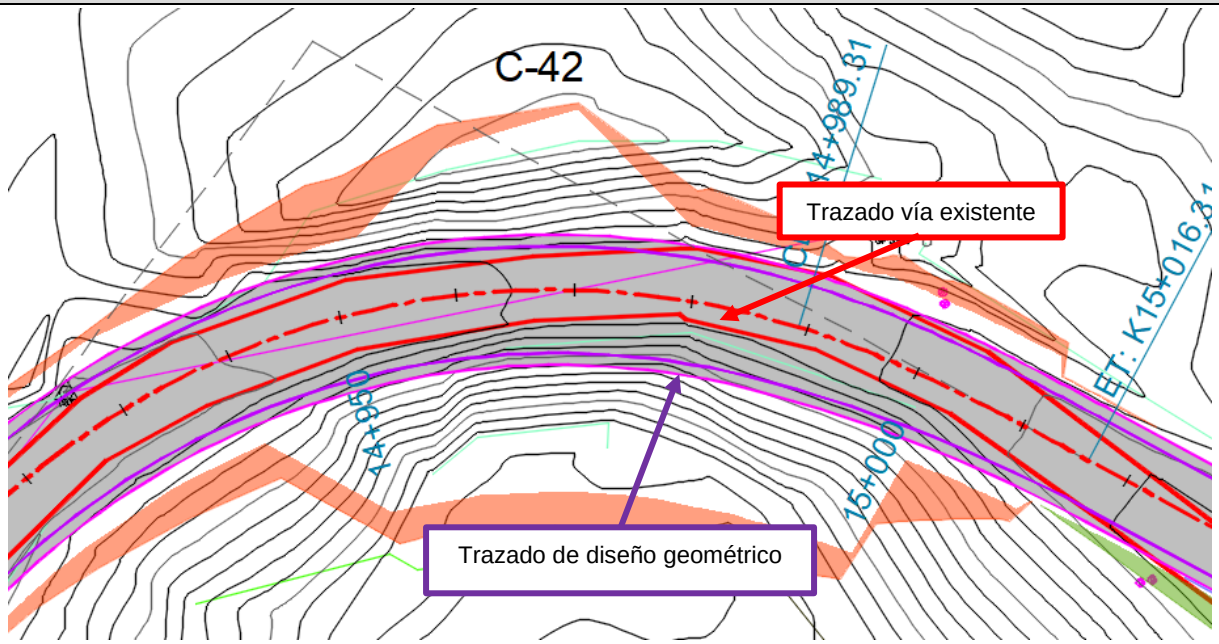
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K13+300	K13+380	80	

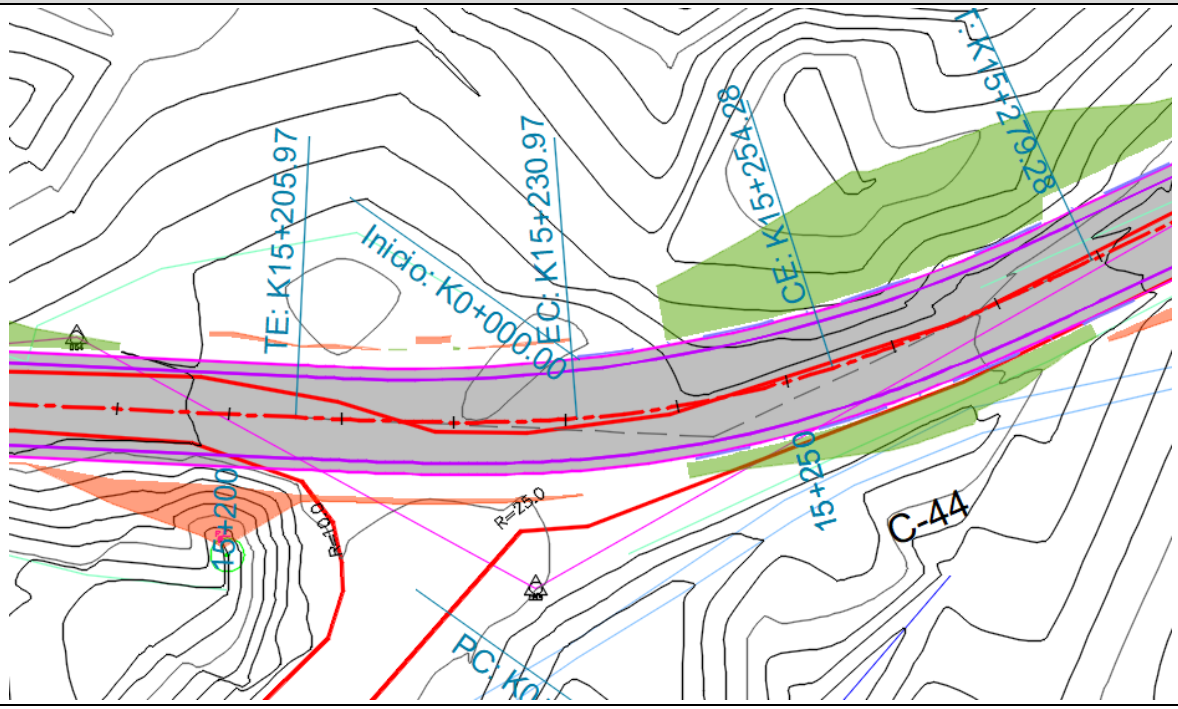
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K13+420	K13+480	60	

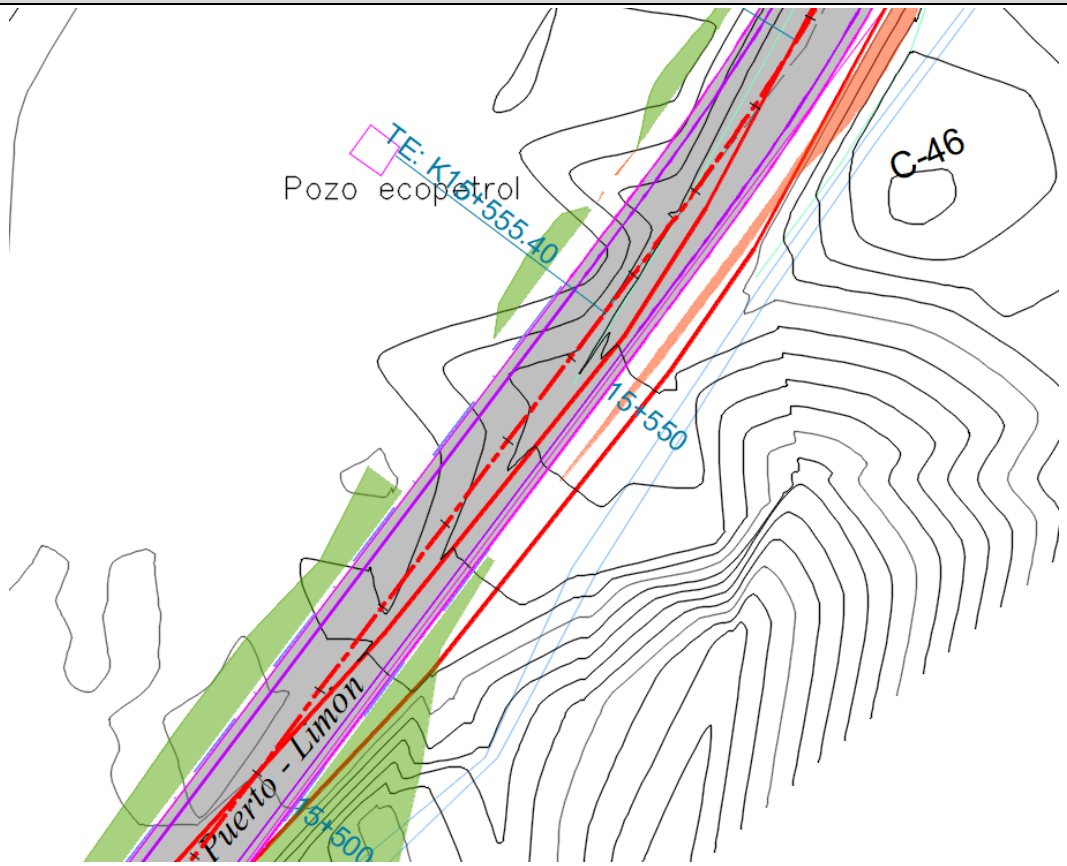
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K13+570	K13+720	150	

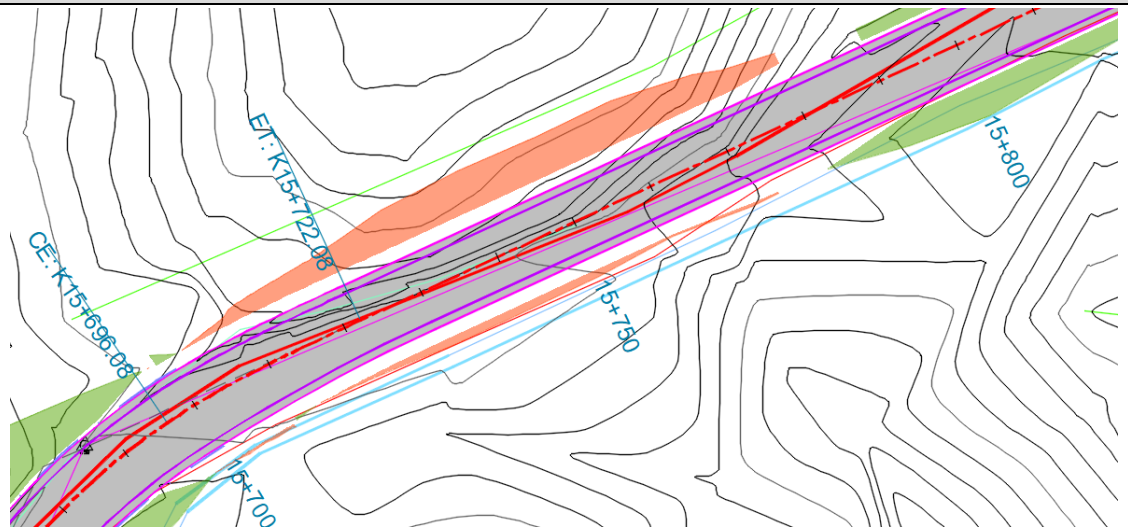
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K14+010	K14+140	130	

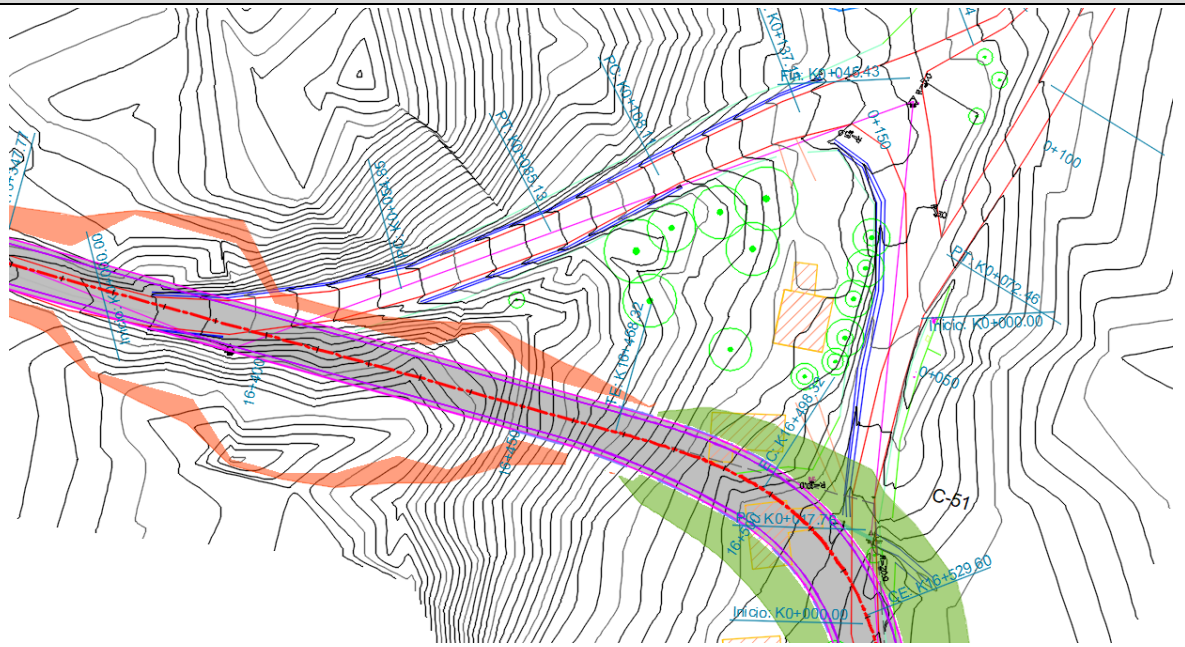
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K14+470	K14+910	440	

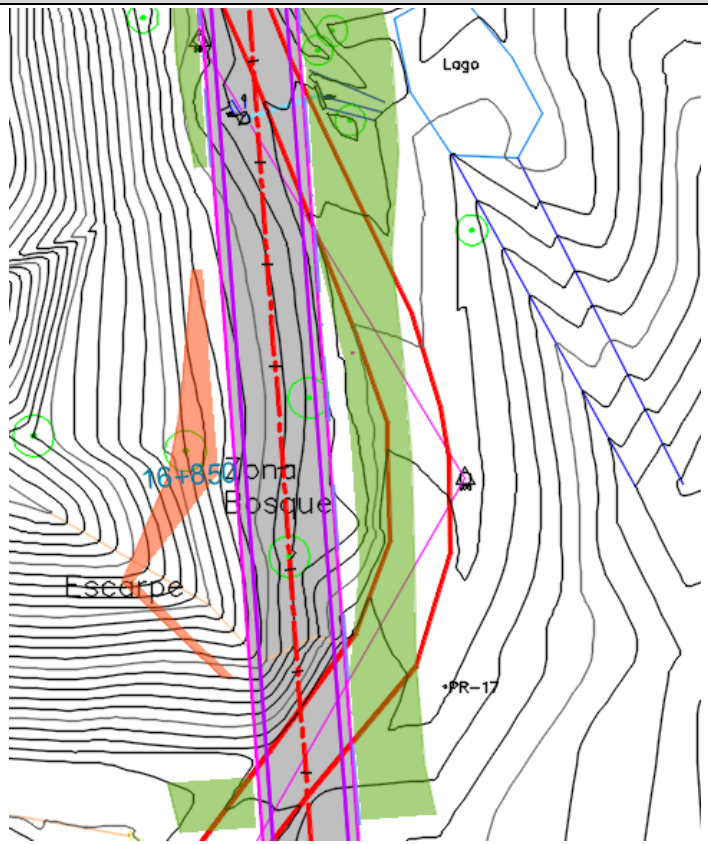
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K14+990	K15+050	60	

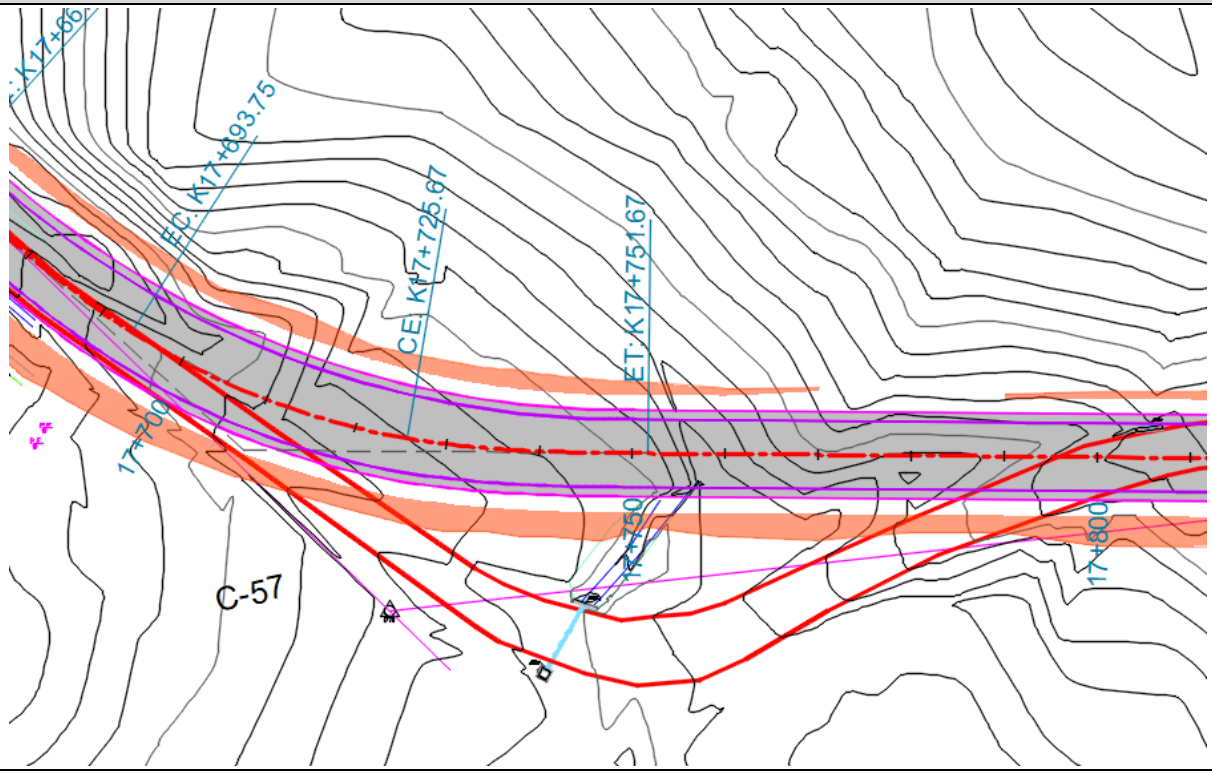
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K15+200	K15+270	70	

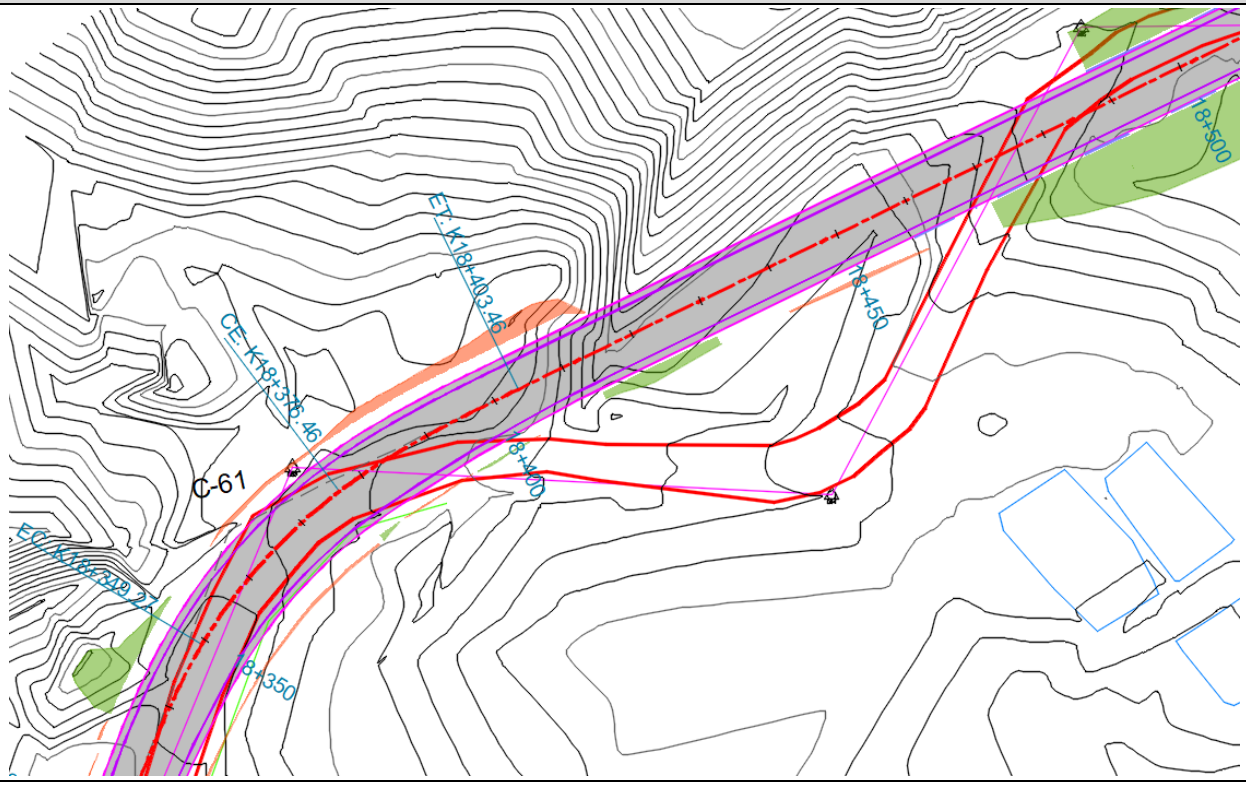
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K15+490	K15+630	140	

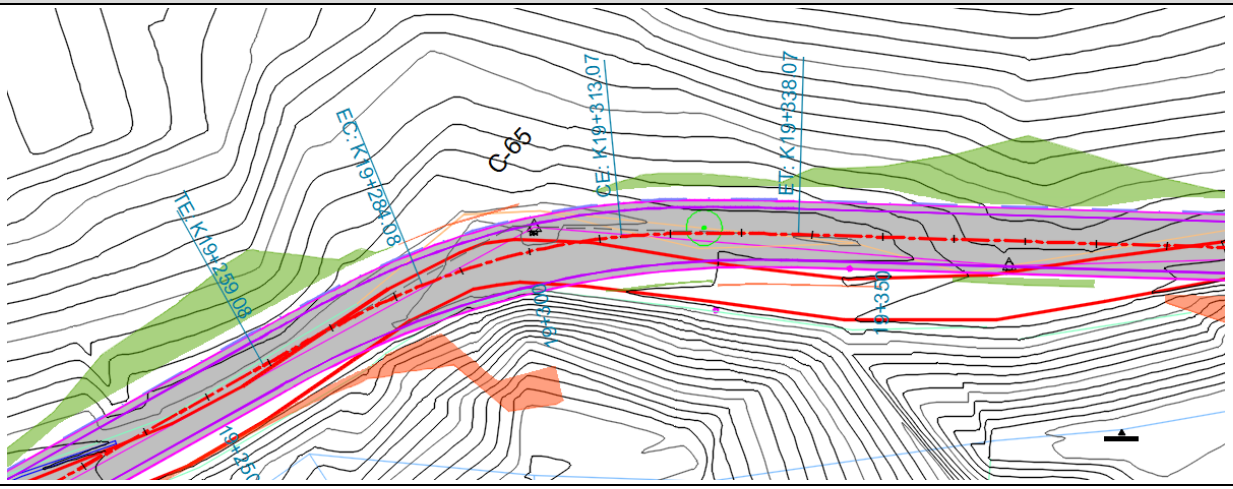
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K15+700	K15+910	210	

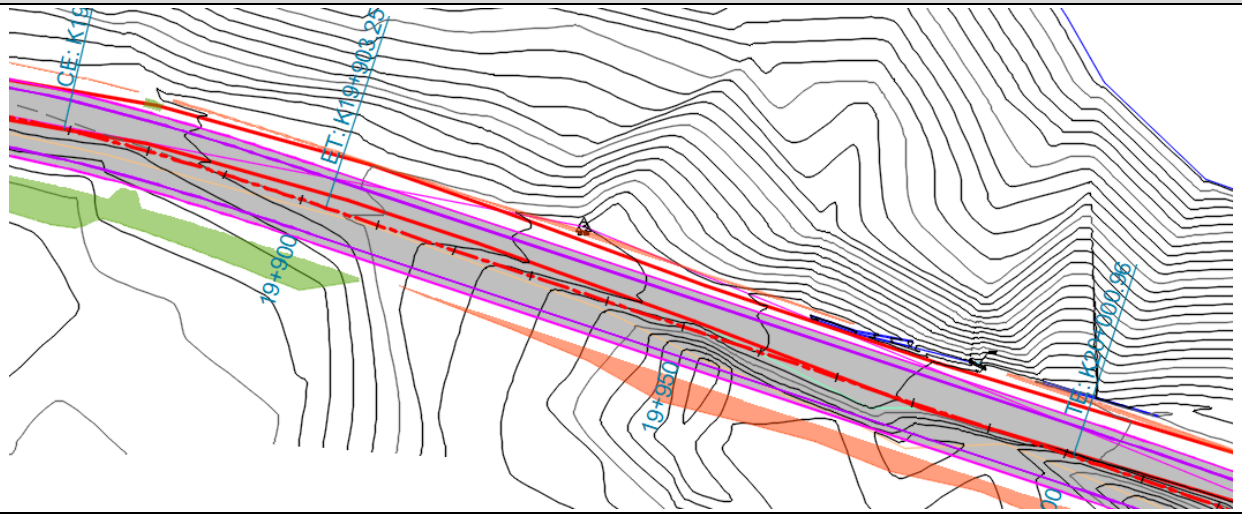
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K16+330	K16+570	240	

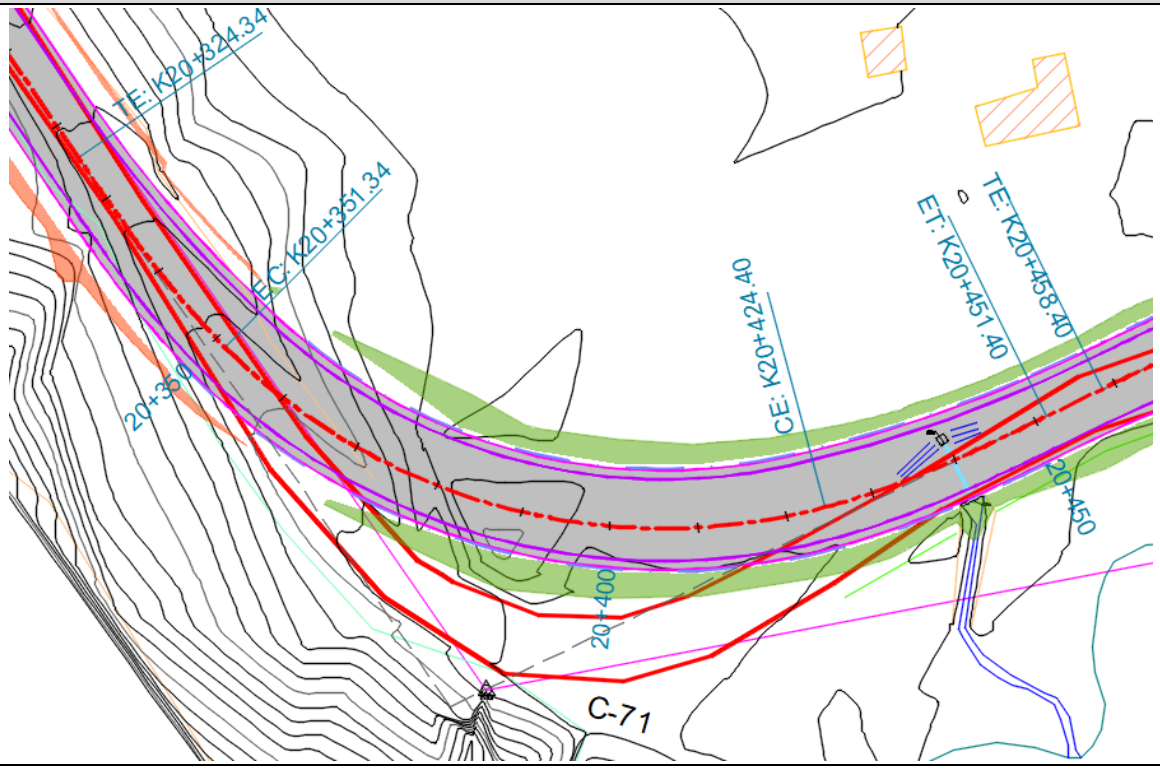
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K16+670	K17+450	780	

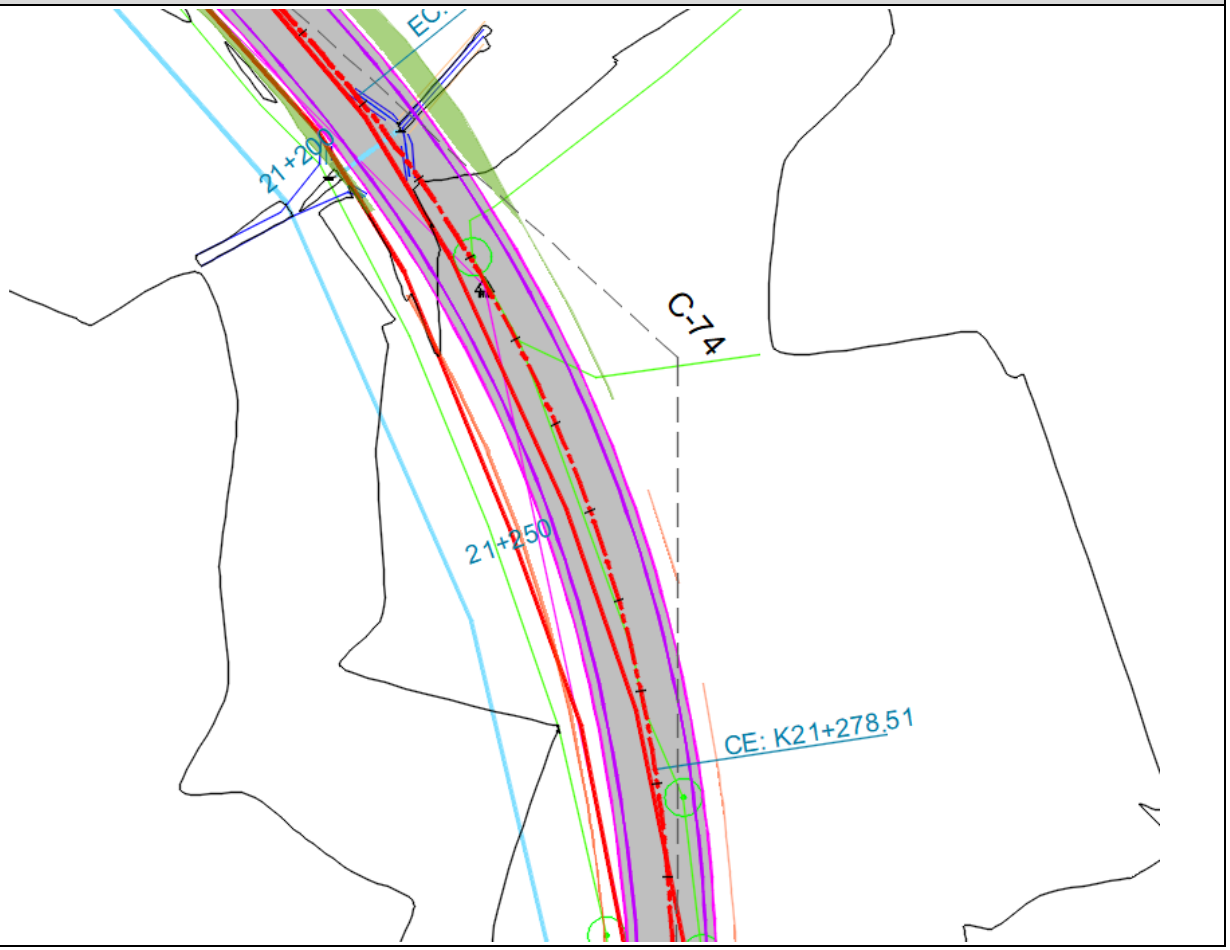
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K17+700	K18+010	310	

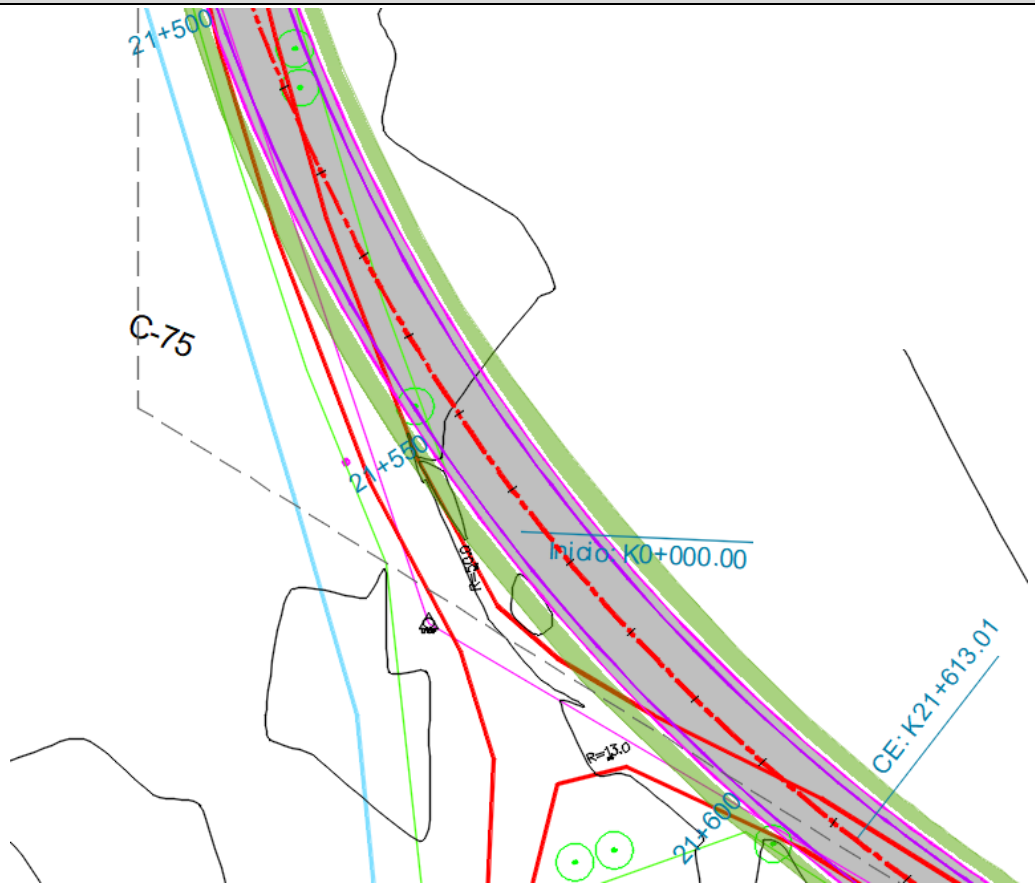
Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K18+340	K19+110	770	

Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K19+260	K19+590	330	

Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K19+850	K20+140	290	

Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K20+310	K20+610	300	

Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K21+220	K21+310	90	

Inicio	Fin	Longitud (m)	Evidencia
K21+500	K21+660	160	

En función de lo anterior, en los sectores a relacionados no se considerará espesor alguno de granular existente, es decir, se tendrá que hacer el mejoramiento de la subrasante con adición de materiales granulares (Artículo 230-22) e inclusión de material tipo subbase granular Clase A (Artículo 320-22) garantizando una adecuación de la plataforma de trabajo y a su vez un módulo equivalente de mínimo 100 MPa en las zonas de llenos y de 45MPa en las zonas de corte.

En consecuencia, en la Ilustración 12-2 se presentan los cambios de rasante y los espesores de material granular existente que podrían ser aprovechados para la conformación de la plataforma de trabajo que servirá para la implantación de las estructuras de pavimento proyectadas.

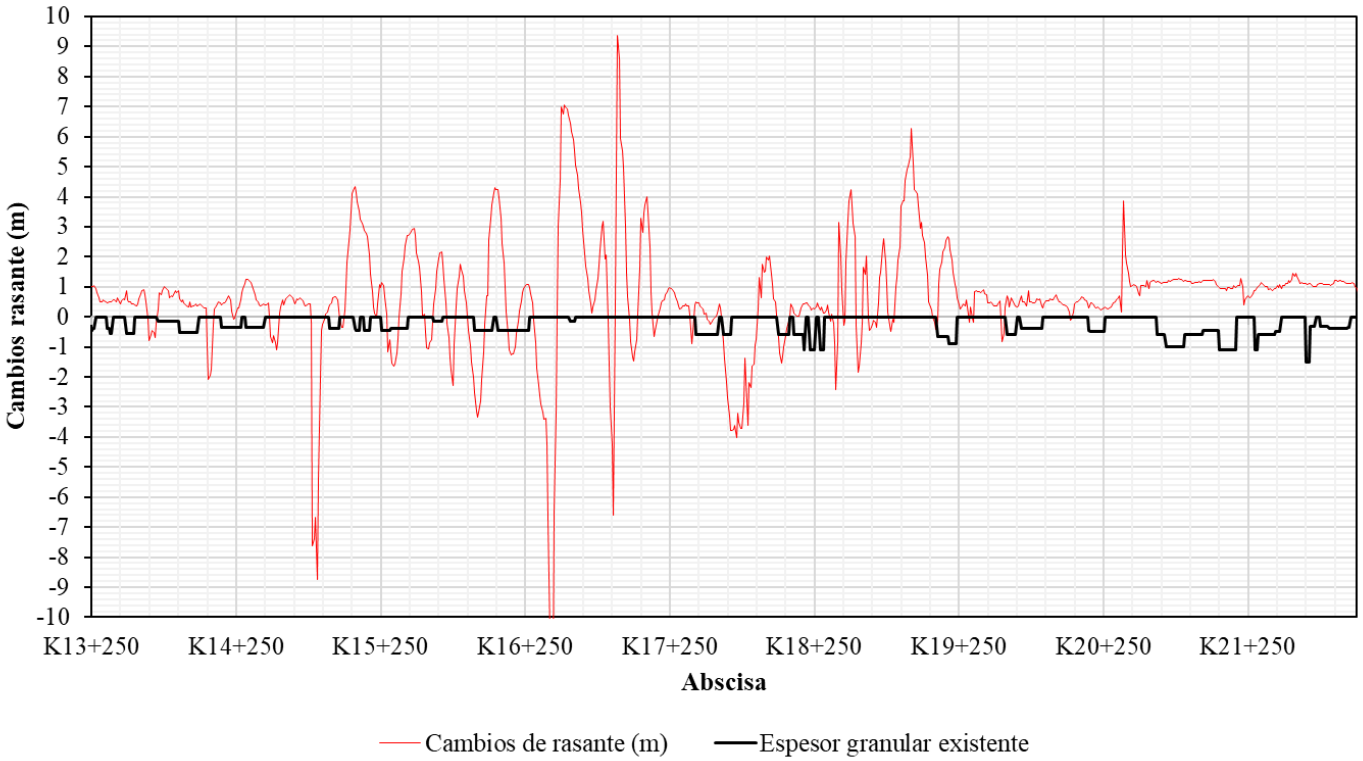


Ilustración 12-2. Cambios de rasante y espesores de material granular existente. Considerando la implantación de la estructura de pavimento rígido de 21cm (21cm MR45 + Adecuación plataforma de trabajo 100MPa en zonas de lleno o 45MPa en zonas de corte con inclusión de 20cm de Subbase Granular Clase A entre la adecuación de la plataforma de trabajo y losa de concreto).

De lo anterior, se aclara la rasante proyectada desde el componente geométrico contempla la implantación de la estructura de pavimento rígido, por lo que la rasante proyectada para el pavimento flexible será 14cm mayor a la indicada con anterioridad.

En consecuencia, los análisis que se desarrollarán a continuación para la conformación de la plataforma de trabajo de mínimo 100 MPa en las zonas de llenos y de 45MPa en las zonas de corte aplicable para ambas alternativas.

12.1 ADECUACIÓN DE LA PLATAFORMA DE TRABAJO PARA UN MÓDULO EQUIVALENTE DE 100 MPa

Teniendo en cuenta el valor de soporte de la subrasante en términos de CBR (entre 1.34% y 1.50%) e identificados los sectores en los cuales se podrá hacer el aprovechamiento de los materiales granulares existentes con capacidad de soporte en términos de CBR (14%), se procede a validar inicialmente si el espesor de granular existente es suficiente para obtener un módulo equivalente de 100 MPa o en caso contrario determinar el espesor de material de mejoramiento (Art. 230-22) o conformación de terraplén mediante el uso de Subbase Granular Clase A (Art. 320-22) que permita llegar a dicho valor mínimo o 45MPa en las hipótesis de diseño.

Para dicho análisis se emplea la metodología de Ivanov, la cual se resume a continuación.

$$E_{eq} = \frac{E_{sbr}}{1 - \frac{2}{\pi}\left(1 - \frac{1}{n^{3.5}}\right) tan^{-1}\left(n \frac{e_{mej}}{2a}\right)} \qquad n = \sqrt[2.5]{E_{mej} / E_{sbr}}$$

Ecuación 31

Donde:

E_{eq} = Módulo elástico equivalente del sistema, kg/cm²
E_{sbr} = Módulo elástico de la subrasante, kg/cm²
e_{mej} = Espesor de la capa de mejoramiento, cm
a = Radio del área de carga, 15.05cm
n = Parámetro adimensional determinado con la expresión

Es de anotar que, el valor máximo que puede alcanzar el módulo del granular existente se limita a 95.4 MPa considerando un CBR de 14% (Valor establecido en el numeral 6.2) a partir de la siguiente ecuación:

$$E = 2555CBR^{0.64}\ (psi)$$

Ecuación 32

Donde:

E= Módulo del granular, (psi)

CBR = Capacidad de soporte del material, (%)

Adicionalmente, se considerará la remoción de 10cm del material granular existente con el objeto de garantizar un proceso de reconformación y nivelación de la superficie actual, es de anotar que dicho espesor removido (10cm) será compensado con material que se requiera para la conformación de la estructura del terraplén (Art. 220-22).

Finalmente, la conformación de terraplén con Subbase Granular Clase A Art. 320-22) se limita a 115MPa considerando un CBR de 40% y cuyo soporte se desarrolló en el numeral 2.1.7.4 Subbase Granular (SBG-A), a= 0.12.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Tabla 12-4 se presenta, a modo de ejemplo, el cálculo del módulo equivalente entre el K13+250 al K22+350.

Tabla 12-4. Cálculo del módulo combinado de la subrasante y granular existente. Metodología de Ivanov. Módulo 100 MPa o 45MPa.

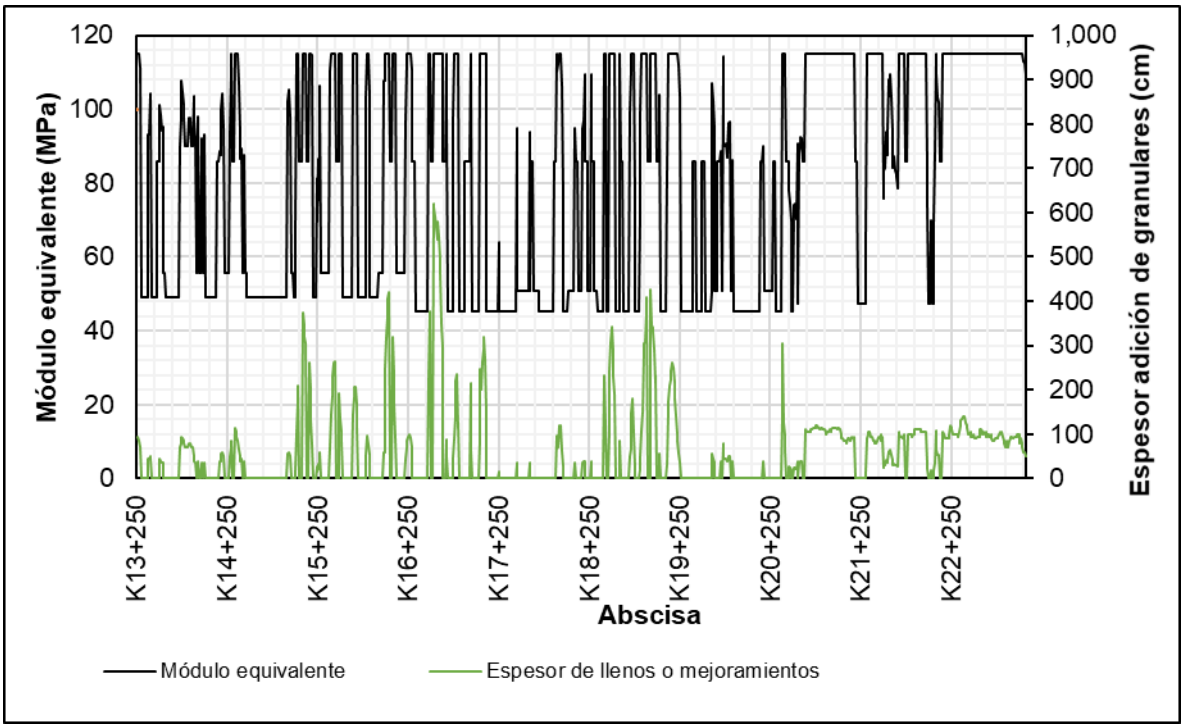
Abscisa	Cambio de rasante (m)	Espesor granular existente (cm)	CBR de subrasante (%)	Módulo de subrasante (MPa)	Módulo granular existente o mejoramiento de subrasante (Mpa)	Conversación Granular existente o mejoramiento de subrasante (cm)	Módulo combinado de Subrasante+Mejoramiento	Módulo equivalente	Conformación terraplén en SBG-A		Módulo combinado de Subrasante+terraplén	Comentario
							MPa	MPa	MPa	(cm)	(Mpa)	
K13+260	1.02	-0.45	1.65	16.5	95.4	30.79	47.0	47.0	115.0	95.00	115	-
K13+270	1.03	-0.45	1.65	16.5	95.4	31.82	48.0	48.0	115.0	95.00	115	-
K13+280	0.95	-0.40	1.65	16.5	95.4	29.07	45.3	45.3	115.0	85.00	115	-
K13+290	0.79	-0.40	1.65	16.5	95.4	28.47	44.7	44.7	115.0	70.00	111	-

Abscisa	Cambio de rasante (m)	Espesor granular existente (cm)	CBR de subrasante (%)	Módulo de subrasante (MPa)	Módulo granular existente o mejoramiento de subrasante (Mpa)	Conversación Granular existente o mejoramiento de subrasante (cm)	Módulo combinado de Subrasante+Mejoramiento	Módulo equivalente	Conformación terraplén en SBG-A		Módulo combinado de Subrasante+terraplén	Comentario
							MPa	MPa	MPa	(cm)	(Mpa)	
K13+300	0.64	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+310	0.51	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+320	0.51	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+330	0.58	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+340	0.55	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+350	0.50	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+360	0.45	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+370	0.50	0.00	1.65	16.5	76.9	40.00	49.2	49.2	115.0	0.00	49	Mejoramiento subrasante (Art. 230-22)
K13+380	0.51	-0.40	1.65	16.5	95.4	25.29	41.4	41.4	115.0	45.00	93	-
K13+390	0.51	-0.40	1.65	16.5	95.4	25.24	41.3	41.3	115.0	45.00	93	-
K13+400	0.57	-0.55	1.65	16.5	95.4	40.53	56.3	56.3	115.0	50.00	104	-

Nota: En el caso de mejoramientos de la subrasante con adición de materiales (Art. 320-22), se deberá garantizar como mínimo un espesor de 40cm de dichos materiales previo a la implantación de la estructura de pavimento anteriormente dimensionadas. (MR o Pavimento flexible + Base y/o subbase granular).

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma, en la Ilustración 12-3, se presenta la variación del módulo equivalente a lo largo del corredor considerando los cambios de rasante, espesores granulares existentes (-10cm) e inclusión, de mejoramientos (Art. 230-22) y llenos con material tipo Subbase Granular SBG-A para garantizar una plataforma de trabajo apropiada (Módulo equivalente de 45MPa y/o 100MPa).



Nota: Análisis considerando los cambios de rasante proyectados en el eje de la vía.

Ilustración 12-3. Módulo equivalente y material granular adicional para garantizar cambios de rasante para garantizar un módulo equivalente entre 45MPa y 100MPa.

El soporte numérico de lo expuestos anteriormente se presenta adjunto en el Anexo 6 "*Memorias de cálculo"* con lecturas cada 10 metros lineales con los espesores de material granular existente mínimo a conservar, excavaciones y espesores de incorporación de material granular tipo Subbase Granular Clase A (Art. 320-22) y/o de mejoramientos de la subrasante con adición de materiales (Art. 230-22) para la conformación de la plataforma de trabajo con el objeto de garantizar como mínimo 45MPa y/o 100MPa.

De igual forma, en la Tabla 12-5 se presenta la sectorización del corredor en función de los espesores requeridos para la conformación de la plataforma de trabajo. Nótese qu en

aproximadamente 47% del corredor se requeriría la incorporación de material para mejorar la capacidad de soporte de la subrasante (CBR ≥10% Art. 230-22) y el 53% faltante corresponderá a la conformación del terraplén (uso de Subbase Granular Clase A Art.330-22) y cuyas alturas están regidos principalmente por los cambios de rasante proyectados desde el componente geométrico.

Tabla 12-5 Sectorización del corredor en función de los espesores requeridos para conformación de la plataforma de trabajo.

Tipo de intervención	Longitud (m)	Porcentaje	Comentario
Geometría	4,300	47%	La conformación del terraplén se realiza con Subbase Granular Clase A (Art. 330-22)
Mejoramiento	4,810	53%	Mínimo 40cm de mejoramiento de la subrasante con adición de materiales (CBR>10%) Art.230-22 y posterior conformación de terraplén
Total	9,110	100%	-

Fuente: Elaboración propia a partir de proyección geométrica.

13 SECCIONES TRANSVERSALES TIPO

A continuación, se presenta de forma esquemática las secciones tipo prevalentes a lo largo del corredor para la implantación de la estructura de pavimento rígido recomendada.

13.1 ADECUACIÓN PLATAFORMA DE TRABAJO: Incorporación de material mejoramiento (Art. 230-22)

El primer escenario, corresponderá a aquellos sectores en los cuales se requiere la adición de material granular para el mejoramiento en capacidad de la plataforma de trabajo existente, es decir, sectores en los cuales el material granular existente es insuficiente o nulo y por lo tanto se requiere la adición de material granular que cumpla con los requerimientos de calidad establecidos en el Artículo 230-22. En la Ilustración 13-1 se presenta a modo de ejemplo la sección tipo representativa del escenario anteriormente descrito.

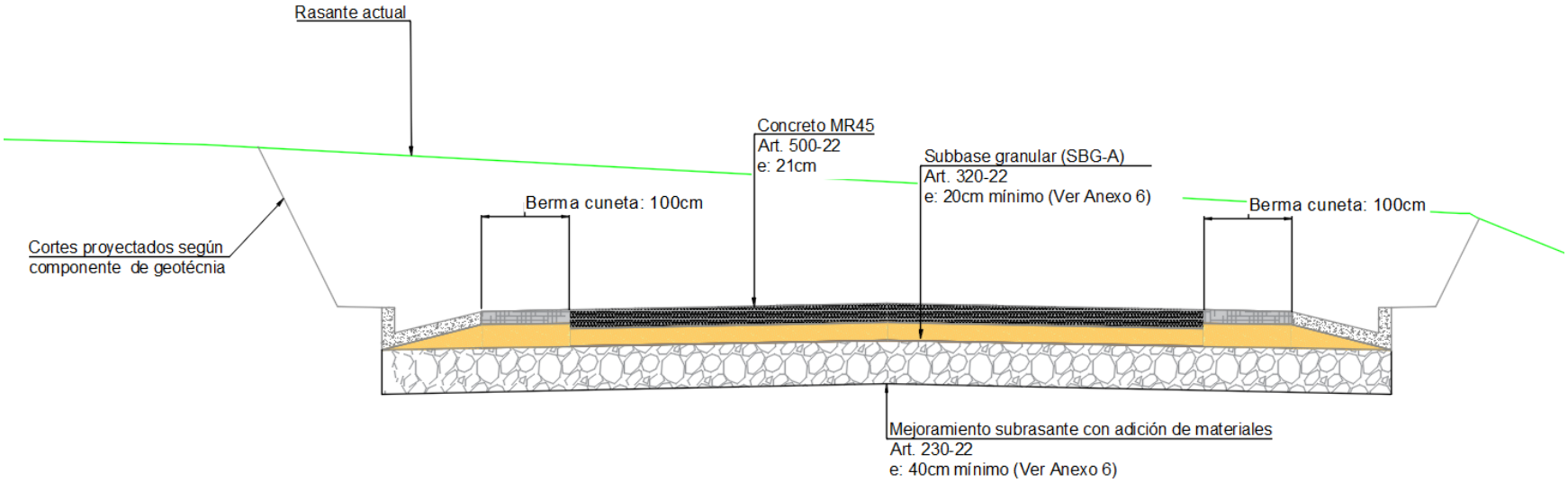


Ilustración 13-1. Sección transversal tipo sobre zonas de corte o ausencia de material granular existente.
Fuente: Elaboración propia a partir de proyección geométrica.

Los sectores que requieren dicha intervención corresponden a los relacionados en la Tabla 13-1.

Tabla 13-1. Sectores que requieren mejoramiento con adición de materiales.

Inicio	Fin
K13+300	K13+380
K13+420	K13+480
K13+570	K13+730
K14+010	K14+140
K14+150	K14+160
K14+470	K14+920
K14+990	K15+050
K15+200	K15+280
K15+490	K15+640
K15+700	K15+920
K16+310	K16+500
K16+530	K16+580

Inicio	Fin
K16+620	K16+640
K16+670	K16+880
K16+940	K17+450
K17+610	K17+640
K17+700	K17+870
K17+890	K18+020
K18+100	K18+130
K18+210	K18+240
K18+280	K18+310
K18+340	K18+600
K18+620	K18+900
K18+930	K19+000

Inicio	Fin
K19+030	K19+120
K19+260	K19+400
K19+430	K19+520
K19+530	K19+600
K19+850	K20+140
K20+150	K20+160
K20+280	K20+430
K20+460	K20+610
K21+220	K21+320
K21+500	K21+670
K21+980	K22+120

Fuente: Elaboración propia.

13.2 ADECUACIÓN PLATAFORMA DE TRABAJO: Ampliaciones de terraplén

De igual forma, para todo el corredor se deberá tener en cuenta que debido a los aumentos de rasante es posible que se generen sectores que requieran la ampliación del terraplén, por lo cual se deberán realizar llaves de empalme cuya sección tipo se presenta

en la Ilustración 13-2. En aquellas zonas donde se identifique que el ancho de la calzada proyectada genere pequeños sobre anchos con respecto a la condición topográfica actual del corredor, se recomienda sobre la base del chaflan de terraplén nuevo la ejecución de una llave de empalme la cual contará con una altura mínima de 0.50 m y un ancho mínimo de 1.0 m o adaptado a las condiciones topográficas del terraplén existente. Con lo anterior se garantiza que el hombro del terraplén proyectado no se cimente sobre cobertura vegetal y/o material suelto del terraplén existente. A su vez, las caras del terraplén se deberán proteger con grama (césped) para prevenir su inestabilidad producto del intemperismo.

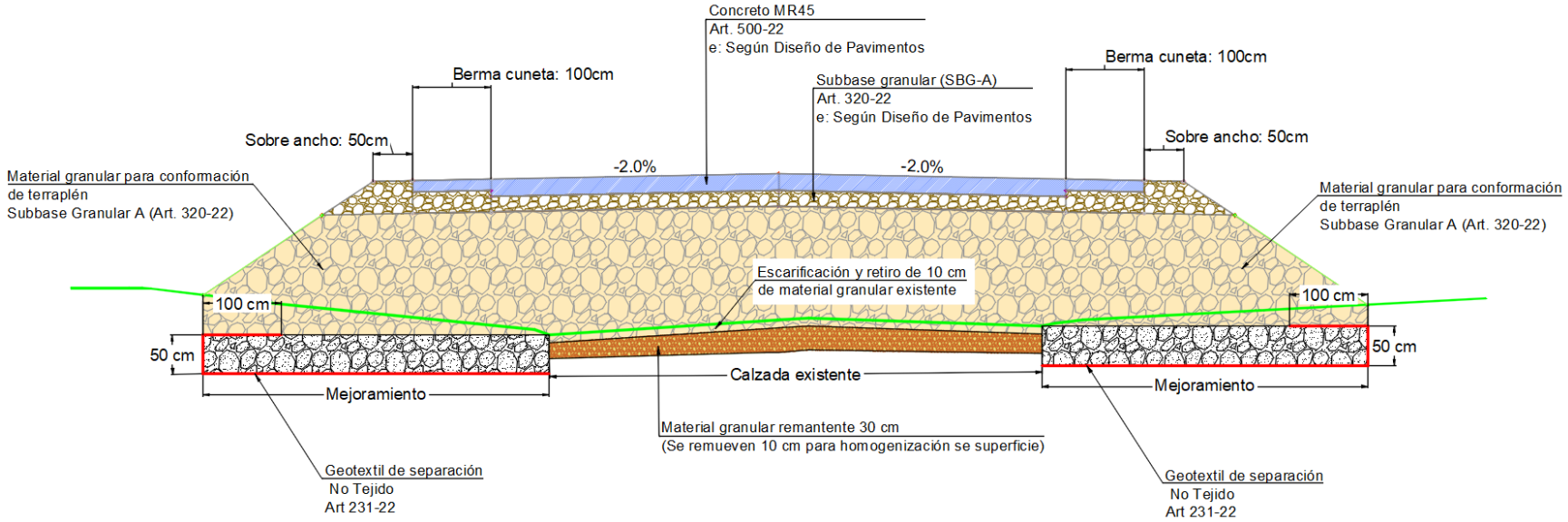


Ilustración 13-2. Implantación estructura de pavimento propuesta sobre materiales existentes y conformación de llave de empalme donde el ancho de calzada proyectada por diseño geométrico genere un pequeño sobre ancho con respecto a las condiciones topográficas del terraplén existente.

13.3 IMPLANTACIÓN SOBRE OBRAS HIDRÁULICAS

Debido a los cambios de rasante proyectados para garantizar el recubrimiento mínimo de las obras hidráulicas, en la Ilustración 13-3 se presenta la sección transversal tipo para la implantación de la estructura de pavimento.

Es de anotar que esta sección es aplicable para todas las obras hidráulicas a implantar a lo largo del corredor y cuyo recubrimiento sea igual o mayor a 80cm (diferencia entre cota del lomo de la tubería y rasante proyectada).

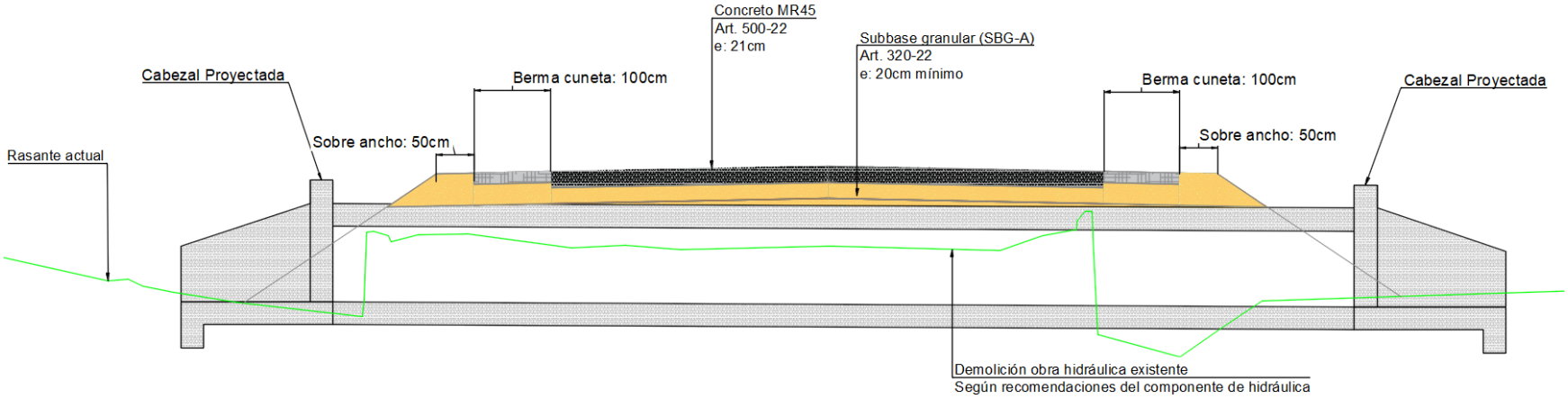


Ilustración 13-3. Sección trasversal tipo sobre obras hidráulicas.

14 PROCESO CONSTRUCTIVO

Los procesos generales requeridos para la construcción de cada una de las capas que conforman las estructuras de pavimento a lo largo del corredor se relacionan en los siguientes incisos.

14.1 ADECUACIÓN DE LA PLATAFORMA DE TRABAJO (RAJÓN O CRUDO DE RÍO (ART. 230-22) O MATERIAL GRANULAR PARA CONFORMACIÓN DE TERRAPLENES (ART. 220-22)

Ante la necesidad de alcanzar un módulo equivalente de 50 MPa en la plataforma de trabajo y producto de los cambios de rasante proyectados, se hace necesario realizar una adecuación de la plataforma de trabajo en los espesores relacionados en el Anexo 6.1 "*Adecuación de la plataforma de trabajo".*

Una vez finalizada la excavación, el material del cuerpo del mejoramiento se colocará en capas sensiblemente paralelas a la superficie de la explanación, de espesor uniforme y lo suficientemente reducido, para que, con los medios disponibles, los vacíos entre los fragmentos más grandes se llenen con las partículas más pequeñas del mismo material, de modo que se obtenga el nivel de densificación deseado y sin evidencias visibles de que se requiera de una mayor consolidación en el material.

Cuando sea Rajón o Crudo de Río (Art. 230), éste se colocará directamente en la excavación, evitando su vertido desde alturas mayores a dos metros (2.0 m), con el fin de reducir su segregación. Deberá extenderse con procedimientos manuales o con equipos livianos (buldózer D5 máximo o equipo equivalente o con retroexcavadora). Se podrá compactar con pasadas de buldózer o retroexcavadora (tracking de D5 o D6 o equipo equivalente), de manera que las puntas del rajón penetren parcialmente en el terreno natural.

De igual forma, se recomienda que durante el proceso de hincado del Rajón o Crudo de río, se debe realizar la verificación del porcentaje de penetración en las subrasantes blandas, que a su vez deberá complementarse hasta alcanzar el espesor efectivo de mejoramiento recomendado en los estudios y diseños presentados en este documento.

En el caso de terraplenes cimentados sobre afirmados, se deben escarificar al menos diez centímetros (10 cm) del material, para garantizar la homogenización de la superficie

existente. Dicho espesor deberá ser compensado con material requerido para la conformación de la estructura del terraplén (Art. 220-22).

14.2 INSTALACIÓN DE CAPAS DE SUBBASE GRANULAR CLASE A

La instalación de las capas de base y subbase granular se realizarán cuando la superficie sobre la cual quedarán apoyadas presente la calidad, densidad, cotas y secciones indicadas dentro de los documentos del proyecto, previamente deberá estar concluido todo lo relacionado con los sistemas de drenaje recomendados de acuerdo con el Estudio y Diseño de Redes.

La superficie donde se dispondrá el material se deberá encontrar suficientemente seca y compacta para evitar que se produzcan ahuellamientos o desplazamientos en ella. El material se extenderá en todo el ancho previsto, en una capa de espesor uniforme que permita obtener el espesor y grado de compactación exigidos.

La cantidad de material extendido será tal, que el espesor de la capa compactada nunca resulte inferior a cien milímetros (100 mm) ni superior a doscientos milímetros (200 mm). Si el espesor por construir es superior a doscientos milímetros (200 mm), el material se deberá colocar en dos (2) o más capas, debiéndose procurar que el espesor de ellas sea aproximadamente igual y nunca inferior a cien milímetros (100 mm). En este caso, se aplicarán para cada capa los procedimientos de ejecución y control acá descritos. El material extendido deberá mostrar una distribución granulométrica uniforme, sin segregaciones evidentes.

Una vez que el material de la capa granular tenga la humedad apropiada, se conformará ajustándose razonablemente a los alineamientos y secciones típicas del proyecto y se compactará con el equipo adecuado, hasta alcanzar la densidad especificada.

Aquellas zonas que, por su reducida extensión, su pendiente o su proximidad a obras de arte no permitan la utilización del equipo aprobado y/o que normalmente se utiliza, se podrán compactar por otros medios adecuados, en forma tal que las densidades secas que se alcancen no sean inferiores a las obtenidas en el resto de la capa.

La compactación se efectuará longitudinalmente, comenzando por los bordes exteriores y avanzando hacia el centro, traslapando en cada recorrido un ancho no menor de la mitad del ancho del rodillo compactador. En las zonas peraltadas, la compactación se hará del borde inferior al superior.

Una vez terminada la compactación, el Constructor perfilará la superficie de la capa granular, ajustándola a los perfiles longitudinales y transversales del proyecto.

14.3 INSTALACIÓN CONCRETO HIDRÁULICO MR45

La instalación del concreto se realizará cuando se compruebe que la superficie sobre la cual se va a extender tenga la densidad apropiada, las cotas indicadas en los planos o definidas en el proyecto y módulo de reacción mínimo de 88.3MPa/m establecido en el numeral 10.3.2.

El concreto se extenderá y se compactará por los medios apropiados para garantizar la homogeneidad de la mezcla colocada, evitando la segregación, la aparición de vacíos y logrando alcanzar la densidad adecuada y el contenido de aire especificado.

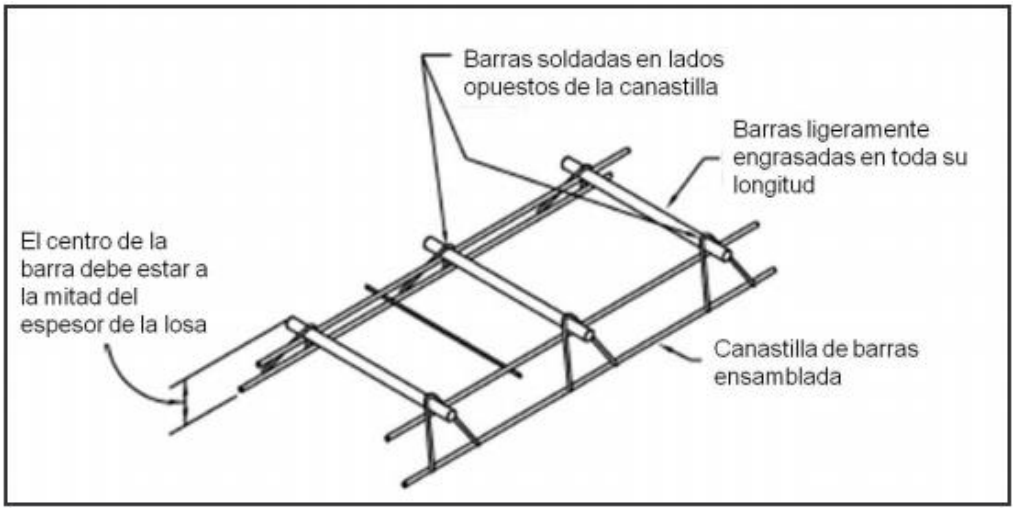
La colocación puede realizarse mediante extendido con formaletas fijas. El concreto debe ser extendido, enrasado y compactado por uno o más equipos, que deben distribuir y compactar uniformemente el concreto, sin segregación de forma que se obtenga la sección requerida con un mínimo de trabajo manual. Sobre el uso de formaletas deslizantes se deduce y se concluye que, para el proyecto que nos atañe y teniendo en cuenta las zonas de trabajo (donde se tienen limitaciones de ancho, restricciones de tráfico, espacio disponible para desplazar el equipo), no se hace posible tener equipos automatizados para la implementación de formaletas deslizantes.

Algunas de las consideraciones para tener en cuenta para los sistemas de colocación de pasadores o barras pasajuntas, se relacionan en los siguientes procedimientos:

- Los pasadores, se podrán colocar las barras pasajuntas previamente al vaciado del concreto mediante canastas metálicas de sujeción, suficientemente sólidas y con uniones soldadas que se fijarán a la base de un modo firme.

- Las barras se deben soldar en la canastilla en forma alternada y las canastas de sujeción deben conservar los pasadores en la posición correcta, durante la colocación y acabado del concreto, mas no deben impedir el movimiento longitudinal de los mismos, como se muestra en la figura a continuación:

Figura 1 Esquema típico barras soldadas en la canastilla



De otra parte y como guía general, se requerirá la colocación de al menos una parrilla de refuerzo en las losas que tengan las siguientes características:

- Longitud de la losa (mayor dimensión en planta) superior a 24 veces el espesor de esta.
- Losas con relación largo/ancho mayor que 1.25.
- Losas de forma irregular (no rectangular)
- Losas con aberturas en su interior para acomodar elementos como pozos de alcantarillado o sumideros.
- Losas en las cuales no coinciden las juntas con las losas adyacentes.

El acero de refuerzo de las losas estará constituido por barras corrugadas con límite de fluencia (fy) de 420 MPa (4200 kg/cm^2). Todos los detalles del refuerzo, como cuantía, distribución, localización se definen en el Anexo 10 "*Modulación de losas."*

15 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se presentan los principales hallazgos y consideraciones técnicas para la rehabilitación del corredor objeto de estudio.

15.1 ESTUDIO DE TRÁNSITO

Se contempla un valor de NESE de 1,228,684 para el dimensionamiento de la estructura de pavimento flexible (periodo diseño de 10 años) y de 2,879,096 ejes equivalentes de 8.2t en un periodo de 20 años para la estructura de pavimento rígido, garantizando una confiabilidad en el diseño y tránsito del 90%, valor que fue previamente establecido en el numeral 2.1.4 Confiabilidad. Los soportes de los cálculos relacionados anteriormente se adjuntan en el Anexo 5 "*Estudio de tránsito"* y Anexo 6 "*Memorias de cálculo".*

15.2 CAPACIDAD DE SOPORTE DE LOS MATERIALES EXISTENTES

Con el objeto de determinar la capacidad de soporte (CBR) de los materiales existentes, se ejecutó el procedimiento descrito en la norma INV E-142-22 "*Relaciones humedad – peso unitario seco en suelos (Ensayo modificado de compactación*)" con el fin de determinar la humedad y grado de compactación óptima para la posterior determinación de la capacidad portante de los suelos haciendo uso del procedimiento descrito en la norma INVIAS INV E-148-22 "*CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestras inalteradas*".

En función de lo anterior, en la Tabla 15-1 se presenta los valores promedios y representativos (Percentil 87.5%) para el material granular existente a lo largo del corredor en estudio y cuya clasificación corresponde a Gravas con presencia de limos (GM y GP-GM).

Tabla 15-1. CBR representativo por tipo de material

APIQUE	SUCS	Prof (m)		DENSIDAD SECA MÁXIMA	DENSIDAD (kN/m3)			CBR (%)		
		inicio	fin	(kN/m3)	98%	95%	93%	98%	95%	93%
AP-20 (K12+350)	GP-GM	0.00	0.55	21.93	21.5	20.8	20.4	48.0	8.1	-
AP-AF-3 (K20+850)	GP-GM	0.00	0.60	21.92	21.5	20.8	20.4	107.8	64.8	36.2

APIQUE	SUCS	Prof (m)		DENSIDAD SECA MÁXIMA	DENSIDAD (kN/m3)			CBR (%)		
		inicio	fin	(kN/m3)	98%	95%	93%	98%	95%	93%
AP-AF-6 (K21+600)	GP-GM	0.00	0.60	21.48	21.1	20.4	20.0	66.0	29.6	5.3
Promedio								73.9	34.2	20.7
Desviación estándar								30.7	28.6	21.8
Percentil 87.5%								52.5	13.5	9.2

Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, de los ensayos de caracterización adjuntos en el Anexo 4 "*Resultados de laboratorio"*, se validan los valores de resistencia mecánica (CBRs Método I) para los materiales granulares (GM, GP-GM). De los cuales se resalta un valor característico de 14.16 % a partir de un grado de compactación del 95 % del ensayo Proctor.

Por lo que, para efectos de desarrollo del diseño, se considera pertinente adoptar un valor característico de 14% para los materiales gravosos (GM, GP-GM) que se encuentran actualmente dispuestos como capa de rodadura entre el K13+250 al K22+350.

15.3 ALTERNATIVA DE INTERVENCIÓN RECOMENDADA

Dadas las limitantes geométricas existentes producto de los revestimientos mínimos que se requieren para la implantación de la tubería de las distintas obras de drenaje que se van a desarrollar a lo largo del corredor, desde el componente geométrico, se proyecta un aumento de rasante promedio de 1.0 metros a lo largo del corredor.

Tras el análisis de las actividades de mantenimiento que requieren las estructuras de pavimento (Flexible y rígido), a nivel presupuestal, el impacto de los mantenimientos correctivos que requiere el pavimento asfáltico para garantizar valores de IRI entre 3.0m/km y 4m/km hacen que dicha alternativa sea económicamente más costosa en un periodo de 20 años respecto a la construcción de la estructura de pavimento rígido que requerirá para el mismo periodo de servicio (20 años), el reemplazo localizado de 2% de las losas (a partir del año 7) y mantenimientos programados para la limpieza y resellado de las juntas (cada 5 años).

En función de la interpretación geotécnica, características particulares del corredor y análisis de mantenimientos anteriormente descritas, se obtiene como resultado que la estructura de pavimento idónea para la construcción del corredor corresponde a la adjunta en la Ilustración 15-1.

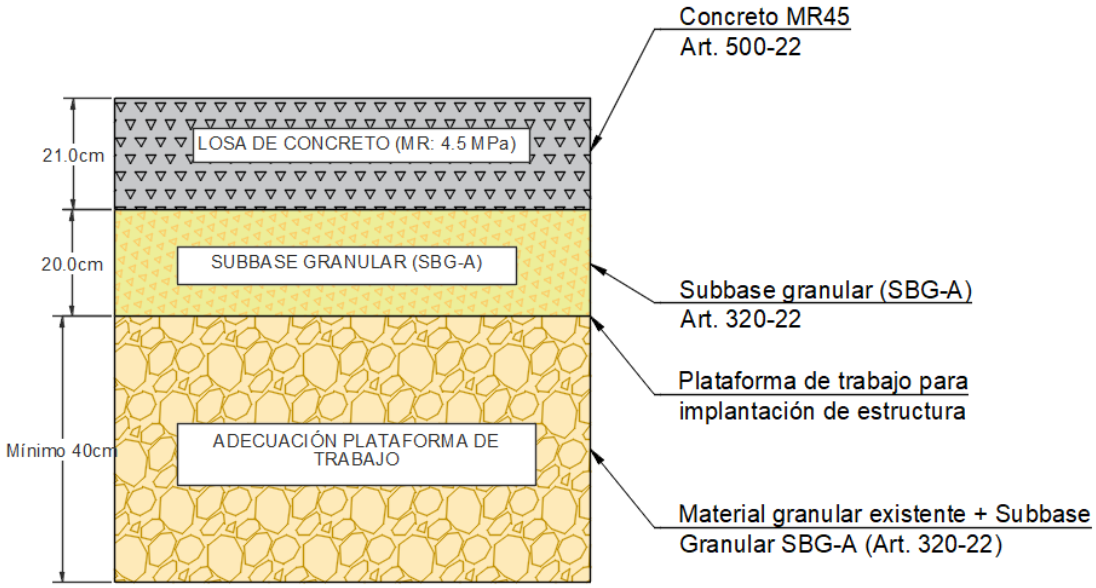


Ilustración 15-1. Sección tipo de la estructura de pavimento recomendada - Conformación de terraplenes. Entre el K13+250 al K22+350.

Fuente: Elaboración propia.

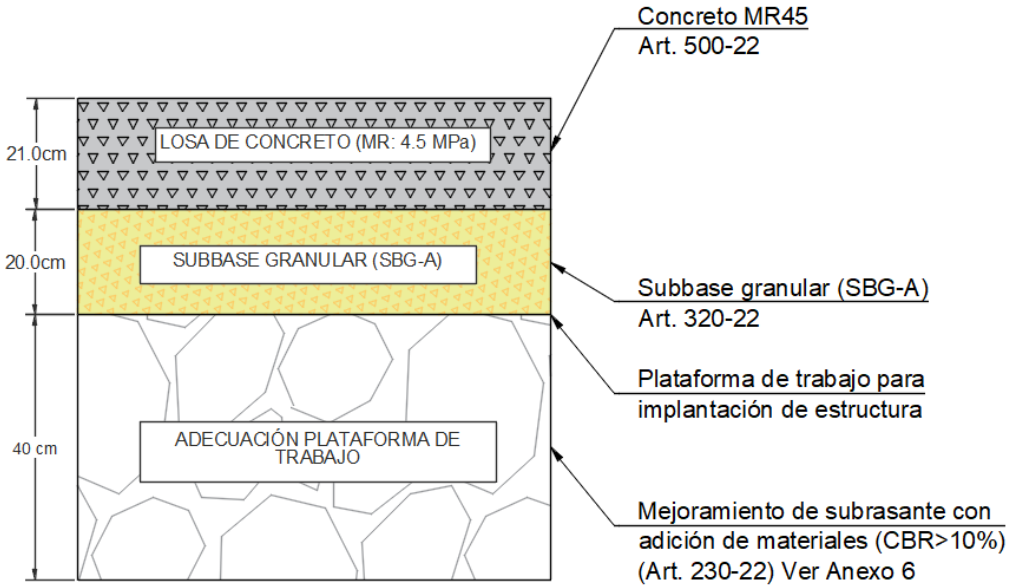


Ilustración 15-2. Sección tipo de la estructura de pavimento recomendada – Zonas de Corte o cambios de rasante menores a 41cm. Entre el K13+250 al K22+350 y Acceso a puente sobre el Río Caquetá.

Fuente: Elaboración propia.

Con el objeto de realizar la modulación de losas adecuada, se recomienda que las losas sean cuadradas (Largo = Ancho) o presenten una relación de esbeltez no mayor a 1.25 y longitudes no mayores a 4.2 metros.

De igual forma, para losas irregulares o con relación de esbeltez mayor a 1.25, se debe considerar el refuerzo en ambos sentidos en acero corrugado, con barras diámetro 1/2”, separadas cada 0.20 m y colocadas en el tercio superior de la losa.

Respecto a la modulación de las bermas, se recomienda que estas presenten una forma cuadrada (es decir 1x1m) con el objeto de no hacer uso de mallas de refuerzo que afecten negativamente el balance económico del proyecto.

Considerando las recomendaciones dadas por el INVIAS[9], para una losa con espesor de 21cm, es necesaria la instalación de pasadores con diámetro de 1 1/8” con longitud de 400 mm y separación entre centros de 300 mm.

De igual forma, para las barras de amarre se recomienda la instalación de barras de acero corrugado de diámetro de ½” con una longitud de 850mm, separadas entre centros cada 1.20m. Las barras no se deben colocar a menos de 38 cm de la junta transversal. No obstante, lo anterior, se considera pertinente que la separación de dichas barras no sea mayor a 0.70m

15.3.1 RECOMENDACIONES TÉCNICAS A CONSIDERAR

- Previo a la instalación de los materiales granulares (Subbase Granular Clase A) para la conformación de la plataforma de trabajo, se recomienda inicialmente remover 10cm del material granular existe y posterior a ello realizar una prueba de carga, la cual consiste en el paso (ida y vuelta) de una volqueta de eje sencillo de 7 m^3 cargada por toda el área de la vía, con el fin de identificar zonas de consistencia baja, las cuales deberán ser intervenidas de manera especial, en función del comportamiento observado. En caso de presentarse ahuellamientos se deberá retirar todo el material blando (baja consistencia) y conformar una plataforma de trabajo adecuada, mediante el uso de material seleccionado para el mejoramiento de la subrasante, según especificaciones técnicas que se establecen en el Artículo 230-22 de las Especificaciones Generales de Construcción del INVIAS; caso contrario, se recomienda recompactación del material granular existente e instalación de la estructura recomendada para la adecuación de la plataforma de trabajo y posterior implantación de la estructura de pavimento.

- Es totalmente indispensable que el material de subrasante no presente en su contenido raíces, basuras o escombros, por lo que se establece que bajo ningún concepto podrá cimentarse sin desplante y/o descapote de la totalidad de la cobertura vegetal y rellenos con escombros.

[9] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito.

- Todas las ampliaciones y rasantes, deberán cumplir con las cotas de diseño y bajo ningún concepto podrán cimentarse sin desplante y/o descapote (como mínimo retirar la cobertura vegetal).

- Dadas las condiciones de pluviosidad de la zona y al considerar el tipo de suelos, es importante tener en cuenta que durante el proceso constructivo, cuando se lleve a cabo la excavación de cajas para el emplazamiento de estructuras de pavimento y/o rellenos de nivelación se deberá realizar el extendido, sello y compactación de la capa de material granular lo más pronto posible, lo anterior con la finalidad de proteger la plataforma de trabajo de posibles cambios de humedad generados por lluvia; igualmente se deberá realizar la excavación y construcción de la estructura de pavimento en tramos no mayores de 100.0 m lineales dado que se debe propender por mantener en menor tiempo posible las excavaciones abiertas.

- Durante las labores de construcción se recomienda verificar en campo, por un especialista en el área, las condiciones existentes y éstas deberán garantizar las condiciones óptimas y premisas de diseño para la fundación de la estructura que soportará el sistema de pavimento. De encontrarse condiciones diferentes a las consideradas en el diseño presentado deberá informarse a esta oficina para realizar las modificaciones pertinentes.

- Los procesos constructivos de los materiales granulares, se debe contemplar un sobre ancho mínimo de 50 cm con el objeto de garantizar la homogenización durante los procesos de compactación que se realicen sobre dichos materiales. Los taludes de reposo y disposición de las capas estructurales nuevas se recomiendan de 1.5H:1V.

- Por otra parte, dada las condiciones de la zona, se recomienda tener en cuenta las estructuras de drenaje y captación de aguas, como lo son alcantarillas y bermas para evitar el ingreso de aguas de escorrentía al paquete estructural y así, proteger el corredor de posibles infiltraciones que sean perjudiciales al buen desempeño de la estructura que finalmente se proyecte.

- Para las zonas de aproche al puente vehicular proyectado sobre el Río Caquetá, se una vez se construyan los accesos en función de las recomendaciones geotécnicas, se deberá implementar la estructura de pavimento (21cm Concreto Hidráulico MR45 + 20 cm de Subbase Granular Clase A) previa validación de la capacidad de soporte

de los terraplenes de aproximación y la cual deberá corresponder a mínimo 58 MPa/m (ver 16 VALIDACIÓN CAPACIDAD ESTRUCTURAL)

- Los materiales por utilizar para el desarrollo de los trabajos de obra deberán cumplir con los requerimientos de especificación enmarcados bajo la normativa del Instituto Nacional de Vías-INVIAS en su versión 2022.

- Para el espacio público peatonal proyectado, se propusieron espesores mínimos de construcción, con subbase granular tipo SBG- C (Art. 320-22).

4Tabla 15-2. Estructura de pavimento para espacio público.

Tipo estructura	Clasificación subrasante	Mejoramiento	Geotextil	SBG-C (Art.320-22) (cm)	Arena o Mortero 1:5 nivelación (cm)	Material superficie (adoquín de arcilla) (NTC 3 829) (cm)
Andenes	S1	Mejoramientos o rellenos según diseño geométrico y analizado en el numeral 12.1 del presente documento	Geotextil NT2500 (Entre el material granular para la adecuación de la plataforma de trabajo y SBG-C)	15	4	6

Fuente: Elaboración propia.

Es de anotar que el material de superficie (adoquines en arcilla) deberán cumplir con las especificaciones técnicas de la NTC 3 829.

La Arena de sello entre juntas se utiliza para cubrir las juntas o espacios libres entre los adoquines, ayudando a dar confinamiento a los elementos individualmente, y estructuralmente para conformar un conjunto compacto para la distribución de cargas. Sirve a la vez para disminuir la filtración de agua hacia la subbase, lo cual mejora la estabilidad del conjunto. Se deberá utilizar una arena cuya procedencia sea de origen natural o de trituración, no deberá contener: materiales sólidos, residuos vegetales, ni materia orgánica. Deberá estar completamente seca para que pueda penetrar por las juntas. El proceso de tamizado debe asegurar el retiro de sobretamaños y otros materiales sólidos contaminantes. Su granulometría se especifica en la Tabla 10-18.

Tabla 15-3. Granulometría para la arena de sello.

Tamiz		Porcentaje que pasa
Icontec	**Alterno**	
2.36mm	No. 8	100
1.18mm	No. 16	90-100
600um	No. 30	60-90
300um	No. 50	30-60
150um	No. 100	5-30
75um	No. 200	0-5

Fuente: Elaboración propia.

- Para el pontón proyectado entre el K16+880 al K16+930 se recomienda la implementación de mezcla asfáltica tipo MDC-19 en un espesor mínimo de compactación de 5.0 cm. Sin embargo, este espesor puede ser mayor siempre y cuando no sobrepase las recomendaciones dadas por el especialista Estructural respecto al espesor utilizado durante la determinación de la carga “muerta” utilizada para el análisis del puente en cuestión. De igual forma, se deberá implementar una rampa de transición en una longitud de 3 metros en los accesos del pontón con el objeto de generar, como su nombre lo dice, una transición adecuada entre la estructura de pavimento y la implantación de las obras tipo pontón y cuyo esquema se adjunta en la Ilustración 15-3.

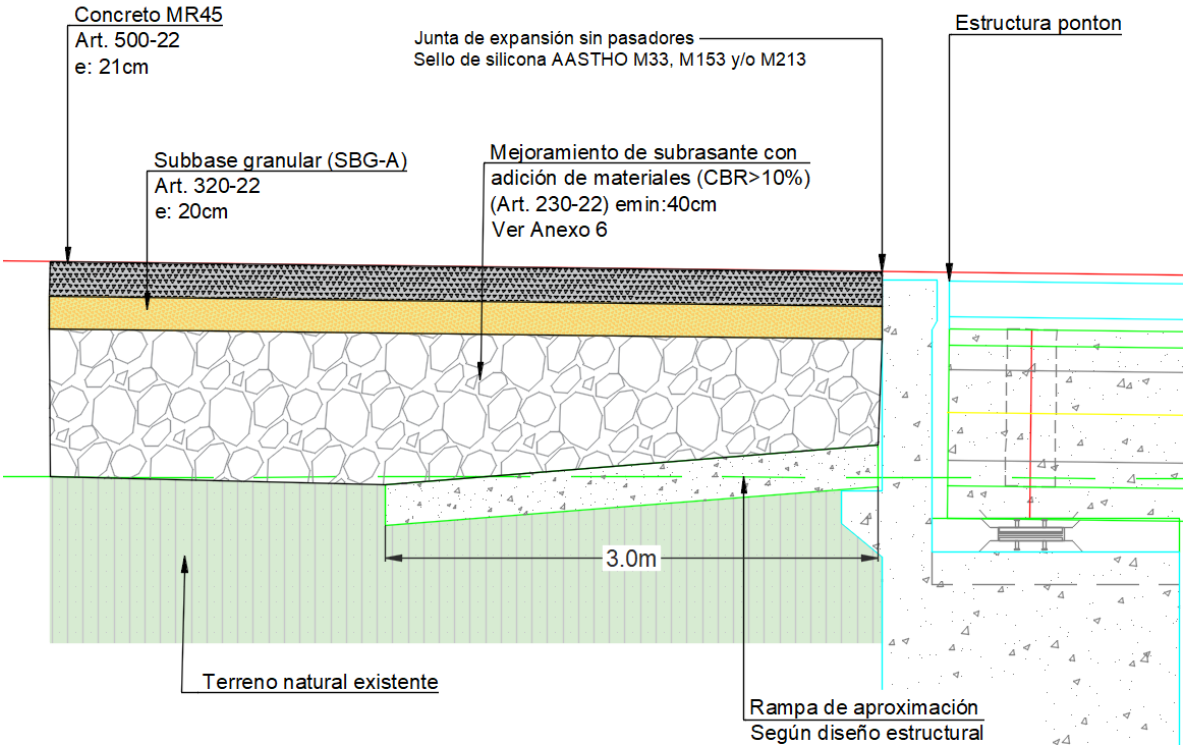


Ilustración 15-3. Rampas de aproximación a pontones.
Fuente: Elaboración propia.

15.3.2 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA IMPLEMENTACIÓN DE GEOTEXTIL

Teniendo en cuenta la necesidad de implementar un espesor de mejoramiento bajo el terraplén proyectado, localizado en los costados del material de afirmado existente, el cual permita garantizar una plataforma de trabajo adecuada para la cimentación de la estructura de pavimento, es importante tener en consideración los siguientes aspectos:

1. El material de mejoramiento corresponde a Crudo de Río, cuyo desgaste en la Máquina de Los Ángeles deberá ser inferior al 50%. En términos granulométricos, este material presenta un porcentaje de finos menor al 15% (pasa tamiz No. 200), arenas entre el 35% y 45% (pasa tamiz No. 4), y un porcentaje de agregado grueso superior al 50%.

2. La subrasante se encuentra conformada por un depósito aluvial en matriz arcillo limosa, con un porcentaje de CBR característico entre 1.34% y 1.65%.

3. La zona presenta condiciones anegadas, es decir, permanece saturada y en algunos periodos del año, presenta una lámina de agua ligeramente superior a la cota del terreno natural.

4. El afirmado existente presenta un espesor promedio de 40 cm, conformado por material aluvial con presencia de arenas, gravas y bajo contenido de finos, con un porcentaje de CBR característico de 14% a un grado de compactación del 98% de la densidad máxima obtenida en el Proctor Modificado.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario efectuar la implementación de un geotextil de separación, el cual evite la migración de las arenas presentes en el crudo de río (migración por lavado de las arenas), dada la presencia de agua en la subrasante.

Este geotextil no implica un refuerzo adicional a la plataforma de trabajo sobre la cual se soporta la estructura de pavimento, condición bajo la cual sólo se emplea como separación entre el mejoramiento y la subrasante (Geotextil No Tejido). Así mismo, dada la naturaleza redondeada del crudo de río, éste no afectará la integridad del geotextil durante el proceso constructivo del mejoramiento. De igual forma, se debe garantizar que el material de mejoramiento no tenga presencia de residuos de construcción y se encuentre libre de contaminación (madera, plástico, acero, yeso, entre otros).

El geotextil de separación deberá satisfacer los requerimientos, a cabalidad y sin excepción alguna, establecidos en la Especificación INVIAS 2022, Artículo 231 “Separación de suelos de subrasante y capas granulares con geotextil”. Los requerimientos mínimos, propiedades mecánicas e hidráulicas, se encuentran definidos en las tablas 231-1 y 231-2, las cuales se presentan a continuación:

Tabla 231 — 1. Propiedades mecánicas del geotextil en términos de VMPR
(Medidas en la dirección principal más débil del geotextil)

Propiedad	Norma de ensayo ASTM	Geotextiles tejidos	Geotextiles no tejidos
Elongación (%)	D4632	< 50	≥ 50
Resistencia a la tensión Grab, valor mínimo (N)	D4632	1 100	700
Resistencia de la costura a la tensión Grab, valor mínimo (N)	D4632	990	630
Resistencia a la penetración con pistón de cincuenta milímetros (50 mm) de diámetro, valor mínimo (N)	D6241	2 200	1 375
Resistencia al rasgado trapezoidal, valor mínimo (N). (Nota)	D4533	400	250

Nota: el VMPR para la resistencia al rasgado trapezoidal de los geotextiles tejidos monofilamento debe ser de doscientos cincuenta newtons (250 N).

Tabla 231 — 2. Propiedades hidráulicas del geotextil en términos de VMPR

Característica	Norma de ensayo ASTM	VMPR
Permitividad, valor mínimo (s^{-1}). (Nota 1)	D4491	0,02
Tamaño de abertura aparente (TAA), valor máximo (mm). (Nota 2)	D4751	0,60
Estabilidad ultravioleta después de quinientas horas (500 h) de exposición, valor mínimo (%)	D4355	50

Nota 1: la permitividad del geotextil debe ser mayor que la permitividad del suelo ($\psi_g > \psi_s$).

Nota 2: el valor del tamaño de abertura aparente (TAA) representa el valor máximo promedio por rollo.

Fuente: Especificación INVIAS 2022, Artículo 231.

Es importante manifestar que el geotextil deberá envolver el material de mejoramiento en al menos 1.00 m. Así mismo, el traslapo entre geotextiles no deberá ser inferior a 0.30 m

16 VALIDACIÓN CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Con el objeto de garantizar la estabilidad de la estructura de pavimento rígido proyectada se deberá realizar la verificación del módulo de reacción de la estructura de pavimento (K) mediante la ejecución de ensayos de placa acorde a los procedimientos descritos en la norma de ensayo INV E-168-22. Los valores del K deberán estar corregidos por saturación.

Como dispositivo de carga se debe hacer uso de un camión o remolque o una combinación de ambos, un marco anclado u otra estructura cargada con peso suficiente para proporcionar la reacción deseada sobre la superficie durante el ensayo. Los puntos de apoyo (ruedas en el caso de un camión o remolque) deberán estar, al menos, a 2.4m (8 pies) de la circunferencia de la placa de apoyo de mayor diámetro que se está empleando.

De igual forma, se hará uso de un juego de placas de carga circulares, de acero, de no menos de 25.4 mm (1”) de espesor cada una, maquinadas de forma que se puedan organizar en forma piramidal para garantizar rigidez, y que tengan diámetros de 152 a 762mm (6 a 30”). Los diámetros de las placas adyacentes en la disposición piramidal no deberán diferir en más de 152mm (6”).

Para la lectura de las deformaciones, se hará uso de tres o más deformímetros (diales indicadores), graduados en unidades de 0.01 mm (o 0.001”), capaces de registrar una deformación máxima de 25.4 mm (1”), u otros dispositivos equivalentes para medir deformaciones.

Los deformímetros deberán estar montados sobre una vida de deflexión de 62.5mm (2 ½”) de diámetro o un ángulo de acero de 76x76x6mm (3”x3”x1/4”) o equivalente. Debe tener 5.5m (18 pies) de largo y debe descansar sobre soportes localizados a no menos de 2.4m (8pies) de la circunferencia de la placa de carga o de la rueda o pata de apoyo más próxima.



Ilustración 16-1. Ensayo plato de carga.

El procedimiento de ensayo corresponde a la aplicación de cargas en incrementos uniformes, a una rata moderadamente rápida. La magnitud de cada incremento de carga deberá ser suficientemente pequeña para permitir el registro de un número suficiente de puntos (no menos de seis), para obtener una curva exacta de carga – deformación.

Luego de que se incremente cada incremento de carga, se mantiene la carga en este punto hasta cuando la deformación no aumente a una rata mayor de 0.03mm (0.001”) por minuto, durante tres minutos consecutivos.

La deformación debe corresponder al promedio de los valores registrados por los diales instalados. Se continúa este procedimiento hasta alcanzar la deformación total escogida o hasta que se haya alcanzado la capacidad de carga del dispositivo, lo que ocurra primero. En este punto, se mantiene la carga hasta cuando la deformación no aumente a una rata mayor de 0.03mm (0.001”) por minuto, durante tres minutos consecutivos.

Una vez anotada la deformación total, se disminuye la carga hasta aquella a la cual los medidores del dial fueron colocados en “cero”, y se mantiene la carga de asentamiento en cero, hasta cuando la rata de recuperación no exceda de 0.03mm (0.001”) durante tres minutos consecutivos.

Con las lecturas de deformación y carga aplicada, se realiza un gráfico con puntos que represente la magnitud de la carga total aplicada para cada incremento, contra la deformación correspondiente. Así mismo, se debe representar el punto correspondiente a la deformación obtenida luego de la liberación total de la carga. Se debe realizar una corrección para el punto de deformación cero, teniendo en cuenta el peso muerto del equipo y la carga de asiento inicial. A partir del gráfico se puede obtener la relación entre una carga cualquiera y la deformación total causada por dicha carga, así como las deformaciones de rebote y residual para la máxima carga total usada.

Las verificaciones se deben considera por lote, que se acepta o rechaza en conjunto, es de anotar que un lote corresponde a la menor área construida que resulte de aplicar los siguientes criterios:

- Quinientos metros (500 m) de capa compactada en el ancho total de la subbase granular.
- Tres mil quinientos metros cuadrados (3,500 m^2) de subbase granular compactada.
- La obra ejecutada en una jornada de trabajo.

Los resultados del módulo de reacción (k) deben ser como mínimo los relacionados en la Tabla 16-1. Módulo de reacción para validación en obra, previo a la instalación de la capa superior.

Tabla 16-1. Módulo de reacción para validación en obra.

Plataforma de trabajo conformada por	**Previa instalación de losa**	
	Espesor (cm)	**K**
		MPa/m
Sobre Subbase Granular Clase A (Zonas de terraplén)	Variable	88
Sobre Subbase Granular Clase A (Zonas con inclusión de mejoramiento de la subrasante con adición de materiales de 40cm)	Variable	58

Fuente: Elaboración propia.

17 LIMITACIONES

Este informe se efectuó con base en los resultados de la campaña de exploración del subsuelo y en el programa de ensayos de laboratorio elaborados por el Consorcio Vías Colombia 055 y Geoensayos S.A.S. En caso de encontrarse condiciones diferentes a las aquí consignadas y a las encontradas en la exploración realizada se deberá informar a la menor brevedad a esta Consultoría para analizar la situación y verificar las condiciones propias de los cambios que se requieran efectuar. Cualquier modificación que se efectúe deberá ser informada a esta oficina para analizar su viabilidad y deberá llevar el visto bueno de acuerdo con comunicación oficial.

18 FUENTES DE CONSULTA

- AASHTO GUIDE FOR DESING OF PAVEMENT STRUCTURES, 1993.

- ARA INC, ERES CONSULTANTS DIVISION, “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”, NCHRP Report 1-37A, Champaign, Illinois, March 2004

- C. J. Glover, R. R. Davison, C. H. Domke et al., “Development of new method for assessing asphalt binder durability with field validation,” Texas Transportation Institute, College Station, TX, USA, 2005, Report FHWA/TX-05/1872–2report.

- Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material Characterization. Marzo 2004.

- GILLESPIE T.D., KARAMIHAS S.M., SAYERS M.W., NASIM M.A., HANSEN W., and EHSAN N., “Effects of Heavy-Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance”, Transportation Research Board, National Research Council, Report No. 353, National Academy Press, Washington D. C., 1993, pp. 24-34.

- HUANG, YANG H. (2004) Pavement analysis and design. Second Edition, Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. USA.

- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. ESPECIFICACIONES GENERALES DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS. Resolución está 1524 del 6 de mayo de 2022.

- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, adoptada mediante Resolución No.002658 del 27 de julio de 2002 del Instituto Nacional de Vías. INVIAS, 2008.

- L. F. Walubita, A. E. Martin, S. H. Jung et al., “Comparison of fatigue analysis approaches for two hot mix asphalt concrete (HMA) mixtures,” Texas Transportation Institute, College Station, TX, USA, 2005, Report FHWA/TX-05/0-4468-2report.

- L. F. Walubita, Comparison of Fatigue Analysis Approaches for Predicting Fatigue Lives of Hot Mix Asphalt Concrete Mixtures (HMA), Texas A&M University, College Station, TX, USA, 2006, Ph.D. DissertationThesis.

- N. A. Al-Azri, S. H. Jung, K. M. Lunsford et al., “Binder oxidative aging in texas pavements,” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1962, pp. 12–20, 2006

- R. Abu Al-Rub, M. Darabi, S. Kim, D. Little, and C. Glover, “Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative ageing in ageing susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete,” Construction and Building Materials, vol. 41, pp. 439–454, 2013.

- Rondón et al. Rondón et al. Ahuellamiento en mezclas asfálticas. Junio de 2021.