CONTRATO COP 613-2025 – EJECUTAR A MONTO AGOTABLE POR EL SISTEMA DE PRECIOS UNITARIOS, LAS ACTIVIDADES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y/O CONSERVACIÓN Y/O MANTENIMIENTO Y/O REHABILITACIÓN DE LA MALLA VIAL LOCAL E INTERMEDIA, ESPACIO PÚBLICO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS EN LA LOCALIDAD DE TUNJUELITO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C

ALCALDÍA LOCAL DE TUNJUELITO

CONTRATO COP-613-2025

CONTRATISTA

CONSORCIO COCO

DISEÑO DE PAVIMENTOS SEGMENTOS VIALES – CIV´S

6000859, 6000931, 6000833, 6000557, 6000389, 6000372, 6000830, 6000870, 6000857 Y 6000786

BOGOTÁ D.C., ENERO 2026

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN 12
2. GENERALIDADES 13
2.1 Metodología 13
2.2 Normatividad Consultada 14
2.3 Condiciones Climáticas 14
2.4 Localización y descripción de los segmentos viales 16
3. DIAGNÓSTICO VIAL POR LA METODOLOGÍA PCI 21
4. TRÁNSITO DE DISEÑO 25
5. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA 29
5.1 Estratigrafía 32
5.2 Nivel freático 35
5.3 Ensayos de caracterización física 35
5.4 Análisis de potencial de expansión 38
5.5 Análisis de potencial de contracción de arcillas 44
5.6 Recomendación sobre la expansión y contracción 45
5.7 Ensayos de capacidad de soporte del suelo 52
5.6. Mejoramiento de la subrasante 54
6. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE 56
6.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES 56
6.1.1. Mezcla asfáltica (MD-19) 58
6.1.2. Mezcla asfáltica MD-GCR (MCCh25) 59

6.1.3. Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) 62

6.1.4. Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) (convencional o reciclada) estabilizada con cemento 5% y aditivo ionizante 64

6.1.5. **Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)convencional o reciclada** 71

6.2. CAPACIDAD ESTRUCTURAL REQUERIDA 73

6.3. Parámetros de alternativas de diseño en pavimento flexible.....74

6.4. Alternativas de diseño de pavimento flexible.....77

6.4.1. Alternativa 1: Carpeta asfáltica (MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25), Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) y Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG) - Mejoramiento con geocelda.....77

6.5. Verificación estructural de esfuerzos y deformaciones por método racional..79

6.5.1. Revisión mecanicista de espesores planteados 81

6.6. Especificaciones Técnicas De Materiales De Construcción......82

7. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO 86

7.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES 86

7.1.1. Mezcla asfáltica MD-19..... 87

7.1.2. Subbase granular reciclada (AR-SBG) o subbase granular tipo A (SBG-A) 88

7.1.3. Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) (convencional o reciclada) estabilizada con cemento 5% y aditivo ionizante 89

7.2. Cálculo Del Módulo De Reacción K 96

7.3. Capacidad Estructural Requerida 101

7.4. Parámetros de alternativas de diseño en pavimento rígido 102

7.4.1. Confiabilidad (R) y Desviación estándar (Zr) 102

7.4.2. Confiabilidad – Error normal combinado 103

7.4.3. Índices de serviciabilidad (ΔPSI) 103

7.4.4. Coeficientes de drenaje 104

7.4.5. Coeficientes de transferencia de carga 105

7.4.6. Número estructural (SN) 105

7.5. Alternativas de diseño de pavimento rígido 106

7.5.1. Alternativa 1: Losa de concreto MR-45, Subbase reciclada (AR-SBG) y mejoramiento con geocelda 106

7.5.2. Alternativa 2: Losa de concreto MR-45, Subbase reciclada (AR-SBG) estabilizado con cemento 5%con cemento y mejoramiento con geocelda . 107

7.6. Verificación por metodología PCA 108

7.6.1. CONVERSIÓN DE EJES EQUIVALENTES A ESPECTRO DE CARGAS PARA DISEÑO PCA 108

7.6.2. ANALISIS DE ALTERNATIVAS PCA 110

7.7. Especificaciones Técnicas De Materiales De Construcción 115

7.8. Características Geométricas de la Losa 118

7.9. Modulación ante la Presencia de Estructuras Hidráulicas 119

7.10. Características de las Barras de Transferencia y Amarre 121

7.11. Juntas de Transferencia 121

7.12. Juntas de Expansión 122

7.13. Sellado de Juntas y ventana de corte 122

8. RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN 124

8.1. Equipos para los materiales granulares 125

8.2. Proceso constructivo general para materiales granulares 129

8.3. Proceso constructivo general para mezclas asfálticas 131

9. CONCLUSIONES 133

10. RECOMENDACIONES DE INTERVENCIÓN Y PROCESO CONSTRUCTIVO 135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Información general de los segmentos viales (Fuente: Propia) 17

Tabla 2. Tipo de intervención del segmento vial de acuerdo a diagnostico (Fuente: Propia) 22

Tabla 3. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000859 (Fuente: Propia) 22

Tabla 4. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000931 (Fuente: Propia) 22

Tabla 5. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000833 (Fuente: Propia) 23

Tabla 6. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000557 (Fuente: Propia) 23

Tabla 7. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000389 (Fuente: Propia) 23

Tabla 8. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000372 (Fuente: Propia) 24

Tabla 9. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000830 (Fuente: Propia) 24

Tabla 10. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000870 (Fuente: Propia) 24

Tabla 11. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000857 (Fuente: Propia) 25

Tabla 12. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000857 (Fuente: Propia) 25
Tabla 13. Número de ejes equivalentes para el segmento vial. (Fuente: Guía GU-IC-019,2013) 27
Tabla 14. Tránsito en los segmentos viales (Fuente: Propia) 29
Tabla 15. Ubicación de los apiques en los segmentos viales (Fuente: Propia) 30
Tabla 16. Características físicas de la subrasante parte 1 (Fuente: Adaptado de ensayos de laboratorio) 35
Tabla 17. Características físicas de la subrasante parte 2 (Fuente: Adaptado de ensayos de laboratorio) 35
Tabla 18. Tipos de intervención. (Fuente: Propia) 38
Tabla 19. Clasificación de suelos expansivos. (Fuente: Tabla H.9.1-1, NSR10) 39
Tabla 20. Potencial expansivo de la subrasante- NSR -10. (Fuente: Elaboración propia) 39
Tabla 21. Potencial expansivo de la subrasante. (Fuente: Elaboración propia) 40
Tabla 22. Resultados de ensayo CBR (Fuente: Propia) 53
Tabla 23. Cálculo CBR subrasante. (Fuente: Propia) 53
Tabla 24. Correlaciones entre CBR y MR. (Fuente: Guía GU-IC-019,2013) 54
Tabla 25. Propiedades mecánicas de los materiales 66
Tabla 26. Propiedades mecánicas de los materiales (Fuente: metodología AASHTO-93) 73
Tabla 27. Parámetros de diseño alternativa pavimento flexible. (Fuente: Elaboración propia) 76
Tabla 28. Espesores de diseño de pavimento flexible método AASHTO, alternativa 1 (geocelda) (Fuente: elaboración propia) 78
Tabla 29. Espesores de diseño de pavimento flexible método AASHTO, alternativa 3 (Geocelda) (Fuente: elaboración propia) 79
Tabla 30. Valores de esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento (Fuente: metodología AASHTO-93) 81
Tabla 31. Parámetros de entrada del modelo (Fuente: Elaboración propia) 81
Tabla 32. Módulos de elasticidad de los materiales (Fuente: metodología AASHTO-93) . 81
Tabla 33. Verificación de valores admisibles y calculados Alternativa No. 1 (Fuente: Propia) 82

Tabla 34. Verificación de valores admisibles y calculados Alternativa No. 2 (Fuente: Propia) 82
Tabla 35. Propiedades mínimas del geotextil a utilizar. Fuente: IDE ET-2018 85
Tabla 36. Propiedades recomendadas del geotextil a utilizar. Fuente: Proveedores, 2025 85
Tabla 37. Propiedades mecánicas de los materiales 92
Tabla 38. Cálculo de módulo combinado material estabilizado y granular (Fuente: Propia) 99
Tabla 39. Parámetros de diseño alternativa pavimento rígido. (Fuente: Elaboración propia) 105
Tabla 40. Espesores de diseño de pavimento rígido método AASHTO, alternativa 1 (Fuente: Propia) 107
Tabla 41. Espesores de diseño de pavimento rígido método AASHTO, alternativa 2 (Fuente: Propia) 108
Tabla 42. Repeticiones acumuladas para metodología PCA..... 110
Tabla 43. Propiedades mínimas del geotextil a utilizar. Fuente: IDE ET-2018 118
Tabla 44. Propiedades recomendadas del geotextil a utilizar. Fuente: Proveedores, 2025 118
Tabla 45. Características de las barras de transferencia. Fuente: Adaptado de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002..... 121
Tabla 46. Características de las barras de amarre. Fuente: Adaptado de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002..... 121
Tabla 47. Características de las juntas. Fuente: Adaptado de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002..... 121
Tabla 48. Alternativa recomendada Fuente Propia. 135
Tabla 49. Espesor de GCR 137

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Registro mensual y anual de días con lluvia (Fuente: IDIGER) 15

Ilustración 2. Ubicación segmentos viales (Fuente: Propia- Google Earth) 17
Ilustración 3. Ubicación Segmento vial 6000859. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 18
Ilustración 4. Ubicación Segmento vial 6000931. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 18
Ilustración 5. Ubicación Segmento vial 6000833. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 18
Ilustración 6. Ubicación Segmento vial 6000557. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 19
Ilustración 7. Ubicación Segmento vial 6000389. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 19
Ilustración 8. Ubicación Segmento vial 6000372. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 19
Ilustración 9. Ubicación Segmento vial 6000830. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 20
Ilustración 10. Ubicación Segmento vial 6000870. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) .. 20
Ilustración 11. Ubicación Segmento vial 6000857. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) .. 20
Ilustración 12. Ubicación Segmento vial 600786. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU) 21
Ilustración 13. Ubicación de los apiques (Fuente: Propia- Google Earth) 31
Ilustración 14. Perfiles Estratigráficos parte 1 (Fuente: Propia) 32
Ilustración 15. Perfiles Estratigráficos parte 2 (Fuente: Propia) 33
Ilustración 16. Perfiles Estratigráficos parte 3 (Fuente: Propia) 33
Ilustración 17. Análisis granulométrico materiales encontrados en los apiques en comparación a la especificación IDU para Subbase Granular (Fuente: Propia) 37
Ilustración 18. Criterio 2, análisis de expansión. 39
Ilustración 19. Criterio 3, Potencial de expansión, Dakshanamurthy and Raman 40
Ilustración 20. Potencial de expansión, Dakshanamurthy and Raman 41
Ilustración 21. Guía metodológica para la identificación de suelos problemáticos – INVIAS 2025 44
Ilustración 22. Criterios para la selección preliminar de estabilizantes tradicionales – NCHRP (2009) 45
Ilustración 23. Esquema de ubicación barrenos de Cal 47
Ilustración 24. Cargas no uniformes impuestas en estructuras de pavimento por suelos expansivos Fuente: Soil – Geosynthetic Interaction Test to Develop Specifications for Geosynthetic – StabilizedRoadway. University of Texas (2018) 49

Ilustración 25. Geostinteticos analizados Fuente: Soil – Geosynthetic Interaction Test to Develop Specifications for Geosynthetic – StabilizedRoadway. University of Texas (2018)..... 52
Ilustración 26. Grafica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: metodología AASHTO-93) 58
Ilustración 27. Effect of adding rubber into asphalt mixture strain, creep..... 60
Ilustración 28. Grafica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: metodología AASHTO-93) 61
Ilustración 29. Grafica Coeficiente estructural para bases granulares sin tratar (Fuente: metodología AASHTO-93)..... 63
Ilustración 30. Valores recomendados para coeficientes de drenaje de capas granulares (Fuente: metodología AASHTO-93)..... 64
Ilustración 31. Grafica Coeficiente estructural para subbases granulares sin tratar (Fuente: metodología AASHTO-93)..... 72
Ilustración 32. Valores recomendados de confiabilidad (Fuente: metodología AASHTO-93) 74
Ilustración 33. Valores recomendados de confiabilidad AASHTO (Fuente: AASHTO) 75
Ilustración 34. Valores recomendados de drenaje AASHTO (Fuente: AASHTO) 76
Ilustración 35. Coeficientes de Calage (Fuente: metodología AASHTO-93)..... 80
Ilustración 36. Gráfica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: AASHTO) . 88
Ilustración 37. Gráfica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: AASHTO) . 89
Ilustración 38. Guía para diseño de estructuras de pavimentos. (Fuente: AASHTO) 98
Ilustración 39. Cálculo de Módulo de Reacción combinado (Fuente: AASHTO)..... 99
Ilustración 40. Valores recomendados de confiabilidad (Fuente: AASHTO)..... 103
Ilustración 41. Valores recomendados de confiabilidad AASHTO (Fuente: AASHTO) ... 103
Ilustración 42. Valores recomendados de Servicialidad AASHTO (Fuente: AASHTO)... 104
Ilustración 43. Valores recomendados de drenaje AASHTO (Fuente: AASHTO) 104
Ilustración 44. Valores recomendados de transferencia de carga AASHTO (Fuente: AASHTO) 105
Ilustración 45. Verificación fatiga – erosión (alternativa 1), PCA 111

Ilustración 46. Análisis de sensibilidad, espesor de la losa. 112
Ilustración 47. Análisis de sensibilidad, módulo de rotura. 112
Ilustración 48. Análisis de sensibilidad, módulo de reacción. 112
Ilustración 49. Verificación fatiga – erosión (alternativa 2), PCA 113
Ilustración 50. Análisis de sensibilidad, espesor de la losa. 114
Ilustración 51. Análisis de sensibilidad, módulo de rotura. 114
Ilustración 52. Análisis de sensibilidad, módulo de reacción. 114
Ilustración 53. Junta en pozos 119
Ilustración 49. Ilustración SEQ Ilustración * ARABIC 19. Junta en Pozos 120
Ilustración 55. Junta en Sumideros 120
Ilustración56. Detalle Junta de expansión 122

CONTROL DE CAMBIOS DEL DOCUMENTO

ÍNDICE DE REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA MODIFICACIÓN

REVISIÓN Y APROBACIÓN

ELABORACIÓN	**NÚMERO DE REVISIÓN**	1	**fecha**	26/01/2026
	RESPONSABLE DE LA ELABORACIÓN	**CONSORCIO COCO**		
	PROFESIONAL	**CARGO**	Firma	
	José Miguel Aldana	Especialista en pavimentos		
APROBACIÓN	Vo.Bo. INTERVENTORÍA			
	REVISÓ	**CARGO**	Firma	
		Especialista en pavimentos	Shirley Ramirez P.	

1. INTRODUCCIÓN

En desarrollo del contrato de Obra COP-613-2025, suscrito entre la Alcaldía Local de TUNJUELITO y el CONSORCIO COCO, se hace necesario realizar los diagnósticos, estudios y diseños de la infraestructura de la malla vial local, con el fin de ejecutar las obras necesarias teniendo en cuenta las condiciones actuales, el comportamiento del suelo, así como las especificaciones técnicas de los materiales y procesos de construcción vigentes de acuerdo con las normas para la ciudad de Bogotá D.C.

Adicionalmente, se propondrán alternativas de estructuras de pavimento contemplando los diferentes factores existentes en los tramos tales como, redes sanitarias y pluviales, sumado al uso de materiales reciclados, con el fin de cumplir con la normativa ambiental vigente.

En el presente informe se describe la modelación y diseños estructurales de pavimentos para ser adoptados en la intervención de los segmentos viales identificados con los CIV´S 6000859, 6000931, 6000833, 6000557, 6000389, 6000372, 6000830, 6000870, 6000857 y 6000786 de la ciudad de Bogotá D.C., con base en el cual más adelante se proponen y modelan alternativas de diseño de la intervención para el mejoramiento de sus condiciones operacionales en su totalidad.

2. GENERALIDADES

En este capítulo se presenta la metodología y normativa consultada para la elaboración de los estudios y diseños de pavimento. Así mismo, la ubicación de las vías a diseñar. De acuerdo con el anexo técnico del contrato de obra 613 DE 2025, el presente informe acoge a las metodologías convencionales ya sean de carácter analítico, mecanicistas o racionales. Para lo que compete a este diseño se realizará a través de la metodología AASHTO, Guía Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales para Bogotá D.C. y comprobación mediante la modelación de método mecanicista o racional.

2.1 Metodología

Para el desarrollo de la elaboración de los estudios y diseños, se tendrán en cuenta las siguientes actividades:

- Revisión de la información contenida en el anexo técnico del respectivo contrato de consultoría.
- Verificación de las hipótesis de diseño y elaboración del diseño, acogiendo las Especificaciones Técnicas de materiales de acuerdo con la normatividad vigente.
- Revisión de la Guía Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales para Bogotá D.C.
- Análisis del estudio de tránsito y determinación de número de ejes equivalentes de diseño y evaluación del tránsito por cada segmento vial y de acuerdo con la *"Guía Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales Para Bogotá D.C."* en la Tabla 4.4 *Categoría de tránsito de diseño.*
- Diseño de una estructura de pavimento por medio de la metodología AASHTO-93 y PCA.
- Verificación estructural de esfuerzos y deformaciones por método racional.

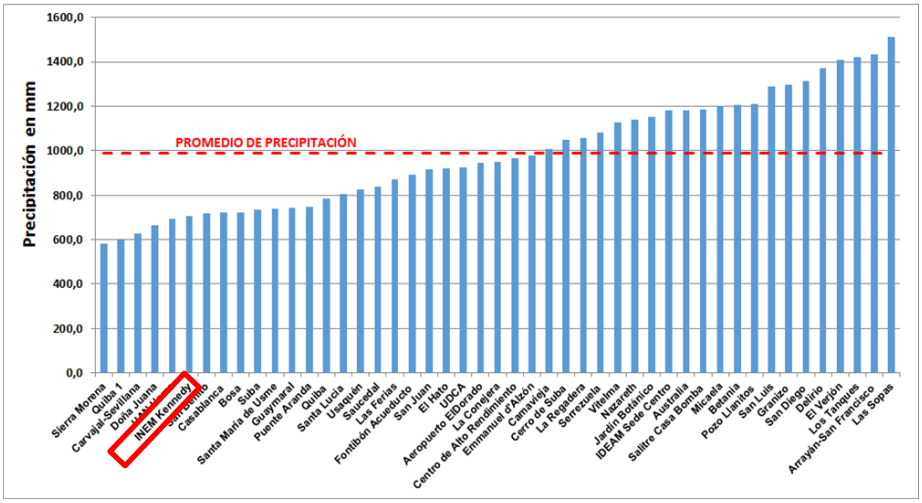
2.2 Normatividad Consultada

Para realizar una apropiada elaboración del diseño, se tendrá en cuenta:

- Metodología de diseño de pavimentos The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), versión 1993, ampliamente utilizada en el medio colombiano.
- Guía Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales para Bogotá D.C.
- Resolución número 010910 DE 2019 que en su artículo 3, precisa que el documento ET-IC-01 -Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018) debe ser adoptado.

2.3 Condiciones Climáticas

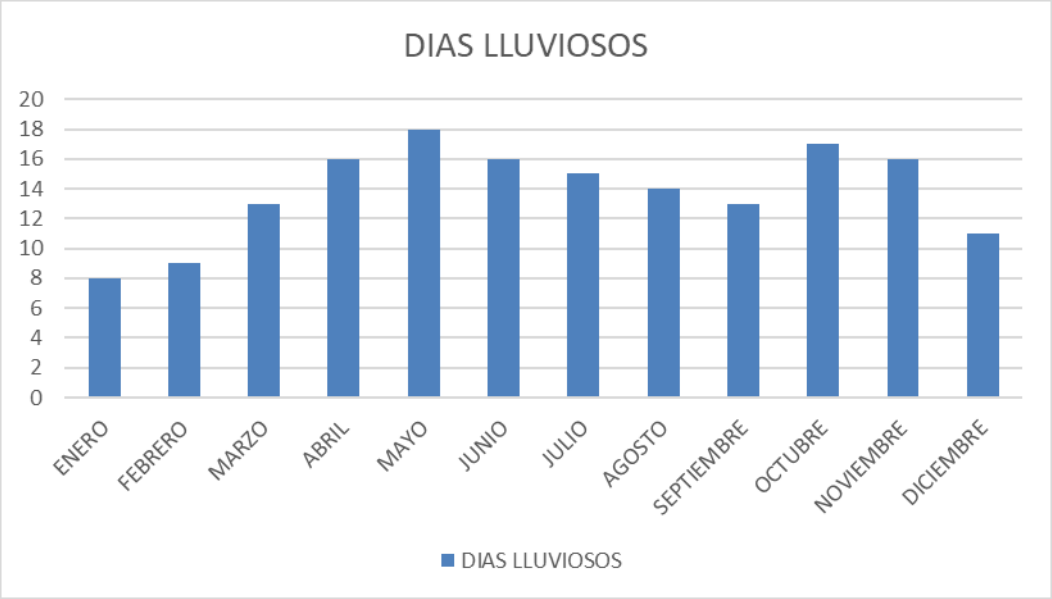
Para la evaluación de las condiciones climatológicas del proyecto, se tiene en cuenta los datos reportados por la estación climatológica principal (CP) TUNJUELITO (CASA BLANCA) ubicada en las coordenadas 4°34'00"N" y 74°10'00"W a una altura de 2640 metros sobre el nivel medio del mar, y que registra una Precipitación anual de 700 mm, Número de días con lluvia de 188 días y una Humedad relativa anual: 80% (IDIGER; 2023):



Gráfica 1. Promedios mensuales de precipitación (mm) del año 2023 (Fuente: IDIGER)

ELEV	LONGITUD	LATITUD	NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2520	74°4'13.1"W	4°42'4.05"N	Enmanuel D Alzon	7	8	11	12	13	10	8	8	9	14	13	9	121
2543	74°9'5.11"W	4°39'42.0"N	Vegas Las Hda	6	7	11	13	16	12	10	10	9	13	13	9	128
2579	74°2'0.0"W	4°47'0.0"N	Torca	7	8	10	13	14	13	13	11	10	12	11	8	130
2580	74°8'0.0"W	4°34'0.0"N	Picota La	7	9	12	15	17	18	17	16	12	14	14	9	160
2570	74°2'59.0"W	4°47'55.1"N	C.Univ.Agrop-Udca	7	9	13	15	18	16	16	15	12	14	15	10	160
2700	74°10'0.0"W	4°30'0.0"N	Dona Juana	7	8	12	15	18	18	18	17	13	14	14	9	164
2640	74°12'0.0"W	4°36'0.0"N	Bosa	8	9	13	16	18	16	15	14	13	17	16	11	166
2880	74°5'0.0"W	4°29'0.0"N	Cisaca	7	10	12	16	18	18	20	20	14	15	14	10	173
2500	74°4'0.0"W	4°46'0.0"N	Conejera La	10	11	16	17	19	16	14	14	14	16	17	12	177
3000	74°9'17.4"W	4°26'47.4"N	Pasquilla	6	8	10	17	20	21	23	20	15	15	14	8	178
3320	74°11'2.0"W	4°20'34.6"N	Esc La Union	6	9	12	17	20	21	22	20	14	16	15	8	181
2556	74°5'20.7"W	4°38'17.1"N	Univ Nacional	8	11	16	16	19	16	16	15	16	18	17	12	181
2552	74°6'9.6"W	4°40'9.6"N	Jardin Botanico	11	11	15	18	20	16	16	15	15	18	17	13	185
2665	74°10'0.0"W	4°34'0.0"N	Casablanca	9	10	15	19	20	18	19	17	15	18	17	12	188
2546	74°9'0.0"W	4°42'0.0"N	Eldorado Didactica	8	11	14	19	21	17	18	16	16	19	18	12	188
2547	74°9'2.4"W	4°42'20.1"N	Apto El Dorado	8	11	15	19	21	18	18	16	16	19	17	12	189
2800	74°7'34.6"W	4°28'52.7"N	Sta Maria de Usme	7	9	13	17	20	21	23	21	15	17	17	10	190
2630	74°7'0.0"W	4°34'0.0"N	Sta Lucia	11	12	14	19	19	18	18	17	15	18	17	13	190
2680	74°6'0.0"W	4°37'0.0"N	Camavieja	9	11	15	18	20	18	18	17	15	19	18	13	191
2800	74°8'45.6"W	4°10'20.1"N	Nazareth	6	9	13	18	22	23	24	23	17	17	14	8	193
2900	74°9'0.0"W	4°39'0.0"N	Saucedal 2	10	11	16	19	21	18	18	17	15	18	18	13	194
2725	74°3'41.6"W	4°35'54.1"N	Venado Oro Vivero	8	11	14	17	20	21	21	20	15	17	17	13	194
2685	74°4'22.4"W	4°36'25.6"N	Sede Ideam Kra 10	9	11	16	19	20	19	21	19	14	18	17	12	195
2691	74°4'0.0"W	4°45'0.0"N	Cerro de Suba	11	14	17	17	19	17	17	17	16	19	19	13	196
3000	74°10'0.0"W	4°32'0.0"N	Quiba	9	10	15	19	20	21	20	20	16	19	17	12	197
2580	74°4'0.0"W	4°40'0.0"N	Salitre Casa Bomba	10	14	18	19	20	19	17	16	16	19	18	15	200
2900	74°18'40.2"W	4°1'51.7"N	San Juan	11	12	16	22	22	19	20	18	15	22	20	15	214
2545	74°9'0.0"W	4°40'0.0"N	Fontibon Acueducto	12	13	17	20	21	20	20	19	18	20	20	16	217
2700	74°4'0.0"W	4°37'0.0"N	San Diego	11	12	18	20	21	22	22	21	18	22	20	17	223
3050	74°7'55.2"W	4°23'39.3"N	Australia	7	10	14	20	26	26	28	25	20	21	18	11	226
2650	74°2'44.0"W	4°47'18.0"N	Esc Col Ingenieria	14	14	17	20	24	22	23	21	18	20	19	16	227
3316	74°3'0.0"W	4°34'0.0"N	Guadalupe	11	12	17	21	23	23	25	23	18	19	21	15	228
2985	74°5'0.0"W	4°31'0.0"N	Juan Rey	10	11	16	21	24	25	27	24	18	19	19	13	228
3000	74°2'0.0"W	4°38'0.0"N	San Luis 1 Y 2	13	13	18	21	24	24	24	22	19	21	20	16	235
3150	74°11'27.4"W	4°11'48.0"N	Taques Los	11	11	17	21	25	25	24	25	22	20	19	14	236
2800	74°1'0.0"W	4°46'0.0"N	Serrezuela	14	14	17	20	25	23	22	23	20	22	21	17	238
2800	74°4'0.0"W	4°34'0.0"N	Vitelma	13	14	18	21	23	23	24	24	18	21	21	17	239
2850	74°8'0.0"W	4°1'0.0"N	Pozo Llanitos	11	13	18	22	25	25	26	25	22	22	19	15	243
3150	74°11'0.0"W	4°23'0.0"N	Hato El	10	12	17	23	26	25	26	25	22	23	20	15	244
3460	74°8'0.0"W	4°20'0.0"N	Boca Grande	11	13	17	22	26	26	27	26	24	22	20	15	248
3047	74°2'0.0"W	4°35'0.0"N	Arrayan-San Fco	13	14	19	23	26	25	28	26	21	22	20	15	253
3125	74°3'0.0"W	4°37'0.0"N	Granizo	15	15	19	22	26	25	26	25	21	22	21	17	253
3056	74°9'0.0"W	4°24'0.0"N	Regadera 2 La	10	13	17	22	27	27	28	26	24	24	21	15	255
3000	74°3'0.0"W	4°33'0.0"N	Delirio	14	15	19	22	26	26	28	26	20	21	21	18	256
3250	74°1'0.0"W	4°35'0.0"N	Verjon El	14	15	19	23	27	27	29	28	23	25	23	17	269
3200	74°12'0.0"W	4°9'0.0"N	Sopas Las	13	14	21	26	29	28	29	29	25	26	23	16	279

Ilustración 1. Registro mensual y anual de días con lluvia (Fuente: IDIGER)



Gráfica 2. Días de lluvia en el año Estación Tunjuelito (Fuente: Propia con datos IDIGER)

Se determina el porcentaje de tiempo en que la estructura estará expuesta a niveles de humedad cercanos a la saturación en los meses de mayor precipitación, traducidos en los días de lluvias totales, considerando los que presentan valores por encima del promedio. Bajo estas condiciones el coeficiente de drenaje de los materiales granulares no tratados se define en $m_{SBG-BG} = 1.00$.

$$\%tiempo = \frac{días\ con\ precipitación}{365}$$

$$\%tiempo = \frac{188}{365} = 51\%$$

2.4 Localización y descripción de los segmentos viales

Los segmentos viales que se relacionan a continuación se encuentran en la UPL VENECIA y se catalogan como malla vial local. A continuación, se presenta su ubicación y las características geométricas más relevantes:

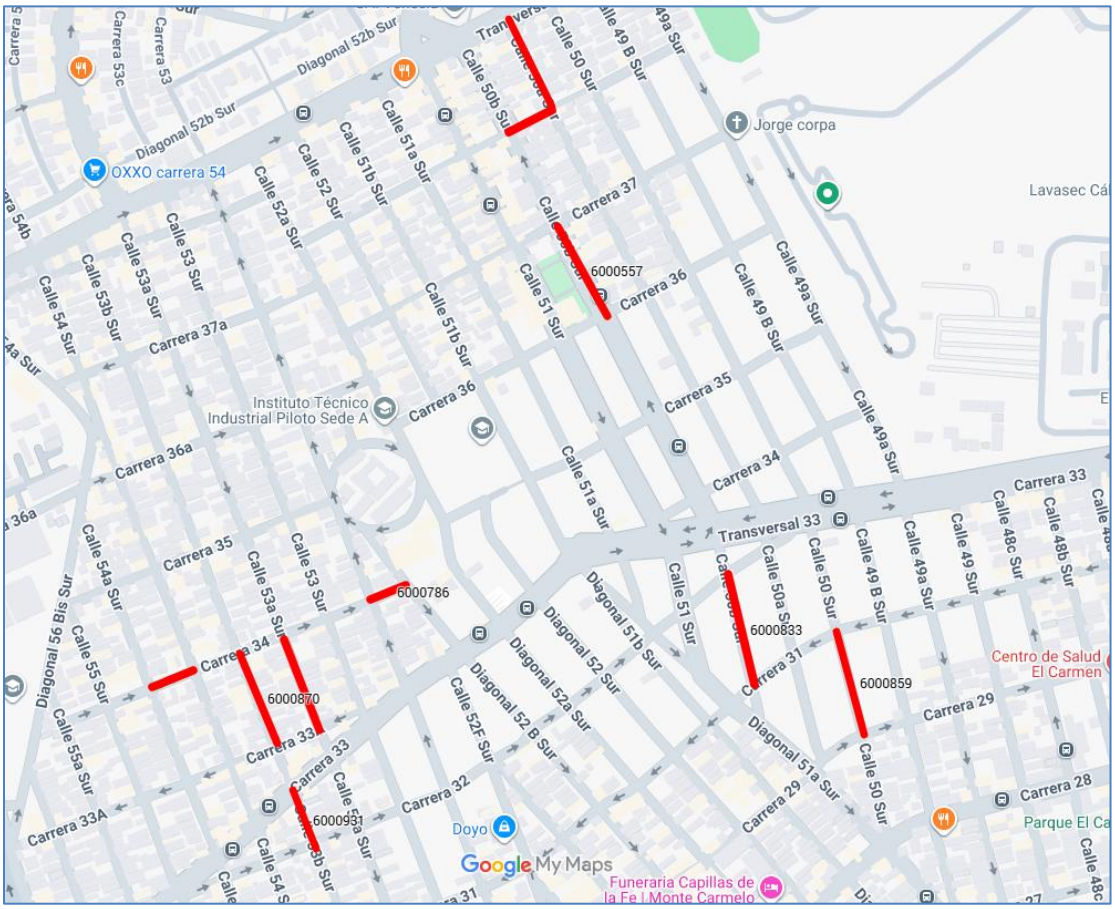


Ilustración 2. Ubicación segmentos viales (Fuente: Propia- Google Earth)

CIV	EJE	DESDE	HASTA	ÁREA (m2)
6000859	CLL. 50 SUR	CRA. 29	CRA. 31	170,6
6000931	CLL. 53B SUR	CRA. 32	CRA. 33	287,46
6000833	CLL. 50B SUR	CRA. 32	CRA. 31	180,3
6000557	CLL. 50A SUR	CRA. 36	CRA. 37	220,1
6000389	CRA. 38	CLL. 50A SUR	CLL. 50B SUR	100,3
6000372	CLL. 50A SUR	TV. 44	CRA. 38	180,3
6000830	CRA. 34	CLL. 54 SUR	CLL. 54A SUR	120,54
6000870	CL. 53B SUR	CRA. 33A	CRA. 34	650,34
6000857	CL. 53A SUR	CRA. 33A	CRA. 34	606,41
6000786	CRA. 34	DG. 52B SUR	CL. 52G SUR	231,43

Tabla 1. Información general de los segmentos viales (Fuente: Propia)

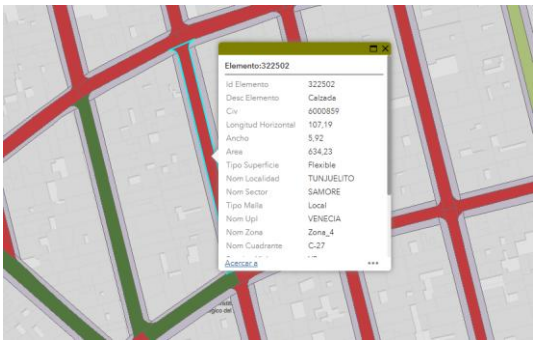


Ilustración 3. Ubicación Segmento vial 6000859. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

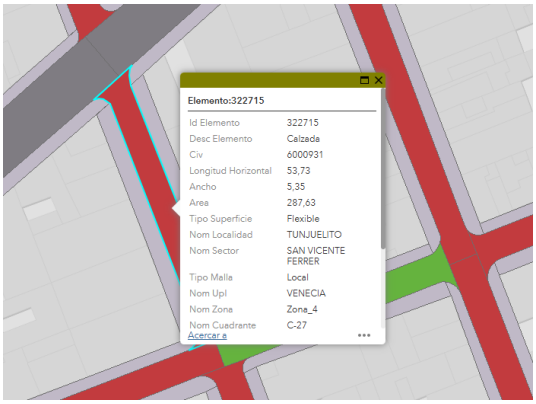


Ilustración 4. Ubicación Segmento vial 6000931. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

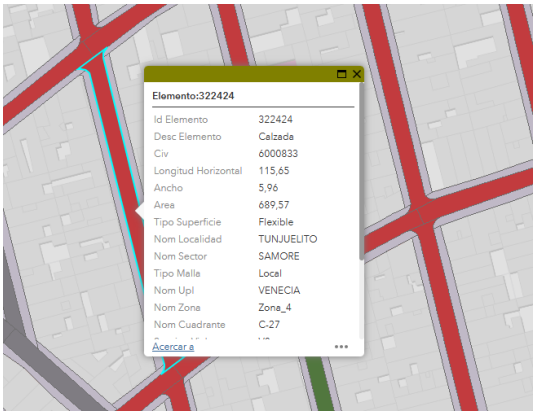


Ilustración 5. Ubicación Segmento vial 6000833. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

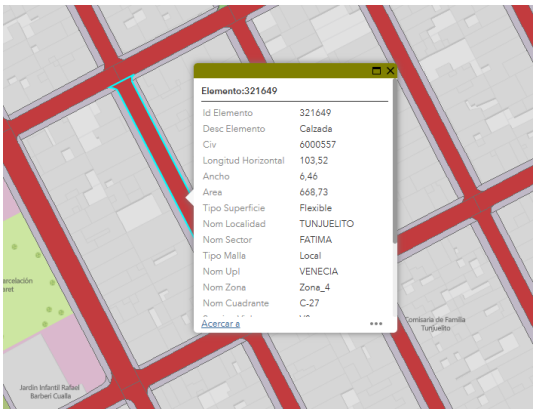


Ilustración 6. Ubicación Segmento vial 6000557. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

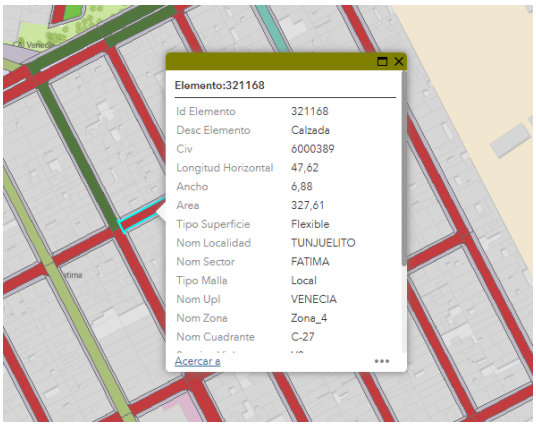


Ilustración 7. Ubicación Segmento vial 6000389. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

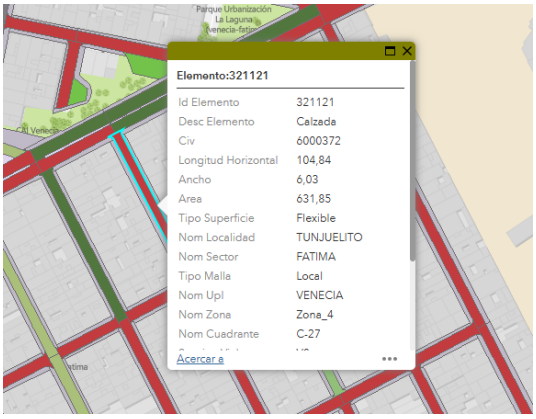


Ilustración 8. Ubicación Segmento vial 6000372. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

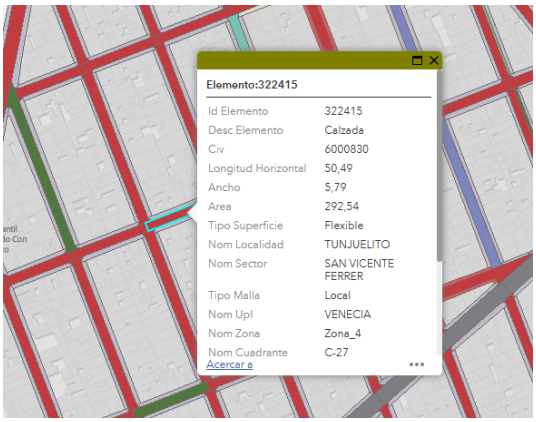


Ilustración 9. Ubicación Segmento vial 6000830. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

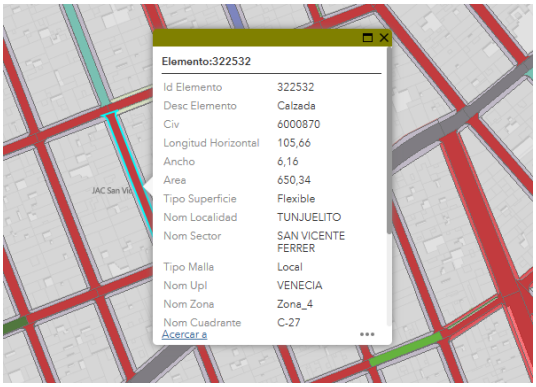


Ilustración 10. Ubicación Segmento vial 6000870. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

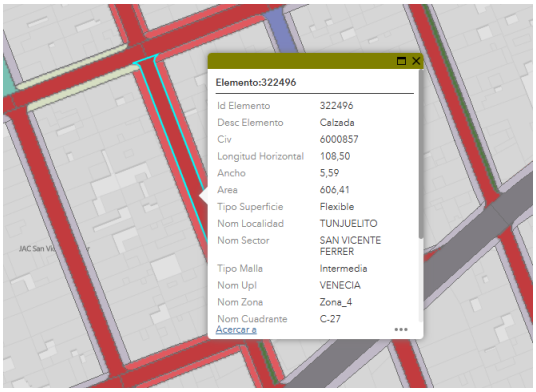


Ilustración 11. Ubicación Segmento vial 6000857. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

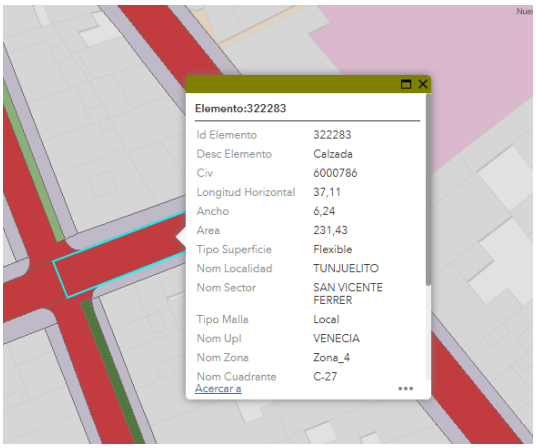


Ilustración 12. Ubicación Segmento vial 600786. (fuente: Inventario Malla Vial – IDU)

3. DIAGNÓSTICO VIAL POR LA METODOLOGÍA PCI

En el presente apartado se muestra el panorama general del estado actual de los tramos viales de estudio, los cuales fueron mostrados en el documento DIAGNÓSTICO DE LA MALLA VIAL DE LA LOCALIDAD DE TUNJUELITO. Allí se evaluaron las condiciones de operación en términos de la estructura de pavimento y su condición superficial a partir de los lineamientos establecidos en la metodología Pavement Condition Index – PCI. De acuerdo con la evaluación funcional y estructural, en el diagnostico vial se recomendó una intervención del tipo RECONSTRUCCIÓN debido al estado actual de las vías de acuerdo a los daños que fueron relacionados en el documento de diagnóstico. Teniendo en cuenta lo anterior se presenta los resultados de diagnóstico para cada uno de las unidades de muestreo que hacen parte de los segmentos viales:

CIV	EJE	DESDE	HASTA	CLASIFICACIÓN DE INTERVENCIÓN
6000859	CLL. 50 SUR	CRA. 29	CRA. 31	RECONSTRUCCIÓN
6000931	CLL. 53B SUR	CRA. 32	CRA. 33	RECONSTRUCCIÓN
6000833	CLL. 50B SUR	CRA. 32	CRA. 31	RECONSTRUCCIÓN
6000557	CLL. 50A SUR	CRA. 36	CRA. 37	RECONSTRUCCIÓN
6000389	CRA. 38	CLL. 50A SUR	CLL. 50B SUR	RECONSTRUCCIÓN

CIV	EJE	DESDE	HASTA	CLASIFICACIÓN DE INTERVENCIÓN
6000372	CLL. 50A SUR	TV. 44	CRA. 38	RECONSTRUCCIÓN
6000830	CRA. 34	CLL. 54 SUR	CLL. 54A SUR	RECONSTRUCCIÓN
6000870	CL. 53B SUR	CRA. 33A	CRA. 34	RECONSTRUCCIÓN
6000857	CL. 53A SUR	CRA. 33A	CRA. 34	RECONSTRUCCIÓN
6000786	CRA. 34	DG. 52B SUR	CL. 52G SUR	RECONSTRUCCIÓN

Tabla 2. Tipo de intervención del segmento vial de acuerdo a diagnostico (Fuente: Propia)

Tabla 3. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000859 (Fuente: Propia)

Tabla 4. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000931 (Fuente: Propia)



Tabla 5. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000833 (Fuente: Propia)



Tabla 6. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000557 (Fuente: Propia)



Tabla 7. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000389 (Fuente: Propia)

Tabla 8. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000372 (Fuente: Propia)

Tabla 9. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000830 (Fuente: Propia)

Tabla 10. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000870 (Fuente: Propia)

Tabla 11. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000857 (Fuente: Propia)

Tabla 12. Registro fotográfico segmento vial CIV 6000857 (Fuente: Propia)

4. TRÁNSITO DE DISEÑO

En general, el tránsito influye de manera directa en el diseño de las estructuras de pavimento. El número y el peso de los ejes que pasan en el período de diseño imponen una agresividad o daño a la estructura. En una vía local este parámetro de diseño influye en mayor magnitud, puesto que el tiempo de aplicación de la carga es mayor debido a que la velocidad de diseño es inferior si se compara con vías principales.

La evaluación del tránsito tiene en cuenta la clasificación y configuración de los vehículos, que permite diferenciar el flujo vehicular que puede circular en este tipo de vías. La clasificación de los vehículos se realiza acorde con su uso, comercial o no, y a su peso,

vehículos livianos y pesados. La clasificación asociada al uso de los vehículos define la distribución de tránsito en una vía local rural. Por su parte, la clasificación según la carga permite evaluar el daño que los vehículos pesados imponen a la estructura de pavimento.
En cuanto a su configuración, los vehículos pesados se clasifican por el número y tipo de eje que poseen (Resolución 4100 de 2004 modificada – Resolución 1782 de 2009 – Ministerio de Transporte). Para vías de las distintas localidades de Bogotá se estima que pasarán vehículos tipo 2 y tipo 3, puesto que vehículos pesados de una mayor clasificación necesitan de condiciones geométricas amplias difíciles de encontrar en este tipo de vías.
Los segmentos viales de la localidad de TUNJUELITO en su mayoría cuentan con un flujo vehicular entre un rango entre flujo bajo y medio. En su mayoría corresponden a vías locales de carácter residencial con tránsito de vehículos livianos, por consiguiente, si se tiene en cuenta que la vía se encuentra clasificada como Tipo de Malla Local, se asume el valor establecido por la Guía GU-IC-019 “DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO Y VÍAS LOCALES PARA BOGOTÁ D.C. elaborada por el Instituto de Desarrollo Urbano - IDU para un nivel de tránsito tipo T1-1.

De acuerdo con lo establecido en la guía anteriormente mencionada, la categoría de tránsito T1-1 comprende un número de vehículos comerciales inferiores a 50 y para el cual se espera un Número de Ejes Equivalentes (NEE) inferior a 615.000 para pavimentos flexibles y menor a 2.345.000 para pavimentos rígidos, en un periodo de 10 y 20 años respectivamente. En cambio, la categoría de tránsito T2-1 comprende un número de vehículos comerciales mayores a 50 y menores o iguales 100; para el cual se espera un Número de Ejes Equivalentes (NEE) mayores a 2.345.000 y menores o iguales 4.690.000 para pavimentos rígidos pero mayores a 615.000 y menores o iguales 1.235.000 para el caso de pavimentos flexibles.

Denominación	Número de vehículos comerciales día	NEE (Número de ejes equivalente de 8.2 T) para 20 años – Pavimento rígido	NEE (Número de ejes equivalente de 8.2 T) para 10 años – Pavimento flexible y articulado
T1–1	VDPo ≤ 50	NEE ≤ 2.345.000	NEE ≤ 615.000
T2–1	50 < VDPo ≤ 100	2.345.000 < NEE ≤ 4.690.000	615.000 < NEE ≤ 1.235.000
T2–2	100 < VDPo ≤ 150	4.690.000 < NEE ≤ 7.000.000	1.235.000 < NEE ≤ 1.855.000

Tabla 13. Número de ejes equivalentes para el segmento vial. (Fuente: Guía GU-IC-019,2013)

La utilización de la categoría de tránsito T1-1 en vías locales sin necesidad de realizar aforos se sustenta en criterios técnicos, normativos y funcionales que garantizan la pertinencia y solidez del diseño de pavimentos en contextos residenciales. La Guía GU-IC-019 del IDU, aplicable a Bogotá, establece parámetros tipificados para vías locales y de bajo volumen de tránsito, con el propósito de unificar metodologías de diseño y reducir la necesidad de estudios costosos en segmentos de red cuya dinámica vehicular es estable y predecible. En estas vías, el tránsito se compone en su mayoría de automóviles, motocicletas y camionetas livianas, con una presencia mínima de vehículos pesados, lo que hace que el volumen de vehículos comerciales difícilmente supere el umbral de 50 diarios definido para la categoría T1-1.

Desde el punto de vista funcional, las vías locales no están diseñadas para soportar tránsito de carga de alta intensidad, sino para garantizar la accesibilidad a predios y la movilidad interna de barrios y sectores residenciales. Esta condición implica que la configuración vehicular que circula en ellas corresponde mayoritariamente a vehículos tipo 2 y tipo 3, según lo definido por el Ministerio de Transporte, los cuales imponen un nivel de solicitación significativamente inferior al observado en corredores principales o de carácter arterial. Por tal motivo, el empleo de la categoría T1-1 resulta coherente con la realidad operativa de la malla vial local y evita la sobrestimación de cargas que podrían derivar en diseños sobredimensionados e ineficientes.

Adicionalmente, la categoría T1-1 presenta un carácter conservador en cuanto al número de ejes equivalentes (NEE) considerados para el periodo de diseño. Este margen de seguridad permite absorber incrementos moderados en el tránsito que puedan surgir por cambios en el uso del suelo, crecimiento poblacional o eventual circulación de vehículos pesados, sin comprometer la durabilidad y el desempeño de la estructura del pavimento. De esta manera, aun en ausencia de aforos específicos, el diseño se mantiene dentro de parámetros de confiabilidad técnica y responde adecuadamente a posibles escenarios de variación en la demanda vehicular.

La no realización de aforos en vías locales se justifica también en términos de eficiencia técnica y económica. Invertir recursos en la medición puntual de volúmenes vehiculares en segmentos residenciales, donde la variabilidad y la magnitud del tránsito son reducidas, no aporta información adicional relevante para el diseño. Por el contrario, el uso de valores tipificados como T1-1 permite optimizar recursos y concentrar esfuerzos en corredores de mayor jerarquía y complejidad, donde sí se requiere un análisis detallado de la demanda de tránsito para garantizar la validez del dimensionamiento estructural.

En conclusión, la adopción del tránsito T1-1 en vías locales sin necesidad de aforos constituye una decisión técnica sustentada en la normativa vigente, en la predictibilidad del comportamiento vehicular de la red de malla local, en la coherencia funcional de estas vías y en un criterio de eficiencia en la planeación y utilización de recursos. Este enfoque asegura que el diseño de pavimentos en localidades como Tunjuelito sea adecuado, seguro y ajustado a las condiciones reales de operación, sin incurrir en sobrecostos ni en procedimientos innecesarios.

Con base en la información obtenida se determina que una categoría T1-1 de acuerdo a categoría IDU, por lo cual, será usado el traficó obtenido de la proyección que corresponde a 2.345.000 Ejes equivalentes.

En el caso de los presentes tramos viales se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- Al realizar la intervención de este tramo vial se atrae un tránsito de la zona adyacente al mismo, ya que es uno de los corredores de movilidad alternos.
- El número de ejes equivalentes se debe establecer teniendo en cuenta que el Fondo de Desarrollo Local no volverá a priorizar este corredor en 10 años como mínimo, y el tramo vial debe estar funcional en la medida de lo posible durante este período.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, el número de ejes equivalentes para diseño de pavimento flexible y rígido se establecen a continuación:

CIV	EJE	DESDE	HASTA	TIPO DE VÍA	NEE FLEXIBLE	NEE RÍGIDO
6000859	CLL. 50 SUR	CRA. 29	CRA. 31	LOCAL	615.000	2.345.000
6000931	CLL. 53B SUR	CRA. 32	CRA. 33	LOCAL	615.000	2.345.000
6000833	CLL. 50B SUR	CRA. 32	CRA. 31	LOCAL	615.000	2.345.000
6000557	CLL. 50A SUR	CRA. 36	CRA. 37	LOCAL	615.000	2.345.000
6000389	CRA. 38	CLL. 50A SUR	CLL. 50B SUR	LOCAL	615.000	2.345.000
6000372	CLL. 50A SUR	TV. 44	CRA. 38	LOCAL	615.000	2.345.000
6000830	CRA. 34	CLL. 54 SUR	CLL. 54A SUR	LOCAL	615.000	2.345.000
6000870	CL. 53B SUR	CRA. 33A	CRA. 34	LOCAL	615.000	2.345.000
6000857	CL. 53A SUR	CRA. 33A	CRA. 34	LOCAL	615.000	2.345.000
6000786	CRA. 34	DG. 52B SUR	CL. 52G SUR	LOCAL	615.000	2.345.000

Tabla 14. Tránsito en los segmentos viales (Fuente: Propia)

5. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

El objetivo principal de la exploración del subsuelo es identificar la variación vertical de los diferentes tipos de suelos y/o unidades estratigráficas en la longitud del corredor vial en estudio, los espesores de las capas, el estado de las capas granulares que se identifican en profundidad y el tipo de subrasante que se tiene como en la parte inferior de la estructura de pavimento.

Para conocer las propiedades físicas, intrínsecas y los parámetros geotécnicos de los materiales presentes en los tramos viales, se procedió a realizar la exploración directa mediante apiques, en ellos se tomaron muestras inalteradas para realizar los respectivos ensayos. Teniendo en cuenta la longitud de cada segmento vial, se tomaron apiques

manuales ejecutados con profundidad de 1.50 metros, donde en concordancia con las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Pavimentos del IDU, los ensayos que se realizaron sobre las exploraciones son los siguientes:

- Ensayo de contenido de humedad (INV E-123)

- Límites de Atterberg (INV E-125, INV E-126)

- Análisis granulométrico (INV E-122)

- Ensayo CBR (INV E-132 para laboratorio e INV E-133 para campo)

CIV	COORDENADA APIQUE
6000859	4°35'00"N 74°08'04"W
6000931	4°34'56"N 74°08'23"W
6000833	4°35'02"N 74°08'08"W
6000557	4°35'15"N 74°08'13"W
6000389	4°35'20"N 74°08'15"W
6000372	4°35'22"N 74°08'15"W
6000830	4°35'00"N 74°08'28"W
6000870	4°35'00"N 74°08'25"W
6000857	4°35'00"N 74°08'23"W
6000786	4°35'04"N 74°08'20"W

Tabla 15. Ubicación de los apiques en los segmentos viales (Fuente: Propia)



Ilustración 13. Ubicación de los apiques (Fuente: Propia- Google Earth)

La campaña de exploración realizada mediante el apique ejecutados resulta técnicamente suficiente para la caracterización geotécnica de la zona de intervención y, en consecuencia, para el diseño de la estructura de pavimento. De acuerdo con los lineamientos del IDU consignados en la guía GU-IC-019 y en las especificaciones generales de exploración geotécnica, la densidad y distribución de apiques debe garantizar una cobertura adecuada de los tramos representativos de la vía, priorizando aquellos sectores con mayor influencia estructural y funcional. En este caso, la disposición espacial de los cuatro puntos asegura la representación de los diferentes segmentos de la malla vial proyectada, evitando concentraciones o vacíos que comprometan la confiabilidad del análisis.

Asimismo, la información obtenida evidencia condiciones de subrasante homogéneas en cuanto a composición y capacidad de soporte, lo cual reduce la variabilidad geotécnica y valida la decisión de no aumentar el número de exploraciones. La proximidad de los apiques al eje de calzada, según lo establecido en las recomendaciones técnicas del IDU, garantiza que los resultados reflejen de manera directa las solicitaciones de tránsito esperadas para vías locales (clasificación T1-1), sin requerir un nivel de muestreo más intensivo.

Finalmente, el diseño de pavimentos considera factores de seguridad normativos y coeficientes de ajuste que permiten absorber variaciones menores en las propiedades de la subrasante. Bajo estas condiciones, se concluye que los cuatro apiques ejecutados constituyen una base técnica y normativa suficiente para la caracterización del terreno, cumpliendo con los criterios de representatividad, homogeneidad y confiabilidad establecidos por el IDU para estudios de este tipo.

A continuación, se presentan los perfiles estratigráficos encontrados y los resultados de los ensayos de laboratorio.

5.1 Estratigrafía

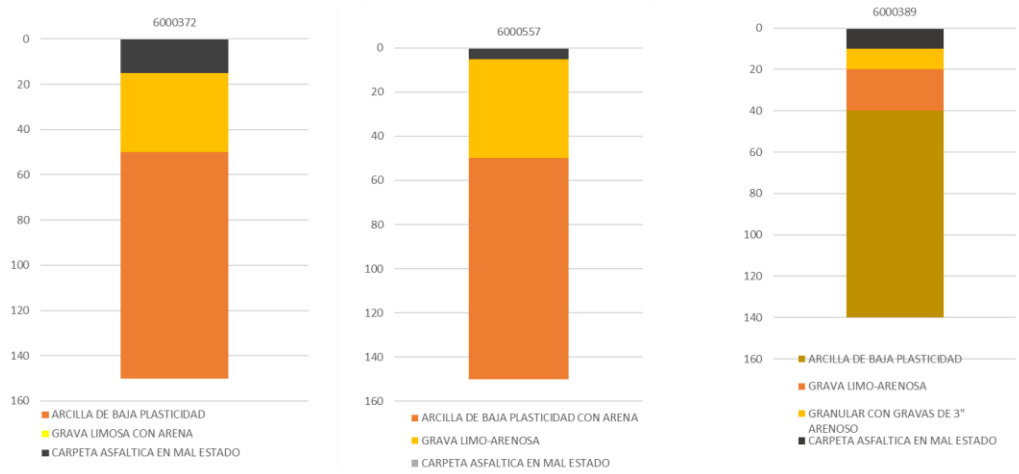


Ilustración 14. Perfiles Estratigráficos parte 1 (Fuente: Propia)

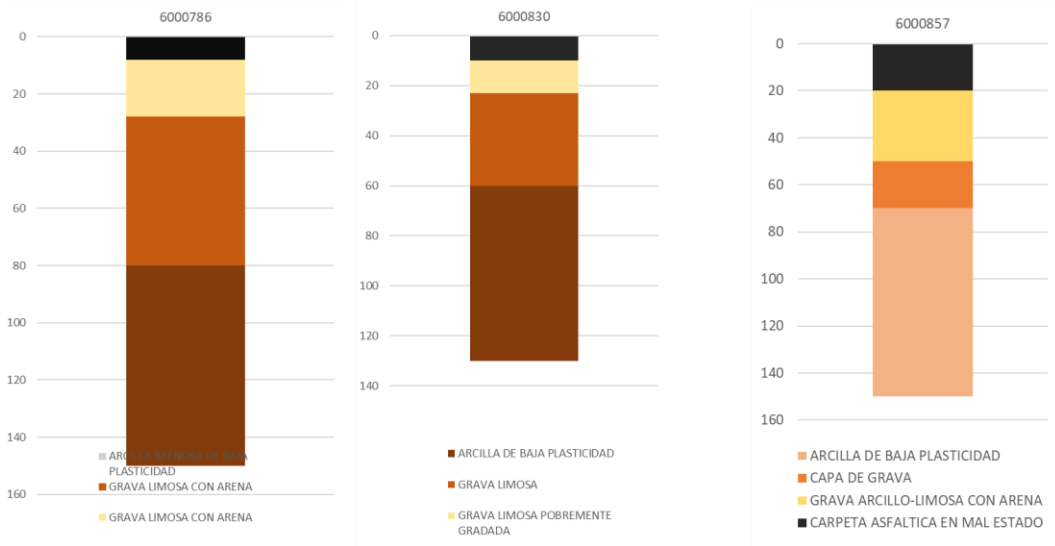


Ilustración 15. Perfiles Estratigráficos parte 2 (Fuente: Propia)

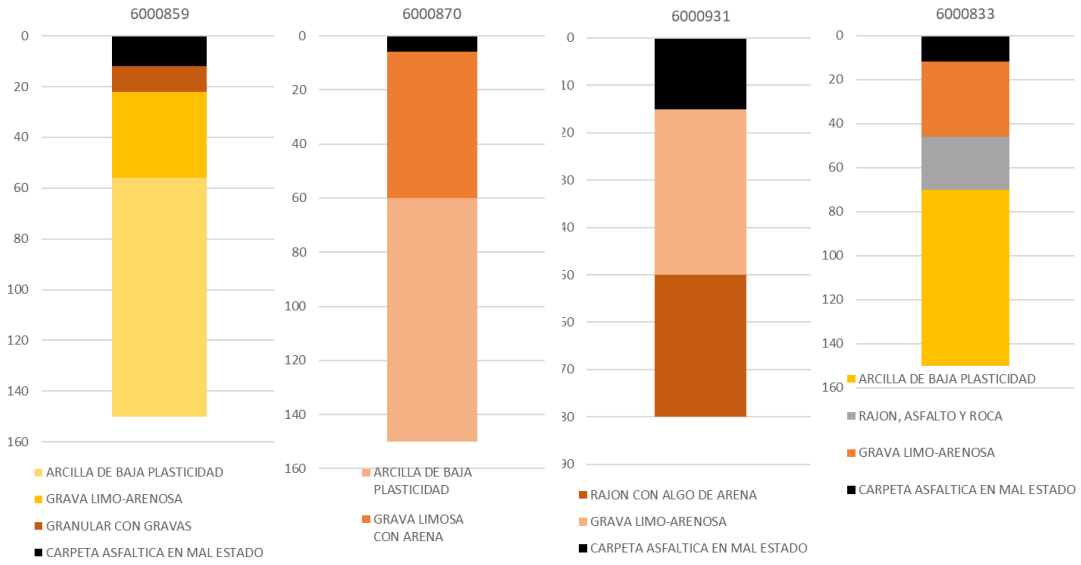


Ilustración 16. Perfiles Estratigráficos parte 3 (Fuente: Propia)

- En el apique 6000372 se identificó un perfil estratigráfico conformado por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 15 cm, seguida de una capa de grava limosa con arena de 35 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad de 100 cm.

- En el apique 6000557 se observó un perfil estratigráfico compuesto por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 5 cm, una capa de grava limo-arenosa de 45 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad con arena de 100 cm.
- En el apique 6000389 se identificó un perfil estratigráfico constituido por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 10 cm, una capa granular arenosa con gravas de hasta 3” de 10 cm, una capa de grava limo-arenosa de 20 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad de 100 cm.
- En el apique 6000786 se observó un perfil estratigráfico conformado por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 8 cm, una capa de grava limosa con arena de 72 cm y una capa de arcilla arenosa de baja plasticidad de 70 cm.
- En el apique 6000830 se identificó un perfil estratigráfico compuesto por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 10 cm, una capa de grava limosa pobremente gradada de 13 cm, una capa de grava limosa de 37 cm y dos capas consecutivas de arcilla de baja plasticidad de 70 cm y 20 cm, respectivamente.
- En el apique 6000857 se observó un perfil estratigráfico conformado por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 20 cm, seguida de una capa de grava arcillo-limosa con arena de 30 cm, una capa de grava de 20 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad de 80 cm.
- En el apique 6000859 se identificó un perfil estratigráfico compuesto por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 12 cm, una capa granular con gravas de 10 cm, una capa de grava limo-arenosa de 34 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad de 94 cm.
- En el apique 6000870 se observó un perfil estratigráfico conformado por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 6 cm, una capa de grava limosa con arena de 54 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad de 90 cm.
- En el apique 6000931 se identificó un perfil estratigráfico compuesto por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 15 cm, una capa de grava limo-arenosa de 35 cm, una capa de rajón con presencia de arena de 30 cm y una capa de arcilla arenosa de 70 cm.

- En el apique 6000833 se observó un perfil estratigráfico conformado por una capa de carpeta asfáltica en mal estado de 12 cm, una capa de grava limo-arenosa de 34 cm, una capa de rajón, asfalto y roca de 24 cm y una capa de arcilla de baja plasticidad de 80 cm..

En el anexo 7 se encuentran los certificados de los laboratorios.

5.2 Nivel freático

Con respecto al nivel freático, en ninguno de los apiques se reporta una condición de nivel freático hasta la profundidad de exploración.

5.3 Ensayos de caracterización física

Para el desarrollo del presente documento se realizaron apiques en donde se tomaron muestras alteradas y se realizaron ensayos índices de clasificación (humedad natural, límites de consistencia y gradación), y sobre las muestras inalteradas recuperadas en la subrasante se realizaron ensayos de CBR en laboratorio. A continuación, se muestran los resultados de los apiques realizados:

Característica	6000372	6000557	6000389	6000786	6000830
Profundidad (m)	0,50 - 1,50	0,50 - 1,50	0,50 - 1,50	0,80 - 1,50	1,3 - 1,5
Clasificación U.S.C.S.	CL	CL	CL	CL	CL
Limite líquido (%)	35	35	37	37	47
Limite plástico (%)	22	22	23	23	23
Índice de plasticidad	13	13	14	14	24
Humedad natural (%)	18,02	20,36	20,77	25,25	34,89
Gravas (%)	0	0	0	0	0
Arenas (%)	3	26	10	46	3
Finos (%)	97	74	90	54	97
Expansión CBR (%)	0,5	0,73	0,31	0,2	0,4
Límite de contracción	18	18	18	18	16

Tabla 16. Características físicas de la subrasante parte 1 (Fuente: Adaptado de ensayos de laboratorio)

Característica	6000857	6000859	6000870	6000931	6000833
Profundidad (m)	0,70 - 1,50	0,56 - 1,50	0,60 -1,50	0,8 - 1,50	0,70 - 1,50
Clasificación U.S.C.S.	CL	CL	CL	CL	CL
Limite líquido (%)	33	40	38	34	36
Limite plástico (%)	24	24	24	23	23
Índice de plasticidad	9	16	14	11	13
Humedad natural (%)	21,13	22,22	22,17	18,23	17,69
Gravas (%)	0	0	0	0	0
Arenas (%)	23	4	12	31	11
Finos (%)	77	96	88	69	89
Expansión CBR (%)	0,46	0,39	0,52	0,19	0,46
Límite de contracción	21	19	19	19	19

Tabla 17. Características físicas de la subrasante parte 2 (Fuente: Adaptado de ensayos de laboratorio)

*Nota: el límite de contracción fue calculado a partir del límite líquido y el índice de plasticidad.

Como parámetro fundamental en el diagnóstico de la estructura de pavimento del tramo de estudio se hace necesaria la determinación de las características intrínsecas del subsuelo, en lo que respecta al perfil estratigráfico y el estado y condición de los mismos para ser aprovechados dentro de las intervenciones propuestas.

A partir de lo anterior, se presentan las curvas de gradación obtenidas en el laboratorio para los materiales granulares existentes en la estructura de la vía. Se superponen los límites establecidos por el IDU para una Subbase Granular (SBG) en líneas discontinuas color rojo, se observa que ninguno de los materiales encontrados en campo no cumple con los criterios de gradación para una Subbase ya que sobrepasan el límite superior o inferior de la especificación indicando una presencia de finos muy superior e inferior al valor máximo establecido.

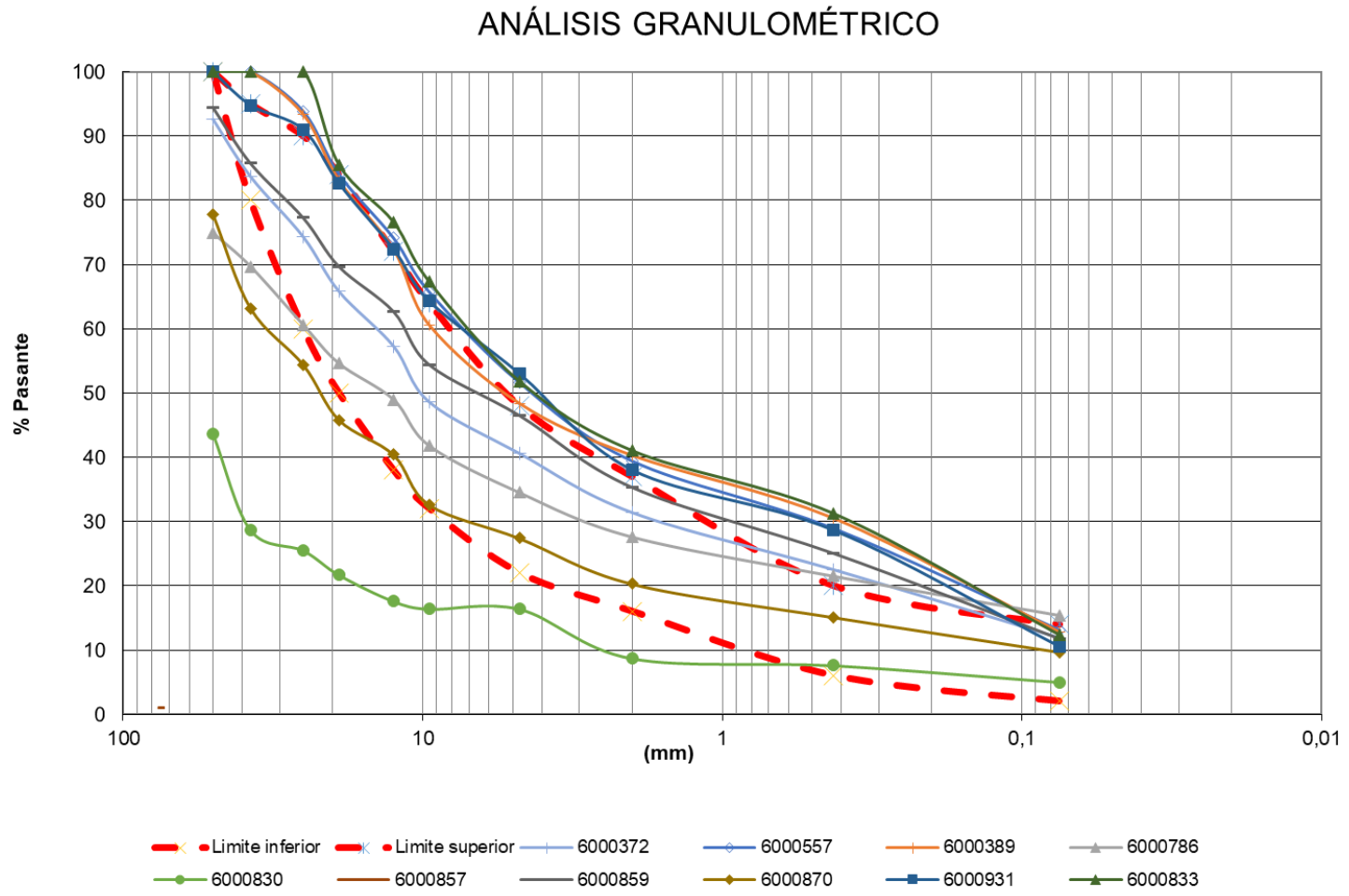


Ilustración 17. Análisis granulométrico materiales encontrados en los apiques en comparación a la especificación IDU para Subbase Granular (Fuente: Propia)

A partir de lo anterior, se presentan las curvas de gradación obtenidas en el laboratorio para los materiales granulares existentes en la estructura de la vía. Se superponen los límites establecidos por el IDU para una Subbase Granular (SBG) en líneas discontinuas color rojo, se observa que ninguno de los materiales encontrados en campo cumple con los criterios de gradación para una Subbase ya que sobrepasan el límite superior de la especificación indicando una presencia de finos muy superior al valor máximo establecido. Por lo que, se concluye lo siguiente:

CIV	EJE	DESDE	HASTA	DIAGNOSTICO INICIAL DE LA MALLA VIAL	CLASIFICACIÓN DE INTERVENCIÓN
6000859	CLL. 50 SUR	CRA. 29	CRA. 31	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000931	CLL. 53B SUR	CRA. 32	CRA. 33	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000833	CLL. 50B SUR	CRA. 32	CRA. 31	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000557	CLL. 50A SUR	CRA. 36	CRA. 37	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000389	CRA. 38	CLL. 50A SUR	CLL. 50B SUR	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000372	CLL. 50A SUR	TV. 44	CRA. 38	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000830	CRA. 34	CLL. 54 SUR	CLL. 54A SUR	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000870	CL. 53B SUR	CRA. 33A	CRA. 34	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000857	CL. 53A SUR	CRA. 33A	CRA. 34	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN
6000786	CRA. 34	DG. 52B SUR	CL. 52G SUR	RECONSTRUCCIÓN	RECONSTRUCCIÓN

Tabla 18. Tipos de intervención. (Fuente: Propia)

Lo anterior teniendo en cuenta que, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en su glosario (página 82 -https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/Glosario/GLOSARIO7NOV21.pdf) define la Reconstrucción como: retiro y reemplazo parcial o total de la estructura de un pavimento o de espacio público, para generar una nueva estructura. Es posible considerar la reutilización total o parcial de los materiales existentes.

5.4 Análisis de potencial de expansión

El potencial de expansión se evalúa por varios criterios en función a los límites de consistencia, medición del esfuerzo de expansión, entre otros. El análisis cualitativo de expansión se realiza bajo los criterios establecidos en la NSR-10, de acuerdo con los límites de consistencia.

Potencial de expansión	Expansión (%) medida en consolidómetro bajo presión vertical de 0.07 kgf/cm2	Límite Líquido LL, en (%)	Límite de contracción en (%)	Índice de Plasticidad IP, en (%)	Porcentaje de partículas menores de una micra (m)	Expansión libre EL en (%), medida en probeta
Muy alto	>30	> 63	< 10	> 32	> 37	> 100
Alto	20 - 30	50 - 63	6 – 12	23 – 45	18 – 37	> 100
Medio	10 - 20	39 - 50	8 – 18	12 – 34	12 – 27	50 - 100
Bajo	< 10	< 39	> 13	< 20	< 17	< 50

Tabla 19. Clasificación de suelos expansivos. (Fuente: Tabla H.9.1-1, NSR10)

CIV	PROFUNDIDAD (m)	Expansión CBR (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	LL (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	LC (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	IP (%)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN	Porcentaje de partículas menores de una micra (m)	POTENCIAL DE EXPANSIÓN
6000372	0,50 - 1,50	0,5	Bajo	35	Bajo	18	Bajo	13	Medio	97	Muy alto
6000557	0,50 - 1,50	0,73	Bajo	35	Bajo	18	Bajo	13	Medio	74	Muy alto
6000389	0,50 - 1,50	0,31	Bajo	37	Bajo	18	Bajo	14	Medio	90	Muy alto
6000786	0,80 - 1,50	0,2	Bajo	37	Bajo	18	Bajo	14	Medio	54	Muy alto
6000830	1,3 - 1,5	0,4	Bajo	47	Medio	16	Bajo	24	Alto	97	Muy alto
6000857	0,70 - 1,50	0,46	Bajo	33	Bajo	21	Bajo	9	Bajo	77	Muy alto
6000859	0,56 - 1,50	0,39	Bajo	40	Medio	19	Bajo	16	Medio	96	Muy alto
6000870	0,60 -1,50	0,52	Bajo	38	Bajo	14	Bajo	14	Medio	88	Muy alto
6000931	0,8 - 1,50	0,19	Bajo	34	Bajo	19	Bajo	11	Bajo	69	Muy alto
6000833	0,70 - 1,50	0,46	Bajo	36	Bajo	19	Bajo	13	Medio	89	Muy alto

Tabla 20. Potencial expansivo de la subrasante- NSR -10. (Fuente: Elaboración propia)

Parámetro	Qué evalúa	Uso principal
LL – IP	Capacidad intrínseca del suelo para expandirse	Clasificación del material
w – LL	Estado actual del suelo frente a su capacidad de hidratación	Riesgo real de expansión en campo

Ilustración 18. Criterio 2, análisis de expansión.

En la siguiente tabla se presenta el análisis con base en el criterio anterior:

Muestra No.	Profundidad (m)	Clasificación USCS	Límite Líquido LL (%)	Límite Plástico PL (%)	Índice Plasticidad PI (%)	Contenido Humedad (%)	FINOS (%)	LC	Potencial de expansión (LL-IP)	Potencial de expansión (WL- LL)	Potencial de contracción
6000372	0,50 - 1,50	CL	35	22	13	18,02	97	18	Medio	Alto	Bajo
6000557	0,50 - 1,50	CL	35	22	13	20,36	74	18	Medio	Alto	Bajo
6000389	0,50 - 1,50	CL	37	23	14	20,77	90	18	Medio	Alto	Bajo
6000786	0,80 - 1,50	CL	37	23	14	25,25	54	18	Medio	Alto	Bajo
6000830	1,3 - 1,5	CL	47	23	24	34,89	97	16	Medio	Alto	Medio
6000857	0,70 - 1,50	CL	33	24	9	21,13	77	21	Bajo	Alto	Bajo
6000859	0,56 - 1,50	CL	40	24	16	22,22	96	19	Medio	Alto	Bajo
6000870	0,60 -1,50	CL	38	24	14	22,17	88	19	Medio	Alto	Bajo
6000931	0,8 - 1,50	CL	34	23	11	18,23	69	19	Bajo	Alto	Bajo
6000833	0,70 - 1,50	CL	36	23	13	17,69	89	19	Medio	Muy alto	Bajo

Tabla 21. Potencial expansivo de la subrasante. (Fuente: Elaboración propia)

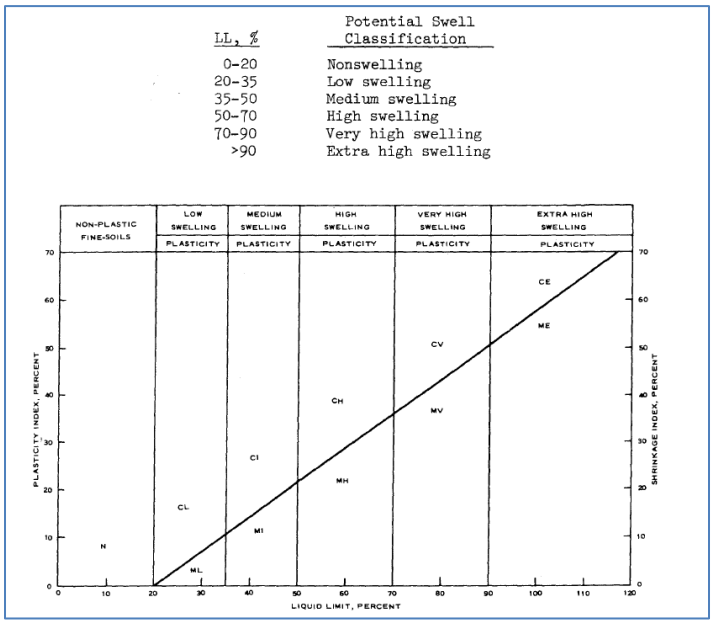


Ilustración 19. Criterio 3, Potencial de expansión, Dakshanamurthy and Raman

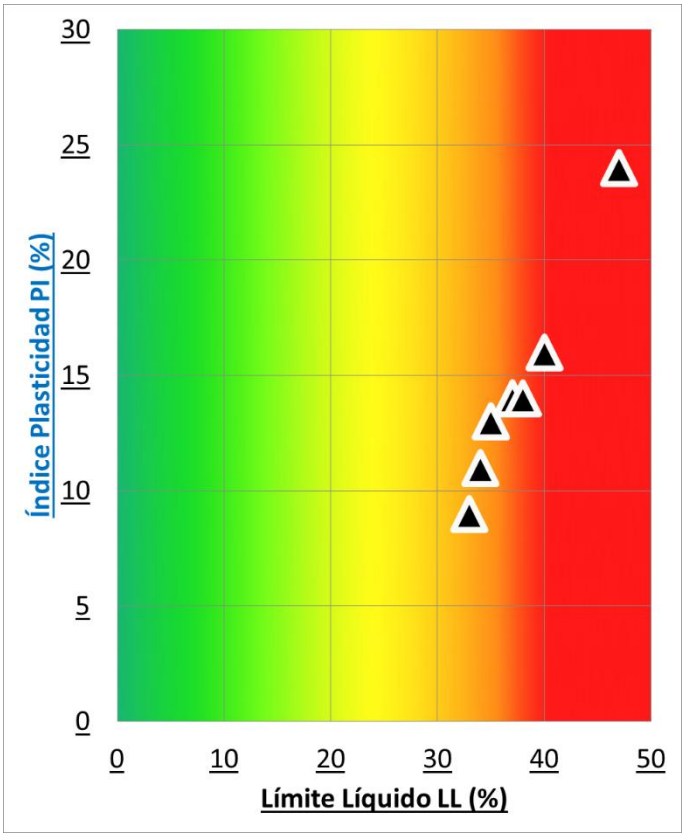


Ilustración 20. Potencial de expansión, Dakshanamurthy and Raman

Con base en los resultados obtenidos y de conformidad con los criterios establecidos en la NSR-10 para la identificación y clasificación de suelos expansivos, se concluye que la subrasante evaluada presenta una condición de expansión crítica que debe ser atendida de manera obligatoria en el diseño y ejecución de la estructura, toda vez que confluyen indicadores intrínsecos del material y condiciones reales de campo que favorecen su activación. Entre las profundidades aproximadas de 0,24 m y 1,50 m se identifica de manera continua un estrato clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH), el cual, de acuerdo con la Tabla H.9.1-1 de la NSR-10, corresponde a materiales con elevada susceptibilidad a cambios volumétricos por variaciones en el contenido de humedad. Los valores de límite líquido registrados, comprendidos entre 57 % y 75 %, ubican al material en rangos de potencial de expansión alto a muy alto, situación que se ve reforzada por índices de

plasticidad entre 32 % y 57 %, los cuales superan ampliamente los umbrales asociados a suelos con comportamiento expansivo severo. Adicionalmente, el porcentaje extremadamente alto de partículas menores de una micra, del orden del 97 % al 98 % en todas las muestras analizadas, evidencia la predominancia de fracciones ultrafinas con alta superficie específica y elevada capacidad de adsorción de agua, característica típica de suelos altamente expansivos y de respuesta volumétrica significativa ante procesos de humectación y secado.

Este diagnóstico se consolida al analizar el estado actual del suelo frente a su capacidad de hidratación, mediante el criterio contenido de humedad natural (w) versus límite líquido (LL), el cual permite evaluar el riesgo real de expansión en condiciones de campo. Los contenidos de humedad medidos, entre aproximadamente 24 % y 38 %, combinados con límites líquidos elevados, indican que el material se encuentra en un rango de humedad que lo hace particularmente sensible a incrementos adicionales de agua, ya sea por infiltración superficial, deficiencias de drenaje, ascenso capilar o variaciones estacionales, pudiendo alcanzar con facilidad estados que detonan procesos de hinchamiento. En este contexto, el potencial expansivo no es únicamente teórico, sino que existe una alta probabilidad de que se manifieste durante la vida útil de la estructura.

De igual forma, los valores de límite de contracción obtenidos, junto con su clasificación como potencial de contracción alto a muy alto, ponen de manifiesto que el comportamiento del suelo no se limita a un evento puntual de expansión, sino que responde a un mecanismo cíclico de expansión-contracción, especialmente perjudicial para estructuras superficiales, dado que genera levantamientos diferenciales, fisuración, pérdida de contacto entre capas y facilita la entrada de agua, agravando progresivamente el deterioro estructural. Esta condición se ve agravada por los resultados de capacidad de soporte, donde los valores de CBR inalterado y sumergido evidencian una subrasante débil y marcadamente sensible a la humedad, con pérdidas significativas de resistencia al incrementarse el contenido de agua, lo cual confirma que los cambios volumétricos se acompañan de una reducción sustancial de la capacidad portante.

Finalmente, la criticidad de la condición identificada se acentúa por la ubicación del estrato expansivo dentro de la denominada zona activa del suelo, comprendida dentro del rango de profundidades donde se producen las mayores variaciones de humedad y succión, y que además coincide con la zona directamente influenciada por las cargas transmitidas por la estructura y el tránsito. En consecuencia, la presencia de una arcilla de alta plasticidad, con potencial expansivo alto a muy alto, activa frente a condiciones reales de humedad y con baja capacidad de soporte, constituye un escenario de riesgo técnico que, de no ser tratado, puede derivar en deformaciones diferenciales, pérdida de serviciabilidad y mayores costos de mantenimiento. Por lo anterior, resulta técnicamente justificado y necesario incorporar medidas específicas de control de humedad y/o mejoramiento de la subrasante, orientadas a mitigar los cambios volumétricos y garantizar el desempeño adecuado y la durabilidad de la estructura proyectada.

5.5 Análisis de potencial de contracción de arcillas

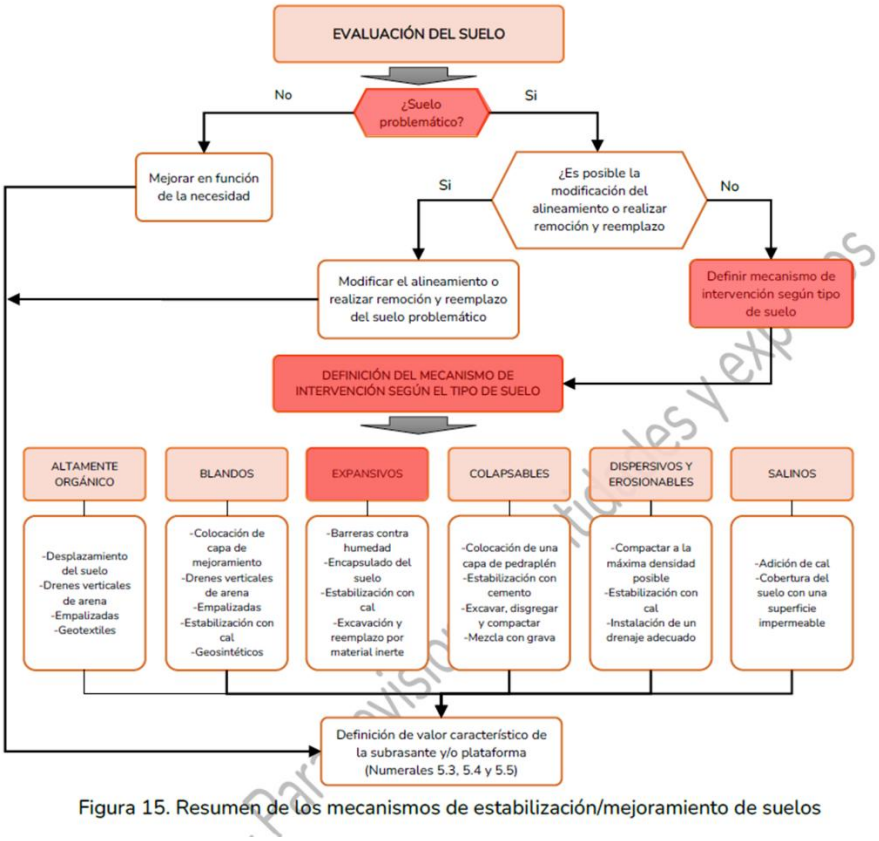


Figura 15. Resumen de los mecanismos de estabilización/mejoramiento de suelos

Ilustración 21. Guía metodológica para la identificación de suelos problemáticos – INVIAS 2025

En consecuencia, este informe considera que el estrato arcilloso 0,24 -1,50 m debe tratarse como suelo susceptible a cambios volumétricos dentro de la zona activa, y por tanto se recomienda: (i) evitar excavaciones que dejen este material expuesto sin protección; (ii) asegurar drenajes laterales y superficiales que impidan aumentos de humedad en la subrasante; y (iii) contemplar, si la rasante de diseño lo intercepta, un mejoramiento o espesores granulares que desacoplen el paquete estructural del horizonte arcilloso.

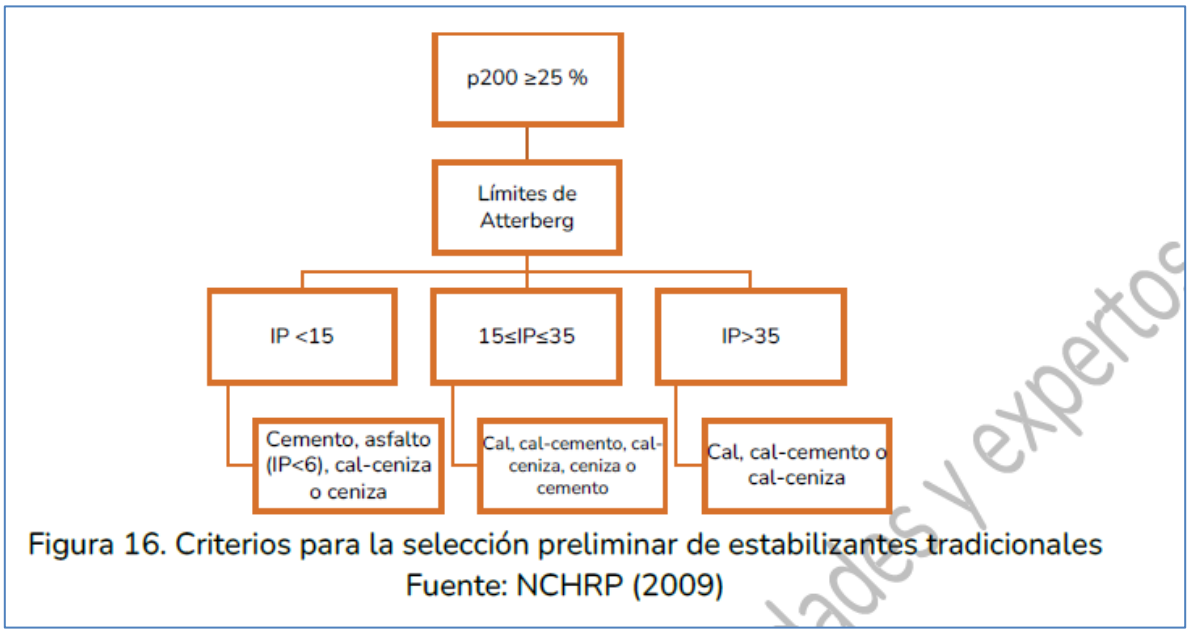


Ilustración 22. Criterios para la selección preliminar de estabilizantes tradicionales – NCHRP (2009)

5.6 Recomendación sobre la expansión y contracción

Como resultado de los análisis cualitativos y de laboratorio efectuados sobre el estrato arcilloso ubicado entre 0,24 m y 1,50 m —el cual presentó comportamiento de “arcilla crítica” presentando sensibilidad a la humedad en los CBR sumergidos — se considera necesario incorporar un tratamiento combinado que atienda, por un lado, la reactividad del suelo fino y, por otro, la transmisión de deformaciones hacia la estructura de pavimento. Para ello se plantea:

1. Tratamiento puntual de la subrasante mediante barrenos de cal, con el fin de reducir plasticidad y reactividad en la zona activa.

- Procedimiento constructivo para los barrenos de cal

Una vez ejecutada la excavación hasta la cota de diseño de la subrasante (previa a la conformación de la estructura de pavimento), se deberá realizar el siguiente procedimiento:

- Trazado de cuadrícula: marcar en planta una retícula de 1,00 m x 1,00 m, dispuesta “en tres bolillos” en ambas direcciones, de manera que los puntos de inyección queden alternados y se logre un solape adecuado de las zonas tratadas.
- Perforación: ejecutar barrenos manuales de 3” de diámetro y 1,0 m de profundidad en cada punto de la cuadrícula, procurando que la perforación atraviese el horizonte arcilloso identificado en el apique y quede dentro de la zona activa donde se presentan los cambios de humedad.
- Retiro del elemento de perforación: retirada la tubería o herramienta hincada, se procederá a la inyección del material estabilizante.
- Inyección de cal: introducir en cada barreno cal comercial con un contenido de $Ca(OH)_2$ del orden del 60 %, preparada con el mínimo contenido de agua que permita su adecuada manejabilidad, evitando mezclas demasiado fluidas que puedan perderse por las caras del barreno.
- Dosificación: se deberá colocar del orden de 17 kg de cal comercial por cada barreno de 1,0 m de longitud, garantizando una distribución homogénea. Esta dosificación está pensada para cubrir el ancho total de la vía y el largo del segmento intervenido, de modo que no queden zonas sin tratar dentro de la franja de pavimento.
- Relleno y compactación: una vez aplicado el reactivo, se procederá al relleno y compactación controlada del estrato hasta dejarlo en condiciones de recibir las capas superiores.

El objeto de estos barrenos es modificar in situ el comportamiento de la arcilla de alta plasticidad, reduciendo su índice de plasticidad efectivo y su capacidad de hinchamiento/contracción, especialmente en el tramo que queda directamente bajo la estructura de pavimento.

- Alcance de la solución

La combinación de mejoramiento puntual (barrenos de cal) permite atacar el problema en dos niveles: se mitiga la agresividad del suelo expansivo y, al mismo tiempo, se incrementa

la capacidad del paquete granular para trabajar como un sistema más rígido frente a las deformaciones impuestas desde abajo.

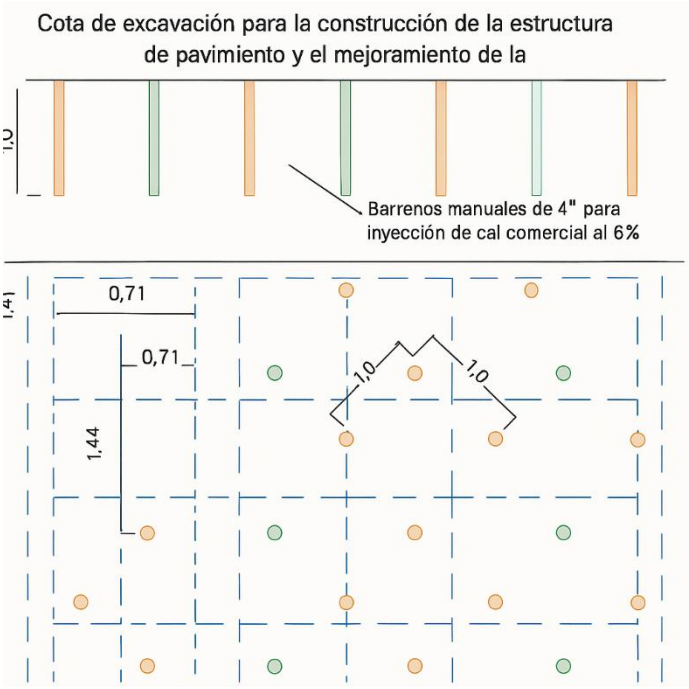


Ilustración 23. Esquema de ubicación barrenos de Cal

El tratamiento con cal se fundamenta en los principios de modificación y estabilización química establecidos por la literatura geotécnica (Lambe, 1962; Little, 1995; ASTM D6276), según los cuales la incorporación controlada de hidróxido de calcio en suelos arcillosos favorece:

- La reducción del índice de plasticidad por intercambio catiónico.
- La disminución del potencial de expansión mediante floculación y aglomeración.
- La mejora progresiva de la resistencia y rigidez del material, derivada de reacciones pozolánicas.
- La atenuación de la sensibilidad a la humedad y la reducción de la deformabilidad del macizo tratado.

Dado que la problemática está confinada a un horizonte específico con comportamiento activo, el empleo de barrenos permite intervenir el suelo de manera profunda y localizada, garantizando que el reactivo ingrese directamente en la zona donde se originan los cambios volumétricos.

El tratamiento químico mediante barrenos de cal constituye una solución adecuada y proporcional frente a subrasantes que han evidenciado comportamiento expansivo, porque:

1. Interviene directamente el estrato problemático, modificando su composición mineralógica y reduciendo su reactividad.
2. Disminuye de manera efectiva el potencial de expansión, mitigando el riesgo de levantamientos diferenciales y deformaciones post–construcción.
3. Incrementa la rigidez y resistencia del suelo tratado, mejorando la capacidad de soporte del perfil sin necesidad de excavaciones profundas o reemplazos masivos.
4. Reduce la variabilidad volumétrica del estrato, lo que se traduce en un comportamiento más estable del pavimento frente a ciclos de humedad, tránsito y climatología local.
5. Genera un efecto durable, dada la naturaleza irreversible de las reacciones pozolánicas entre la cal y los minerales arcillosos.

En criterio técnico, el tratamiento con barrenos de cal constituye una medida eficaz, costo–eficiente y técnicamente sustentada para abordar subrasantes arcillosas reactivas, especialmente cuando los ensayos de expansión tipo Lambe y los CBR sumergidos han demostrado comportamiento crítico. La solución propuesta disminuye de manera significativa el riesgo de deformaciones futuras y aporta estabilidad al sistema antes de la conformación del paquete estructural del pavimento.

Adicional sobre lo anterior, los pavimentos apoyados sobre subrasantes arcillosas de alta plasticidad suelen presentar un tipo de deterioro que no obedece únicamente al tránsito sino, principalmente, a la variación volumétrica del suelo de fundación. En suelos clasificados como CH o A-7-6, el aumento del contenido de agua produce hinchamiento y

la pérdida de humedad induce contracción; este ciclo estacional lluvia–sequía genera movimientos verticales y, sobre todo, empujes laterales dentro de la zona activa (0–1,5 m) que terminan reflejándose en la carpeta o en las capas granulares como fisuras longitudinales paralelas al eje de la vía. Este fenómeno ha sido descrito por Zornberg (2012) como “fisuración inducida por el ambiente”, diferenciándola de la fisuración por fatiga, pues aparece aun en estructuras con capacidad estructural suficiente.

La causa mecánica de este comportamiento radica en que el suelo expansivo, al hincharse, impone deformaciones no uniformes sobre la base y la subbase: unas porciones del paquete son levantadas o empujadas lateralmente y otras permanecen más rígidas, generando zonas de tracción en la parte superior del granular donde la mezcla asfáltica es más sensible a la apertura de grietas (Zornberg, 2012). La University of Texas (2018), en el programa “Soil–Geosynthetic Interaction Test to Develop Specifications for Geosynthetic–Stabilized Roadway”, modeló este mismo fenómeno como la acción de cargas no uniformes desde el suelo expansivo hacia la estructura de pavimento, que con el tiempo terminan alineándose en una fisura longitudinal.

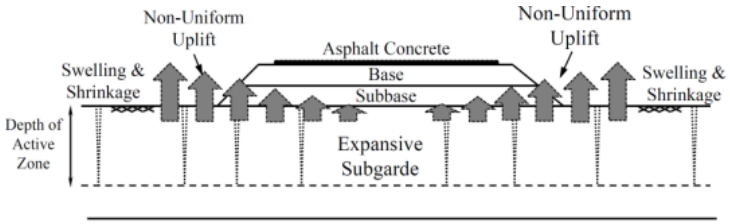


Ilustración 24. Cargas no uniformes impuestas en estructuras de pavimento por suelos expansivos Fuente: Soil – Geosynthetic Interaction Test to Develop Specifications for Geosynthetic – StabilizedRoadway. University of Texas (2018)

Frente a este tipo de patologías, la estabilización química (por ejemplo, con cal) ha mostrado ser una medida necesaria pero no suficiente: mejora la trabajabilidad y reduce parcialmente la plasticidad, pero no siempre logra eliminar el movimiento cíclico del estrato cuando la oscilación de humedad es marcada (University of Texas, 2018). Por esa razón, en los estudios comparativos de secciones de control, secciones con cal, secciones con geotextil de separación y secciones con geomallas biaxiales y multidireccionales, se

observó que las menores tasas de evolución de fisuración longitudinal se obtuvieron en las secciones que incorporaron geomalla, particularmente cuando esta se ubicó entre la subbase tratada y la base granular sin tratar (Zornberg, 2012; University of Texas, 2018).

- Mecanismo de aporte de la geomalla

El aporte de la geomalla no es solamente “separar” o “reforzar” en sentido genérico; los ensayos de interacción suelo–geosintético demostraron que el beneficio puede expresarse como un aumento de la rigidez del sistema compuesto granular–geosintético, medido a partir de la relación carga por unidad de ancho (T) vs. desplazamiento (u), para deformaciones pequeñas (0,1–1,0 mm). La pendiente de esta relación se definió como un parámetro de desempeño o rigidez movilizada del sistema (University of Texas, 2018). A mayor rigidez movilizada:

- Se restringe el desplazamiento lateral del granular cuando el suelo expansivo empuja desde abajo o desde los costados.
- Se distribuyen mejor las tensiones hacia el plano de la geomalla, reduciendo la concetración de deformaciones en un punto.
- Se desacopla parcialmente la deformación impuesta por el suelo expansivo de la deformación que “ve” la capa asfáltica, que es la que finalmente fisura.

En términos prácticos, esto significa que la geomalla actúa como un plano de anclaje que obliga a que las deformaciones del suelo de fundación se expresen de forma más uniforme en la base, de manera que no se formen gradientes de tracción tan altos en la parte superior del paquete. Este efecto fue más claro en geomallas multidireccionales (TX), porque su patrón de rigidez es más isotrópico y responde mejor a deformaciones que no son estrictamente unidireccionales (Zornberg, 2012).

- Ubicación óptima y compatibilidad con estabilización

Otro hallazgo relevante de la University of Texas (2018) es que, cuando se utilizan tratamientos de estabilización (cal o cementantes) sobre suelos con potencial de expansión, la geomalla no debe reemplazar la estabilización química, sino complementarla. La disposición más efectiva observada fue:

- subrasante / subbase químicamente tratada (función de mejora);
- geomalla colocada sobre esa subbase tratada (función de confinamiento y distribución de esfuerzos);
- base granular sin tratar (función estructural y de drenaje);
- carpeta asfáltica.

Con esta configuración se logró mantener los espesores de la estructura de control, pero con un menor crecimiento del porcentaje de fisuración longitudinal a lo largo del tiempo. Esto es especialmente pertinente en su caso, porque el apiqe muestra una arcilla CH entre 0,65 m y 1,50 m, justo dentro de la zona en la que ocurren los cambios de humedad; por lo tanto, cualquier movimiento de ese estrato tendrá tendencia a transmitirse hacia arriba si no existe un plano de rigidez que lo limite.

– Pertinencia para el proyecto

Considerando que su sondeo identificó una arcilla de alta plasticidad (LL 55 %, LP 27 %, IP 28 %) con pasante Nº 200 prácticamente total y que el ensayo de expansión tipo Lambe clasificó el material como “arcilla crítica”, el comportamiento descrito en la literatura es directamente aplicable a su tramo: la subrasante sí tiene capacidad de imponer deformaciones no uniformes sobre la estructura. En consecuencia, el estado del arte aquí reseñado respalda técnicamente que el diseño de pavimento incluya una geomalla en la interfaz subbase tratada–base granular como medida de mitigación frente a la fisuración inducida por el ambiente, tal como lo plantean Zornberg (2012) y la University of Texas (2018). Las geomallas a utilizar son del tipo multidireccional (GG9=TX-5/TX-160), Adicionalmente se encontró que, para efectos de conocer la mejor forma de aplicar geomallas en una estructura de pavimento con tratamientos de estabilización química, lo

ideal era colocarla entre la subbase químicamente tratada y bajo la base granular sin tratar, conservando los espesores de la estructura de pavimento de control sin estabilizar mecánicamente con la geomalla. Conforme la investigación de Jorge Zornberg, se buscó determinar la relación entre carga por unidad de ancho del geosintético (T) y los desplazamientos a lo largo del mismo (u), para desplazamientos en el rango de 0,1 mm a 1,0 mm. La pendiente de la relación lineal definida entre T2 y u a través de la longitud/espesor confinada del geo sintético ha sido definida como el parámetro de desempeño $K_{SGC.}$

Geosynthetic Name	Geosynthetic Type	Manufacturing Processes	Polymer Type	Expected performance
GG 2	Triangular Geogrid	Extruded (Homogenous)	Polypropylene (PP)	Excellent
GG 3	Biaxial Geogrid	Woven with Coated Yarn	Polyester (PET)	Moderate
GG 4	Biaxial Geogrid	Laser Welded	Polypropylene (PP)	Poor

Ilustración 25. Geostinteticos analizados Fuente: Soil – Geosynthetic Interaction Test to Develop Specifications for Geosynthetic – StabilizedRoadway. University of Texas (2018)

5.7 Ensayos de capacidad de soporte del suelo

En el caso de la capacidad de soporte de los segmentos viales mencionados anteriormente, se realizaron ensayos de laboratorio de CBR inalterado, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

APIQUE	CBR NATURAL (%)	CBR SUMERG (%)
6000372	4,31	0,91
6000557	10,9	1,58
6000389	3,86	0,82
6000786	7,38	3,48
6000830	2,85	0,53

APIQUE	CBR NATURAL (%)	CBR SUMERG (%)
6000857	5,36	1,15
6000859	2,85	0,81
6000870	4,18	1,06
6000931	7,27	2,11
6000833	5,69	1,06
Promedio	**5,47**	**1,35**
Desviación estándar	2,49	0,87
Percentil 75	***6,88***	***1,47***

Tabla 22. Resultados de ensayo CBR (Fuente: Propia)

A partir del análisis de los CBR presentados, se toman los siguientes datos para su análisis:

CBR SUMERGIDO (%)	Mr		
	MPa	**kg/cm2**	**PSI**
1,47	11,04	112,62	1601,76

Tabla 23. Cálculo CBR subrasante. (Fuente: Propia)

En el diseño de pavimentos para vías locales es fundamental utilizar un enfoque que permita obtener las condiciones geotécnicas más completas y representativas. Basado en la experiencia, se recomienda llevar a cabo múltiples ensayos de CBR aprovechando toda la información disponible, lo que permite estandarizar el diseño del pavimento en lugar de segmentarlo por tramos. El uso del percentil 75 como valor representativo permite: Controlar la dispersión y evitar valores atípicos bajos que podrían sobredimensionar la estructura, si se adopta el mínimo o el promedio, se corre el riesgo de proyectar secciones estructurales sobredimensionadas, incrementando costos innecesarios y tiempos de ejecución. Reflejar condiciones conservadoras pero realistas del terreno, el percentil 75 no desconoce los valores bajos, pero los filtra dentro de una base estadística robusta, considerando que en pavimentos urbanos la heterogeneidad es inherente al medio. Alinear el diseño a la práctica recomendada en conservación de vías locales, en este tipo de proyectos, no se busca diseñar para condiciones extremas aisladas, sino para un comportamiento representativo de la mayoría del tramo intervenido.

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace necesario realizar una evaluación de las estructuras de pavimento teniendo en cuenta el valor de CBR real para los tramos a diseñar.

Para la evaluación del módulo de elasticidad de la subrasante se cuenta con la información de los CBR medidos en laboratorio. Para estimar los valores del módulo de elasticidad a partir de los ensayos de CBR se usa la correlación publicada en la guía "DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO Y VÍAS LOCALES PARA BOGOTÁ D.C." define las correlaciones entre el CBR y el módulo de elasticidad de la subrasante, a partir de las siguientes ecuaciones:

	Valor de CBR	Módulo Resiliente (MPa)
1	CBR ≤ 4%	7.5 * CBR
2	4% < CBR ≤ 9%	10 * CBR

Tabla 24. Correlaciones entre CBR y MR. (Fuente: Guía GU-IC-019,2013)

La Guía IDU GU-IC-019 establece que se debe realizar mejoramiento en el suelo de la subrasante si los valores de resistencia del suelo son inferiores a un equivalente en términos de CBR del 4 % o un valor de módulo resiliente M_r = 40 MPa o 5800 psi. Para este caso, en específico y al tratarse de una rehabilitación que se cimentará sobre los materiales inmediatamente inferiores a la primera capa de material granular, no se requerirá mejoramiento de la subrasante a menos que el durante el proceso constructivo se evidencie la necesidad de implementarlo.

5.6. Mejoramiento de la subrasante

Teniendo en cuenta la caracterización física y mecánica de la subrasante puntualmente para los segmentos viales, se propone el siguiente tipo de mejoramiento:

5.6.1. Mejoramiento con Geocelda

Para determinar el aporte estructural de la geocelda se determina el aumento del módulo de la capa de mejoramiento por medio del Factor de mejoramiento de módulo o MIF por

sus siglas en inglés (Modulus Improvement Factor), el cual se determina como la relación entre el material granular confinado con la geocelda y un material granular no confinado. Para hallar este factor, se requiere:

- Tránsito de diseño
- CBR de la subrasante
- Material de relleno de la geocelda

De acuerdo con los estudios realizados por Tanyu B.F., Aydilek A. H., Lau W., Edil T.B., Benson C.H. (2013), se determinó que el factor de incremento de módulo varía de 1,3 a 1,5. en el presente caso, y atendiendo a las condiciones de baja capacidad portante de la subrasante, se adoptó un valor conservador de *MIF = 1.3*, lo que permite incrementar el módulo resiliente de la capa granular confinada con geocelda y alcanzar un comportamiento estructural equivalente al obtenido mediante otras técnicas de mejoramiento. Para determinar el módulo de la capa de granular sin reforzar y reforzado con geocelda para alcanzar un valor similar al obtenido con el mejoramiento, se toma como referencia la ecuación para la determinación del módulo de un material granular de la Shell y se modifica incluyendo el factor MIF:

$$E_2 = 0.2h^{0.45}E_3 * MIF$$

Ecuación 1. Incremento del módulo del material granular por MIF. Fuente: Adaptado de Shell, 2019.

Donde,

- E_j, es el módulo de la capa superior (MPa)
- E_n, es el módulo de la capa inferior (MPa)
- h, es el espesor de la capa en evaluación (mm)
- MIF, es el factor de mejoramiento de módulo

Para llegar al valor de soporte mínimo, se procede a realizar el cálculo hasta encontrar el espesor que satisfaga esta condición de plataforma. A continuación, se presentan los resultados obtenidos (Anexo 9):

Descripción	Altura (h)
Geocelda (h=15cm)	15
Subbase SBG-B	5

Descripción	CBR (%)	kg/cm2	PSI
Subrasante	1,47	112,62	1601,76
Subrasante mejorada con Geocelda	4,43	443,45	6307,3

Por medio de este procedimiento se obtiene la colocación de una (1) capa de Geocelda de 15 cm de altura con lleno de material granular tipo Subbase Granular tipo B o Subbase reciclada (AR-SBG) y una capa de Subbase Granular Tipo B (SBG-B) o Subbase reciclada (AR-SBG) de 5 cm.

6. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FLEXIBLE

El diseño de pavimento flexible busca determinar un conjunto de capas de materiales que logren soportar las cargas de los vehículos durante el periodo de diseño, reutilizando los materiales existentes y generando una solución técnica y económicamente viable. A continuación, se presenta el método de diseño, las alternativas a diseñar y el cálculo de espesores.

6.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Dadas las condiciones de sitio y teniendo en cuenta el aprovechamiento de materiales reciclados que se enmarcan dentro del cumplimiento del plan de gestión de RCD (aprovechamiento de los Residuos de Construcción y Demolición) y la resolución 1115 de 2012 donde se realiza el aprovechamiento de este tipo de material toda vez que deberán cumplir con las especificaciones técnicas relacionadas en el anexo técnico. Además, el uso de materiales granulares con residuos de demolición de construcción y demolición contribuye a disminuir el impacto ambiental generado por el desecho de neumáticos usados y por las actividades constructivas a lo largo de la ciudad.

El anexo técnico del contrato de obra No. 1136 de 2024 establece que para el desarrollo de las intervenciones del proyecto se deberán cumplir con el documento ET-IC-01 - Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C.

De igual manera se resaltan Los valores típicos del módulo de elasticidad (E) y del módulo resiliente (Mr) para materiales granulares utilizados en bases y subbases de pavimentos en Colombia están especificados en los documentos técnicos del INVIAS, como el Manual de Diseño de Pavimentos para Baja, Media y Alta Transitabilidad, así como en pliegos de especificaciones generales.

A continuación, le presento los valores de referencia típicos según estos documentos:

Subbase granular (tipo INVIAS – SBG o equivalente):

Parámetro	Valor típico
Módulo de elasticidad (E)	80 – 200 MPa
Módulo resiliente (Mr)	80 – 250 MPa
CBR	≥ 30 % (mínimo)

Subbase estabilizada con emulsión asfáltica (BAE – Base Asfáltica Emulsionada)

Parámetro	Valor típico
Módulo resiliente (Mr)	300 – 800 MPa
Resistencia a tracción indirecta	150 – 400 kPa

A continuación, se presentarán los materiales de construcción típicos de la zona que serán utilizados en el presente documento y sus propiedades mecánicas:

6.1.1. Mezcla asfáltica (MD-19)

Las características mecánicas de las mezclas asfálticas en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a1, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico de la mezcla asfáltica. A partir de lo anterior, el coeficiente a1 se obtiene mediante la correlación establecida por AASHTO a una temperatura de 20°C:

$$a_1 = 0.184 * Ln(M_r asfalto) - 1.9547$$

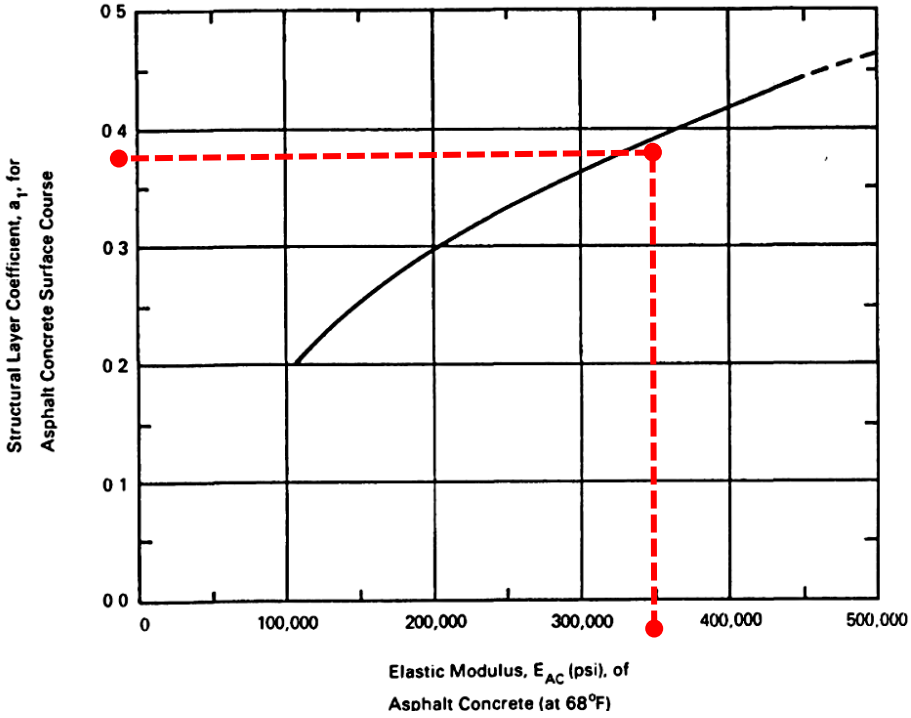


Ilustración 26. Grafica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: metodología AASHTO-93)

Teniendo en cuenta lo anterior, si el valor M_r convencional es 345.000 psi, se obtiene un valor de coeficiente estructural de a1 = 0.39.

Por otro lado, la capacidad de permeabilidad y drenaje del material se encuentra definido mediante el coeficiente de drenaje m1. Teniendo en cuenta que la capa asfáltica posee una capacidad de permeabilidad mayor en comparación a las capas inferiores, se obtiene el valor de coeficiente de drenaje m1 = 1.00.

6.1.2. Mezcla asfáltica MD-GCR (MCCh25)

Las características mecánicas de las mezclas asfálticas en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a1, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico de la mezcla asfáltica. A partir de lo anterior, el coeficiente a1 se obtiene mediante la correlación establecida por AASHTO a una temperatura estándar de 20°C:

$$a_1 = 0.184 * Ln(M_r asfalto) - 1.9547$$

Para el caso de la modificación de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado, en el trabajo contratado por el IDU, realizado por la Universidad de los Andes en 2002, se concluyó que el GCR aumenta la rigidez del ligante, aunque mejora otras propiedades, lo que convierte al GCR en un modificador potencial, porque absorbe parte de los maltenos, dejando un gran contenido de asfáltenos, y aumenta la elasticidad y punto de ablandamiento del nuevo ligante modificado, disminuyendo de esta manera ductilidad y penetración. Además, al incorporar el GCR a la mezcla asfáltica, la deformación permanente indica que las mezclas con caucho son más deformables; los módulos obtenidos señalaron menos susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, lo que favorece el no fisuramiento a bajas temperaturas y la no deformabilidad excesiva a temperaturas elevadas, todo lo anterior se traduce en una mezcla con mayor duración como se ha venido indicando. Estudios realizados en este sentido han ratificado las propiedades del asfalto modificado con grano de caucho, así lo señalan Infante, A. S. F., Santanilla, E. B. F., & Lizcano, F. A. R. (2009). La caracterización dinámica de la mezcla con las cantidades óptimas de este modificador presentó una reducción del ahuellamiento del 8% y un aumento en el módulo dinámico del 14%, lo que conlleva un incremento en la durabilidad del 25%

En el estudio “Building Sustainable Pavements: Investigating the Effectiveness of Recycled Tire Rubber as a Modifier in Asphalt Mixtures” se encontró que al incrementar el contenido de caucho reciclado (“RAR modifier”) al 10 % respecto a la mezcla de base, el módulo de rigidez aumentó en el rango de aproximadamente 12-17 % para temperaturas de ensayo de 15-20 °C

En el resumen “Effect of Waste Tire Rubber on Properties of Asphalt Cement and Asphalt Concrete Mixtures: State of the Art” se menciona que, al añadir caucho de neumáticos al asfalto, se incrementa el módulo de resiliencia hasta un “optimum” valor para ciertos porcentajes (por ejemplo 10-15 %), antes de que con más caucho el efecto decaiga.

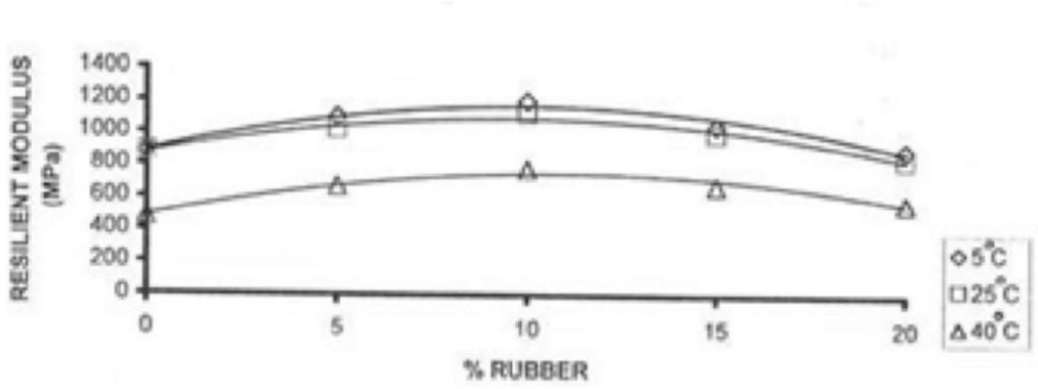


Ilustración 27. Effect of adding rubber into asphalt mixture strain, creep stiffness, and resilience models. Mohammad A. T. Alsheyab

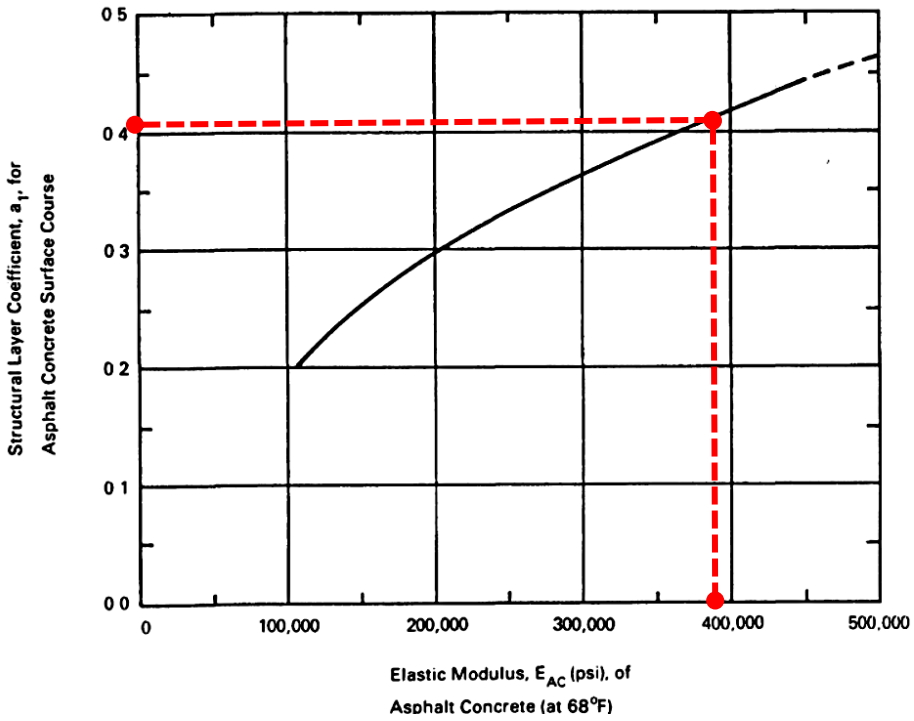


Ilustración 28. Grafica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: metodología AASHTO-93)

Teniendo en cuenta lo anterior, si el valor M_r es 395.000 psi (aumento del 14% respecto al valor del módulo convencional del asfalto), se obtiene un valor de coeficiente estructural de a1 = 0.41.

Por otro lado, la capacidad de permeabilidad y drenaje del material se encuentra definido mediante el coeficiente de drenaje m1. Teniendo en cuenta que la capa asfáltica posee una capacidad de permeabilidad mayor en comparación a las capas inferiores, se obtiene el valor de coeficiente de drenaje m1 = 1.00.

De acuerdo con el decreto 442 de 2015, donde se indica que su artículo 10 APROVECHAMIENTO DE LLANTAS USADAS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN EL DISTRITO CAPITAL. Modificado por el art. 4°, Decreto Distrital 265 de 2016. Desde el 1 de julio de 2016, toda obra de infraestructura de transporte en el Distrito Capital que se ejecute y adelante en procesos constructivos con asfalto, deberá prever el uso de materiales provenientes

del aprovechamiento de llantas usadas en las proporciones técnicas que para el efecto exija el Instituto de Desarrollo Urbano, en la totalidad de metro cuadrado de la mezcla asfáltica usada para la obra en un porcentaje no menor al 25% de la totalidad del volumen de la mezcla asfáltica usada en vías vehiculares (Troncales de tráfico mixto, Malla Vial Arterial No Troncal, Malla Vial Intermedia y Malla Vial Local). Razón por la cual, en el caso de usar mezclas asfálticas, las mismas podrán ser reemplazadas por mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado del tipo MCCh25, con el fin de dar cumplimiento al decreto señalado

6.1.3. Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A)

Las características mecánicas de las bases granulares no tratadas en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a2, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico del material. A partir de lo anterior, el coeficiente a2 se obtiene mediante la correlación establecida por AASHTO:

$$a_2 = 0.249 * Log(M_r BG) - 0.977$$

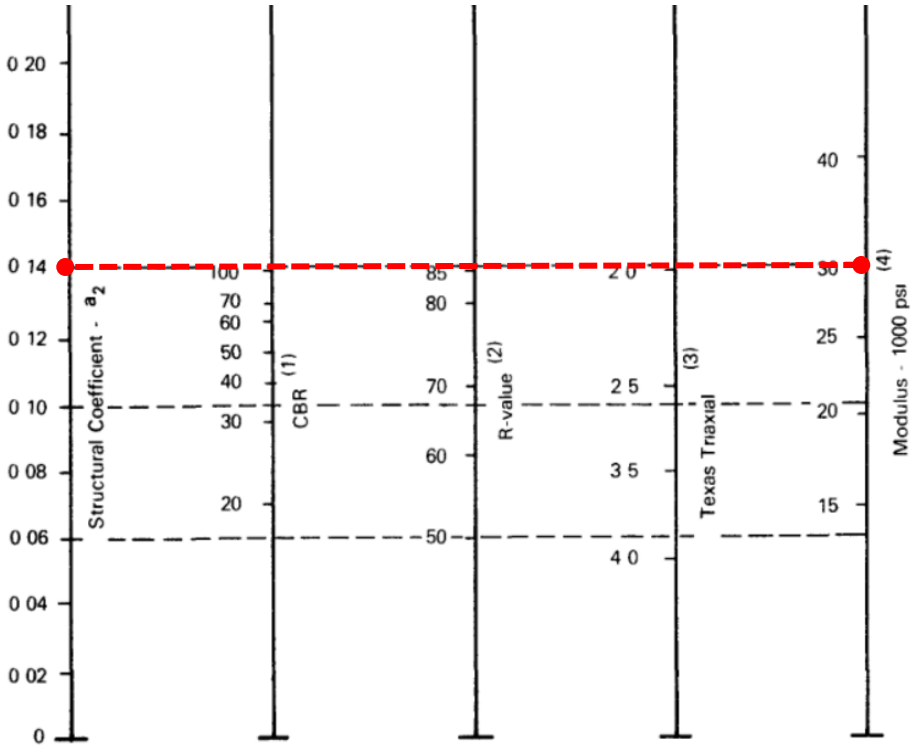


Ilustración 29. Grafica Coeficiente estructural para bases granulares sin tratar (Fuente: metodología AASHTO-93)

Teniendo en cuenta lo anterior, si el valor M_r convencional es 30.000 psi, se obtiene un valor de coeficiente estructural de a2 = 0.14. Por otro lado, la capacidad de permeabilidad y drenaje de la capa base granular se encuentra definido mediante el coeficiente de drenaje m2. Teniendo en cuenta que la humedad relativa de la zona es superior al 25%, los días de lluvia al año son cercanos al 25% y las condiciones de drenaje existentes a lo largo del tramo vial son buenas, pero pueden verse afectadas debido a la acumulación de basuras y daños en las obras de drenaje (sumideros) llevando su condición de drenaje regular, por lo cual se obtiene el valor de coeficiente de drenaje m2 = 0.80.

Table 2.4. Recommended m_i Values for Modifying Structural Layer Coefficients of Untreated Base and Subbase Materials in Flexible Pavements

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1–5%	5–25%	Greater Than 25%
Excellent	1 40–1 35	1 35–1 30	1 30–1 20	1 20
Good	1 35–1 25	1 25–1 15	1 15–1 00	1 00
Fair	1 25–1 15	1 15–1 05	1 00–0 80	0 80
Poor	1 15–1 05	1 05–0 80	0 80–0 60	0 60
Very poor	1 05–0 95	0 95–0 75	0 75–0 40	0 40

Ilustración 30. Valores recomendados para coeficientes de drenaje de capas granulares (Fuente: metodología AASHTO-93)

6.1.4. Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) (convencional o reciclada) estabilizada con cemento 5% y aditivo ionizante

Se define como una mezcla de agregados reciclados provenientes de materiales previamente utilizados en estructuras viales, procesados y clasificados, a los cuales se les adiciona un 5% de cemento Portland (como agente hidráulico) con el fin de mejorar la cohesión, resistencia mecánica y comportamiento frente al agua de la subbase granular. De acuerdo a la Especificación Técnica 520-18 del Instituto de Desarrollo Urbano se pueden utilizar aditivos para modificar las propiedades de los materiales, con el fin de alcanzar las condiciones particulares del pavimento por construir.

Características principales:

- AR-BG: Agregado reciclado procesado que cumple con las especificaciones de granulometría y calidad de una subbase granular.
- Cemento 5%: Proporciona una estabilización hidráulica mínima, ayudando a mejorar la rigidez y reducir la deformación permanente.

Las características mecánicas de las bases granulares tratadas con cemento en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a2, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico de la base granular tratada con cemento. A partir de lo anterior, si el valor M_r convencional promedio para una subbase estabilizada

con cemento se calcula a partir de lo solicitado en la especificación técnica 520-18, respecto a la resistencia a la compresión a 7 días que debe ser de 4.5 MPa.

La adopción de un módulo de elasticidad de 37000 psi para una base granular estabilizada con cemento al 5% se fundamenta en los rangos establecidos por la literatura técnica internacional, los lineamientos metodológicos de AASHTO 93, la documentación técnica de la Portland Cement Association (PCA), recomendaciones del Transportation Research Board (TRB) y los criterios referidos en el Manual de Diseño de Pavimentos del INVIAS (2013).

En primer lugar, AASHTO (1993), en su guía para el diseño estructural de pavimentos, establece que los módulos elásticos típicos para capas suelo-cemento con contenidos de 3% a 7% se encuentran en el intervalo de 25000 a 50000 psi. De forma concordante, la Portland Cement Association (PCA. (1992). *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Portland Cement Association.) indica que materiales estabilizados con 4% a 6% de cemento presentan módulos usuales entre 30000 y 60000 psi, dependiendo del tipo de material granular, la compacidad y la calidad del curado. Por su parte, el Transportation Research Board, mediante el documento E236 sobre propiedades mecánicas de mezclas suelo-cemento, señala que los módulos elásticos de estos materiales suelen ubicarse entre 28000 y 70000 psi para suelos granulares con dosificaciones de cemento entre 3% y 6% (TRB. (1995). *Soil-Cement: Engineering Properties, Construction Practices, and Performance*. Transportation Research Board, Circular E-236). Con base en estas referencias, el valor adoptado de 37000 psi corresponde a la zona media del rango reportado por la literatura y evita sobreestimaciones que podrían generar diseños no conservadores.

En segundo lugar, el Manual de Diseño de Pavimentos del INVIAS (2013), aunque no establece un módulo único obligatorio para las capas tratadas con cemento, señala que los materiales granulares estabilizados con porcentajes del 3% al 6% suelen presentar módulos equivalentes entre 200 MPa y 400 MPa. El valor adoptado de 37000 psi corresponde aproximadamente a 255 MPa, ubicándose por encima del límite inferior y por debajo del

superior sugerido por INVIAS, con lo cual se garantiza una aproximación prudente y coherente con el comportamiento real del material, especialmente bajo condiciones de fisuración y degradación progresiva.

Asimismo, la relación entre la resistencia a la compresión simple (UCS) y el módulo resiliente documentada por AASHTO (1993), PCA (1992) y TRB (1995) indica que los materiales con 5% de cemento, compactados bajo Proctor Modificado, suelen alcanzar resistencias a 7 días entre 3.0 y 4.5 MPa. Utilizando la relación empírica Mr ≈ 1000 × UCS, ampliamente citada en dichas fuentes, se obtendrían módulos teóricos superiores a 40000 psi. No obstante, diversas guías de diseño recomiendan reducir este valor para considerar el comportamiento de la mezcla en servicio, la generación de microfisuras y la pérdida progresiva de rigidez, razón por la cual para pavimentos flexibles se adoptan valores convencionales entre 30000 y 50000 psi, siendo 37000 psi coherente con una aproximación conservadora.

Finalmente, la experiencia técnica documentada en proyectos urbanos con suelos blandos y materiales granulares estabilizados en ciudades latinoamericanas muestra que módulos entre 32000 y 45000 psi son típicos en bases con contenidos de cemento entre 4% y 6% (PCA, 1992; TRB, 1995). En ese sentido, el valor adoptado refleja razonablemente el desempeño esperado en condiciones reales de carga y operación, sin incurrir en sobreestimaciones que pudieran comprometer el diseño de la estructura del pavimento.
De acuerdo a lo anterior se obtiene:

CAPA	M_r / E (psi)
base reciclada BG-A (convencional o reciclada) estabilizado con cemento 5% y aditivo	37000

Tabla 25. Propiedades mecánicas de los materiales

Las Especificaciones Técnicas IDU 520-18 aborda las capas de material granular estabilizado con cemento. Según esta especificación, el contenido óptimo de ligante

residual debe determinarse mediante el ensayo de inmersión-compresión (norma INV E-738-07), aplicando los siguientes criterios:

- Resistencia de probetas curadas en seco: ≥ 2000 kPa.
- Resistencia conservada tras curado húmedo: ≥ 75%.

El porcentaje óptimo de ligante residual será aquel que, cumpliendo las exigencias indicadas, consiga el valor máximo de resistencia tras curado húmedo. En la práctica, una dosificación del 5% de cemento ha demostrado ser efectiva para cumplir con estos requisitos, proporcionando una mezcla con adecuada cohesión y resistencia.

A partir de lo anterior, si el valor M_r convencional promedio para una base estabilizada con cemento es 37.000 psi, se obtiene un valor de coeficiente estructural de a2 = 0.18. Por otro lado, la capacidad de permeabilidad y drenaje del material se encuentra definido mediante el coeficiente de drenaje m2. Teniendo en cuenta que este material se encuentra tratado con cemento, tiene una capacidad de permeabilidad mayor en comparación a las capas inferiores, por lo cual se obtiene el valor de coeficiente de drenaje m2 = 1.00

Ahora, La inclusión de un aditivo líquido iónico dentro de una mezcla de base granular estabilizada con cemento al 5% se sustenta en el comportamiento químico, mecánico y de durabilidad demostrado en los ensayos del documento técnico aportado, y se integra de manera coherente con lo dispuesto por la Especificación Técnica 520-18 del IDU para capas de base y subbase mejoradas con cemento hidráulico. Esta combinación es compatible con el tipo de mezcla definida en la especificación, no altera los requisitos normativos exigidos y contribuye a mejorar la eficiencia estructural de la capa tratada.

a) Compatibilidad con la Especificación 520-18 del IDU

La Especificación 520-18 establece que las capas de base o subbase mejoradas con cemento pueden incluir, además del material granular, cemento, agua y “eventualmente aditivos”, siempre que estos sean compatibles con el cemento hidráulico y que su empleo y dosificación sean definidos por el diseñador mediante ensayos previos que demuestren

el efecto deseado y sin alterar negativamente las propiedades restantes de la mezcla. La especificación también exige que se verifique la ficha técnica, certificaciones y compatibilidad del aditivo con el cemento. (ver anexo Ficha técnica aditivo Protech)

En este contexto, el uso de un aditivo líquido iónico cumple plenamente con la especificación, pues su función es modificar el comportamiento del suelo y del cemento mediante mecanismos de intercambio iónico, floculación controlada y reducción de susceptibilidad al agua, sin interferir con las reacciones cimentantes. Además, su aplicación se ajusta al proceso constructivo descrito en la especificación, dado que puede incorporarse disuelto en el agua de mezclado, conforme al procedimiento de mezcla en planta o mezcla en sitio previsto normativamente.

b) Fundamentación química y mecánica del aditivo

El documento técnico entregado como anexo, describe que el aditivo líquido iónico genera un proceso de reorganización interna de partículas finas, reduce la capacidad de adsorción de agua y promueve la formación de microestructuras más estables en combinación con un aditivo sólido como el cemento. Este mecanismo produce un aumento de cohesión, una reducción significativa en la pérdida de humedad y una mejora del desempeño mecánico de la mezcla.

En los ensayos de laboratorio incluidos en el documento, se observan incrementos importantes en resistencia a la compresión, capacidad soporte (CBR), módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta cuando el aditivo líquido se utiliza en combinación con cemento. Este comportamiento mejora la rigidez inicial de la mezcla y aporta progresivamente a su resistencia a largo plazo, manteniendo un desempeño uniforme aun en presencia de variaciones de humedad.

De igual forma, la estabilización dual (cemento + aditivo líquido) mantiene un comportamiento semi-ligado y flexible, mitigando la excesiva rigidez propia de las capas

exclusivamente cementadas, lo cual favorece su compatibilidad con carpetas asfálticas y reduce la posibilidad de fisuración por retracción.

c) Contribución del aditivo al cumplimiento de los requisitos normativos de la mezcla

La Especificación 520-18 define lineamientos sobre granulometría, calidad de agregados, contenido mínimo de cemento, pérdidas en durabilidad, resistencia mínima y calidad del agua, todos los cuales siguen siendo aplicables sin restricciones cuando se usa un aditivo líquido iónico.

La presencia del aditivo no sustituye el papel estructural del cemento, sino que optimiza la microestructura del material granular y mejora la eficiencia de su interacción con el aglutinante. Como resultado, la mezcla logra más fácilmente los parámetros establecidos por la especificación, tales como:

- Alcanzar la resistencia mínima exigida a los siete días según la clasificación del material granular;
- Cumplir con los límites de pérdida en durabilidad establecidos por la norma de ensayo correspondiente;
- Asegurar la homogeneidad de la mezcla durante su fabricación en planta o en sitio;
- Mantener la humedad de compactación dentro de los rangos definidos en la fórmula de trabajo;
- Facilitar la obtención de una densidad compactada igual o superior al 98% de la densidad máxima determinada.

Estos beneficios se traducen en una mejor capacidad para cumplir con los controles de calidad de la mezcla y de la capa terminada establecidos en las Tablas 520.6, 520.7 y 520.8 de la especificación, especialmente en lo relativo a resistencia, módulo de reacción, densidad, espesor y planicidad.

d) Mejora de la durabilidad hidráulica y resistencia al agua

El documento técnico evidencia que la adición del aditivo líquido iónico incrementa la estabilidad del material frente a ciclos de humedad, reduciendo la susceptibilidad a pérdidas de estructura y favoreciendo la retención de resistencia. Esto complementa de forma directa las exigencias de la Especificación 520-18, que requiere que las mezclas tratadas con cemento alcancen niveles adecuados de durabilidad y un comportamiento estable ante exposiciones a agua, condición indispensable para pavimentos urbanos sujetos a infiltraciones y variaciones de humedad.

e) Contribución al desempeño en servicio y compatibilidad estructural

Los resultados presentados en el documento muestran valores elevados de módulo resiliente en edades tempranas y aumentos progresivos a medida que avanzan las reacciones internas. Este comportamiento permite que la capa actúe como un elemento de soporte eficiente dentro de la estructura del pavimento, mejorando de forma directa la transmisión de cargas hacia capas inferiores y contribuyendo a la prolongación de la vida útil del pavimento.

A su vez, el carácter semi-ligado de la mezcla con aditivo líquido reduce la posibilidad de fisuración excesiva, condición que es coherente con la recomendación de prefisuración de la Especificación 520-18 cuando los contenidos de cemento son elevados y en materiales muy rígidos. En este caso, el aditivo favorece un comportamiento más estable y menos propenso a contracciones severas.

En conclusión, la utilización de un aditivo líquido iónico en combinación con una dosificación de cemento al 5% en la base granular se justifica desde el punto de vista químico, mecánico, hidráulico y normativo.

El aditivo:

- Es compatible con la estructura del diseño descrito en la Especificación 520-18 del IDU;

- Optimiza la reacción del cemento sin interferir con sus propiedades fundamentales;
- Incrementa la resistencia, rigidez y cohesión de la mezcla;
- Mejora significativamente la estabilidad frente a la humedad;
- Facilita el cumplimiento de los controles de calidad exigidos por la especificación;
- Contribuye a la durabilidad y desempeño estructural del pavimento en condiciones reales de servicio.

Por lo tanto, su inclusión se considera técnica, funcional y normativamente adecuada para el diseño de una base estabilizada con cemento al 5% y 1Lt/m3 de aditivo ionizante.

6.1.5. **Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)convencional o reciclada**

Las características mecánicas de las subbases granulares no tratadas en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a3, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico del material. A partir de lo anterior, el coeficiente a3 se obtiene mediante la correlación establecida por AASHTO:

$$a_3 = 0.227 * Log(M_r SBG) - 0.839$$

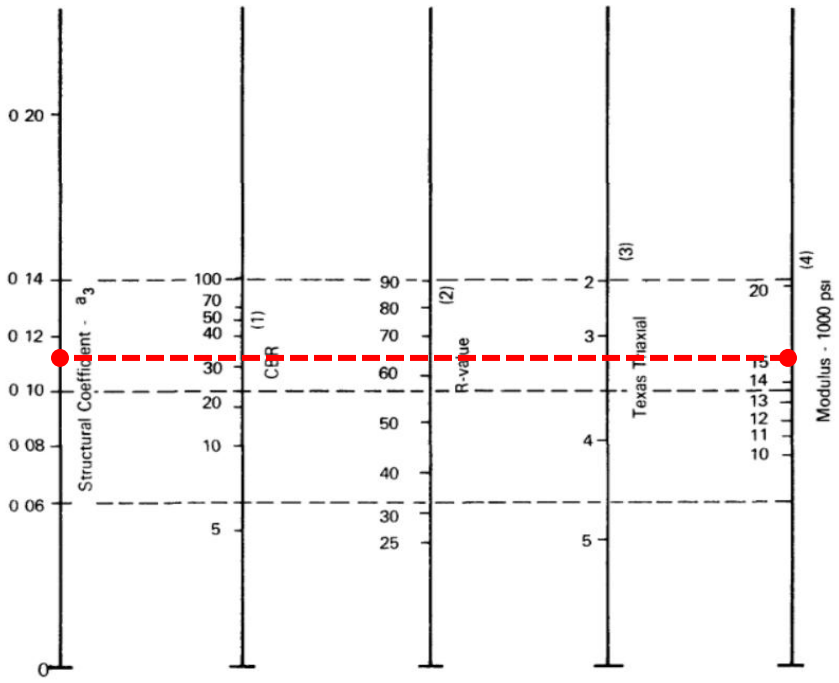


Ilustración 31. Grafica Coeficiente estructural para subbases granulares sin tratar (Fuente: metodología AASHTO-93)

Teniendo en cuenta lo anterior, si el valor M_r convencional es 15.000 psi, se obtiene un valor de coeficiente estructural de a3 = 0.11. Por otro lado, la capacidad de permeabilidad y drenaje de la capa subbase granular se encuentra definido mediante el coeficiente de drenaje m3. Teniendo en cuenta que la humedad relativa de la zona es superior al 25%, los días de lluvia al año son cercanos al 25% y las condiciones de drenaje existentes a lo largo del tramo vial son buenas, pero pueden verse afectadas debido a la acumulación de basuras y daños en las obras de drenaje (sumideros) llevando su condición de drenaje regular, por lo cual se obtiene el valor de coeficiente de drenaje m2 = 0.80.

A partir de los valores obtenidos anteriormente, en la siguiente tabla se presenta el resumen las propiedades de los materiales:

CAPA	M_r / E (psi)	a_i	m_i
Mezcla asfáltica (MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25)	345.000	0.39	1.00

CAPA	M_r / E (psi)	a_i	m_i
Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A)	30.000	0.14	0.80
Base granular tipo A estabilizado con cemento 5% y aditivo	37000	0.18	1.00
Subbase granular Tipo A (SBG-A)	15.000	0.11	0.80

Tabla 26. Propiedades mecánicas de los materiales (Fuente: metodología AASHTO-93)

6.2. CAPACIDAD ESTRUCTURAL REQUERIDA

En este caso se acudió a la metodología AASHTO 1993 para diseño de pavimentos flexibles para establecer el espesor de estructura de pavimentos requerida por la vía, con base en los resultados de los ensayos y análisis ya presentados; el dimensionamiento de los espesores se efectuó empleando el método de la AASHTO 1993, según el cual la capacidad del pavimento es 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, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\log W_{18} = Z_r * S_0 + 9.36\,Log\,(SN+1) - 0.20 + \frac{Log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}\right)} + 2.32\,LogMr - 8.07$$

Donde:

- **W18**, es el número de aplicaciones de carga de 18 kips, (80 kN) previstas.
- **ZR**, es el área bajo la curva de distribución estandarizada para una confiabilidad R, que considera la probabilidad de que el índice de servicio del pavimento sea superior a pt durante el periodo de diseño.
- **So**, es la desviación estándar de la distribución normal de las variables asociadas a todas las variables.
- **ΔPSI**, es la pérdida del servicio prevista en el diseño.
- **MR**, es el módulo resiliente de la subrasante de soporte de la estructura de vía
- **SN,** es el número estructural de la vía que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$SN = a_1 m_1 D_1 + a_2 m_2 D_2 + a_3 m_3 D_3 \ldots + \ldots a_i m_i D_i$$

Dónde: ai es el coeficiente estructural de la capa
Mi es el coeficiente de drenaje de la capa
Di es el espesor de la capa (en pulgadas)

6.3. Parámetros de alternativas de diseño en pavimento flexible

A continuación, se presentan cado uno de los parámetros requeridos para el diseño de pavimentos flexibles mediante la metodología AASHTO – 93:

6.3.1. Confiabilidad (R) y Desviación estándar (Zr)

La confiabilidad se entiende como el grado de seguridad de una determinada alternativa de diseño, determinando la probabilidad de que el pavimento pueda soportar el número de repeticiones de carga que sea aplicada durante su vida útil, según la guía AASHTO, recomienda unos valores de acuerdo al tipo de vía que se esté analizando, para nuestro caso, que son vías locales rurales se debe adoptar una confiabilidad entre 50% y 80%. En este caso se adopta una confiabilidad de 80%.

Tipo de carretera	Nivel de confiabilidad *R* (%)	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85.0 – 99.9	80.0 – 99.9
Arterias principales	80.0 – 99.9	75.0 – 95.0
Colectoras	80.0 – 95.0	75.0 – 95.0
Locales	50.0 – 80.0	50.0 – 80.0

R (%)	50	70	75	80	85	90	92	94	95	98	99.99
Zr	0.000	-0.524	-0.674	-0.841	-1.037	-1.282	-1.405	-1.555	-1.645	-2.054	-3.750

Ilustración 32. Valores recomendados de confiabilidad (Fuente: metodología AASHTO-93)

6.3.2. Confiabilidad – Error normal combinado

Teniendo en cuenta que la predicción del tránsito es confiable, que los equipos con que se va a construir la estructura de pavimento son adecuados y se encuentran en buenas condiciones debido a la magnitud del proyecto y que los materiales que se van a implementar cumplen con las especificaciones técnicas tenidas en cuenta para el diseño, se toma como valor de desviación estándar 0.45.

Proyecto de pavimento	S_0	
	Flexible	Rígido
	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Construcción nueva	0.45	0.35
Sobrecapas	0.50	0.40

Ilustración 33. Valores recomendados de confiabilidad AASHTO (Fuente: AASHTO)

6.3.3. Índices de serviciabilidad (ΔPSI)

Según la AASHTO la serviciabilidad es la habilidad especifica de una sección de pavimento para servir al tráfico. Debido a que la estructura de pavimento a diseñar es flexible se tomara una serviciabilidad inicial (Pi) de 4.5 y también debido a que es una vía principal en la zona se toma una serviciabilidad final (Pf) de 2.2, determinando que el ΔPSI es igual a 2.3.

TIPO PAVIMENTO	SERVICIABILIDAD INICIAL, Po
Concreto	4.5
Asfalto	4.2

Fuente: AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II–10.

Tipo de vía	Servicialidad final, P_f
Autopista	2.5 – 3.0
Carreteras	2.0 – 2.5
Zonas industriales	
Pavimento urbano principal	1.5 – 2.0
Pavimento urbano secundario	1.5 – 2.0

6.3.4. Coeficientes de drenaje

La calidad del drenaje se evalúa mediante coeficientes de drenaje (Cd) para las cappas de base y subbase granular. Los valores se seleccionan con base en las características del material, la calidad del drenaje y el porcentaje de tiempo en el que la estructura del pavimento está expuesta a altos niveles de humedad. En estructuras semirrígidas el coeficiente de drenaje se asume como 1.0 por ser impermeable.

Características del drenaje	Porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próxima a la saturación			
	Menos del 1%	1 – 5%	5 – 25%	Mas del 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy malo	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Ilustración 34. Valores recomendados de drenaje AASHTO (Fuente: AASHTO)

6.3.5. Numero estructural (SN)

A continuación, se presentan los parámetros de análisis que se tendrán en cuenta para el caso donde se realice un mejoramiento de subrasante con Geocelda y el valor del Número Estructural requerido (Anexo 2):

PARÁMETROS	VALOR
Ejes equivalentes 8.2 ton proyectados a 10 años (W18)	615.000
Confiabilidad (R)	80%
Desviación estándar (Zr)	0,45
Índice de serviciabilidad (ΔPSI)	2.3
Módulo de Elasticidad del Asfalto MD-19	345000 PSI
Módulo de elasticidad Base Granular tipo A	30000 PSI
Módulo de elasticidad Base Granular tipo A Estabilizada con cemento 5% y aditivo	37000 PSI
Módulo de elasticidad Subbase Granular tipo A	15000 PSI
SN Requerido con mejoramiento con geocelda	**3.1**

Tabla 27. Parámetros de diseño alternativa pavimento flexible. (Fuente: Elaboración propia)

6.4. Alternativas de diseño de pavimento flexible

Basados en los parámetros antes mencionados, se procede a calcular el número estructural y espesores de capas del diseño a partir de la ecuación para pavimentos flexibles del "AASHTO Guide for design of pavement structures 1993". Para el cálculo de los espesores (en pulgadas) se utiliza la siguiente ecuación:

$$\mathrm{SN} = \sum_{i=1}^{n} (a_i m_i D_i)$$

$$SN = a_1 m_1 D_1 + a_2 m_2 D_2$$

En este caso a1, m1 y D1 corresponden a los factores de la capa asfáltica mientras que a2, m2 y D2 son coeficientes de la capa base granular. Para ello, se plantean diferentes alternativas de materiales asfalticos y granulares como se presentan a continuación:

6.4.1. Alternativa 1: Carpeta asfáltica (MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25), Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) y Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG) - Mejoramiento con geocelda

En el caso de Carpeta asfáltica (MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25) y Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) y Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG y mejoramiento con geocelda rellena con granular (Anexo 2):

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO
(MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25)	12	620-18	345.000 psi
Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A)	15	533-18	30.000 psi

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG)	20	533-18	15.000 psi
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular reciclada (AR-SBG) con Geocelda h=15cm	20	412-18	6307.3 PSI
Geotextil tejido, método tira ancha >90 kN/m	-	411-18	
Barrenos de cal en tresbolillo cada 1m perforaciones de 2 m de profundidad	-	231-18	
Subrasante			1601.76 PSI

Tabla 28. Espesores de diseño de pavimento flexible método AASHTO, alternativa 1 (geocelda) (Fuente: elaboración propia)

Alternativa 2: Carpeta asfáltica (MD-19), Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) (Convencional o reciclada) estabilizada con 5% de cemento – Mejoramiento geocelda

En el caso de Carpeta asfáltica (MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25) y Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) (convencional o reciclada) estabilizada con 5% de cemento con aditivo y mejoramiento con geocelda rellena con granular (Anexo 2):

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO
(MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25)	12	620-18	345.000 PSI

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO
Base Granular (BG-A) estabilizada con 5% de cemento y aditivo	20	520-18	37.000 PSI
Geomalla multiaxial, resistencia a fluencia ³ 300 kN/m	-	242-18	
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular reciclada (AR-SBG) con Geocelda h=15cm	20	412-18	6307.3 PSI
Geotextil tejido, método tira ancha >90 kN/m	-	411-18	
Barrenos de cal en tresbolillo cada 1m perforaciones de 1 m de profundidad	-	231-18	
Subrasante			1601.76 PSI

Tabla 29. Espesores de diseño de pavimento flexible método AASHTO, alternativa 3 (Geocelda) (Fuente: elaboración propia)

6.5. Verificación estructural de esfuerzos y deformaciones por método racional

A partir de los resultados obtenidos en el anterior capitulo, se realiza la verificación estructural de los esfuerzos y deformaciones a través del método de diseño racional de pavimentos. Para la verificación de las alternativas propuestas mediante la metodología AASHTO-93, se tendrán en cuenta los módulos de elasticidad y espesores cada una de las capas ya establecidas; y se utilizara el programa WinDEPAV (Vásquez Varela, 2018) para el cálculo de esfuerzos y deformaciones que se generarían en la estructura planteada. A continuación, se presentan los criterios más relevantes en el análisis mecanicista:

Los valores de deformaciones admisibles por falla de fatiga para la estructura de pavimento, se obtienen a través de la ley de fatiga recomendada por Shell

International Petroleum Company. La deformación máxima tangencial admisible de la carpeta asfáltica se presenta a continuación:

$$\varepsilon_t = (0.856V_b + 1.08)E_{asf}^{-0.36}\left(\frac{N}{K}\right)^{-0.20}$$

Donde:

- $\boldsymbol{V_b}$, es el porcentaje de asfalto en volumen. En este se establece 10% para una mezcla convencional
- $\boldsymbol{E_{asf}}$, es el módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica (expresado en N/m2)
- $\boldsymbol{N}$, es el número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas para el periodo de diseño
- $\boldsymbol{K}$, es el factor de desplazamiento o de Calage, que se obtiene como $\boldsymbol{K = K1 * K2 * K3}$. En este caso K=8.25

METODO SHELL COEFICIENTES DE CALAGE			
		MEZCLAS ABIERTAS % BAJO DE ASFALTO	MEZCLAS DENSAS RICAS EN ASFALT.
AUTOREPARACIÓN DE PEQUEÑAS FISURAS DIFERENTES ESTADOS DE TENSIONES	K1	2	10
DISTRIBUCION LATERAL DE LAS CARGAS	K2	CUALQUIERA 2.5	
DIFERENTES TEMPERATURAS DE TRABAJO DE LA MEZCLA A LO LARGO DEL DIA Y DEL AÑO	K3	Espesores pequeños Temperaturas bajas	Espesores altos Temperaturs altas
		1	0.33

Ilustración 35. Coeficientes de Calage (Fuente: metodología AASHTO-93)

La deformación vertical admisible de la subrasante de acuerdo a la ley de ahuellamiento de la Universidad de Nottingham, bajo un nivel de confianza del 85% se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_z = 0.026N^{-0.25}$$

El esfuerzo vertical admisible de compresión en la subrasante de acuerdo del criterio Dormon y Kerhoven, se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_z = \frac{0.007E_{subr}}{1 + 0.7\log N}$$

Donde:

- $\boldsymbol{\sigma_z}$, es el esfuerzo vertical de compresión de la subrasante (expresado en kg/cm2)
- $\boldsymbol{E_{subr}}$, es el módulo de elasticidad de la subrasante (expresado en kg/cm2)
- $\boldsymbol{N}$, es el número de repeticiones admisibles

A partir de lo anterior, en la siguiente tabla se muestran los valores admisibles para la estructura analizada:

deformación máxima tangencial admisible asfalto ε_t	Deformación vertical admisible subrasante ε_z	Esfuerzo vertical admisible subrasante σ_z
4.42E-04	7.71E-04	6.13E-01

Tabla 30. Valores de esfuerzos y deformaciones de la estructura de pavimento (Fuente: metodología AASHTO-93)

Teniendo en cuenta lo anterior, los parámetros de diseño usados en el modelo mecanicista se presentan a continuación:

PARÁMETROS	VALOR
Radio de carga	10.8 cm
Presión de contacto	5.6 kg/cm2
Distancia entre eje de ruedas	32.4 cm

Tabla 31. Parámetros de entrada del modelo (Fuente: Elaboración propia)

CAPA	E (kg/cm2)	μ
Mezcla asfáltica (MD-19 y MD-GCR)	22.500	0.35
Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) o Base Granular Reciclada Tipo A (AR-BG)	2.100	0.40
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular Reciclada Tipo B (AR-SBG)	1.050	0.40
Subrasante	416.00	0.45

Tabla 32. Módulos de elasticidad de los materiales (Fuente: metodología AASHTO-93)

Una vez establecidos los valores admisibles y los parámetros de entrada para la evaluación de esfuerzos y deformaciones, a continuación, se presentan los valores de espesores mínimos obtenidos para cada una de las alternativas:

6.5.1. Revisión mecanicista de espesores planteados

A continuación, se realiza la comprobación de los valores admisibles de esfuerzos y deformaciones obtenidos anteriormente para las capas mínimas obtenidas anteriormente y que presenta valores cercanos a los limites anteriormente establecidos (Anexo 4):

DISEÑO DE ESTRUCTURA No. 1		
deformación máxima tangencial admisible asfalto ε_t	Deformación vertical admisible subrasante ε_z	Esfuerzo vertical admisible subrasante σ_z
1,67E-04	4.40E-04	4.23E-01
CUMPLE	***CUMPLE***	***CUMPLE***

Tabla 33. Verificación de valores admisibles y calculados Alternativa No. 1 (Fuente: Propia)

DISEÑO DE ESTRUCTURA No. 2		
deformación máxima tangencial admisible asfalto ε_t	Deformación vertical admisible subrasante ε_z	Esfuerzo vertical admisible subrasante σ_z
1,07E-04	4.08E-04	3.02E-01
CUMPLE	***CUMPLE***	***CUMPLE***

Tabla 34. Verificación de valores admisibles y calculados Alternativa No. 2 (Fuente: Propia)

6.6. Especificaciones Técnicas De Materiales De Construcción.

- La mezcla asfáltica (MD-19) deberá cumplir con todo lo señalado en la sección 620-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

- La capa de subbase granular mejorada con cemento hidráulico deberá ser un tipo SBG-CH, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 520-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018). Se utilizan subbases tratadas con cemento teniendo en cuenta la erosionabilidad que se produce en los pavimentos rígidos, para el uso de la subbase tratada con cemento más aditivo químico se recomienda realizar el diseño de mezcla correspondiente, de acuerdo a la especificación técnica 520-18.

- La capa de subbase granular deberá ser un tipo SBG, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 510-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

- El riego de imprimación deberá ser un tipo CRL-0 o CRL-1, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 610-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

- La capa de base granular mejorada con cemento hidráulico deberá ser un tipo BG-CH, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 520-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018). Se utilizan subbases tratadas con cemento teniendo en cuenta la erosionabilidad que se produce en los pavimentos rígidos, para el uso de la subbase tratada con cemento más aditivo químico se recomienda realizar el diseño de mezcla correspondiente, de acuerdo a la especificación técnica 520-18.

- El material de mejoramiento con rajón deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 410-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

La geocelda a utilizar corresponde a un sistema tridimensional de confinamiento celular fabricado en polietileno de alta densidad (HDPE), termo-soldado mediante ultrasonido para conformar un entramado flexible y de alta resistencia, destinado al confinamiento de material granular tipo subbase.

Configuración Propuesta

Altura nominal: 150 mm (15 cm)

Espesor de pared: ≥ 1,5 mm

Apertura de celda (romboidal/hexagonal): 300 mm

Tipo de relleno: Subbase Granular Tipo B (SBG-B) o AR-SBG reciclada

Factor de mejoramiento de módulo (MIF): 1,5

Propiedades Técnicas Mínimas Requeridas

Propiedad	Unidad	Valor mínimo exigido	Referencia técnica / Norma
Resistencia a tensión (pared de celda)	kN/m	≥ 20	ASTM D4595 / ISO 10319
Resistencia a fusión de soldadura	% de lámina base	≥ 100	ASTM D4437
Densidad del material	g/cm³	0,94 – 0,96	ASTM D1505
Estabilidad UV	% retención resistencia	≥ 70 % después de 500 h exposición	ASTM D4355

Condiciones de Instalación

Extensión de geoceldas sobre subrasante previamente nivelada y compactada.

Fijación mediante anclajes metálicos o plásticos cada 2,0 m en sentido transversal y longitudinal.

Relleno y compactación de celdas con material granular en capas de mínimo 10 cm.

Un geotextil es un geosintético permeable elaborado con materiales textiles, los geotextiles no pueden ser considerados como productos textiles tradicionales, debido a que son elaborados con fibras sintéticas con un amplio rango de propiedades, los principales polímeros usados para su fabricación son el polipropileno, poliéster, polietileno, polietileno

y poliamida. Los filamentos, o fibras pueden ser monofilamento, multifilamento, discontinuas, cortadas, bicomponente, y se ensamblan para formar hilos. Al menos un 95% de las fibras en masa deben ser sintéticas, y deben ser protegidas contra la descomposición. Los geotextiles se clasifican basados en la forma de colocación de los hilos para formar los hilos en tejido y no tejidos. Los geotextiles tejidos son formados por un entretejido uniforme regular de hilos en dos direcciones, son fabricados a partir de hilos conformando un patrón uniforme con aberturas visibles, que mantienen su posición relativa entre ellas.

El geotextil debe ser un geotextil tejido con multifilamentos de poliéster, que garantice un desempeño mecánico e hidráulico. Este geotextil deberá cumplir los siguientes requisitos mínimos:

Tabla 411.1
Requerimientos de propiedades mínimos para geotextiles

Propiedad	Norma de Ensayo	Separación VMPR		Estabilización VMPR	
		Geotextiles Tejidos	Geotextiles No Tejidos	Geotextiles Tejidos	Geotextiles No Tejidos
Elongación	ASTM D 4632	< 50%	> 50%	< 50%	> 50%
Resistencia a la tensión Grab	ASTM D 4632	1100 N	700 N	1400 N	900 N
Resistencia a la costura	ASTM D 4632	990 N	630 N	1200 N	810 N
Resistencia a la punción o penetración estática 50 mm.	ASTM D 6241	2200 N	1375 N	2750 N	1925 N
Resistencia al rasgado trapezoidal	ASTM D 4533	400 N	250 N	500 N	350 N
Permitividad	ASTM D 4491	0.02 s^{-1}		0.05 s^{-1}	
Tamaño de Abertura Aparente	ASTM D 4751	0.60 mm		0.43 mm	
Estabilidad Ultravioleta (esfuerzo retenido)	ASTM D 4355	50% después de 500 h de exposición		50% después de 500 h de exposición	

Tabla 35. Propiedades mínimas del geotextil a utilizar. Fuente: IDE ET-2018

Propiedad	Norma de Ensayo	Valor mínimo requerido (Tejido)
Elongación	ASTM D 4632	< 50 %
Resistencia a la tensión Grab	ASTM D 4632	1,400 N
Resistencia a la costura	ASTM D 4632	1,200 N
Resistencia a la punción (50 mm)	ASTM D 6241	2,750 N
Resistencia al rasgado trapezoidal	ASTM D 4533	500 N
Permittividad	ASTM D 4491	0.05 s^{-1}
Tamaño de Abertura Aparente (AOS)	ASTM D 4751	0.43 mm
Estabilidad Ultravioleta (esfuerzo retenido)	ASTM D 4355	50 % después de 500 h

Tabla 36. Propiedades recomendadas del geotextil a utilizar. Fuente: Proveedores, 2025

7. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO

El diseño de pavimento rígido busca determinar un conjunto de capas de materiales que logren soportar las cargas de los vehículos durante el período de diseño, reutilizando los materiales existentes y generando una solución técnica y económicamente viable. A continuación, se presenta el método de diseño, las alternativas a diseñar y el cálculo de espesores.

7.1. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Dadas las condiciones de sitio y teniendo en cuenta el aprovechamiento de materiales reciclados que se enmarcan dentro del cumplimiento del plan de gestión de RCD (aprovechamiento de los Residuos de Construcción y Demolición) y la resolución 1115 de 2012 donde se realiza el aprovechamiento de este tipo de material toda vez que deberán cumplir con las especificaciones técnicas relacionadas en el anexo técnico. Además, el uso de materiales granulares con residuos de demolición de construcción contribuye a disminuir el impacto ambiental generado por el desecho de neumáticos usados y por las actividades constructivas a lo largo de la ciudad.

El anexo técnico del contrato de obra No. 258 DE 2025 establece que para el desarrollo de las intervenciones del proyecto se deberán cumplir con el documento ET-IC-01 - Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C.

De igual manera se resaltan Los valores típicos del módulo de elasticidad (E) y del módulo resiliente (Mr) para materiales granulares utilizados en bases y subbases de pavimentos en Colombia están especificados en los documentos técnicos del INVIAS, como el Manual de Diseño de Pavimentos para Baja, Media y Alta Transitabilidad, así como en pliegos de especificaciones generales.

A continuación, le presento los valores de referencia típicos según estos documentos:

Subbase granular (tipo INVIAS – SBG o equivalente):

Parámetro	Valor típico
Módulo de elasticidad (E)	80 – 200 MPa
Módulo resiliente (Mr)	80 – 250 MPa
CBR	≥ 30 % (mínimo)

Subbase estabilizada con emulsión asfáltica (BAE – Base Asfáltica Emulsionada)

Parámetro	Valor típico
Módulo resiliente (Mr)	300 – 800 MPa
Resistencia a tracción indirecta	150 – 400 kPa

A continuación, se presentarán los materiales de construcción típicos de la zona que serán utilizados en el presente documento y sus propiedades mecánicas:

7.1.1. Mezcla asfáltica MD-19

Las características mecánicas de las mezclas asfálticas en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a1, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico de la mezcla asfáltica. A partir de lo anterior, el coeficiente a1 se obtiene mediante la correlación establecida por AASHTO a una temperatura de 20°C:

$$a_1 = 0.184 * Ln(M_r asfalto) - 1.9547$$

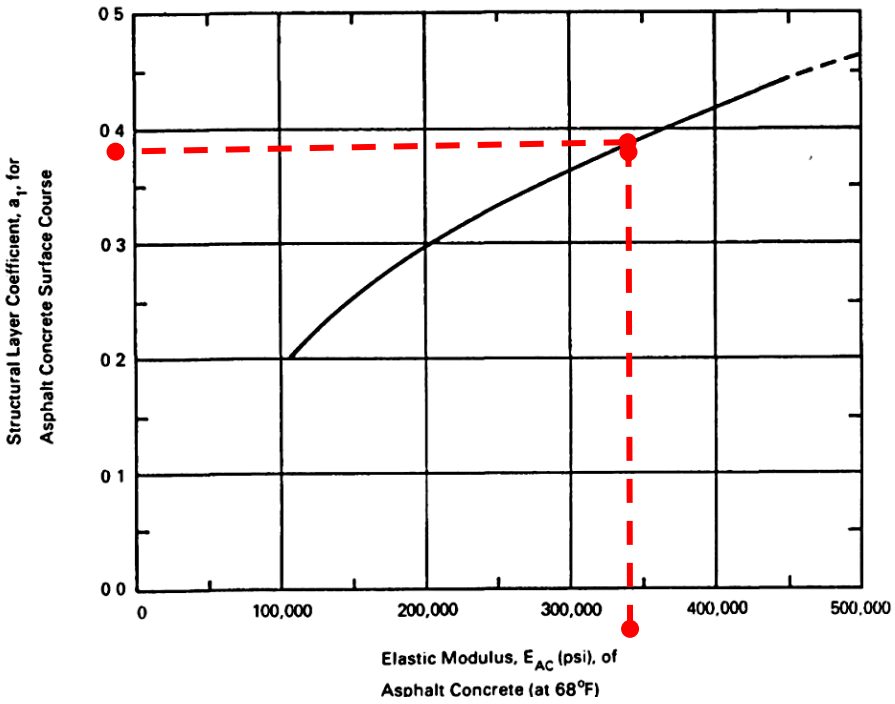


Ilustración 36. Gráfica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: AASHTO)

Teniendo en cuenta lo anterior, si el valor M_r convencional es 345.000 psi.

7.1.2. Subbase granular reciclada (AR-SBG) o subbase granular tipo A (SBG-A)

Las características mecánicas de las subbases granulares no tratadas en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a3, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico del material. A partir de lo anterior, el coeficiente a3 se obtiene mediante la correlación establecida por AASHTO:

$$a_3 = 0.227 * Log(M_r SBG) - 0.839$$

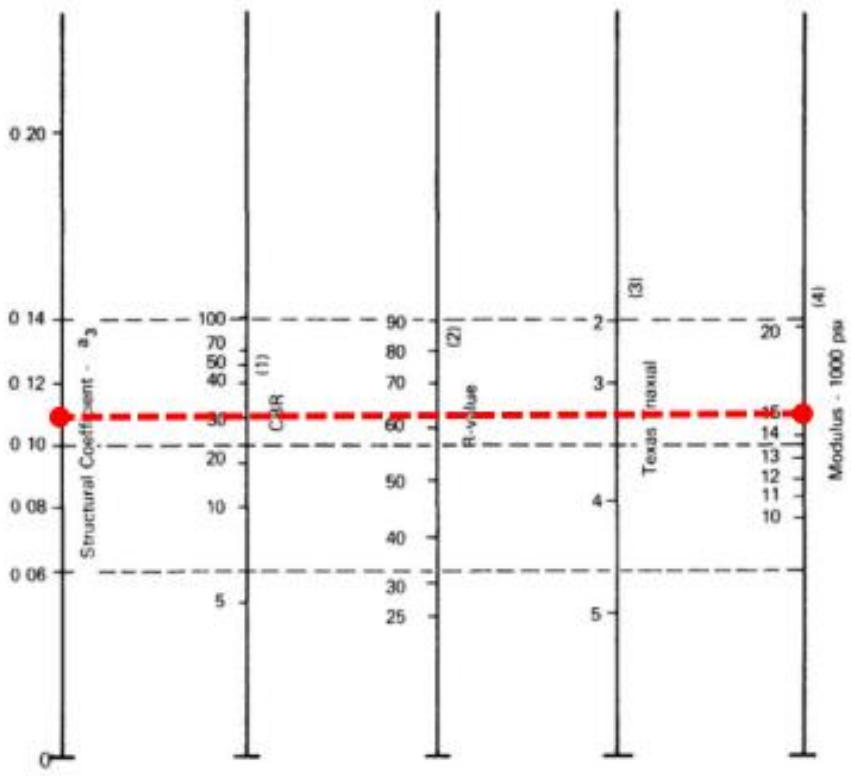


Ilustración 37. Gráfica Coeficiente estructural para capas asfálticas (Fuente: AASHTO)

Teniendo en cuenta lo anterior, si el valor Mr convencional es 15.000 psi, encontrándose dentro del rango de módulos descrito anteriormente.

7.1.3. Base Granular Tipo A (BG-A BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) (convencional o reciclada) estabilizada con cemento 5% y aditivo ionizante

Se define como una mezcla de agregados reciclados provenientes de materiales previamente utilizados en estructuras viales, procesados y clasificados, a los cuales se les adiciona un 5% de cemento Portland (como agente hidráulico) con el fin de mejorar la cohesión, resistencia mecánica y comportamiento frente al agua de la subbase granular. De acuerdo a la Especificación Técnica 520-18 del Instituto de Desarrollo Urbano se pueden

utilizar aditivos para modificar las propiedades de los materiales, con el fin de alcanzar las condiciones particulares del pavimento por construir.

Características principales:

- AR-BG: Agregado reciclado procesado que cumple con las especificaciones de granulometría y calidad de una subbase granular.
- Cemento 5%: Proporciona una estabilización hidráulica mínima, ayudando a mejorar la rigidez y reducir la deformación permanente.

Las características mecánicas de las bases granulares tratadas con cemento en la metodología AASHTO-93 se determinan a través del coeficiente estructural a2, el cual depende del valor del módulo resiliente o elástico de la base granular tratada con cemento. A partir de lo anterior, si el valor M_r convencional promedio para una subbase estabilizada con cemento se calcula a partir de lo solicitado en la especificación técnica 520-18, respecto a la resistencia a la compresión a 7 días que debe ser de 4.5 MPa.

La adopción de un módulo de elasticidad de 37000 psi para una base granular estabilizada con cemento al 5% se fundamenta en los rangos establecidos por la literatura técnica internacional, los lineamientos metodológicos de AASHTO 93, la documentación técnica de la Portland Cement Association (PCA), recomendaciones del Transportation Research Board (TRB) y los criterios referidos en el Manual de Diseño de Pavimentos del INVIAS (2013).

En primer lugar, AASHTO (1993), en su guía para el diseño estructural de pavimentos, establece que los módulos elásticos típicos para capas suelo-cemento con contenidos de 3% a 7% se encuentran en el intervalo de 25000 a 50000 psi. De forma concordante, la Portland Cement Association (PCA. (1992). *Soil-Cement Laboratory Handbook*. Portland Cement Association.) indica que materiales estabilizados con 4% a 6% de cemento presentan módulos usuales entre 30000 y 60000 psi, dependiendo del tipo de material granular, la compacidad y la calidad del curado. Por su parte, el Transportation Research

Board, mediante el documento E236 sobre propiedades mecánicas de mezclas suelo-cemento, señala que los módulos elásticos de estos materiales suelen ubicarse entre 28000 y 70000 psi para suelos granulares con dosificaciones de cemento entre 3% y 6% (TRB. (1995). *Soil-Cement: Engineering Properties, Construction Practices, and Performance*. Transportation Research Board, Circular E-236). Con base en estas referencias, el valor adoptado de 37000 psi corresponde a la zona media del rango reportado por la literatura y evita sobreestimaciones que podrían generar diseños no conservadores.

En segundo lugar, el Manual de Diseño de Pavimentos del INVIAS (2013), aunque no establece un módulo único obligatorio para las capas tratadas con cemento, señala que los materiales granulares estabilizados con porcentajes del 3% al 6% suelen presentar módulos equivalentes entre 200 MPa y 400 MPa. El valor adoptado de 37000 psi corresponde aproximadamente a 255 MPa, ubicándose por encima del límite inferior y por debajo del superior sugerido por INVIAS, con lo cual se garantiza una aproximación prudente y coherente con el comportamiento real del material, especialmente bajo condiciones de fisuración y degradación progresiva.

Asimismo, la relación entre la resistencia a la compresión simple (UCS) y el módulo resiliente documentada por AASHTO (1993), PCA (1992) y TRB (1995) indica que los materiales con 5% de cemento, compactados bajo Proctor Modificado, suelen alcanzar resistencias a 7 días entre 3.0 y 4.5 MPa. Utilizando la relación empírica $Mr \approx 1000 \times UCS$, ampliamente citada en dichas fuentes, se obtendrían módulos teóricos superiores a 40000 psi. No obstante, diversas guías de diseño recomiendan reducir este valor para considerar el comportamiento de la mezcla en servicio, la generación de microfisuras y la pérdida progresiva de rigidez, razón por la cual para pavimentos flexibles se adoptan valores convencionales entre 30000 y 50000 psi, siendo 37000 psi coherente con una aproximación conservadora.

Finalmente, la experiencia técnica documentada en proyectos urbanos con suelos blandos y materiales granulares estabilizados en ciudades latinoamericanas muestra que módulos

entre 32000 y 45000 psi son típicos en bases con contenidos de cemento entre 4% y 6% (PCA, 1992; TRB, 1995). En ese sentido, el valor adoptado refleja razonablemente el desempeño esperado en condiciones reales de carga y operación, sin incurrir en sobreestimaciones que pudieran comprometer el diseño de la estructura del pavimento.
De acuerdo a lo anterior se obtiene:

CAPA	M_r / E (psi)
base reciclada BG-A (convencional o reciclada) estabilizado con cemento 5% y aditivo	37000

Tabla 37. Propiedades mecánicas de los materiales

Las Especificaciones Técnicas IDU 520-18 aborda las capas de material granular estabilizado con cemento. Según esta especificación, el contenido óptimo de ligante residual debe determinarse mediante el ensayo de inmersión-compresión (norma INV E-738-07), aplicando los siguientes criterios:

- Resistencia de probetas curadas en seco: ≥ 2000 kPa.
- Resistencia conservada tras curado húmedo: ≥ 75%.

El porcentaje óptimo de ligante residual será aquel que, cumpliendo las exigencias indicadas, consiga el valor máximo de resistencia tras curado húmedo. En la práctica, una dosificación del 5% de cemento ha demostrado ser efectiva para cumplir con estos requisitos, proporcionando una mezcla con adecuada cohesión y resistencia.

A partir de lo anterior, si el valor M_r convencional promedio para una base estabilizada con cemento es 37.000 psi, se obtiene un valor de coeficiente estructural de a2 = 0.18. Por otro lado, la capacidad de permeabilidad y drenaje del material se encuentra definido mediante el coeficiente de drenaje m2. Teniendo en cuenta que este material se encuentra tratado con cemento, tiene una capacidad de permeabilidad mayor en comparación a las capas inferiores, por lo cual se obtiene el valor de coeficiente de drenaje m2 = 1.00

Ahora, La inclusión de un aditivo líquido iónico dentro de una mezcla de base granular estabilizada con cemento al 5% se sustenta en el comportamiento químico, mecánico y de durabilidad demostrado en los ensayos del documento técnico aportado, y se integra de manera coherente con lo dispuesto por la Especificación Técnica 520-18 del IDU para capas de base y subbase mejoradas con cemento hidráulico. Esta combinación es compatible con el tipo de mezcla definida en la especificación, no altera los requisitos normativos exigidos y contribuye a mejorar la eficiencia estructural de la capa tratada.

f) Compatibilidad con la Especificación 520-18 del IDU

La Especificación 520-18 establece que las capas de base o subbase mejoradas con cemento pueden incluir, además del material granular, cemento, agua y “eventualmente aditivos”, siempre que estos sean compatibles con el cemento hidráulico y que su empleo y dosificación sean definidos por el diseñador mediante ensayos previos que demuestren el efecto deseado y sin alterar negativamente las propiedades restantes de la mezcla. La especificación también exige que se verifique la ficha técnica, certificaciones y compatibilidad del aditivo con el cemento. (ver anexo Ficha técnica aditivo Protech)

En este contexto, el uso de un aditivo líquido iónico cumple plenamente con la especificación, pues su función es modificar el comportamiento del suelo y del cemento mediante mecanismos de intercambio iónico, floculación controlada y reducción de susceptibilidad al agua, sin interferir con las reacciones cimentantes. Además, su aplicación se ajusta al proceso constructivo descrito en la especificación, dado que puede incorporarse disuelto en el agua de mezclado, conforme al procedimiento de mezcla en planta o mezcla en sitio previsto normativamente.

g) Fundamentación química y mecánica del aditivo

El documento técnico entregado como anexo, describe que el aditivo líquido iónico genera un proceso de reorganización interna de partículas finas, reduce la capacidad de adsorción de agua y promueve la formación de microestructuras más estables en combinación con un

aditivo sólido como el cemento. Este mecanismo produce un aumento de cohesión, una reducción significativa en la pérdida de humedad y una mejora del desempeño mecánico de la mezcla.

En los ensayos de laboratorio incluidos en el documento, se observan incrementos importantes en resistencia a la compresión, capacidad soporte (CBR), módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta cuando el aditivo líquido se utiliza en combinación con cemento. Este comportamiento mejora la rigidez inicial de la mezcla y aporta progresivamente a su resistencia a largo plazo, manteniendo un desempeño uniforme aun en presencia de variaciones de humedad.

De igual forma, la estabilización dual (cemento + aditivo líquido) mantiene un comportamiento semi-ligado y flexible, mitigando la excesiva rigidez propia de las capas exclusivamente cementadas, lo cual favorece su compatibilidad con carpetas asfálticas y reduce la posibilidad de fisuración por retracción.

h) Contribución del aditivo al cumplimiento de los requisitos normativos de la mezcla

La Especificación 520-18 define lineamientos sobre granulometría, calidad de agregados, contenido mínimo de cemento, pérdidas en durabilidad, resistencia mínima y calidad del agua, todos los cuales siguen siendo aplicables sin restricciones cuando se usa un aditivo líquido iónico.

La presencia del aditivo no sustituye el papel estructural del cemento, sino que optimiza la microestructura del material granular y mejora la eficiencia de su interacción con el aglutinante. Como resultado, la mezcla logra más fácilmente los parámetros establecidos por la especificación, tales como:

- Alcanzar la resistencia mínima exigida a los siete días según la clasificación del material granular;
- Cumplir con los límites de pérdida en durabilidad establecidos por la norma de ensayo correspondiente;

- Asegurar la homogeneidad de la mezcla durante su fabricación en planta o en sitio;
- Mantener la humedad de compactación dentro de los rangos definidos en la fórmula de trabajo;
- Facilitar la obtención de una densidad compactada igual o superior al 98% de la densidad máxima determinada.

Estos beneficios se traducen en una mejor capacidad para cumplir con los controles de calidad de la mezcla y de la capa terminada establecidos en las Tablas 520.6, 520.7 y 520.8 de la especificación, especialmente en lo relativo a resistencia, módulo de reacción, densidad, espesor y planicidad.

i) Mejora de la durabilidad hidráulica y resistencia al agua

El documento técnico evidencia que la adición del aditivo líquido iónico incrementa la estabilidad del material frente a ciclos de humedad, reduciendo la susceptibilidad a pérdidas de estructura y favoreciendo la retención de resistencia. Esto complementa de forma directa las exigencias de la Especificación 520-18, que requiere que las mezclas tratadas con cemento alcancen niveles adecuados de durabilidad y un comportamiento estable ante exposiciones a agua, condición indispensable para pavimentos urbanos sujetos a infiltraciones y variaciones de humedad.

j) Contribución al desempeño en servicio y compatibilidad estructural

Los resultados presentados en el documento muestran valores elevados de módulo resiliente en edades tempranas y aumentos progresivos a medida que avanzan las reacciones internas. Este comportamiento permite que la capa actúe como un elemento de soporte eficiente dentro de la estructura del pavimento, mejorando de forma directa la transmisión de cargas hacia capas inferiores y contribuyendo a la prolongación de la vida útil del pavimento.

A su vez, el carácter semi-ligado de la mezcla con aditivo líquido reduce la posibilidad de fisuración excesiva, condición que es coherente con la recomendación de prefisuración de la Especificación 520-18 cuando los contenidos de cemento son elevados y en materiales muy rígidos. En este caso, el aditivo favorece un comportamiento más estable y menos propenso a contracciones severas.

En conclusión, la utilización de un aditivo líquido iónico en combinación con una dosificación de cemento al 5% en la base granular se justifica desde el punto de vista químico, mecánico, hidráulico y normativo.

El aditivo:

- Es compatible con la estructura del diseño descrito en la Especificación 520-18 del IDU;
- Optimiza la reacción del cemento sin interferir con sus propiedades fundamentales;
- Incrementa la resistencia, rigidez y cohesión de la mezcla;
- Mejora significativamente la estabilidad frente a la humedad;
- Facilita el cumplimiento de los controles de calidad exigidos por la especificación;
- Contribuye a la durabilidad y desempeño estructural del pavimento en condiciones reales de servicio.

Por lo tanto, su inclusión se considera técnica, funcional y normativamente adecuada para el diseño de una base estabilizada con cemento al 5% y 1Lt/m3 de aditivo ionizante.

7.2. Cálculo Del Módulo De Reacción K

El módulo de reacción k de la plataforma de soporte se obtiene de la correlación entre el valor del CBR de la capa de subrasante y la capa de transición. Para determinar este módulo k se utiliza el procedimiento descrito en la guía de diseño de AASHTO-93. Para

determinar el aporte combinado de subrasante y capa de cuerpo, se definen las siguientes alternativas para pavimento rígido:

- Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)Convencional o reciclada
- Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) Convencional o reciclada

El valor del módulo de reacción combinado se obtiene de acuerdo con lo indicado anteriormente, y se ajusta a una pérdida de soporte LS = 1,0.

A continuación, se presentan los valores de K Combinado para la Base tipo A (convencional o reciclada) tratada con cemento (Color Azul) y Subbase Granular (Color Naranja):

Pasos en el nomograma:

- Localice el eje de la izquierda con el valor del módulo de elasticidad de la subrasante.
- Siga una línea recta hasta el espesor del material granular o estabilizado (eje medio).
- Luego cruce una línea hasta el eje derecho correspondiente al módulo de elasticidad del material.
- El valor leído será el módulo k-eq (equivalente).

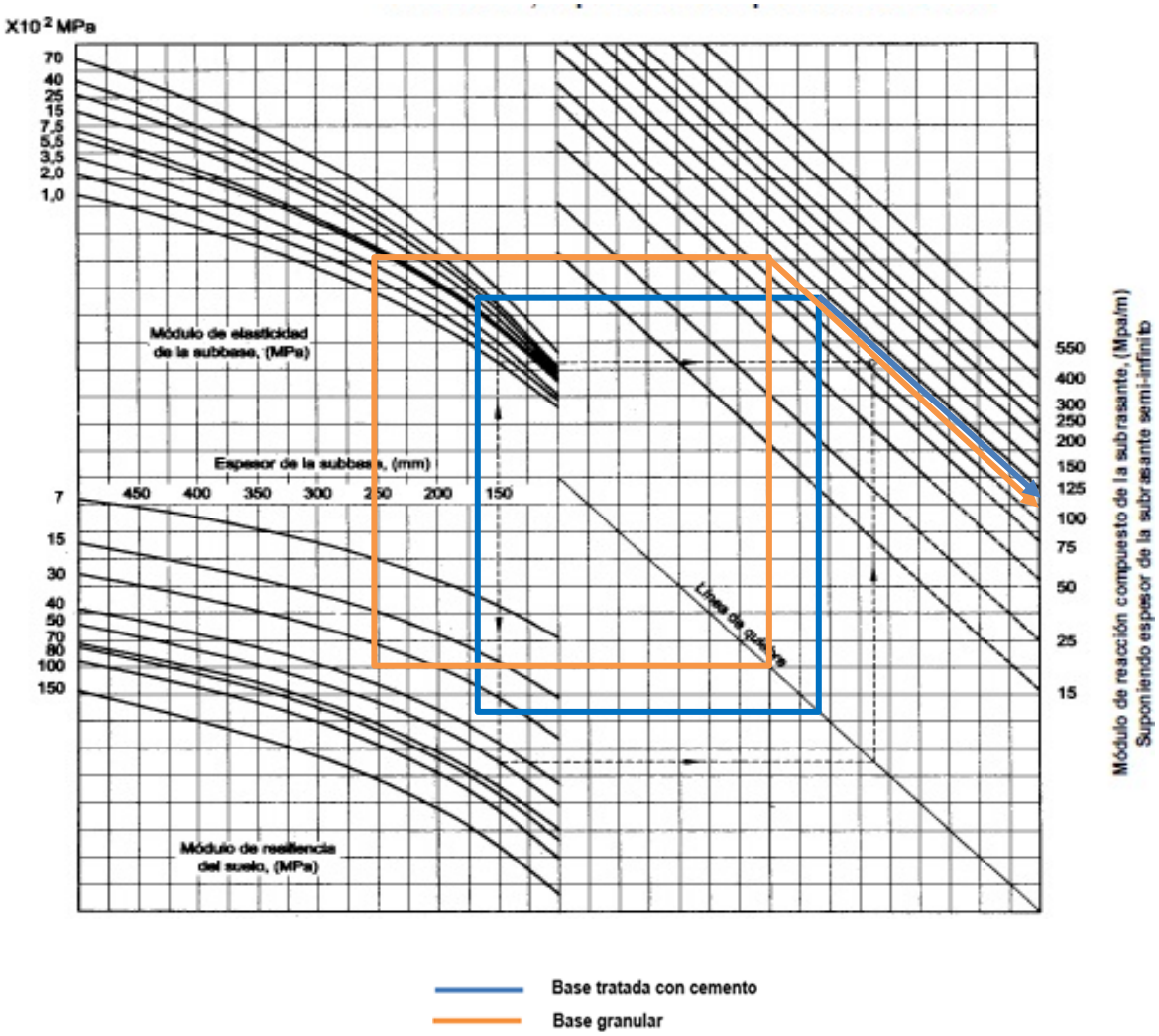


Ilustración 38. Guía para diseño de estructuras de pavimentos. (Fuente: AASHTO)

Pasos en el nomograma:

- Localice el eje inferior con el valor del módulo k-eq (equivalente).
- Siga una línea recta hasta atravesar la línea de LS = 1
- Luego cruce una línea hasta el eje lateral correspondiente al módulo de elasticidad del material.
- El valor leído será el módulo k-eq (equivalente).

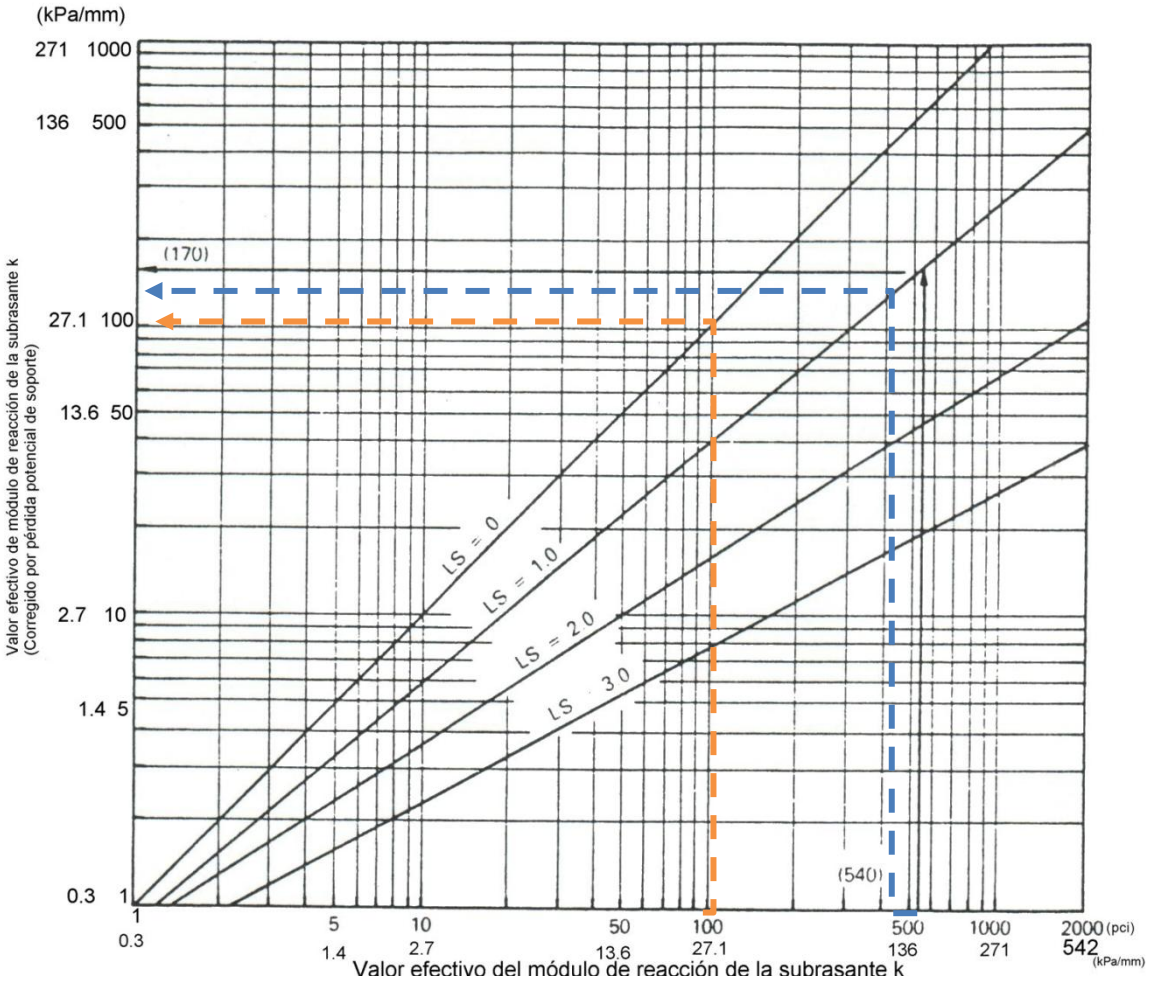


Ilustración 39. Cálculo de Módulo de Reacción combinado (Fuente: AASHTO)

A partir de lo anterior y con el fin de brindar espesores de capa constructivos, se empleará una capa Subbase reciclada (AR-SBG).

CAPA	E (psi)	ESPESOR	*k*
Base Granular Tipo A (BG-A_BG38) o Base Granular Reciclada (AR-BG-A) Estabilizada con cemento 5%	37000	16 cm	125 pci
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)Convencional o reciclada	15000	25 cm	115 pci

Tabla 38. Cálculo de módulo combinado material estabilizado y granular (Fuente: Propia)

La construcción de una capa de base granular estabilizada con cemento por debajo de un espesor de 16 cm resulta inadecuada desde los puntos de vista estructural, constructivo, mecánico y de durabilidad. Una capa con espesor insuficiente no cumple los criterios necesarios para garantizar el desempeño esperado dentro del paquete estructural del pavimento y aumenta de forma significativa el riesgo de fallas prematuras.

A continuación, se exponen los argumentos técnicos que sustentan la necesidad de mantener espesores mínimos iguales o superiores a 16 cm.

Las bases estabilizadas con cemento se comportan como materiales semi rígidos con alta rigidez inicial. Su contribución estructural depende no solo de su módulo, sino de su espesor efectivo. Cuando la capa es demasiado delgada, no alcanza a desarrollar la rigidez requerida para distribuir adecuadamente las cargas verticales hacia las capas inferiores.

Una base tratada con cemento por debajo de 16 cm:

- incrementa la tensión de compresión en la subbase y la subrasante;
- reduce la eficiencia del módulo resiliente de la capa estabilizada, ya que el espesor insuficiente hace que la rigidez efectiva sea menor a la calculada en diseño;
- aumenta el riesgo de deformaciones permanentes en las capas inferiores.

En otras palabras, una base muy delgada no actúa como un elemento distribuidor de cargas, sino como una lámina frágil que concentra esfuerzos y acelera la fatiga estructural.

as bases estabilizadas con cemento tienden naturalmente a fisurar por contracción, retracción hidráulica y cambios térmicos. Cuando el espesor es muy bajo:

- la capa pierde capacidad para absorber microfisuras internas;
- la velocidad de secado es mayor, lo que acelera la contracción;
- aumenta el agrietamiento superficial y longitudinal;
- aumenta la probabilidad de que la fisuración se refleje rápidamente hacia la carpeta asfáltica.

Una capa tratada con espesores menores a 20 cm se comporta como un elemento demasiado rígido y demasiado delgado, lo cual incrementa la densidad de fisuras y deterioros por reflexión, comprometiendo la durabilidad del pavimento.

Una base estabilizada con cemento con espesor menor de 20 cm:

- no alcanza el desempeño estructural requerido;
- pierde rigidez efectiva y genera esfuerzos excesivos en capas inferiores;
- presenta mayores riesgos de fisuración y reflexión a la carpeta asfáltica;
- es difícil de mezclar, controlar y compactar adecuadamente;
- compromete el cumplimiento de la Especificación 520-18 del IDU;
- reduce significativamente la vida útil del pavimento.

Por todas estas razones, el espesor operativo mínimo recomendado y empleado en el diseño y en obra para bases estabilizadas con cemento es de 20 cm o superior, garantizando confiabilidad estructural, durabilidad y adecuado comportamiento mecánico dentro de la estructura del pavimento.

7.3. Capacidad Estructural Requerida

En este caso se acudió a la metodología AASHTO 1993 para diseño de pavimentos rígidos para establecer el espesor de estructura de pavimentos requerida por la vía, con base en los resultados de los ensayos y análisis ya presentados; el dimensionamiento de los espesores se efectuó empleando el método de la AASHTO 1993, según el cual la capacidad del pavimento es 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, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 7{,}35\log(D+1) - 0{,}06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4{,}5-1{,}5}\right)}{\frac{1{,}624\text{ x }10^7}{(D+1)^{8{,}46}}} + (4{,}22 - 0{,}32P_t)\log\left[\frac{\frac{S_c' C_d}{D^{0{,}75}} - 1{,}132)}{215{,}63\,J\left[D^{0{,}75} - \frac{18{,}42}{\left[\frac{E_c}{k}\right]^{0{,}25}}\right]}\right]$$

Ecuación 2. Metodología diseño de pavimento rígido por medio de la metodología AASHTO-93

Donde:

- **W18**, es el número de aplicaciones de carga de 18 kips, (80 kN) previstas.
- **ZR**, es el área bajo la curva de distribución estandarizada para una confiabilidad R, que considera la probabilidad de que el índice de servicio del pavimento sea superior a pt durante el periodo de diseño.
- **So**, es la desviación estándar de la distribución normal de las variables asociadas a todas las variables.
- **D**, es el espesor de la losa del pavimento en pulgadas.
- **ΔPSI**, es la pérdida del servicio prevista en el diseño.
- Pt, es la serviciabilidad final.
- Sc, es el módulo de rotura del concreto en PSI.
- **J**, es el coeficiente de transferencia de carga.
- Cd, es el Coeficiente de drenaje.
- Ec, es el módulo de elasticidad del concreto, en PSI.
- k, es el módulo de reacción de la subrasante, en pci (PSI/in).

El procedimiento para determinar la estructura que supla las solicitaciones del tránsito, consiste en despejar el espesor de losa requerido

7.4. Parámetros de alternativas de diseño en pavimento rígido

A continuación, se presentan cado uno de los parámetros requeridos para el diseño de pavimentos flexibles mediante la metodología AASHTO – 93:

7.4.1. Confiabilidad (R) y Desviación estándar (Zr)

La confiabilidad se entiende como el grado de seguridad de una determinada alternativa de diseño, determinando la probabilidad de que el pavimento pueda soportar el número de repeticiones de carga que sea aplicada durante su vida útil, según la guía AASHTO, recomienda unos valores de acuerdo al tipo de vía que se esté analizando, para nuestro

caso, que son vías locales rurales se debe adoptar una confiabilidad entre 50% y 80%. En este caso se adopta una confiabilidad de 80%.

Tipo de carretera	Nivel de confiabilidad *R* (%)	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85.0 – 99.9	80.0 – 99.9
Arterias principales	80.0 – 99.9	75.0 – 95.0
Colectoras	80.0 – 95.0	75.0 – 95.0
Locales	50.0 – 80.0	50.0 – 80.0

R (%)	50	70	75	80	85	90	92	94	95	98	99.99
Zr	0.000	-0.524	-0.674	-0.841	-1.037	-1.282	-1.405	-1.555	-1.645	-2.054	-3.750

Ilustración 40. Valores recomendados de confiabilidad (Fuente: AASHTO)

7.4.2. Confiabilidad – Error normal combinado

Teniendo en cuenta que la predicción del tránsito es confiable, que los equipos con que se va a construir la estructura de pavimento son adecuados y se encuentran en buenas condiciones debido a la magnitud del proyecto y que los materiales que se van a implementar cumplen con las especificaciones técnicas tenidas en cuenta para el diseño, se toma como valor de desviación estándar 0.35.

Proyecto de pavimento	S_0	
	Flexible	Rígido
	0.40 – 0.50	0.30 – 0.40
Construcción nueva	0.45	0.35
Sobrecapas	0.50	0.40

Ilustración 41. Valores recomendados de confiabilidad AASHTO (Fuente: AASHTO)

7.4.3. Índices de serviciabilidad (ΔPSI)

Según la AASHTO la serviciabilidad es la habilidad específica de una sección de pavimento para servir al tráfico. Debido a que la estructura de pavimento a diseñar es rígido se tomará

una serviciabilidad inicial (Pi) de 4.5 y también debido a que es una vía principal en la zona se toma una serviciabilidad final (Pf) de 2.3, determinando que el ΔPSI es igual a 2.2.

TIPO PAVIMENTO	SERVICIABILIDAD INICIAL, Po
Concreto	4.5
Asfalto	4.2

Fuente: AASHTO Guide for design of pavement structures. Washington D.C., 1993. p. II–10.

Tipo de vía	Servicialidad final, P_t
Autopista	2.5 – 3.0
Carreteras	2.0 – 2.5
Zonas industriales	
Pavimento urbano principal	1.5 – 2.0
Pavimento urbano secundario	1.5 – 2.0

Ilustración 42. Valores recomendados de Servicialidad AASHTO (Fuente: AASHTO)

7.4.4. Coeficientes de drenaje

La calidad del drenaje se evalúa mediante coeficientes de drenaje (Cd) para las cappas de base y subbase granular. Los valores se seleccionan con base en las características del material, la calidad del drenaje y el porcentaje de tiempo en el que la estructura del pavimento está expuesta a altos niveles de humedad. En estructuras semirrígidas el coeficiente de drenaje se asume como 1.0 por ser impermeable.

Características del drenaje	Porcentaje del tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próxima a la saturación			
	Menos del 1%	1 – 5%	5 – 25%	Mas del 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
Bueno	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	1.00
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy malo	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.40	0.40

Ilustración 43. Valores recomendados de drenaje AASHTO (Fuente: AASHTO)

7.4.5. Coeficientes de transferencia de carga

El coeficiente de transferencia de carga (J) es un parámetro adimensional que tiene en cuenta la capacidad que tienen los pasadores de transferir o distribuir las cargas en la zona más propensa a fallar.

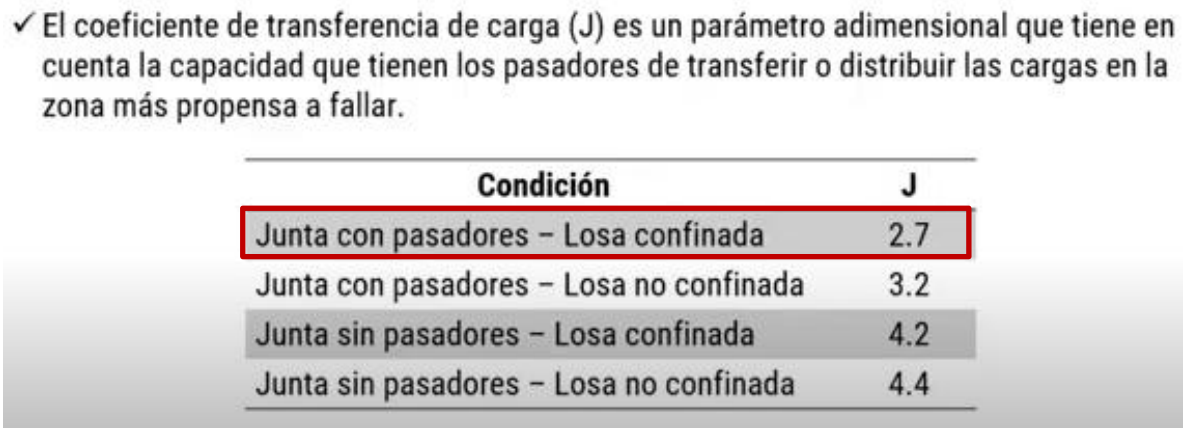


Ilustración 44. Valores recomendados de transferencia de carga AASHTO (Fuente: AASHTO)

7.4.6. Número estructural (SN)

A continuación, se presentan los parámetros de análisis que se tendrán en cuenta:

PARÁMETROS	VALOR
Ejes equivalentes 8.2 ton proyectados a 20 años (W18)	2.345.000
Confiabilidad (R)	80%
Desviación estándar (S_0)	0,35
Índice de serviciabilidad (ΔPSI)	2.2
Coeficiente de transmisión de carga	2.7
Coeficiente de drenaje	1.0
Módulo de rotura de concreto	4.5 MPa
Módulo de elasticidad del concreto	31000 MPa
Modulo combinado base granular tipo A estabilizada con cemento 5% y aditivo	125 pci
Modulo combinado Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)Convencional o reciclada	115 pci

Tabla 39. Parámetros de diseño alternativa pavimento rígido. (Fuente: Elaboración propia)

7.5. Alternativas de diseño de pavimento rígido

Basados en los parámetros antes mencionados, se procede a calcular el número estructural y espesores de capas del diseño a partir de la ecuación para pavimentos rígidos del "AASHTO Guide for design of pavement structures 1993". Para ello, se plantean diferentes alternativas de mezclas de concreto y granulares como se presentan a continuación:

7.5.1. Alternativa 1: Losa de concreto MR-45, Subbase reciclada (AR-SBG) y mejoramiento con geocelda

En el caso de Losas de Concreto MR-45, capa anti erosiva que en la práctica corresponde a una MD-19 de acuerdo a las especificaciones técnicas IDU ET 2018, Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)Convencional o reciclada y mejoramiento con geocelda H=15 cm con sello, se obtienen los siguientes resultados (Anexo 3):

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO	VALOR DE MODULO COMBINADO
Losa de concreto MR-45	18	800-18	4.502.639 PSI	-
CAPA ANTI EROSIVA MD-19	5	620-18	345.000 PSI	115 PCI
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)Convencional o reciclada	25	533-18	15.000 PSI	
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular reciclada (AR-SBG) con Geocelda h=15cm	20	412-18	6307.3 PSI	
Geotextil tejido, método tira ancha >90 kN/m		411-18		
Barrenos de cal en tresbolillo cada 1 m perforaciones de 1 m de profundidad	-	231-18		

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO	VALOR DE MODULO COMBINADO
Subrasante	-	-	1601.76 PSI	

Tabla 40. Espesores de diseño de pavimento rígido método AASHTO, alternativa 1 (Fuente: Propia)

Así mismo, en el anexo 3 se encuentra la verificación a través de las tabla 4-4 Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal para el espesor de losa arrojado.

7.5.2. Alternativa 2: Losa de concreto MR-45, Subbase reciclada (AR-SBG) estabilizado con cemento 5%con cemento y mejoramiento con geocelda

En el caso de las losas de concreto Mr-45, Base granular tipo A (convencional o reciclada) estabilizado con cemento 5% y mejoramiento con geocelda H=15 cm con sello, se obtienen los siguientes resultados (Anexo 3):

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO	VALOR DE MODULO COMBINADO
Losa de concreto MR-45	18	800-18	4.502.639 PSI	-
Base granular tipo A (convencional o reciclada) estabilizada con cemento 5% y aditivo	16	533-18	37.000 PSI	150 PCI
Geomalla multiaxial, resistencia a fluencia ³ 300 kN/m	-	242-18		
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular reciclada (AR-SBG) con Geocelda h=15cm	20	412-18	6307.3 PSI	
Geotextil tejido, método tira ancha >90 kN/m	-	411-18		
Barrenos de cal en tresbolillo cada 1 m perforaciones de 1 m de profundidad	-	231-18		

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO	VALOR DE MODULO COMBINADO
Subrasante	-	-	1601.76 PSI	

Tabla 41. Espesores de diseño de pavimento rígido método AASHTO, alternativa 2 (Fuente: Propia)

Así mismo, en el anexo 3 se encuentra la verificación a través de las tabla 4-4 Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T2 como factor principal para el espesor de losa arrojado.

7.6. Verificación por metodología PCA

Se verifica el diseño del pavimento rígido mediante la metodología PCA (Portland Cement Association), asegurando que cumpla con los criterios de desempeño estructural y funcional establecidos para las condiciones de tránsito y características del suelo del proyecto. La metodología PCA se fundamenta en el análisis de esfuerzos y deformaciones en losas de concreto, considerando factores como cargas de tráfico, propiedades del material, condiciones de soporte y parámetros ambientales, con el fin de garantizar una vida útil adecuada y minimizar riesgos de falla prematura.

7.6.1. CONVERSIÓN DE EJES EQUIVALENTES A ESPECTRO DE CARGAS PARA DISEÑO PCA

Para la verificación estructural del pavimento rígido mediante la metodología de la Portland Cement Association (PCA), se requiere expresar el tránsito de diseño en términos de repeticiones reales de carga, diferenciadas por tipo de eje y nivel de carga, dado que el desempeño estructural de las losas de concreto depende de manera directa del espectro de cargas actuantes y no únicamente del número acumulado de ejes equivalentes.

En este sentido, a partir de un tránsito de diseño definido como 2.345.000 ejes equivalentes de 18 kip (W18), se procedió a reconstruir un espectro de cargas compatible, bajo

supuestos técnicos razonables y conservadores, considerando que no se dispone de información específica de pesaje dinámico (WIM).

La conversión se realizó teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Se adopta como eje patrón el eje simple de 80 kN (18 kip).
- Se asume una distribución típica de participación por tipo de eje en el carril de diseño, correspondiente a:
  - 55% ejes simples,
  - 35% ejes tándem,
  - 10% ejes trídem.
- Para cada tipo de eje se definieron rangos de carga representativos (bins), con una distribución estadística concentrada en cargas medias y con presencia de sobrecargas, coherente con tránsito urbano de vehículos pesados.
- La equivalencia entre repeticiones reales y ejes equivalentes se aproximó mediante la ley potencial de carga, asegurando que la suma ponderada de daños reproduzca el valor total de W18 = 2.345.000.

Con base en lo anterior, el espectro de cargas adoptado para el análisis PCA se presenta a continuación, expresado en número de repeticiones acumuladas durante el periodo de diseño, correspondientes al carril de diseño:

Tipo de eje	Nivel de carga	Repeticiones acumuladas
Eje simple	50 kN	113.280
Eje simple	60 kN	226.560
Eje simple	70 kN	283.199
Eje simple	80 kN	283.199
Eje simple	90 kN	169.920
Eje simple	100 kN	56.640
Eje tándem	100 kN (grupo)	72.087
Eje tándem	120 kN (grupo)	180.218
Eje tándem	140 kN (grupo)	216.261
Eje tándem	160 kN (grupo)	180.218
Eje tándem	180 kN (grupo)	72.087
Eje trídem	150 kN (grupo)	20.596

Eje trídem	180 kN (grupo)	51.491
Eje trídem	210 kN (grupo)	61.789
Eje trídem	240 kN (grupo)	51.491
Eje trídem	270 kN (grupo)	20.596

Tabla 42. Repeticiones acumuladas para metodología PCA.

La verificación de consistencia del espectro demuestra que la suma de las repeticiones reales ponderadas por sus respectivos factores de equivalencia reproduce un valor de W18 ≈ 2.345.000, por lo cual el espectro resulta coherente y técnicamente válido para efectos del análisis mecanicista–empírico mediante PCA.

Este espectro de cargas se emplea posteriormente para la evaluación de los criterios de fatiga de la losa y erosión en juntas y bordes, conforme a los procedimientos establecidos por la metodología PCA, permitiendo una estimación más representativa del comportamiento estructural del pavimento rígido frente al tránsito esperado.

No obstante, se deja constancia de que, en caso de disponerse de información específica de pesaje vehicular o espectros locales de carga, estos podrán reemplazar o ajustar el espectro aquí adoptado, con el fin de refinar el análisis estructural y reducir la incertidumbre asociada a los supuestos de tránsito.

7.6.2. ANALISIS DE ALTERNATIVAS PCA

El análisis se realizará mediante el software PCAcalculo (versión 1.2), GRUA. utilizando la metodología PCA – 84 (Portland Cement Association -1984).

ALTERNATIVA 1	
PARAMETRO DE DISEÑO	**VALOR**
CONFINAMIENTO DE ESTRUCTURA	DOVELAS: SI – BERMAS: SI
FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA	1.0
CONSUMO DE FATIGA	<100
CONSUMO DE EROSIÓN	<100
MODULODE ROTURA (MR)	652 PSI (45MPa)
ESPESOR PROPUESTO DE LA LOSA	18 Cm

ESPESOR PROPUESTO DE SUB BASE	25 Cm
CBR	4.43

Espesor de losa :	180	mm
Módulo de rotura :	4.50	MPa
K del conjunto :	56	MPa/m
Periodo de diseño :	20	años
Porcentaje de fatiga	0.00	
Porcentaje de erosión	1.06	
Recomendación para barras de anclaje:		
Longitud:	60	cm
Separación entre barras:	105	cm
Recomendación para pasadores (fy=60 ksi):		
Longitud:	35	cm
Separación entre barras:	30	cm
Diámetro de barras:	2.22	cm

Ilustración 45. Verificación fatiga – erosión (alternativa 1), PCA

El espesor de 180 mm de la losa propuesto cumple con los criterios de fatiga y erosión.

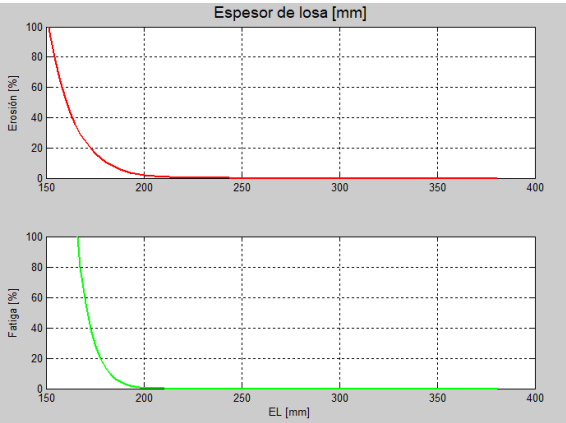


Ilustración 46. Análisis de sensibilidad, espesor de la losa.

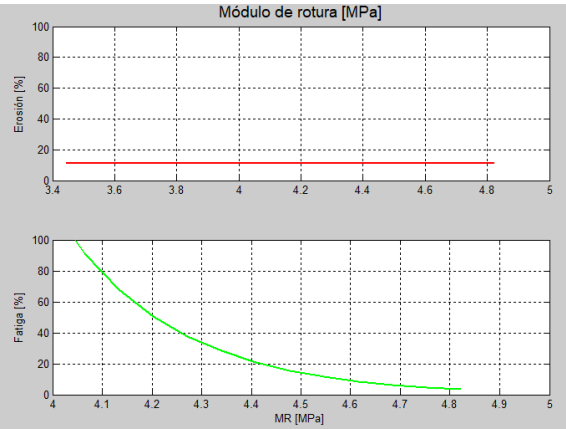


Ilustración 47. Análisis de sensibilidad, módulo de rotura.

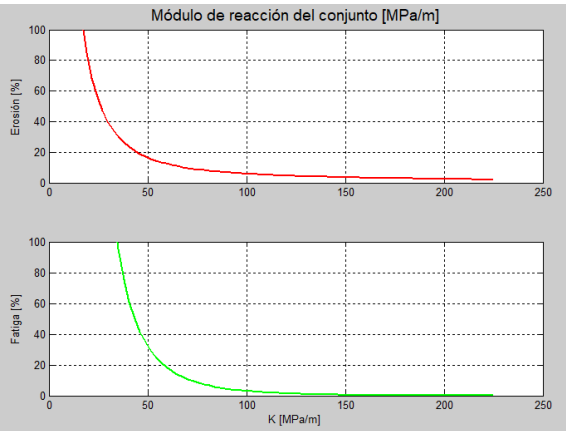


Ilustración 48. Análisis de sensibilidad, módulo de reacción.

ALTERNATIVA 2	
PARAMETRO DE DISEÑO	**VALOR**
CONFINAMIENTO DE ESTRUCTURA	DOVELAS: SI – BERMAS: SI
FACTOR DE SEGURIDAD DE CARGA	1.0
CONSUMO DE FATIGA	<100
CONSUMO DE EROSIÓN	<100
MODULODE ROTURA (MR)	652 PSI (45MPa)
ESPESOR PROPUESTO DE LA LOSA	18 Cm
ESPESOR PROPUESTO DE SUB BASE ESTABILIZADA	16 Cm
CBR	4.43

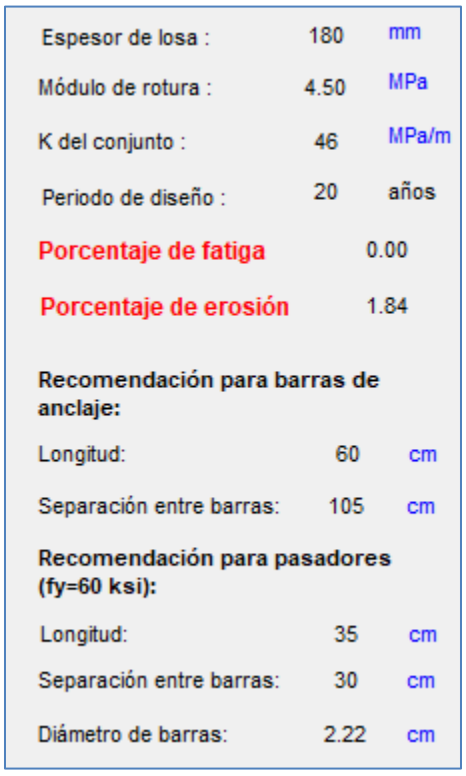


Ilustración 49. Verificación fatiga – erosión (alternativa 2), PCA

El espesor de 180 mm de la losa propuesto cumple con los criterios de fatiga y erosión.

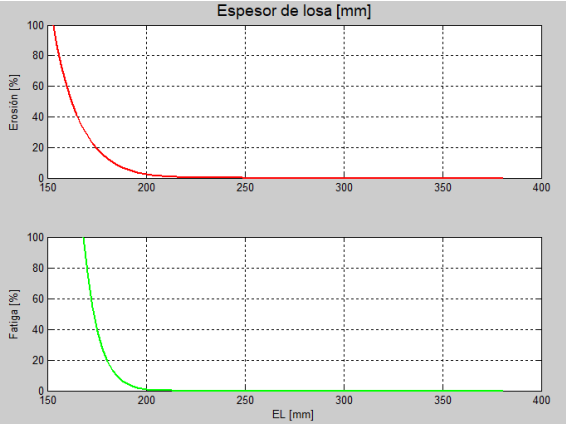


Ilustración 50. Análisis de sensibilidad, espesor de la losa.

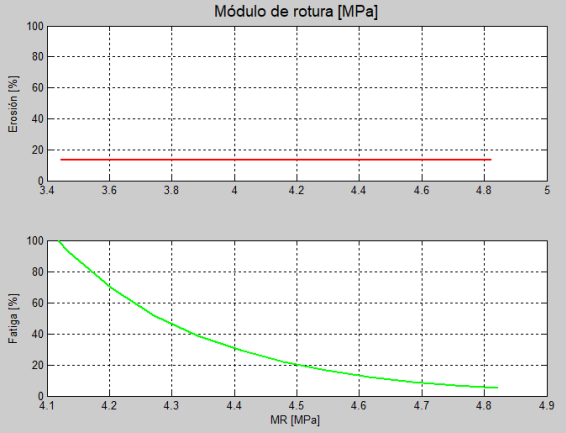


Ilustración 51. Análisis de sensibilidad, módulo de rotura.

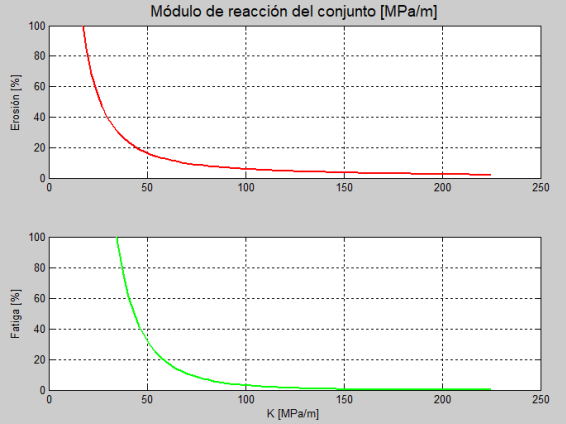


Ilustración 52. Análisis de sensibilidad, módulo de reacción.

7.7. Especificaciones Técnicas De Materiales De Construcción

Para efectos de aplicación todos los materiales incluidos en este diseño deberán cumplir lo establecido en las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018):

- La capa anti erosiva (MD-19) deberá cumplir con todo lo señalado en la sección 620-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018). La lámina de polietileno de baja densidad (LDPE), con espesor mínimo de 200 micras, ubicada entre la losa de concreto MR-45 y la capa anti-erosiva MD-19, actúa como una barrera eficaz contra la pérdida de humedad durante las primeras horas de fraguado del concreto, lo que ayuda a controlar el proceso de curado, disminuye el riesgo de fisuración por retracción plástica y mejora la calidad superficial de la losa. Además, cumple una doble función al reducir el coeficiente de fricción en la interfaz losa-base y al impedir el ascenso de humedad desde las capas inferiores, lo que resulta especialmente beneficioso en zonas húmedas o con suelos poco drenantes. Esta recomendación se alinea con lo establecido por documentos técnicos como el ACI 302.1R y la especificación ASTM C171, y representa una solución de bajo costo con un alto impacto positivo sobre la durabilidad y el comportamiento estructural del pavimento.

- La capa de subbase granular deberá ser un tipo SBG, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 510-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

- El riego de imprimación deberá ser un tipo CRL-0 o CRL-1, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 610-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

- La capa de base granular mejorada con cemento hidráulico deberá ser un tipo BG-CH, la cual deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 520-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018). Se utilizan subbases tratadas con cemento teniendo en cuenta la erosionabilidad que se produce en los pavimentos rígidos, para el uso de la subbase tratada con cemento más aditivo químico se recomienda realizar el diseño de mezcla correspondiente, de acuerdo a la especificación técnica 520-18.

- El material de mejoramiento con geocelda deberá cumplir con todo lo señalado en la Sección 412-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

La geocelda a utilizar corresponde a un sistema tridimensional de confinamiento celular fabricado en polietileno de alta densidad (HDPE), termo-soldado mediante ultrasonido para conformar un entramado flexible y de alta resistencia, destinado al confinamiento de material granular tipo subbase.

Configuración Propuesta

Altura nominal: 150 mm (15 cm)
Espesor de pared: ≥ 1,5 mm
Apertura de celda (romboidal/hexagonal): 250 – 300 mm
Tipo de relleno: Subbase Granular Tipo B (SBG-B) o AR-SBG reciclada
Factor de mejoramiento de módulo (MIF): 1,3

Propiedades Técnicas Mínimas Requeridas

Propiedad	Unidad	Valor mínimo exigido	Referencia técnica / Norma
Resistencia a tensión (pared de celda)	kN/m	≥ 20	ASTM D4595 / ISO 10319
Resistencia a fusión de soldadura	% de lámina base	≥ 100	ASTM D4437
Densidad del material	g/cm³	0,94 – 0,96	ASTM D1505
Estabilidad UV	% retención resistencia	≥ 70 % después de 500 h exposición	ASTM D4355

Condiciones de Instalación

Extensión de geoceldas sobre subrasante previamente nivelada y compactada.

Fijación mediante anclajes metálicos o plásticos cada 2,0 m en sentido transversal y longitudinal.

Relleno y compactación de celdas con material granular en capas de mínimo 10 cm.

Un geotextil es un geosintético permeable elaborado con materiales textiles, los geotextiles no pueden ser considerados como productos textiles tradicionales, debido a que son elaborados con fibras sintéticas con un amplio rango de propiedades, los principales polímeros usados para su fabricación son el polipropileno, poliéster, polietileno, polietileno y poliamida. Los filamentos, o fibras pueden ser monofilamento, multifilamento, discontinuas, cortadas, bicomponente, y se ensamblan para formar hilos. Al menos un 95% de las fibras en masa deben ser sintéticas, y deben ser protegidas contra la descomposición. Los geotextiles se clasifican basados en la forma de colocación de los hilos para formar los hilos en tejido y no tejidos. Los geotextiles tejidos son formados por un entretejido uniforme regular de hilos en dos direcciones, son fabricados a partir de hilos

conformando un patrón uniforme con aberturas visibles, que mantienen su posición relativa entre ellas.

El geotextil debe ser un geotextil tejido con multifilamentos de poliéster, que garantice un desempeño mecánico e hidráulico. Este geotextil deberá cumplir los siguientes requisitos mínimos:

Tabla 411.1
Requerimientos de propiedades mínimos para geotextiles

Propiedad	Norma de Ensayo	Separación VMPR		Estabilización VMPR	
		Geotextiles Tejidos	Geotextiles No Tejidos	Geotextiles Tejidos	Geotextiles No Tejidos
Elongación	ASTM D 4632	< 50%	> 50%	< 50%	> 50%
Resistencia a la tensión Grab	ASTM D 4632	1100 N	700 N	1400 N	900 N
Resistencia a la costura	ASTM D 4632	990 N	630 N	1200 N	810 N
Resistencia a la punción o penetración estática 50 mm.	ASTM D 6241	2200 N	1375 N	2750 N	1925 N
Resistencia al rasgado trapezoidal	ASTM D 4533	400 N	250 N	500 N	350 N
Permitividad	ASTM D 4491	0.02 s^{-1}		0.05 s^{-1}	
Tamaño de Abertura Aparente	ASTM D 4751	0.60 mm		0.43 mm	
Estabilidad Ultravioleta (esfuerzo retenido)	ASTM D 4355	50% después de 500 h de exposición		50% después de 500 h de exposición	

Tabla 43. Propiedades mínimas del geotextil a utilizar. Fuente: IDE ET-2018

Propiedad	Norma de Ensayo	Valor mínimo requerido (Tejido)	Valor típico T2100
Elongación	ASTM D 4632	< 50 %	15 %
Resistencia a la tensión Grab	ASTM D 4632	1,400 N	1140 N– 1600 N
Resistencia a la costura	ASTM D 4632	1,200 N	3400 N – 5000 N
Resistencia a la punción (50 mm)	ASTM D 6241	2,750 N	3200 N – 5,000 N
Resistencia al rasgado trapezoidal	ASTM D 4533	500 N	500 N – 1,200 N
Permittividad	ASTM D 4491	0.05 s^{-1}	0.02 – 0.05 s^{-1}
Tamaño de Abertura Aparente (AOS)	ASTM D 4751	0.43 mm	0.30 – 0.60 mm
Estabilidad Ultravioleta (esfuerzo retenido)	ASTM D 4355	50 % después de 500 h	≥ 70 % después de 500 h

Tabla 44. Propiedades recomendadas del geotextil a utilizar. Fuente: Proveedores, 2025

7.8. Características Geométricas de la Losa

Respecto al espesor definido anteriormente, se define la longitud máxima de la losa y se recomienda que la relación largo/ancho de la losa sea máximo 1,2 veces.

Nota: el ancho de la losa deberá ser verificado en campo con las condiciones reales del tramo vial y su largo no deberá superar las dimensiones anteriormente establecidas, las modificaciones realizadas en cuanto a geometría deberán ser consultadas previamente con el especialista. Así mismo, previo a la instalación del concreto, se resalta que la modulación con los detalles constructivos particulares, se entregaran durante la ejecución del segmento vial. Lo anterior previo a la instalación del concreto para validación y aprobación de la interventoría.

7.9. Modulación ante la Presencia de Estructuras Hidráulicas

Ante la presencia de estructuras hidráulicas se pueden presentar los siguientes casos:

a) Si la junta de expansión no coincide con la junta longitudinal, se debe remodular para que la junta transversal coincida con el eje del pozo.

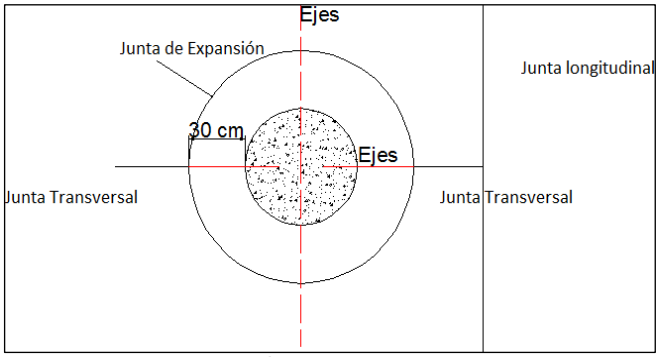


Ilustración 53. Junta en pozos

b) Si la junta de expansión coincide con la junta longitudinal, se debe modular las losas para que la junta transversal coincida con el eje del pozo

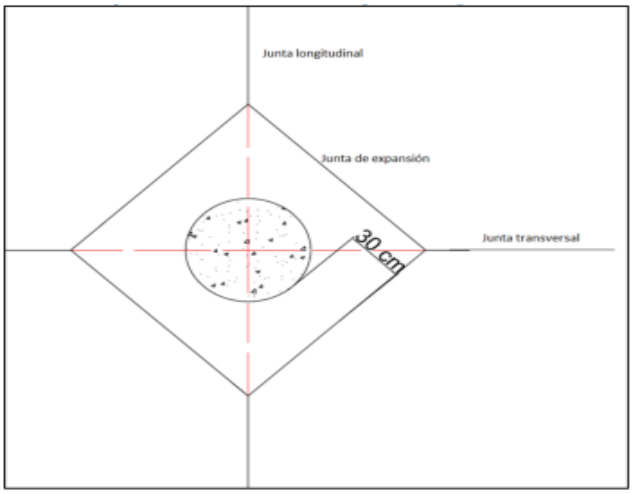


Ilustración 54. Ilustración SEQ Ilustración * ARABIC 19. Junta en Pozos

c) Si hay la presencia de sumideros se debe garantizar que la junta transversal coincida con el eje de este:

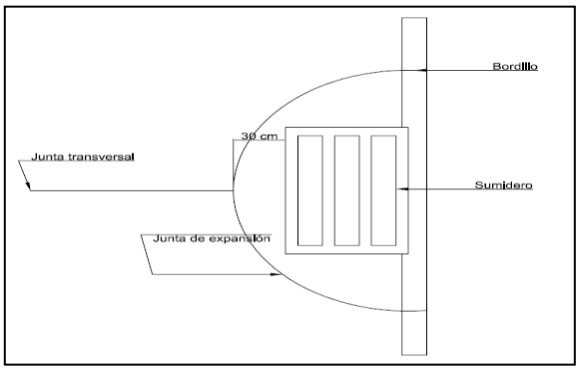


Ilustración 55. Junta en Sumideros

Las losas donde se presentan las estructuras hidráulicas deberán ser reforzadas. El acero de refuerzo de las losas debe estar constituido por barras corrugadas con límite de fluencia (fy) de 60.000 psi. El diámetro de las barras debe ser de ½" con una separación de 25 cm ubicada al tercio superior de la losa. Esta recomendación también aplica para las losas irregulares.

7.10. Características de las Barras de Transferencia y Amarre

Respecto a las características de las barras de transferencia y de amarre, se definen las siguientes características:

El acero de transferencia debe estar constituido por barras corrugadas con límite de fluencia (fy) de acero de amarre debe estar constituido por barras corrugadas con límite de fluencia (fy) de 60.000 psi.

CARACTERÍSTICAS	E= 0.18 m
Tipo	Lisa
Diámetro comercial de las barras (in)	7/8”
Profundidad de las barras (cm)	9
Separación de las barras (cm)	30
Largo de las barras (cm)	35

Tabla 45. Características de las barras de transferencia. Fuente: Adaptado de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.

El acero de amarre debe estar constituido por barras corrugadas con límite de fluencia (fy) de 60.000 psi.

CARACTERÍSTICAS	E= 0.18 m
Tipo	corrugada
Diámetro comercial de las barras (in)	1/2”
Profundidad de las barras (cm)	9
Separación de las barras (cm)	120
Largo de las barras (cm)	85

Tabla 46. Características de las barras de amarre. Fuente: Adaptado de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.

7.11. Juntas de Transferencia

Las juntas deben tener las siguientes características:

CARACTERÍSTICAS	E= 0.18 m
Espaciamiento entre juntas (m)	Ver tabla 29 columnas de ancho normal y ancho máximo.
Profundidad de corte (cm)	6,67
Profundidad del material de sellado (cm)	1,33
Ancho de corte para la junta (cm)	0,67

Tabla 47. Características de las juntas. Fuente: Adaptado de Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2002.

El sello de juntas deberá cumplir con lo consignado en la especificación técnica 800-18 de las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá D.C. (2018).

7.12. Juntas de Expansión

Estas juntas se construyen para aislar estructuras fijas como pozos y sumideros. También deben utilizarse cuando se presenten cambios en la dirección del pavimento y en rampas. En todos los cárcamos y sumideros debe construirse un bordillo.

Cuando se construyen en rampas se omiten los pasadores y se aumenta el espesor de la losa para absorber los esfuerzos de borde no transferidos, a continuación, se presentan esquemas de estas juntas:

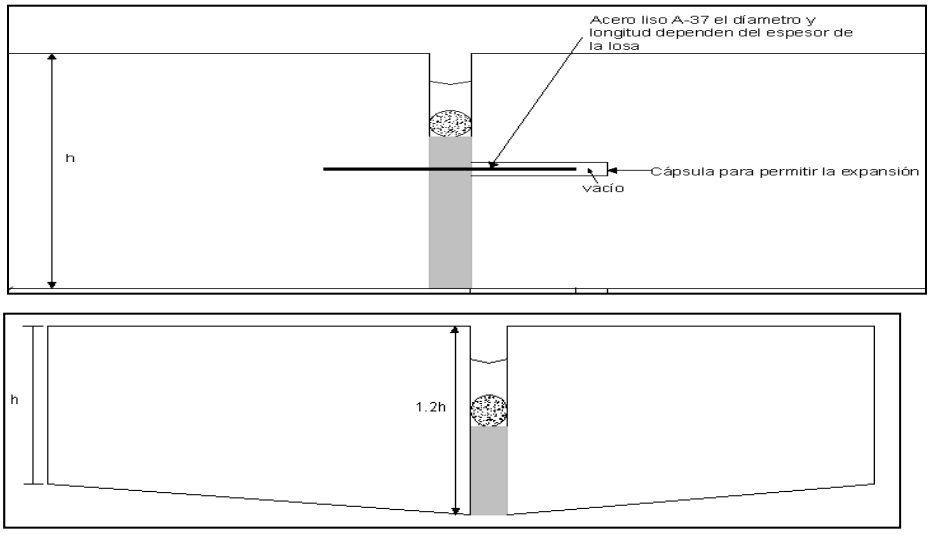


Ilustración56. Detalle Junta de expansión

7.13. Sellado de Juntas y ventana de corte

En el diseño y construcción de pavimentos rígidos, la correcta ejecución de las juntas de contracción es fundamental para controlar las fisuras no deseadas producto de los esfuerzos térmicos y de retracción del concreto. Uno de los aspectos más críticos en este proceso es la determinación adecuada de la ventana de corte, entendida como el intervalo

de tiempo óptimo posterior al vaciado del concreto en el cual deben realizarse los cortes para formar las juntas.

Esta ventana de corte se sitúa en un punto de equilibrio entre dos riesgos principales: si los cortes se realizan de forma prematura, existe el peligro de que el concreto aún no haya alcanzado la resistencia necesaria para evitar el desportillamiento o el arrastre del material durante el corte; por otro lado, si se realizan de manera tardía, se incrementa significativamente la probabilidad de que el concreto fisure de forma aleatoria antes de que la junta pueda inducir la grieta controlada.

Generalmente, la ventana de corte comienza cuando el concreto ha alcanzado una resistencia mínima a la tracción indirecta, lo cual ocurre entre 4 y 12 horas después del vaciado, dependiendo de factores como el tipo de cemento, la temperatura ambiental, el contenido de humedad, el uso de aditivos y las características del equipo de corte. Es recomendable realizar una verificación in situ mediante ensayos no destructivos o pruebas de dureza superficial, además de la observación directa del comportamiento del concreto durante las primeras horas de fraguado.

Existen dos tipos principales de corte: el corte temprano (early-entry), realizado con equipos especiales que permiten cortar incluso antes de las 4 horas; y el corte convencional, que se efectúa cuando el concreto ha adquirido mayor resistencia. En ambos casos, es imprescindible respetar la profundidad mínima de corte, que debe ser de al menos un cuarto del espesor total de la losa, y mantener una alineación precisa conforme a la geometría del diseño estructural del pavimento.

Para el sellado de juntas 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 ser cortada en el momento oportuno para evitar el agrietamiento de la losa, la pérdida de

agregados en la junta, o el desportillamiento. El corte se iniciará tan pronto como el concreto haya desarrollado la suficiente resistencia para soportar los desmoronamientos en los bordes de la junta, generalmente esto sucede de 6 a 8 horas después de colocado el concreto. El corte adicional para formar el depósito de la junta deberá efectuarse cuando menos 72 horas después de la construcción.

- La superficie del sello debe quedar entre 3 y 6 mm por debajo de la superficie de la losa para evitar el desprendimiento del material de sello.
- La cavidad debajo de la junta siempre debe permanecer limpia y libre de cualquier tipo de material.

En Colombia, el material para el sello de juntas en pavimentos rígidos debe cumplir con las especificaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) o el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano), dependiendo del tipo de proyecto (nacional o urbano). Los sellos de juntas se utilizan para evitar la infiltración de agua, ingreso de materiales incomprensibles y proteger la integridad de la losa de concreto. Se recomienda el uso de sellos de poliuretano bicomponente o silicona de bajo módulo, ya que ofrecen mejor desempeño a largo plazo, especialmente en condiciones climáticas variables y con tránsito pesado. Aunque su costo inicial es mayor, compensan con menor mantenimiento y mayor durabilidad

8. RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCIÓN

Se entrega en formato DWG en el anexo 8, los detalles constructivos que irán dentro de la modulación particular de cada segmento vial, estos son:

- Detalle de espesores y capas granulares, para casos sin mejoramiento y con mejoramiento.
- Detalle de modulación de losas para la zona de intervención.
- Disposición de refuerzo de losas irregulares.
- Detalle de ubicación de barras de transferencia lisas.

- Detalle constructivo de barras de amarre corrugadas.
- Detalle de corte inicial de juntas de juntas y corte final con instalación de sellante.
- Detalle de juntas de expansión contra estructuras existentes.
- Detalle de construcción de canastillas para soporte de barras de transferencia lisas.
- Detalle de empalme pavimento rígido. Flexible (pata de elefante)

Antes de la conformación de la capa de mejoramiento, se debe retirar el material de desecho de construcción y/o materia orgánica existente en la superficie que pueda generar contaminación

En caso de encontrarse fallos puntuales en la subrasante o la presencia de limos/arcillas con alto contenido orgánico (comúnmente color negro y/o con presencia de raíces), se deberá reemplazar el material por un espesor mínimo de 30 cm en material de rajón.

Además en casos donde se encuentren fallos y se necesite realizar el reemplazo con material de rajón se podrá utilizar del producto de reciclaje de la demolición , relleno granular y las placas de concreto existente; siempre y cuando estos materiales a instalar, cumplan con las especificaciones de las sección 413-18, lo anterior con el fin de dar cumplimiento a la Resolución 1115 de 2012, por medio de la cual se adoptan los lineamientos técnico – ambientales, para las actividades de aprovechamiento, y tratamiento de los residuos de construcción, y demolición en el distrito capital.

Para la selección de la estructura más adecuada para la intervención, el área técnica del contratista de obra en conjunto con la interventoría deberá evaluar presupuestalmente las alternativas anteriormente presentadas y elegir aquella que se ajuste a las necesidades del proyecto.

8.1. Equipos para los materiales granulares

Para la instalación de materiales granulares, ya sean no tratadas, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Transporte de los materiales: los agregados pétreos se deben transportar en volquetas de platón liso y estanco, debidamente acondicionadas para tal fin. Las volquetas deben estar siempre provistas de una lona o cobertor adecuado, debidamente asegurado, tanto para proteger los materiales que transporta, como para prevenir derrames y emisiones contaminantes.
- Extensión y conformación: el equipo para la extensión, mezcla y homogeneización de los agregados debe estar conformado por motoniveladoras, terminadoras, u otros elementos que no produzcan segregación y que resulten satisfactorios para el Interventor.
- Compactación: se pueden utilizar compactadores de rodillos metálicos, estáticos o vibratorios, de neumáticos o mixtos. Como mínimo, el Contratista de Obra debe poner a disposición de los trabajos un (1) un compactador de rodillo liso vibratorio y uno (1) de neumáticos. Todos los compactadores deben ser autopropulsados y estar dotados de inversores de marcha suaves. Los compactadores de rodillos metálicos no deben presentar surcos ni irregularidades. Los compactadores vibratorios deben disponer de dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, siendo aconsejable que el dispositivo sea automático. Los de neumáticos deben tener ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslapo de las huellas delanteras y traseras. Las presiones de contacto, estáticas o dinámicas, de los diversos compactadores, deben ser las necesarias para conseguir la densidad adecuada y homogénea de la capa en todo su espesor.
- Actividades accesorias: el equipo accesorio debe estar constituido por los equipos requeridos para realizar todas las operaciones de cargue que necesite la ejecución de esta partida de trabajo, así como un carro tanque irrigador y elementos para limpieza, preferiblemente barredora o sopladora mecánica, siempre que las autoridades ambientales lo permitan. Además, se requieren herramientas menores para efectuar distribuciones y correcciones manuales localizadas durante la extensión del material granular.

Para la instalación de materiales granulares mejorados con cemento hidráulico y aditivo químico se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Transporte: los agregados pétreos se deben transportar en volquetas de platón liso y estanco, debidamente acondicionadas para tal fin. Las volquetas deben estar siempre provistas de una lona o cobertor adecuado, debidamente asegurado, tanto para proteger los materiales que transporta, como para prevenir derrames y emisiones contaminantes.
- Producción en sitio: se permite la utilización de motoniveladoras o cualquier otro equipo que permita elaborar la mezcla en sitio, la mezcla debe ser homogénea en características.
- Extensión y conformación: se debe permitir el uso de motoniveladoras para extensión y conformación de la mezcla, garantizando que no se produzca segregación y que resulten satisfactorios para el Interventor.
- Compactación: se deben utilizar compactadores de rodillos metálicos vibratorios, dotados de inversores de marcha suaves. Los compactadores de rodillos metálicos no deben presentar surcos ni irregularidades. Los compactadores vibratorios deben disponer de dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, siendo aconsejable que el dispositivo sea automático. Los de neumáticos deben tener ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslapo de las huellas delanteras y traseras.
- Actividades accesorias: el equipo accesorio debe estar constituido por los equipos requeridos para realizar todas las operaciones de cargue que necesite la ejecución de esta partida de trabajo, así como un carro tanque irrigador y elementos para limpieza, preferiblemente barredora o sopladora mecánica, siempre que las autoridades ambientales lo permitan. Además, se requieren herramientas menores para efectuar distribuciones y correcciones manuales localizadas durante la extensión del material granular.

Para la instalación de materiales granulares mejoradas con cementos asfálticos se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Transporte: la mezcla de granular mejorado con cemento asfáltico elaborada en planta se debe transportar en volquetas de platón liso y estanco, debidamente acondicionadas para tal fin. Sobre la superficie interna del platón se debe aplicar un producto antiadherente, con el fin de evitar la adherencia de la mezcla asfáltica a éste, estar libre de fosfatos, de pH neutro, no tóxico, no inflamable, y preferiblemente biodegradable, cuya composición y cantidad debe ser aprobadas por el Interventor. Para los casos en los que no se emplee un equipo para la transferencia de la mezcla conforme a lo definido en el numeral 500.4.6.2, la forma y altura del platón deben ser tales que, durante el vertido de la mezcla a la tolva de la pavimentadora, el platón sólo, la toque a través de los rodillos previstos para ello. Las volquetas deben estar siempre provistas de un cobertor adecuado, debidamente asegurado, tanto para proteger los materiales que transporta, como para prevenir derrames.
- Extensión y conformación: la extensión de la mezcla de granulas mejorado con cemento asfáltico se debe hacer con máquinas pavimentadoras autopropulsadas, adecuadas para extender y terminar la mezcla con un mínimo de pre-compactación, de acuerdo con los anchos y espesores especificados. La capacidad de la tolva, así como la potencia de la máquina, deben ser adecuadas para el tipo de trabajo a desarrollar. La pavimentadora debe estar equipada con un vibrador y un distribuidor de tornillo sinfín, de tipo reversible, capacitado para colocar la mezcla uniformemente por delante de los enrasadores; debe tener un equipo de dirección adecuado y velocidades para retroceder y avanzar. El equipo debe tener dispositivos automáticos de nivelación y un elemento calefactor para la ejecución de la junta longitudinal. Debe ser ajustable para lograr la sección transversal especificada del espesor de diseño u ordenada por el Interventor.

- Compactación: se deben utilizar compactadores de rodillos metálicos vibratorios, dotados de inversores de marcha suaves. Los compactadores de rodillos metálicos no deben presentar surcos ni irregularidades. Los compactadores vibratorios deben disponer de dispositivos para eliminar la vibración al invertir la marcha, siendo aconsejable que el dispositivo sea automático. Los de neumáticos deben tener ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslapo de las huellas delanteras y traseras.
- Actividades accesorias: el equipo accesorio debe estar constituido por los equipos requeridos para realizar todas las operaciones de cargue que necesite la ejecución de esta partida de trabajo, así como un carrotanque irrigador y elementos para limpieza, preferiblemente barredora o sopladora mecánica, siempre que las autoridades ambientales lo permitan. Además, se requieren herramientas menores para efectuar distribuciones y correcciones manuales localizadas durante la extensión del material granular.

8.2. Proceso constructivo general para materiales granulares

- Preparación de la superficie para el uso de material granular: la colocación de una capa de material granular sólo debe ser autorizada por el Interventor cuando la superficie sobre la cual debe asentarse tenga la calidad, densidad y las cotas y secciones indicadas en los documentos del proyecto o definidas por el Interventor, con las tolerancias establecidas. Además, debe estar concluida la construcción de los dispositivos necesarios para el drenaje y subdrenaje de la calzada, que requieran ser construidos previamente a la construcción de las capas granulares. No se debe extender ninguna capa de material granular mientras no haya sido realizada la nivelación y comprobación del grado de compactación de la capa precedente.
- Colocación y extensión para materiales granulares: la colocación y extensión de la mezcla se debe realizar tomando las precauciones necesarias para evitar segregaciones y contaminaciones. El espesor de la capa antes de compactar debe ser tal que, con la compactación, se obtenga el espesor previsto en los

documentos del proyecto, con las tolerancias establecidas en la especificación ET-500-18, teniendo en cuenta que, en ningún caso, se permite que se complemente el espesor en capas delgadas una vez iniciada la compactación. La humedad del material, durante el proceso de extensión, debe ser acorde a lo establecido en el diseño de la mezcla o la fórmula de trabajo. La cantidad de material extendido debe ser 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 debe colocar en varias capas, debiéndose procurar que el espesor de ellas sea aproximadamente igual, y nunca inferior a cien milímetros (100 mm).

- Compactación para materiales granulares: una vez que el material de la capa granular tenga la humedad apropiada, se debe conformar ajustándose razonablemente a los alineamientos y secciones típicas del proyecto, y se debe compactar con el equipo adecuado hasta alcanzar la densidad exigida. Si se considera necesario, se deben aplicar riegos de agua durante el proceso de compactación, para compensar las pérdidas por evaporación y cerrar la textura de la capa. La compactación se debe efectuar 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 debe hacer desde el borde inferior al superior. Los cambios de dirección de los equipos de compactación se deben realizar sobre el material ya compactado, y los cambios de sentido se deben efectuar con suavidad. Los elementos de compactación deben estar siempre limpios y, si fuera preciso, húmedos. Las zonas que, por su reducida extensión, su pendiente, o su proximidad a obras de arte, no permitan el empleo de los equipos de compactación aprobados, se deben compactar con los medios que resulten adecuados para el caso, de manera que la mezcla resulte homogénea y la densidad alcanzada no sea inferior a la exigida. La capa terminada debe presentar una superficie uniforme

y ajustarse a las rasantes y pendientes establecidas. La distancia entre el eje de proyecto y el borde de la capa no puede ser inferior a la señalada en los planos o la definida por el Interventor; se debe verificar, además, que la cota de cualquier punto de la capa conformada y compactada no varíe en más de diez milímetros (10 mm) de la proyectada.

8.3. Proceso constructivo general para mezclas asfálticas

- Preparación de la superficie existente: la instalación de riegos asfálticos y mezclas asfálticas no se debe realizar mientras no se haya validado que la superficie sobre la cual se va a colocar tenga la densidad apropiada y las cotas indicadas en los planos o definidas por el Interventor. Todas las irregularidades que excedan de las tolerancias establecidas en la especificación respectiva, deben ser corregidas de acuerdo con lo establecido en ella. Antes de aplicar cualquier mezcla asfáltica, se debe verificar que haya ocurrido el curado del riego asfáltico instalado previamente, sin que haya quedado restos de fluidificante, ni de agua en la superficie.
- Extensión de la mezcla: la mezcla se debe extender con la máquina pavimentadora, de modo que se cumplan los alineamientos, anchos y espesores señalados en los planos del proyecto o determinados en la obra por el Interventor. A menos que se expida una instrucción contraria, la extensión se debe realizar en franjas longitudinales, comenzado de los bordes de la calzada, en las zonas por pavimentar con sección bombeada, o en el lado inferior en las secciones peraltadas. La pavimentadora debe ser regulada, de manera que la superficie de la capa extendida resulte lisa y uniforme, sin arrastres ni segregaciones, y con un espesor tal que, luego de compactada, se ajuste a la rasante y sección transversal indicadas en los planos, con las tolerancias establecidas en las especificaciones. Por ningún motivo se debe permitir el empleo de máquinas pavimentadoras que dejen marcas o depresiones en la superficie u otros defectos permanentes en ella. No se debe permitir la segregación de materiales. La extensión de la mezcla

se debe realizar con la mayor continuidad posible, ajustando la velocidad de la pavimentadora conforme la disponibilidad de la mezcla que llega a obra, de manera que aquella sufra el menor número posible de detenciones. La colocación de la mezcla se debe realizar con la mayor continuidad posible, verificando que la pavimentadora deje la superficie a las cotas previstas con el objeto de no tener que corregir la capa extendida. Cuando existe intermitencia en el trabajo, y se está extendiendo mezclas calientes o tibias, se debe comprobar que la temperatura de la mezcla que quede sin extender en la tolva o bajo la pavimentadora no esté por debajo de la temperatura mínima en la descarga indicada en el informe del diseño de la mezcla; de lo contrario, se debe desechar la mezcla fría y ejecutar una junta transversal.

- Compactación: la compactación se debe realizar longitudinalmente de manera continua y sistemática. Debe empezar por los bordes y avanzar gradualmente hacia el centro, excepto en las curvas peraltadas en donde el cilindrado debe avanzar del borde inferior al superior, paralelamente al eje de la vía y traslapando a cada paso en la forma aprobada por el Interventor, hasta que la superficie total haya sido compactada. Si la extensión de la mezcla se ha realizado por franjas, al compactar una de ellas se debe ampliar la zona de compactación para que incluya al menos ciento cincuenta milímetros (150 mm) de la anterior. Los rodillos deben llevar su llanta motriz del lado cercano a la pavimentadora, excepto en los casos que autorice el Interventor, y sus cambios de dirección se deben hacer con suavidad sobre la mezcla ya compactada. Los elementos de compactación deben estar siempre limpios y, si fuera preciso, húmedos; no se permiten, sin embargo, excesos de agua. Independientemente del tipo de compactadores empleados, la compactación final se debe realizar con equipo de neumáticos para eliminar las huellas de los rodillos lisos y la motoniveladora. Las zonas que, por su reducida extensión, su pendiente, o su proximidad a obras de arte, no permitan el empleo de los equipos de compactación aprobados durante el tramo experimental, se deben compactar con los medios que resulten adecuados

para el caso, de manera que la mezcla resulte homogénea y la densidad alcanzada no sea inferior a la exigida.

- Juntas de trabajo: todas las juntas deben presentar la misma textura, densidad y acabado que el resto de la capa compactada. Las juntas entre pavimentos nuevos y viejos, o entre trabajos realizados en días sucesivos, deben cuidarse con el fin de asegurar su perfecta adherencia. A todas las superficies de contacto de franjas construidas con anterioridad, se les debe aplicar manualmente una capa uniforme y ligera de riego de liga antes de colocar la mezcla nueva, dejándolo curar suficientemente. El borde de la capa extendida con anterioridad debe ser cortado verticalmente con el objeto de dejar al descubierto una superficie plana y vertical en todo su espesor, la cual se debe pintar como se ha indicado en el párrafo anterior. A continuación, se debe extender contra ella la nueva mezcla, compactar, y dar terminado con elementos adecuados, antes de permitir el paso definitivo del equipo de compactación. En las capas que funcionen como rodadura, las juntas transversales se deben compactar transversalmente, disponiendo los elementos de apoyo adecuados para los equipos de compactación. Los bordes de las juntas longitudinales que sean irregulares, presenten huecos o estén deficientemente compactados, deben ser cortados para dejar al descubierto una superficie lisa vertical en todo el espesor de la capa. Donde el Interventor lo considere necesario, se debe añadir mezcla que, después de colocada y compactada con pisones, deben ser compactadas mecánicamente. Se debe procurar que las juntas de capas superpuestas guarden una separación mínima de cinco metros (5 m) en el caso de las transversales, y de ciento cincuenta milímetros (150 mm) en el caso de las longitudinales.

9. CONCLUSIONES

Del análisis comparativo efectuado entre las alternativas de pavimento flexible y pavimento rígido, se determina que, para las condiciones particulares del proyecto, la solución de

pavimento flexible resulta más conveniente y racional desde el punto de vista técnico–económico y operativo. Si bien el pavimento rígido presenta un buen desempeño a lo largo del tiempo, su mayor inversión inicial y las restricciones constructivas asociadas no resultan plenamente justificadas frente a una vía con tránsito predominantemente liviano y con necesidad de intervenciones futuras por redes o ajustes de urbanismo.

El pavimento flexible, diseñado conforme a la metodología AASHTO 93, la Norma de Diseño de Pavimentos del INVIAS (2013) y los lineamientos de la GU-IC-019 del IDU, permite adoptar una estructura escalable con periodo inicial de diseño de diez (10) años, ampliable mediante actividades de mantenimiento programado (bacheo localizado, sello, recapado), las cuales son de menor costo unitario y más fáciles de ejecutar sin afectar de manera significativa la operación de la vía. Esta característica de “mantenibilidad” es especialmente útil en entornos urbanos donde es frecuente la intervención de servicios públicos y donde la administración local no siempre dispone de presupuestos altos para rehabilitaciones mayores.

Adicionalmente, el pavimento flexible ofrece ventajas frente a la variabilidad del soporte observada en los apiques, particularmente por la presencia de arcillas de plasticidad media-alta dentro de la zona activa: al tratarse de una estructura más tolerante a pequeñas deformaciones y más sencilla de reforzar, el riesgo de fisuración refleja o de fallas localizadas puede manejarse con intervenciones superficiales, sin necesidad de demoler grandes paños como ocurre en pavimentos rígidos.

En línea con los principios de economía, eficiencia del gasto público y facilidad de conservación, se considera que el pavimento flexible proporciona una solución técnicamente adecuada, de menor costo inicial, compatible con los perfiles viales proyectados y con una operación más sencilla para la entidad durante su ciclo de vida. Por lo anterior, y una vez evaluadas las condiciones de tránsito, suelo de fundación y capacidad institucional para el mantenimiento, se propone técnicamente la adopción de una estructura de pavimento flexible, cuya conformación se detalla en el acápite siguiente.

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)	ESPECIFICACIÓN IDU	VALOR DE MODULO
(MD-19-ET-620-18 (MD-12) y MCCH25)	12	620-18	345.000 PSI
Base Granular (BG-A) estabilizada con 5% de cemento y aditivo	20	520-18	37.000 PSI
Geomalla multiaxial, resistencia a fluencia ³ 300 kN/m	-	242-18	
Subbase Granular Tipo A (SBG-A) o Subbase Granular Reciclada (AR-SBG50) (AR-SBG)o Subbase Granular reciclada (AR-SBG) con Geocelda h=15cm	20	412-18	6307.3 PSI
Geotextil tejido, método tira ancha >90 kN/m	-	411-18	
Barrenos de cal en tresbolillo cada 1m perforaciones de 1 m de profundidad	-	231-18	
Subrasante			1601.76 PSI

Tabla 48. Alternativa recomendada Fuente Propia.

10. RECOMENDACIONES DE INTERVENCIÓN Y PROCESO CONSTRUCTIVO

- Para el refuerzo de la subrasante se recomienda un geotextil tejido biaxial fabricado en poliéster por inserción de trama, lo anterior con la finalidad de proceder con la labor de separación y filtro en la base de apoyo del sistema. Este geotextil deberá ser instalado entre la capa de mejoramiento y las capas granulares superiores.

- En caso de presentarse fallos puntuales en la subrasante que afecten un máximo del 30% del área total de un segmento vial, será necesario reemplazar el material afectado por un espesor mínimo de 30 cm de rajón. Este material ha sido recomendado debido a su capacidad para mejorar la estabilidad de la subrasante, como se explicó en el presente documento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la implementación de esta medida puede presentar ciertas dificultades técnicas, como la

disponibilidad de material adecuado, la logística para su colocación, o los costos asociados al proceso de reemplazo.

- En casos donde se encuentren fallos y se necesite realizar el reemplazo con material de rajón se podrá utilizar del producto de reciclaje de la demolición, relleno granular y las placas de concreto existente; siempre y cuando estos materiales a instalar, cumplan con las especificaciones de las sección 413-18, lo anterior con el fin de dar cumplimiento a la Resolución 1115 de 2012, por medio de la cual se adoptan los lineamientos técnico – ambientales, para las actividades de aprovechamiento, y tratamiento de los residuos de construcción, y demolición en el distrito capital.

- De acuerdo al decreto 442 de 2015, donde se indica que su artículo 10 APROVECHAMIENTO DE LLANTAS USADAS EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE EN EL DISTRITO CAPITAL. Modificado por el art. 4°, Decreto Distrital 265 de 2016. Desde el 1 de julio de 2016, toda obra de infraestructura de transporte en el Distrito Capital que se ejecute y adelante en procesos constructivos con asfalto, deberá prever el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas usadas en las proporciones técnicas que para el efecto exija el Instituto de Desarrollo Urbano, en la totalidad de metro cuadrado de la mezcla asfáltica usada para la obra en un porcentaje no menor al 25% de la totalidad del volumen de la mezcla asfáltica usada en vías vehiculares (Troncales de tráfico mixto, Malla Vial Arterial No Troncal, Malla Vial Intermedia y Malla Vial Local). Razón por la cual, en el caso de usar mezclas asfálticas, las mismas podrán ser reemplazadas por mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado del tipo MCCh25, con el fin de dar cumplimiento al decreto señalado.

- Para la construcción de las obras se recomienda la implementación de sistemas de drenajes y filtros en los sectores donde se requieran de acuerdo con las consideraciones que sean presentadas por el especialista hidráulico. Especialmente se recomienda que estos elementos sean construidos en zonas adyacentes a parques, zonas verdes, o áreas abiertas donde pueda haber infiltración de agua superficial.

- Debe verificarse y diagnosticar la condición actual de las estructuras de drenaje y/o demás estructuras de servicios públicos de la vía, en caso de requerirse, se realizará la reposición de cunetas u otras obras de drenaje. En el comportamiento de la estructura de pavimento, es necesario tener en cuenta la notable influencia de ciertos factores en las propiedades mecánicas de los materiales. Elementos como la vegetación se pueden encontrar a los costados del tramo vial en estudio, los cuales pueden repercutir negativamente en el comportamiento geotécnico de la estructura y el adecuado funcionamiento de los sistemas de drenaje por lo que se recomienda su limpieza periódica.

- En cuanto al uso de la mezcla modificada con Grano de caucho reciclado, en los segmentos viales que se requieran para el cumplimiento de la normativa ambiental, se recomienda utilizarla como la primera capa de la carpeta asfáltica de la siguiente forma:

MATERIAL	ESPESOR REQUERIDO (cm)
MD-19	5
MD-GCR	7

Tabla 49. Espesor de GCR

- La dosificación del material corresponde al siguiente cálculo, basado en datos históricos de la densidad de los materiales a estabilizar:

  - Cálculo de materiales por m^3 de sub-base

Densidad del material granular:

Densidad del material granular = 2052 kg/m3

Cemento (5% en peso):

Cemento = 0.05×2052 kg = 102.6 kg/m3 = 100 kg/m3

Aditivo liquido Iónico 1 litro por m^3 suelto

- Resumen de materiales por m^3 suelto

Material granular: 2052.00 kg

Cemento: 100 kg

Aditivo liquido Ionico: 1 lt

ANEXO 1. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

ANEXO 2. DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS FLEXIBLE

ANEXO 3. DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTOS RÍGIDO

ANEXO 4. VERIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES POR MÉTODO RACIONAL

ANEXO 5. REGISTRO FOTOGRÁFICO APIQUES

ANEXO 6. CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS DE LABORATORIO

ANEXO 7. DETALLES CONSTRUCTIVOS DWG- PDF

ANEXO 8. MEJORAMIENTO DE LA SUBRASANTE

ANEXO 9. DOCUMENTO TÉCNICO DEL ADITIVO LIQUIDO IÓNICO PARA BASES Y SUBBASES ESTABILIZADAS CON CEMENTO

ANEXO 10. VERIFICACIÓN PAVIMENTO RIGIDO POR PCA