



TRAMO DE PRUEBA CON ESTRUCTURA CONVENCIONAL Y LA IMPLEMENTACIÓN DE GEOCELDAS EN LA CL 128A ENTRE TV 60 Y AK 72 BOGOTÁ.

**ANGIE CATALINA SUSPES PÁEZ
JEFERSON CARPIO PATIÑO
HECTOR GIOVANNY MALDONADO TINJACA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTA D.C.**

2018

**TRAMO DE PRUEBA CON ESTRUCTURA CONVENCIONAL Y LA
IMPLEMENTACIÓN DE GEOCELDAS EN LA CL 128A ENTRE TV 60 Y AK 72 BOGOTÁ.**

**ANGIE CATALINA SUSPES PÁEZ
JEFERSON CARPIO PATIÑO
HECTOR GIOVANNY MALDONADO TINJACA**

**DOCENTE
JUAN GABRIEL BASTIDAS**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
BOGOTA D.C.
2018**



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

TABLA DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES	11
1.1	Planteamiento del problema.	11
1.2	Justificación	12
1.3	Objetivos	14
2	MARCO REFERENCIAL	15
2.1	Marco Legal	15
2.1.1	Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial	15
2.1.2	Diseños e intervención.....	18
2.1.3	Entorno Ambiental, Social y Seguridad de Trabajo	21
2.1.4	Plan de Manejo de Transito	22
2.2	Marco Teórico	23
2.2.1	Conference of the Transportation Association of Canada.	23
2.2.2	Geoceldas SA tecnología de confinamiento celular	23
2.2.3	Estudio del comportamiento de un material de subrasante con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga.....	25
2.2.4	Guía de uso de geosintéticos. Bogotá: IDU.....	26
2.3	Marco Conceptual	28
2.3.1	Que es una rehabilitación	28
2.3.2	Generalidades de los Geosintéticos.....	28
2.3.3	Metodología de diseño AASTHO y SHELL	30
2.3.4	Ensayos y laboratorios	32
2.3.5	Retrocálculo directo.....	35
2.4	Estado del Arte	40
3	DESCRIPCIÓN DE LUGAR Y TIEMPO	45
4	METODOLOGÍA	47
4.1.1	Estructuración Técnica.....	47
4.1.2	Intervención o Construcción	49
4.1.3	Cierre y entrega.....	50

5	ALCANCES Y LIMITACIONES	52
6	RESULTADOS OBTENIDOS	53
6.1	Definición de tramo.....	53
6.2	Retrocálculo de los módulos de las capas estructurares.....	56
6.3	Análisis económico y rendimiento	64
7	CONCLUSIONES	69
8	RECOMENDACIONES.....	71
9	BIBLIOGRAFÍA.....	72
10	ANEXOS	75
10.1	Registro fotográfico de la intervención realizada, antes, durante, después y toma de los ensayos.....	75
10.2	Resultados obtenidos por el software EVERCACL	84

LISTA DE GRAFICA

Grafica 1	Índice de Curvatura Superficial	62
Grafica 2	Índice de Daño en la Base	63
Grafica 3	Numero Estructural Efectivo	64
Grafica 4	Costo total por tramo	65
Grafica 5	Costos por tipo de insumos para cada tramo	66
Grafica 6	Rendimientos por tramo	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Metas Establecidas para la UAERMV y Proyectos de Inversión.....	16
Tabla 2 Programas y Estrategias para el Cumplimiento de la Meta.....	17
Tabla 3 Listado de Ensayos, Normas y Especificaciones.....	18
Tabla 4 Especificaciones de las Actividades Ejecutadas en la Intervención.....	20
Tabla 5 Información del Segmento Vial.....	45
Tabla 6 Plan experimental de ensayos tramo de prueba según el sector.....	48
Tabla 7 Alcances y Limitaciones del Proyecto.....	52
Tabla 8 Resumen caracterización materiales y subrasante existente.....	56
Tabla 9 Corrección de las deflexiones por carga y temperatura.....	57
Tabla 10 Deflexiones promedio.....	59
Tabla 11 Espesores de las estructuras modelizadas.....	59
Tabla 12 Módulos Obtenidos por EVERCACL.....	60
Tabla 13 Comparación del módulo resiliente de la subrasante.....	61
Tabla 14 Parámetros del cuenco de deflexión.....	61
Tabla 15 Costo total por tramo intervenido.....	65
Tabla 16 Costos por tipo de insumos para cada tramo.....	66
Tabla 17 Detalle del rendimiento por tramo.....	67
Tabla 18 Resumen de los rendimientos por tramo.....	68

LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1 Localización del Segmento a Intervenir	45
Ilustración 2 Localización del Segmento a Intervenir	46
Ilustración 3 Estructuras implementadas	55
Ilustración 4 Fotografías del antes de la intervención	75
Ilustración 5 Fotografías de la toma de ensayos.....	76
Ilustración 6 Fotografías inicio de excavación y fresado acopiado.....	76
Ilustración 7 Fotografías instalación de geotextil fibrilado	77
Ilustración 8 Fotografías instalación de geoceldas.....	77
Ilustración 9 Fotografías llenado de las geoceldas con subbase granular y con fresado.....	78
Ilustración 10 Fotografías ensayos de placa a los tramos de geoceldas con subbase granular y con fresado.....	78
Ilustración 11 Fotografías instalación de carpeta asfáltica del tramo de las geoceldas con subbase granular y con fresado.....	79
Ilustración 12 Fotografías instalación de Geodrén, adecuación de sumideros reglo de rampas de acceso.....	79
Ilustración 13 Fotografías inicio del tramo con piedra rajón.....	80
Ilustración 14 Fotografías inflación de base en los tramos convencionales, liberación de la capa.....	80
Ilustración 15 Fotografías imprimación de los tramos convencionales.....	80

Ilustración 16 Fotografías rampas de acceso.	80
Ilustración 17 Fotografías instalación de carpeta asfáltica.	81
Ilustración 18 Fotografías toma de datos del ensayo FWD.	82
Ilustración 19 Fotografías de terminado del segmento vial.	83

INTRODUCCIÓN

La Unidad de Mantenimiento vial de Bogotá, dentro de su gestión de intervención para el mantenimiento de la malla vial local, está buscando soluciones a problemas técnicos presentados durante las intervenciones. Los tipos de intervención para el mantenimiento de dicha malla vial están sujetos a la patología encontrada en cada segmento vial evaluado, proponiendo como solución sello de fisuras, parcheo, bacheos, cambios de carpeta y rehabilitaciones según sea el caso; para este último tipo de intervención, se proponen diseños de estructura de pavimento con especificaciones y dimensiones basados en la normatividad vigente por el distrito.

Entre las limitantes que se presentan en la intervención están: se debe respetar los niveles de rasante acordes a los empalmes de los segmentos viales perimetrales, respetar niveles de obras de arte existentes como sumideros, pozos de EAAB y las salidas de aguas lluvias de construcciones y viviendas existentes.

Lo anterior condiciona a mantener las cotas de la rasante existente, según lo encontrado en algunos segmentos viales se ha evidenciado que existen algunas redes de aguas lluvias, negras, gas y acometidas que quedan ubicadas dentro de los espesores de base y subbase del nuevo diseño, obligándonos a buscar soluciones que nos permitan diseñar menores espesores de estructura que cumplan las exigencias actuales del diseño y con la normativa.

Adicionalmente al realizar los mantenimientos viales se ha encontrado en varios sectores de la ciudad un material remanente conocido como Macadam el cual fue un material granular utilizado en el pasado para conformar la base estructural de las vías. Este material actualmente no cuenta con una caracterización técnica que cumpla los parámetros exigidos por las entidades de control lo

que ha generado que se retire dicha capa de remanente aumentando los volúmenes de excavación y sea reemplazado por otros materiales caracterizados y que cumplen con las especificaciones.

La entidad dentro del alcance a la solución de optimizar los espesores, por la situación planteada anteriormente desea vincular la utilización de Geoceldas con el fin de mejorar las estructuras de pavimento y disminuir el volumen de RCD generados.

1 GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del problema.

Dado que la UAERMV tiene como objetivo implementar nuevas tecnologías para la entidad, esto en pro de las intervenciones y de los procesos que cada una que estas implican, en este caso se pretende realizar un estudio y seguimiento juicioso a las rehabilitación ya que son el tipo de intervención que conlleva más insumos, tiempo, y disposición de RCD; lo cual se ha convertido en un punto muy importante ya que el contrato de disposición de RCD debe ser más grandes que los contratos anteriormente realizados por la Unidad, esto se debe a que según la territorialización se deben ejecutar 8,5 kilómetros carril lo que equivale a 60 segmentos viales anuales.

La cantidad de RCD generados se deben a que los diseños actualmente implican excavaciones hasta de 80 cm de profundidad, esta condición también conlleva a tener inconvenientes con las redes de servicios públicos los cuales se encuentran dentro del área de excavación, además de las condiciones climáticas que se presentan durante esta actividad ya que también influyen en el rendimiento de esta, normalmente influye negativamente.

1.2 Justificación

El mantenimiento de vías existentes en la ciudad de Bogotá es un reto para la administración distrital, dado que está inmersa y depende de un número de variables y una coordinación interdisciplinaria entre varias entidades gubernamentales, empresas prestadoras de servicios públicos y limitaciones de orden técnico existentes en las vías locales, para el cumplimiento de dicha meta el distrito necesita que el mantenimiento y rehabilitación de las vías sea: afectivo, para lograr cubrir la malla vial de Bogotá,

Actualmente la unidad de mantenimiento vial realiza intervenciones de rehabilitación en los segmentos viales en los que por patología se requiere, en estos casos se realizan los diseños de acuerdo a lo especificado, lo que lleva al reemplazo del material remante existente hasta encontrar una profundidad donde la subrasante soporte los esfuerzos inducidos. Gran porcentaje de las intervenciones de este tipo que ha realizado la Unidad de Mantenimiento vial en la ciudad de Bogotá, el paquete estructural se encuentra entre 50cm y 80cm con materiales convencionales (bases, subbases granulares y mejoramiento con piedra rajón).

Lo que se busca con este proyecto es optimizar las intervenciones (tiempo, insumos y recursos) y acortar el problema con las redes de servicios públicos sin interferir en su adecuado funcionamiento, manejo de aguas lluvias y nivel freático, ya que este inconveniente ha tenido como consecuencias atrasos de las obras por reparaciones de redes y cambios en los diseños iniciales. Todo lo anterior reduciendo la profundidad del paquete estructural, vinculando la utilización de Geoceldas con el fin de mejorar la distribución de esfuerzos en la subrasante, como alternativa de solución de los problemas planteados anteriormente.

Con el apoyo del área de nuevas tecnologías de la Unidad de Mantenimiento Vial se pretende realizar no solo en tramo de prueba si no un seguimiento de su comportamiento, una comparación en cuanto a tiempo, costos e imprevistos que se presenten durante la intervención; esto con el fin de soportar la factibilidad de la utilización de Geoceldas en las rehabilitaciones futuras a realizar por la entidad.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Implementar un tramo de prueba para rehabilitar la estructura de pavimento del segmento vial y comparar el método convencional versus la implementación de Geoceldas.

Objetivos Específicos

- Determinar los tramos a intervenir y realizar los ensayos PCD para caracterizar la subrasante.
- Realizar el ensayo FWD para obtener los módulos de las capas de la estructura de pavimento implementadas.
- Determinar el comportamiento de la aplicación de Geoceldas, en cuanto al costo y tiempo de ejecución.

2 MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco Legal

2.1.1 Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial

El Acuerdo 645 de 2016, por el cual se adopta el Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas y Plan Plurianual de Inversiones de Bogotá D.C. para el periodo 2016 - 2020 "BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS" (El Concejo de Bogotá D. , 2016), el cual constituye el referente de las acciones y políticas de la Administración Distrital, en la PARTE III, "PROGRAMA DE EJECUCIÓN DE OBRAS DEL POT", de acuerdo con lo mencionado, la Unidad Administrativa Especial (UAERMV) para el cumplimiento de las metas establecidas en el Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas y Plan Plurianual de Inversiones de Bogotá D.C. para el periodo 2016 - 2020, estableció cuatro (4) proyectos de inversión, integrados a los Objetivos Institucionales de acuerdo a la Tabla 1.

La Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación Y Mantenimiento Vial UAERMV, es una entidad descentralizada del orden Distrital adscrita a la Secretaría de Movilidad, creada por Acuerdo 257 de 2006, organizada como unidad administrativa especial, de carácter técnico, que tiene por objeto programar y ejecutar las obras necesarias para garantizar rehabilitación y mantenimiento de la malla vial local, así como la atención inmediata de todo el subsistema de malla vial cuando se presenten situaciones imprevistas que dificulten movilidad en el Distrito Capital (El Concejo de Bogotá D. C., 2006).

Estas obras y acciones consisten en parcheo con mezcla asfáltica, bacheo con material granular y mezcla asfáltica, Producción e instalación de Rap estabilizado, instalación de capas de subbase y base granular, mejoramientos de subrasante con piedra rajón y rellenos seleccionados, producción

de mezclas asfálticas, mantenimiento de pavimentos flexibles con mezclas asfálticas, mantenimiento de pavimentos rígidos con concretos hidráulicos, construcción de obras de drenaje y obras de estabilización de taludes como muros de contención. Cada uno de los segmentos priorizados e intervenidos, deben estar dentro de los programas y a su vez dentro de una de las estrategias de la entidad, para el cumplimiento de la meta física, presentados en la Tabla 2.

Tabla 1 Metas Establecidas para la UAERMV y Proyectos de Inversión

META UNIDAD	OBJETIVOS INSTITUCIONALES	PROYECTOS DE INVERSIÓN	PRESUPUESTO INICIAL
Movilidad 1,083 km-carril de conservación y rehabilitación de la infraestructura vial local (por donde no circulan rutas de Transmilenio zonal)	Mejorar las condiciones de movilidad y seguridad vial de la malla vial local a través de los programas de mantenimiento y/o rehabilitación de la Entidad, así como la atención de situaciones imprevistas que impidan la movilidad en el Distrito Capital	0408 Recuperación, rehabilitación y mantenimiento de la malla vial	\$100.755.481.000
Mantener el 80% de satisfacción con los servicios prestados por las entidades del Sector Movilidad	Mejorar la gestión y que-hacer institucional de la Entidad a través de la implementación de acciones que promuevan la transparencia, el fortalecimiento del servicio al ciudadano y partes interesadas, así como la eficiencia de los procesos y procedimientos.	1171 Transparencia, gestión pública y atención a partes interesadas en la UAERMV	\$ 10.650.000.000
Fortalecer y modernizar en un 80% el recurso tecnológico y de sistemas de información de las entidades del Sector Movilidad	Integrar la gestión de la información normalizada, asertiva y oportuna, acorde con el plan estratégico y visión de entidad con el propósito de generar confianza para la toma de decisiones y soporte para las diferentes políticas del Distrito.	1117 Fortalecimiento y adecuación de la Plataforma tecnológica de la UAERMV	\$ 4.374.176.000
Fortalecer y modernizar en un 80% el recurso tecnológico y de sistemas de información de las entidades del Sector Movilidad	Adecuar la infraestructura física y organizacional de la UAERMV, con el fin que esta responda a la capacidad instalada con que cuenta la Entidad para el cumplimiento de su misionalidad.	1181 Modernización Institucional	\$ 9.558.000.000

Fuente: Unidad Administrativa y Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial

Tabla 2 Programas y Estrategias para el Cumplimiento de la Meta

ESTRATEGIA	PROGRAMA	TIPO DE INTERVENCIÓN
Barrios sin Infraestructura de Servicios Públicos	Misionalidad	Rehabilitaciones
Infraestructura y Gestión de Tránsito	Misionalidad	Cambio de Carpeta, Parcheo, Bacheo y Sello de fisuras
	Salvando Vidas	
Situaciones Imprevistas y Apoyo Interinstitucional	Acuerdo 257 Literal D y C	Parcheo, Bacheo, Sello de fisuras y Obras
	Decreto 064 de 2015	
	Acuerdo 257 Literal D y C	Complementarias
	Emergencias	

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Dentro del el macroproceso de la Gestión Técnica de Mejoramiento de la Malla Vial Local a cargo de la Subdirección de Malla Vial Local SMVL, se encuentra el proceso de Planificación el cual inicia con la actualización del diagnóstico de la malla vial mediante la evaluación de vías, la aplicación del modelo de priorización en las visitas técnicas, la asistencia técnica a localidades, los proyectos de Investigación Estratégica en nuevas tecnologías para la malla vial y finaliza con la entrega de información para su ejecución al área correspondiente. (SMVL, PDV-PR-001 Procedimiento Evaluacion de Vias Version 4.0, 2016)

El modelo de priorización es un instrumento que se utiliza al realizar la evaluación técnica, los criterios de priorización de vías son: Accesibilidad Integral (AI) Cercanía a áreas Prioritarias de Intervención (API), Accesibilidad con Áreas de Actividad (AAA) y Factor de Conectividad (FC) o Factor de Continuidad (CO), el cual también tienen como limitantes de aplicación las vías que están por fuera de las competencias de la Unidad de mantenimiento Vial como lo son: vías con rutas de transporte, vías arteriales, andenes, daños causados por mal estado de las redes de acueducto y alcantarillado, problemas de desecación asociados a la presencia de individuos arbóreos, entre otros, y que son atendidos por otras Entidades del Distrito. (SMVL, PDV-CP-001 Caracterizacion Planificacion del Desarrollo Vial Local Version 5, 2016).

2.1.2 Diseños e intervención

Para la realización de los estudios y los diseños la SMVL debe cumplir con unas especificaciones IDU tanto en los estudios realizados para la elaboración del diseño como en la elaboración y seguimiento de la intervención con los ensayos de laboratorio se realizan, en la Tabla 3 se presenta las normas y especificaciones que deben cumplir los ensayos que se realizan para la elaboración de los diseños.

Tabla 3 Listado de Ensayos, Normas y Especificaciones.

DESCRIPCIÓN ENSAYO	NORMA Y ESPECIFICACIONES
EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO (APIQUES)	
Excavación manual y toma de muestras	INV E-102-13
ENSAYOS SOBRE MATERIALES GRANULARES EXISTENTES	
Humedad natural	INV E-122-13
	NTC 1495-2001
Limites líquido y plástico	INV E-125-13
	INV E-126-13
	NTC 4630-1999
Granulometría por mallas con lavado	INV E-123-13
Equivalente de arena	INV E-133-13
ENSAYOS SOBRE SUELO DE SUBRASANTE	
Humedad natural	INV E-122-13
	NTC 1495-2001
Limites líquido y plástico	INV E-125-13

Fuente: UAE/RMV, 2018

Adicionalmente se utiliza la Guía de diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C desarrollada por (IDU, 2013), la cual es una herramienta de trabajo aplicada a condiciones urbanas de estructuras de pavimentos para vías locales, que garanticen el tránsito permanente optimizando recursos técnicos y financieros. La guía tiene como fin presentar

alternativas de estructuras de pavimentos sometidas a bajos niveles de tránsito para las condiciones climáticas, geotécnicas, hidráulicas y períodos de diseño para vías locales de la ciudad. Igualmente, los tipos de materiales y espesores se ajustan a los procesos constructivos comunes en las diferentes localidades de Bogotá, considerando que en algunas zonas de la ciudad los sistemas de redes de servicios públicos limitan la profundidad de las intervenciones.

Esta guía se realizó considerando Las Especificaciones Técnicas Generales IDU las cuales constituyen un conjunto de instrucciones con validez contractual para el desarrollo de las obras viales de la ciudad de Bogotá D.C. y contienen las condiciones técnicas normalizadas referentes a los materiales y a las unidades de obra incluidas en el documento (IDU-ET, 2011); es importante aclarar que cada una de las actividades realizadas en la intervención son controladas por una especificación descritas en la guía antes mencionada, en la Tabla 4 se presentan los requisitos que deben cumplir las actividades realizadas por la Gerencia de Intervención durante la ejecución.

En Colombia el tema de las Geoceldas es muy reciente, la única referencia encontrada acerca de este tema es una guía desarrollada por el Instituto de Desarrollo Urbano, titulada Guía Para el Buen Uso de Geosintéticos (IDU, 2010), esta dedica un capítulo a la aplicación de geoceldas. Según el IDU (2010), las geoceldas son geosintéticos tridimensionales conocidos como sistemas de confinamiento celular, utilizados en la industria de construcción para estabilización de suelos blandos, muros de suelos reforzados, control de erosión en taludes y canales.

Tabla 4 Especificaciones de las Actividades Ejecutadas en la Intervención

ACTIVIDAD QUE CONTROLAR	REQUISITO
Preparación de la superficie que se va a intervenir	IDU-ET-2011 540.4.1
Nivelación final (Fresado)	IDU-ET-2011 540.4.2
Sobre-Excavación	IDU-ET-2011 310.5.2
Drenaje de excavaciones	IDU-ET-2011 310.5.3
Adecuación de la subrasante	IDU-ET-2011 321.5.1
Trasporte del material Piedra Rajón	IDU-ET-2011 321.4
Extendido del rajón	IDU-ET-2011 321.5.2
Sello del Rajón	IDU-ET-2011 400.5.2
Trasporte del material de Sub Base y Base	IDU-ET-2011 400.4.4
Extendido del material de Sub Base y Base	IDU-ET-2011 400.4.5
Compactación	IDU-ET-2011 400.4.6
Colocación del geotextil y la construcción de la capa de relleno.	IDU-ET-2011 332.5.1 / 400-11
Los geotextiles por utilizar cumplan con la especificación.	IDU-ET-2011 332.2.1.1 / 332.2.1.2 / 332.5.3.1.1
Imprimación o Riego de Liga	IDU-ET-2011 500.4 Imprimación 502.4 Riego de Liga
Colocación y extendida de mezcla asfáltica	IDU-ET-2011 510.5.7
Compactación de la mezcla asfáltica	IDU-ET-2011 510.5.8
Control de Calidad	IDU-ET-2011 500.5.2 / 502.5 / 510.6

Fuente: (GI, 2017)

2.1.3 Entorno Ambiental, Social y Seguridad de Trabajo

La UAERMV, en cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 13, numeral 3, de la Resolución 0242 Por la cual se adoptan los lineamientos para la formulación, concertación, implementación, evaluación, control y seguimiento del Plan Institucional de Gestión Ambiental –PIGA (Secretaría de Medio Ambiente Distrital, 2014); se establece el programa de gestión integral de residuo, el cual tienen como objeto garantizar que los residuos generados, ya sean aprovechables, no aprovechables, peligrosos, especiales, vertimientos o emisiones atmosféricas tengan un manejo integral conforme a la normativa vigente en la materia incluyendo un componente de prevención, minimización y aprovechamiento con el fin de evitar la generación de residuos cuando sea posible; para esto la entidad realiza un acuerdo con UAESP, organización recicladora a la cual la entidad le entrega los residuos reciclables para su adecuado transporte y gestión, dando cumplimiento al decreto 400 de 2004 el al impulsa el aprovechamiento eficiente de los residuos producidos en las entidades distritales.

El decreto 442 del 2015 “Por medio del cual se crea el Programa de aprovechamiento y/o valorización de llantas usadas en el Distrito Capital y se adoptan otras disposiciones” por lo tanto la UAERMV 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 exige el Instituto de Desarrollo Urbano, por lo tanto se debe tener en cuenta que cierto porcentaje de la intervenciones deben ser realizadas con mezcla asfáltica grana de caucho.

El área social debe implementar procesos en los cuales la comunidad debe ser tenida en cuenta ya que es un factor muy importante en las actividades que se realizan, adicionalmente el área de seguridad en el trabajo apoyo contantemente todas las intervenciones realizadas por la entidad.

2.1.4 Plan de Manejo de Transito

Uno de los requisitos para iniciar cualquier obra de intervención vial es tener aprobado el Plan de Manejo de Transito PMT, el cual lo aprueba la Secretaria Distrital de Movilidad, esta es una herramienta que plantea las estrategias, alternativas y actividades necesarias para minimizar o mitigar el impacto generado a las condiciones normales de movilización y desplazamientos de los usuarios de las vías (peatones, vehículos, ciclousarios, y comunidad en general), causados por la ejecución de las obra viales (Movilidad, 2017).

Además se debe tener en cuenta las recomendaciones de especificaciones técnicas mínimas para dispositivos luminosos, descritos en el concepto técnico 17; en el concepto 18 se encuentra la Dirección de Seguridad Vial y Comportamiento del Tránsito, adopta las especificaciones técnicas mínimas que debe cumplir la implementación de cierres parciales sobre las vías de la malla vial arterial, en cuanto a transición de carriles y señalización luminosa para el adecuado control del tráfico en las zonas afectadas por obras; estos conceptos están también regidos bajo la resolución 1885 del 2015 Por la cual se adopta el Manual de Señalización Vial - Dispositivos para la Regulación del Tránsito en Calles, Carreteras y Ciclorrutas de Colombia, de conformidad con los artículos 5°, 113, 115 y el párrafo del artículo 101 de la Ley 769 del 6 de agosto de 2002.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Conference of the Transportation Association of Canada.

Desde 1970 la estabilización con geosintéticos (que son recursos sostenibles) ha sido una técnica utilizada para mejorar el comportamiento de vías pavimentadas y no pavimentadas (Sanat Pokharel, 2010). Un tipo de geosintéticos usado son las geoceldas, un método reciente estudiado durante los últimos 15 años (Ymhaiskar & Mandal, 1996), que son hechas de polímero en forma de celdas tridimensionales artificiales, dispuestas en forma de panal (Han, et al 2008). Las geoceldas generan un gran aporte a la subrasante aumentando su capacidad portante, disminuyendo el desplazamiento vertical y minimizando su desplazamiento horizontal (Han, et al 2008). Debido a las necesidades de estabilizar los suelos de subrasante se han realizado numerosos estudios para definir la efectividad de las geoceldas bajo carga dinámica y estática (Boushehrian et al. 2010). Según el estudio realizado por (Sanat Pokharel, 2010) la rigidez del suelo estabilizado con geoceldas es mejorada en un factor de 1.5 respecto a un suelo sin estabilizar, reduce la deformación plástica y aumenta el porcentaje de la deformación elástica bajo cargas repetitivas.

2.2.2 Geoceldas SA tecnología de confinamiento celular

El cuerpo de ingenieros del ejército de Los Estados Unidos de América desarrolló el primer sistema de confinamiento celular a finales de 1970 como un medio para la construcción de caminos, pistas de aterrizaje, etc., sobre suelos blandos y proveer un sistema que podría no verse afectado por las condiciones de climas húmedos. Ellos determinaron que la colocación de celdas conformadas por paredes delgadas adyacentes llenas de arena sobre una superficie conformada por una subrasante de suelo suelto podía proveer significativamente una mayor capacidad de carga y de apoyo que solamente capas de suelo compactado. (SA, 2014)

De la gran variedad de materiales probados, el Polietileno de alta densidad (PEAD/HDPE) fue el material óptimo para la ejecutar este producto, debido a la combinación de resistencia, vida útil y economía. El sistema de confinamiento celular GEOCELDA se ha producido desde 1990. El primer cliente fue el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América, adquiriendo 6.4 millones de pies cuadrados (600,000 metros cuadrados) de GEOCELDA para su uso en varias aplicaciones militares durante la operación “Desert Storm” o Tormenta del Desierto. Geo Products fue autorizado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América, el titular de la patente (US Pat#4, 797,026), para producir el material de geoceldas hasta 2006 cuando la patente expiro. El número de la Licencia fue 9807 –E- P291. El material GEOCELDA fue también aprobado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América.

Las celdas GEOCELDA tienen un peso muy ligero, son sistemas de confinamiento expansibles que crea una barrera contra la erosión de los suelos o una cimentación estructural, de manera muy económica. (SA, 2014)

Las aplicaciones principales son estabilización de suelos, control de erosión en taludes y canales y muros mecánicamente estabilizados. La planta de fabricación de Geo Products se ubica en Houston Texas, Estados Unidos de América y está acreditada por las certificaciones ISO 9001:2008 y por el Certificado de la Unión Europea CE. También esa certificada por el Ministerio de transporte de la Federación Rusa, así como El Ministerio de Obras Públicas de Panamá (MOP). Adicionalmente, GEOCELDA es un material aprobado para múltiples Departamentos de Transporte dentro de los Estados Unidos de América. Geo Products vende sus productos a través de una red de distribuidores globales en los 7 continentes y cuenta con presencia en 50 países.

2.2.3 Estudio del comportamiento de un material de subrasante con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga

A continuación, describiremos algunas aplicaciones e implementaciones realizadas en la Ciudad de Bogotá con el fin de dar cuerpo y soporte técnico que permita a las entidades responsables de los mantenimientos viales en la ciudad de Bogotá apoyarse para que este tipo de tecnologías sean de uso convencional. (Javeriana, 2011)

Como hemos explicado notablemente las geoceldas son estructuras tridimensionales dispuestas en forma de panel, utilizadas para mejorar las propiedades de los suelos de fundación de un pavimento, estas se colocan en la interfase subrasante-base para mejorar el comportamiento de este ante la aplicación de cargas. Se han realizado análisis de los esfuerzos y asentamientos de un suelo típico de Bogotá ante la aplicación de cargas (monotónicas, ciclos de carga y descarga) mediante pruebas de laboratorio. En esos estudios se realizaron modelos, los cuales consistían en una subrasante sin ningún tipo de mejoramiento, una estabilizada con un sistema convencional y una estabilizada con un sistema de geoceldas. En donde a partir de estos modelos se evaluó la efectividad que puede traer utilizar un sistema de geoceldas como alternativa de refuerzo, obteniendo como resultado una reducción significativa de los asentamientos y esfuerzos verticales. Adicionalmente se realizan ensayos de laboratorio a segmentos de prueba que concluyen lo siguiente:

Es Necesario usar un sistema de estabilización para suelos con características desfavorables ($CBR < 2,5$). Los resultados obtenidos en el trabajo de investigación muestran que utilizar un sistema de geoceldas y un sistema convencional reduce los esfuerzos y asentamientos en una subrasante. Aunque los dos sean un sistema de estabilización que mejora el comportamiento de la

subrasante, el sistema de geoceldas con material de relleno reduce estos parámetros en mayor medida.

Los asentamientos presentaron una reducción del 34% al utilizar un sistema de geoceldas respecto a un sistema de estabilización convencional. Por otra parte, los esfuerzos se reducen en un 53% al utilizar un sistema de geoceldas como alternativa de estabilización, respecto a un sistema de estabilización convencional.

Ante la aplicación de ciclos de carga y descarga se evidencia que las deformaciones plásticas son más grandes en un sistema estabilizado de manera convencional y en un sistema sin estabilizar, obteniendo una deformación plástica de 11,7% en un sistema estabilizado con geoceldas, esto es de gran beneficio para el pavimento ya que el suelo tendrá mayor resistencia frente a la aplicación de carga y descarga.

Los ciclos de carga y descarga muestran que en un sistema estabilizado con geoceldas, se necesitan más de 5 ciclos de carga dinámica, para llegar a la misma deformación de una subrasante sin estabilizar, cargada estáticamente.

Se debe tomar en consideración que el equipo para la aplicación de carga repetida no permite hacer repeticiones continuas, siendo esto un limitante en el desarrollo del proyecto, por otra parte, la caja al no ser una pieza monolítica no tiene la rigidez suficiente para evitar desplazamientos adicionales a los del suelo.

2.2.4 Guía de uso de geosintéticos. Bogotá: IDU

Pruebas de carga de planchas de laboratorio sobre geoceldas mostraron que el rendimiento de las bases de Geocelda-reforzados depende del módulo elástico de la Geocelda. El uso de Geocelda en estructuras con un módulo de elasticidad más alto tenía una mayor capacidad de carga y la

rigidez de la base reforzada. Geoceldas hechas de NPA se encontraron significativamente mejor en la capacidad última de cojinete, la rigidez y refuerzo en relación con geoceldas hechas de polietileno de alta densidad. Geoceldas NPA mostraron una mejor resistencia a la fluencia y una mejor retención de la rigidez y la resistencia a la fluencia particularmente a elevadas temperaturas, verificados por ensayos de placa de carga, el modelado numérico y pruebas de tráfico de la escala completa. Las investigaciones han demostrado que las geoceldas tienen un menor coeficiente de expansión térmica y factor de reducción lenta, y una mayor rigidez a la tracción y la fuerza de geoceldas HDPE; NPA y el aumento de la capacidad de soporte y resolución reducida. (IDU, 2010)

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Que es una rehabilitación

Conjunto de medidas que se aplican con el fin de recuperar la capacidad estructural del pavimento. Algunas implican el retiro de parte de la estructura existente para colocar posteriormente el refuerzo y otras buscan aprovechar las condiciones superficiales existentes del pavimento. Normalmente, van asociados a la ampliación de los períodos de vida útil en su detalle, se debe hacer Estudios y Diseños (UMV, 2018).

2.3.2 Generalidades de los Geosintéticos

Aplicación de Geoceldas

El óptimo desempeño y el adecuado funcionamiento de las estructuras que se construyen con geosintéticos dependen de las buenas prácticas de manejo y de los procedimientos de instalación en obra. Esto abarca desde el almacenamiento de los materiales hasta la construcción de las estructuras que los utilizan. La siguiente guía contiene el procedimiento para la construcción de estructuras con geoceldas para sistemas de soporte de carga, así como las recomendaciones para el manejo, transporte y almacenamiento (CONFICELL LS). Las geoceldas se utilizan como sistema de confinamiento celular para el soporte de cargas dado que:

- ✓ Aumentan el módulo mecánico de la capa granular incrementando la capacidad de carga de la estructura.
- ✓ Resisten a tensión en la capa reforzada generando un efecto de viga, que atenúa la presión aplicada localmente controlando la compresibilidad del suelo de subrasante.

- ✓ Admiten el uso de variados materiales de relleno tales como arena, agregados pétreos, concreto asfáltico o hidráulico reciclado y concreto hidráulico, entre otros, dependiendo de su aplicación.

Estas se diseñan y fabrican logrando un alto desempeño mecánico que se evidencia en:

- Significativa minimización del ahuellamiento superficial de la estructura.
- Distribución lateral de la carga y reducción de la deflexión vertical de la subrasante.
- Control al desplazamiento cortante lateral de los agregados en capas granulares drenantes.
- Al ser llenadas con agregados permeables, se reduce la escorrentía de las aguas lluvias y se facilita su retención e infiltración hacia la subrasante.
- Mantiene la capacidad de soporte de la estructura en condiciones saturadas.
- Aumenta significativamente el número estructural de soporte de carga reduciendo los espesores de base granular y la estructura de pavimento en general.

La guía recomienda sobre el Material de Relleno, ya que debe ser un sistema de confinamiento celular el cual admite el uso de variados materiales de relleno (arena, agregados pétreos, entre otros), lo cual depende del tipo de aplicación y de la disponibilidad del material, se recomienda utilizar material de la mejor calidad disponible; En términos generales, se sugiere que el material contenga partículas duras, resistentes y durables, sin exceso de partículas blandas o desintégrales y sin materia orgánica u otras sustancias perjudiciales. El material ideal debe tener un predominio de la fracción de arenas, índice de plasticidad menor al 6%, contenido de partículas finas inferior al 10% y tamaño máximo nominal menor a 2" (50 mm). El material granular se deberá compactar hasta lograr un peso unitario como mínimo del 95% del máximo obtenido en la prueba de compactación Proctor Modificado. Para el caso de refuerzo de la base granular en estructuras de

pavimento, el peso unitario deberá ser como mínimo el 98% del máximo obtenido en la prueba de compactación Proctor Modificado (Acosta, 2010).

Separación de Subrasantes en Vías con Geotextil T2100

Esta especificación se refiere al uso de Geotextil T2100 para prevenir la mezcla entre los suelos de subrasante y agregados o materiales seleccionados para conformar subbases, bases, o materiales para construir terraplenes, los que se colocarán sobre el Geotextil T2100 de acuerdo a un espesor de diseño y valores de compactación establecidos, en los sitios señalados por los planos del proyecto o los indicados por el Interventor/Supervisor/Inspector (PAVCO, 2014).

Sistema de Subdrenaje con Geodrenes en vías

Esta especificación se refiere al uso de Geodrén vial como sistema de subdrenaje, en los sitios señalados en los planos del proyecto o indicados por el Interventor/supervisor/Inspector. La colocación del Geodrén vial como sistema de subdrenaje permite la captación y conducción del agua a través del sistema. Las características del Geodrén vial serán función de las condiciones hidráulicas del sistema (PAVCO, 2014).

2.3.3 Metodología de diseño AASTHO y SHELL

AASHTO es una asociación de estados unidos sin fines de lucro, representa los cinco modos de transporte: aire, autopistas, transporte público, ferrocarril y agua, su objetivo principal es fomentar el desarrollo, la operación y el mantenimiento de un sistema integrado de transporte nacional, es un líder internacional en el establecimiento de estándares técnicos para todas las fases

del desarrollo de sistemas de carreteras los estándares se emiten para el diseño, construcción de carreteras y puentes, materiales y muchas otras áreas técnicas (AASHTO, 1993).

La metodología AASHTO se basa en dos fundamentos, el tránsito que lleva a la falla del pavimento es función del número estructural (Corredor, 2008), de la resistencia de la subrasante, de la pérdida deseada de índice de servicio y de la confiabilidad elegida, el otro es que incluye la posibilidad de que se reduzca el periodo de diseño por la presencia de suelos de subrasante expansivos; además define los siguientes conceptos (Sabogal, 2008).

Serviciabilidad: Capacidad de un pavimento de servir al tránsito que hace uso de él en un instante determinado, desde el punto de vista del usuario.

Comportamiento del pavimento (performance): Tendencia de la serviciabilidad con el incremento en el número de aplicaciones de carga por eje.

Periodo de comportamiento (periodo de diseño): Lapso que transcurre desde que un pavimento es construido o rehabilitado, hasta que alcanza su serviciabilidad terminal

Este método SHELL considera la estructura del pavimento como un sistema multicapa linealmente elástico, bajo la acción de las cargas de tránsito, en el cual los materiales se encuentran caracterizados por su módulo de elasticidad de Young (E) y su relación de Poisson (μ). Los materiales de la estructura se consideran homogéneos y se asume que las capas tienen una extensión infinita en sentido horizontal (Sabaneta, 2009).

El diseño consiste en elegir espesores de las capas asfálticas y granulares, y características de sus materiales (E , μ), de manera que se cumpla un determinado criterio de deformaciones. El método utiliza un programa BISAR de cómputo, el cual permite calcular los esfuerzos y deformaciones que se producen en cualquier punto de la estructura y localiza las magnitudes máximas de ellos. Los criterios básicos para el diseño estructural son las siguientes:

- Si la deformación horizontal por tracción ϵ_t en la fibra inferior de las capas asfálticas supera la admisible, se producirá el agrietamiento de ellas.
- Si la deformación vertical por compresión en la subrasante ϵ_z es excesiva, se producirá una deformación permanente de la subrasante y por consiguiente del pavimento.

2.3.4 Ensayos y laboratorios

Los ensayos con carga estática no repetida efectuados en el sitio son usados para evaluación y diseño de estructuras de pavimento. Los ensayos con carga estática no repetida efectuados en suelos, bases no cementadas y en materiales de subbase, para determinar el módulo de reacción de la subrasante o una medida de la resistencia al corte de las capas del pavimento.

Granulometría por tamizado para suelos

Este ensayo consiste en la clasificación del terreno natural para compararlo con la clasificación de materiales de suelos, de acuerdo con las normas ASTM D 422 / AASHTO T 88.

Límites de Atterberg

Estos ensayos junto con la granulometría por tamizado se requieren para la clasificación del suelo, en este caso su consistencia con respecto al contenido de humedad. A estos contenidos de

humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg, de acuerdo con las normas ASTM D 4318/ AASTHO T 89:

Límite líquido: el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y es posible moldearse.

Límite plástico: el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se produce el rompimiento.

Límite de retracción o contracción: estado en que el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad, según ASTM D 427/ AASHTO T 92.

Relación de humedad y densidad (Próctor Estándar y/o Próctor Modificado): Mediante esta prueba se puede determinar la compactación o densidad máxima de un suelo o agregado en relación con su contenido de humedad. Existen dos tipos de ensayo Próctor normalizados: Ensayo Próctor Estándar, de acuerdo con las normas ASTM D 698 / AASTHO T 99, método C y el Ensayo Próctor Modificado, de acuerdo con las normas ASTM D 1557 / AASTHO T 180, método D. La diferencia entre ambos ensayos radica en la distinta energía utilizada, debido al mayor peso del pisón y mayor altura de caída en el Próctor Modificado.

CBR en laboratorio: Determina la capacidad soportante del suelo (Relación de Soporte de California, por sus siglas en Ingles), de acuerdo con las normas ASTM D 1883 / AASHTO T 193, en el cual se mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo (subrasante), subbase y/o base granular de un pavimento, bajo condiciones controladas de humedad y densidad.

CBR in situ: o ensayo de Anillo de carga Realizado únicamente en la subrasante y sirve para correlacionarlo con el CBR en laboratorio, de acuerdo con la norma TB ENG 37 del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos.

Determinación del módulo de reacción (placa de carga).

Los ensayos de placa de carga permiten determinar las características resistencia-deformación de un terreno. Consisten en colocar una placa sobre el suelo natural, aplicar una serie de cargas y medir las deformaciones. Existen diversas normas que rigen este ensayo como son las normas ASTM D1194, D 1195, D1196, el resultado del ensayo se representa en un diagrama tensión deformación. A partir de este ensayo se pueden obtener numerosos datos entre los que se destacan:

- Obtención de la capacidad de carga del suelo para un asentamiento determinado.
- Determinación del módulo de reacción o coeficiente de Balasto (K),
- Determinación de las características de la curva carga contra deformación del suelo,
- Obtención del coeficiente de elasticidad del suelo (E)
- Realización de estudios sobre la estabilidad de pavimentos o bases de caminos ya existentes.

La información proporcionada es posible usarla en la evaluación y diseño de pavimentos de tipo rígido o flexible de carreteras y/o aeropuertos y aplicarse tanto a suelos en estado natural como compactados (Valparaiso, 2003).

Algunos términos utilizados en este ensayo son:

- Módulo de reacción. Es la presión que ha de transmitirse a la placa para producir al suelo una deformación prefijada.
- Deflexión. Es el descenso vertical de una superficie debido a la aplicación de una carga sobre ella.
- Deflexión residual. Es la diferencia entre el nivel original de una superficie y su posición final a consecuencia de la aplicación y retiro de una o más cargas en la superficie.

- **Deflexión elástica.** Es la recuperación de la deformación vertical que tiene lugar cuando la carga se retira de la superficie.

Método para medir deflexiones mediante deflectómetro de Impacto (FWD)

El objeto de este método abarca la medición de deflexiones en superficies pavimentadas o sin pavimentar con el dispositivo comúnmente llamado deflectómetro de impacto o FWD. Este método de prueba describe la medición en deflexiones verticales de la respuesta de la superficie a un impulso de carga aplicado en la superficie del pavimento. Las deflexiones verticales son medidas en el eje de carga y en puntos espaciados a distintas distancias radiales del eje de carga.

Este método sirve para determinar las deflexiones superficiales en un pavimento, por medio de la aplicación de una carga de impacto en la superficie del pavimento o estructura. Las deflexiones resultantes son medidas en el centro de la carga aplicada y a distintas distancias del lugar de aplicación de la carga. Las deflexiones pueden ser directamente correlacionadas con el comportamiento del pavimento, o utilizadas para medir in situ las propiedades de los materiales de las capas que conforman la estructura del pavimento.

Algunos usos de la información tomada en el campo incluyen la evaluación estructural que permita evaluar la capacidad de carga de una estructura de pavimento y la determinación de los requerimientos de espesores de sobre capas de pavimento para vías y aeropuertos (INV-E, 2007).

2.3.5 Retrocálculo directo

Esta metodología tiene por objeto evaluar la capacidad portante de la estructura de un pavimento flexible, mediante la utilización de equipo no destructivo, en la cual se mide generalmente deflexiones puntuales a la exposición de una carga en el pavimento, interpretadas a través de técnicas basadas en análisis inverso como AASHTO 93, YONAPAVE y RHODE.

Mediante estas técnicas se permite la cuantificación y cualificación de las capas, del nivel de deterioro estructural del sistema pavimento subrasante a través de dos parámetros:

El primer parámetro se define mediante el módulo resiliente, el cual es comparado con los softwares EVERCALC (Usado en nuestro análisis) y ANSYS, que sustentan su desarrollo en análisis inverso y elementos finitos respectivamente.

Segundo parámetro se define mediante la capacidad estructural del sistema pavimento-subrasante, el cual es analizado a través del concepto de deflexión característica propuesto por la guía de diseño AASHTO 93.

EL estudio da a conocer que el mejor método para caracterizar el estado del pavimento es la técnica propuesta por YONAPAVE. El documento no solo presenta resultados de la condición actual de la vía bajo estudio sino también proporciona recomendaciones con respecto al manejo del pavimento de la vía, que permitan transformar la ingeniería de pavimentos a una ingeniería de gestión de los pavimentos.

Deflectometría de impacto FWD

El FWD es un equipo utilizado en la Ingeniería de Pavimentos para evaluar la condición estructural del pavimento. El equipo de ensayo puede ser montado en un vehículo o en un sistema de remolque tirado por un vehículo. La adquisición de un equipo sofisticado como éste, puede resultar costosa, pero presenta un alto rendimiento, es automatizado y funciona bajo una carga dinámica. Por carga dinámica se entiende una mejor simulación de las cargas del tráfico sobre el pavimento. El equipo cuenta con una serie de sensores o geófonos (10 geófonos) colocados en una regleta, los que se encuentran predispuestos a diferentes distancias medidas desde el centro del plato de carga, el cual tiene un diámetro de 30 cm. La función de dichos sensores es medir las

deflexiones producidas al aplicar la carga dinámica sobre un punto determinado y de este modo generar un cuenco de deflexión (véase Fig. 2), a través del cual se puede caracterizar la capacidad estructural del sistema subrasante-pavimento.

Modelos matemáticos utilizados para la caracterización de la subrasante

La auscultación estructural de pavimentos, empleando deflectometría de impacto, tiene como finalidad determinar la capacidad portante del sistema pavimento-subrasante en cualquier momento de su vida útil; así como el de establecer y cuantificar la necesidad de realizar o no rehabilitaciones (Guzmán Suárez, 2009), mediante modelos matemáticos propuestos por diferentes entidades tales como la AASHTO (1993), LUKANEN (Lukanen & Han, 1991), YONAPAVE (Hoffman, 2003), WSDOT (2005) ó RODHE (Rodhe, 1994). Mediante estos modelos es posible hallar parámetros como el número estructural efectivo (SNef) y el módulo resiliente de la subrasante (M_r); los cuales son necesarios para el diseño y rehabilitación de las carreteras. Para este proyecto se ha establecido realizar la modelación de las estructuras usando como herramienta el Software EVERCALC el cual se basa en siguientes criterios:

Técnicas de análisis inverso y elementos finitos

La modelación de la estructura del pavimento se realiza mediante dos herramientas computacionales, la primera es EVERCALC basado en análisis inverso desarrollado por el Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT, 2005) y la segunda es ANSYS basado en un método racionalista que emplea elementos finitos (Rao Garzón & Garzón Alvarado, 2012).

Análisis inverso con el programa EVERCALC

EVERCALC es un programa que estima el módulo elástico de las capas de pavimento, determina esfuerzos y deformaciones a distintas profundidades dentro de la estructura del pavimento (al fondo de la capa asfáltica, a la mitad de las capas granulares y en la parte superior de la subrasante); usando para ello un enfoque netamente iterativo que obtiene los módulos elásticos a partir de una comparación entre las curvas de deflexión calculadas por el programa y las medidas in situ.

Se inicia con una primera estimación de valores de módulo de cada una de las capas, valores que por criterio del usuario son ingresados hasta que el programa converja a una tolerancia permisible o aceptable, la cual se relaciona con los siguientes parámetros: media cuadrática, tolerancia del módulo y un máximo número de iteraciones (WSDOT, 2005), según las Ecs. 20 y 21:

Media Cuadrática (RMS):

$$\text{RMS}(\%) = \sqrt{\frac{1}{n_d} \sum_{i=1}^n \left(\frac{d_{ci} - d_{mi}}{d_{mi}} \right)^2} \times 100$$

dónde: dci: deflexión calculada de un sensor i, dmi: deflexión medida de un sensor i, nd: número de sensores utilizado en el análisis.

Tolerancia del módulo:

$$E(\%) = \frac{E_{(k+1)i} - E_{(k)i}}{E_{(k)i}} \times 100$$

donde: $E(k+1)$ i : módulo siguiente de una capa determinada i , $E(k)$ i = módulo anterior de una capa determinada i .

Modelización de la estructura del pavimento con elementos finitos Las técnicas más avanzadas para el análisis y diseño racional de pavimentos consideran el uso de elementos finitos como la herramienta de mayor flexibilidad y versatilidad para la representación de los materiales, las condiciones de compatibilidad y la representación de capas.

2.4 Estado del Arte

Aunque en el país se han utilizado geoceldas y a nivel mundial son muchas las investigaciones desarrolladas en este tema, en Colombia la investigación del uso de estas es muy reducida, el uso de geoceldas es considerado como una propuesta de nuevas tecnologías, que sólo se han utilizado en tramos de prueba, pero a los cuales no se les han realizado ensayos de laboratorio. En el segundo semestre del 2011 el IDU sacó un manual de geosintéticos en el cual se explica el uso de las geoceldas dado que es un método no tan reciente, pero de una tecnología innovadora que no ha sido explotada. Las tecnologías innovadoras son consideradas como tecnologías que todavía pueden estar en proceso de evaluación y que no han sido probadas a largo plazo, estas tecnologías tienen soporte en estudios técnicos y prácticas exitosas (Sanat Pokharel M. N., 2017).

Contar con verdadera ingeniería para el refuerzo del suelo es una demanda que se ha generalizado en los últimos años, gracias a los avances en sistemas de transporte y mejoras del desarrollo de áreas industriales, comerciales y residenciales en zonas que necesitan terrenos y vías adicionales. Como respuesta a esta necesidad y a partir de múltiples investigaciones y desarrollos, el resultado ha sido un concepto totalmente nuevo:

Los diferentes expertos proveedores de este tipo de tecnologías en Geo sistemas presentan, LA GEOCELDA, como el sistema de confinamiento, hechas a partir de un material único denominado Nano Polymeric Alloy (NPA). Esta nueva generación de Geoceldas ofrece estabilidad dimensional por 75 años y rendimiento ajustado a las necesidades presentes de la infraestructura del transporte; al mismo tiempo, impulsa la transición desde la protección de canales y taludes a

las aplicaciones de soporte de cargas para autopistas, líneas de ferrocarril y puentes entre sus principales usos.

Beneficios: Incrementa la productividad de sus obras civiles con todos los beneficios que la Geocelda le aporta en vías, contención de suelo reforzado y control de erosión.

- Reemplazo de materiales granulares de alto módulo por materiales granulares de sitio.
- Reducción de espesores de carpeta asfáltica.
- Reducción de espesores de material granular.
- Mayores rendimientos de construcción.
- Disminución de costos iniciales del proyecto.
- Disminución en los ciclos de mantenimiento de la vía.

Para Colombia, según las especificaciones técnicas del IDU (2005), los métodos utilizados para la estabilización de subrasante en Bogotá son: materiales estabilizados con cal, capas de materiales granulares estabilizados con cemento, capas de materiales granulares estabilizados con emulsión asfáltica y productos químicos.

Debido a esta condición y a la falta en el país de experiencias e investigación de aplicación de geoceldas para la estabilización de suelos, se considera indispensable realizar una investigación del comportamiento mecánico en un suelo de subrasante de Bogotá estabilizado con sistemas de geoceldas.

El objetivo de esta investigación es evaluar los esfuerzos y deformaciones de un suelo típico de Bogotá estabilizado con un sistema de Geoceldas al aplicar ciclos de carga y descarga, en

modelos de laboratorio, por medio de la comparación entre los esfuerzos y asentamientos inducidos al aplicar una carga monotónica y ciclos de carga y descarga en una subrasante sin estabilizar, una estabilizada con un sistema de geoceldas y una subrasante mejorada con un sistema convencional.

Como resultado de las investigaciones recientes en cuanto al particular se tienen las siguientes repetidas conclusiones soportadas en tramos de prueba realizados a nivel nacional e internacionalmente (Sanat Pokharel M. N., 2017):

Conclusiones del estudio y tramos de prueba:

- Las bases reforzadas con geocelda tenían un módulo inicial más alto que las bases no reforzadas. Sus factores de mejora del módulo oscilaron entre 1.26 y 2.04.
- El refuerzo con Geocelda redujo significativamente la deformación permanente en comparación con las bases no reforzadas de los tres materiales de relleno bajo carga repetida. Múltiples geoceldas redujeron aún más la deformación permanente en comparación con una única geocelda.
- Los valores de la relación de beneficio de tráfico (TBR) de este estudio fueron iguales o superiores a 8,0 para las bases reforzadas con geocelda única y 12,0 para las bases reforzadas con múltiples geoceldas, respectivamente.
- Las bases QW y AB-3 reforzadas con geoceldas tenían un mayor porcentaje de deformación elástica que las bases no reforzadas debido a la contribución de la geocelda. Con excepción de las bases de arena, las bases AB-3 y QW reforzadas con geoceldas alcanzaron un 90% de deformación elástica después de los pocos ciclos iniciales (principalmente 10 ciclos).

Un Análisis realizado por la Universidad Javeriana en 2011 muestra que es fundamental usar un sistema de estabilización para suelos con características desfavorables ($CBR < 2,5$). Los resultados obtenidos en el trabajo de investigación muestran que utilizar un sistema de geoceldas y un sistema convencional reduce los esfuerzos y asentamientos en una subrasante. Aunque los dos sean un sistema de estabilización que mejora el comportamiento de la subrasante, el sistema de geoceldas con material de relleno reduce estos parámetros en mayor medida.

- Los asentamientos presentan una reducción del 34% al utilizar un sistema de geoceldas respecto a un sistema de estabilización convencional. Por otra parte, los esfuerzos se reducen en un 53% al utilizar un sistema de geoceldas como alternativa de estabilización, respecto a un sistema de estabilización convencional.
- Ante la aplicación de ciclos de carga y descarga se evidencia que las deformaciones plásticas son más grandes en un sistema estabilizado de manera convencional y en un sistema sin estabilizar, obteniendo una deformación plástica de 11,7% en un sistema estabilizado con geoceldas, esto es de gran beneficio para el pavimento ya que el suelo tendrá mayor resistencia frente a la aplicación de carga y descarga.
- Los ciclos de carga y descarga muestran que en un sistema estabilizado con geoceldas, se necesitan más de 5 ciclos de carga dinámica, para llegar a la misma deformación de una subrasante sin estabilizar, cargada estáticamente.

La tesis elaborada en la Universidad Católica de Bogotá evaluó la estructura para determinar la capacidad del pavimento, para esto se realizó la medición de deflectometría de campo con equipo deflectómetro de Impacto FWD (Falling Weight Deflectometer) y así comprobar que las dos estructuras planteadas cumplieran con los requerimientos normativos vigentes. Transcurrido el

tiempo de construcción de los segmentos se evaluaron nuevamente las condiciones estructurales convencionales y no convencionales (Tecnología Geoceldas) presente en estos tramos viales (Gonzalez, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior el alcance del proyecto comprendió la evaluación estructural, y la determinación de la vida residual del pavimento en término de número años para cada una de las vías que comprenden el proyecto. A continuación, se describen cada uno de los pasos para la evaluación Estructural y la determinación de la vida residual del pavimento:

- Medición de deflectometría, utilizando el Deflectómetro de Impacto FWD.
- Recopilación y procesamiento de la información suministrada por el Estudio de tráfico.

El deflectómetro de impacto (Falling Weight Deflectometer, FWD, fue el equipo utilizado en este proyecto para la toma de las medidas de deflexiones. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente forma: Se aplicó una carga dinámica en el pavimento de 40 KN causada por la caída de una masa sobre un plato circular cuya superficie de contacto se asemeja a la de la rueda de un camión. Las deflexiones producidas son medidas por un grupo de geófonos (sensores) ubicados a distancias de 0, 0.30, 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 y 1.80 m del centro del disco de carga de diámetro 0.30 m, y registradas automáticamente en un computador portátil ubicado en el vehículo que arrastra y controla el tráiler de medición.

La evaluación estructural permite determinar la capacidad que presenta el pavimento, incluido el suelo de subrasante, para soportar las cargas que transmiten los vehículos que circulan por las mismas, así como para soportar los cambios en las condiciones medio ambientales. Un pavimento con una capacidad estructural inadecuada frente a las variables mencionadas puede colapsar, requiriendo inversiones importantes para su recuperación.

3 DESCRIPCIÓN DE LUGAR Y TIEMPO

El segmento seleccionado después de realizar la visita técnica y de evaluar otros posibles segmentos, se determinó a intervenir como tramo de prueba el segmento ubicado en la calle 128A entre transversal 60 y la avenida carrera 72 conocida como Avenida Boyacá ; según el diagnóstico realizado por los especialistas de la SMVL Subdirección de la Malla Vial Local, el segmento debe ser intervenido como REHABILITACIÓN TOTAL; a lo largo del segmento se presentan deformación, desecación debido a la presencia de individuos arbóreos, los cuales se deben proteger debidamente durante la intervención de la vía. Ya que el tipo de intervención a realizar en este segmento es una Rehabilitación, hace parte de la estrategia de Barrios Sin Infraestructura Vial (RHVL)

Es importante resaltar que la vía se encuentra en una zona residencial, también se encuentra la Parroquia San Bartolomé, además se las vías con las que se conecta, las cuales tienen un alto volumen de flujo vehicular, por todo esta es que esta vía es importante intervenirla y que esta quede en muy buenas condiciones de transitabilidad.

Según la programación de la entidad deberá ser intervenido en el segundo semestre del presente año, la Gerencia de Intervención tiene programado llevar acabo esta intervención en el mes de junio y julio, la duración prevista es de 30 días hábiles; el seguimiento y los ensayos planteados se realizarán en los siguientes tres meses a partir de la finalización de la intervención.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

Tabla 5 Información del Segmento Vial

ZONA	N° L	LOCALIDAD	UPZ	BARRIO	PK_ID	CIV	EJE	DESDE	HASTA	KM-CARRIL DE IMPACTO	ESTRATEGIA	INTERVENCIÓN PRIORIZADA	SOLICITUD
1	11	SUBA	NIZA	NIZA NORTE	168785	11009699 50008537 11009735 11009749	CL128A	TV60	AK72	0,57	RHVL	RH	IDU

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)



Ilustración 1 Localización del Segmento a Intervenir

Fuente: (IDU I. d., 2018)

A continuación, se presentan las fotografías de cómo se encontraba la vía antes de la intervención realizada.



Ilustración 2 Localización del Segmento a Intervenir

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

4 METODOLOGÍA

4.1.1 Estructuración Técnica

La estructuración técnica del proyecto está definida en tres situaciones, la priorización y la entrega del diseño preliminar y la evaluación del segmento a intervenir. Las dos primeras etapas las realiza la SMVL Subdirección Malla Vial Local la cual se encarga de diagnosticar las vías las cuales son misión de la entidad, diagnostican la vía según el modelo de priorización y determinan la actividad a realizar que en este caso es rehabilitación, posterior se hizo la reserva del segmento ante el IDU, ya que en este proyecto el tipo de intervención a ejecutar será rehabilitación se debe hacer los respectivos estudios geotécnicos para la elaboración del diseño.

El diagnóstico del segmento vial se realizó de acuerdo con la metodología Pavement Index Condition (PCI) según (Varela, 2002), donde se evidenció agrietamiento en bloque de severidad alta, depresiones de severidad media y huecos de severidad alta; es pertinente enunciar que, el segmento en estudio presentaba una sobre carpeta que no permitió evidenciar en la auscultación la totalidad de los daños presentes en la estructura.

Una vez recibidos el diseño de la vía, la GI Gerencia de Intervención en compañía del área de nuevas tecnologías de la entidad, del proveedor de la geoceldas SYNTEX; se realizó una evaluación técnica de la cual se definió el tramo y las condiciones del tramo de prueba, durante las mesas de trabajo, para esto SYNTEX presentó una propuesta la en la cual se encontraban tres estructuras de geocelda, de las cuales se tomaron dos y los demás tramos se definieron según la necesidad de la Unidad de Mantenimiento Vial, de comparar comportamiento de las estructuras convencionales que ya se realizan y una estructura mezclando la base granular con fresado en determinada proporción.

El plan de trabajo que se determinó tenía como fin garantizar disposición de recursos para la construcción, así como el cumplimiento del plan de inspección y ensayo que validaría las hipótesis de mejora de capa estructurales utilizadas en la metodología de diseño de pavimentos con inclusión de sistemas celulares de confinamiento.

El plan de inspección y control con ensayos, busco evaluar el comportamiento mecánico de cada capa que se conformó de la estructura de pavimento, este consistió en los siguientes ensayos; se evaluó la capacidad de soporte de la subrasante con el ensayo de PDC (Penetrómetro de cono), siguiendo los lineamientos especificados por la especificación INV-E-172-13 o ASTM D 6951-09, los materiales granulares y el refuerzo de la geocelda se evaluó con el ensayo de placa, siguiendo los lineamientos especificados por INV. E-168-13, con el cual según (Reyes, 2015), se puede caracterizar de manera indirecta la rigidez bajo carga monotónica de la subrasante y en la capa de rodadura, se evaluó con ensayos de deflectometría con equipo FWD, donde se calculó la deflexión máxima de las estructuras de pavimento, así como los módulos de capa.

Tabla 6 Plan experimental de ensayos tramo de prueba según el sector

SECTOR	1	2	3	4	5
Deflectometría	SI	SI	SI	SI	SI
Ensayo de placa base granular			SI	SI	SI
Ensayo de placa subbase granular			SI	SI	SI
Ensayo de placa sistema de confinamiento y sello	SI	SI			
Ensayo de placa material granular remanente	SI	SI		SI	SI
Ensayo de PDC (subrasante)	SI	SI	SI	SI	SI

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

4.1.2 Intervención o Construcción

Según el cronograma en esta etapa del proyecto se solicitó el PMT Plan de Manejo de Tránsito permiso que es aprobado por la Secretaría de Movilidad, se inicia a realizar la Gestión Social se hacen las actas de vecindad en las viviendas que están localizadas sobre la vía.

Se inicia la intervención de la vía el día 26 de junio del 2016, el fresado de este tramo no cumplió con la granulometría recomendada por lo tanto se utilizó fresado de otras vías que el tipo de intervención era cambio de carpeta, para llenar 40 ml de las geoceldas, luego se inició la excavación y una vez terminada esta actividad el jardín botánico, realizo un tratamiento a las raíces de los árboles, se inició con los tramos de geocelda, luego se realizó el tramo convencional con piedra rajón como mejoramiento de la subrasante, en seguida el tramo convención y por último el tramo de subbase mezclado con fresado.

La instalación de la mezcla se realizó en dos partes, la primera parte cuando se terminaron los tramos de geocelda y luego cuando se termine los otros tramos. Las actividades en común fueron las siguientes:

- Cerramiento y señalización
- Topografía replanteo general
- Excavación mecánica
- Nivelación, compactación mecánica y estabilización de subrasante
- Suministro e instalación de geotextil y de la Geocelda
- Toma de muestras y ensayos de laboratorio
- Base granular BG-A y llénate de la geocelda

➤ Liberación de la estructura

Durante la ejecución de los trabajos, se deberá hacer especial seguimiento por parte de los supervisores o responsables técnicos en campo los siguientes controles:

- Verificar el estado y funcionamiento de todo el equipo empleado por el Constructor.
- Verificar que el terreno se prepare adecuadamente y que se cumplan con las dimensiones especificadas en los planos.
- Verificar que el material de relleno cumpla las especificaciones del diseño.
- Supervisar la correcta colocación del Geotextil y de la GEOCELDA.
- Comprobar que los materiales a utilizar cumplan con los requisitos exigidos por la presente especificación.
- Verificar que cada rollo de Geotextil y GEOCELDA tenga en forma clara la información del fabricante, el número del lote y la referencia del producto, así como la composición química del mismo, junto con el certificado de calidad del fabricante.
- Comprobar que, durante el transporte el Geotextil y la GEOCELDA tengan los empaques que los protejan de las acciones externas.

4.1.3 Cierre y entrega

Por último, se realizó el ensayo FWD para lograr concluir el comportamiento de las diferentes estructuras, también se comparan los rendimientos y los costos. Se realizó la hoja de vida del segmentó la cual consolida los costos, cantidades, documentos preliminares, permisos solicitados, documentación de otras áreas relacionadas con la gestión de la intervención y la ficha de terminado.

Adicionalmente se realizó un informe que fue presentado a todas las áreas con el fin de socializar el comportamiento del tramo y definir si la entidad diseñara y realizará intervenciones con la aplicación de geoceldas para que los procesos sean actualizados.

5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Tabla 7 Alcances y Limitaciones del Proyecto

ALCANCE	LIMITACIONES
Construir el tramo de prueba priorizado por SMVL como rehabilitación reduciendo los espesores planteados en la estructura inicial.	Se tienen que garantizar el flujo de agua debido a que la vía presenta deformaciones fuertes.
Realizar el seguimiento durante la ejecución de tramo para garantizar que cada una de las actividades se realicen de acuerdo a lo establecido	La entidad no cuenta con otros ensayos diferentes a los tradicionales para determinar características más específicas.
Reciclar el material de demolición o material remanente y utilizarlo como llenante de las geoceldas.	Se tienen que llenar con materiales que se ajusten a la granulometría de la base para que sea garantice la cantidad de finos.
	El avance de la intervención después de la excavación depende de la intervención que debe realizar el jardín botánico.

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

6 RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 Definición de tramo

En el segmento vial ubicado en la calle 128A entre avenida carrera 72 y transversal 60, el día 26 de junio del 2018 se inició la intervención de rehabilitación, realizada por la Unidad de Mantenimiento Vial, en el cual se realizó como tramo de prueba definido en 5 secciones con diferentes estructuras las cuales se describen a continuación:

Estructura Sector I

Esta estructura se cimento sobre un material granular remanente clasificado según el SUSC, como Arena Limosa (SM), con espesor de 0.40 m promedio, sobre está, se instaló una capa de 0.15 m de espesor de subbase granular preparada (70% de subbase granular y 30% de fresado de material asfáltico), luego 0,15 m de espesor de base granular y como capa asfáltica 0,10 m de concreto asfáltico tipo MGR-19.

Estructura Sector II

Esta estructura se cimento sobre un material granular remanente clasificado según la SUSC como Arena Limosa (SM) y espesor de 0,40m promedio, la primera capa instalada corresponde a 0,15m de subbase granular, 0,15m de base granular y 0,10 m de concreto asfáltico tipo MGR-19.

Estructura Sector III

En esta estructura fue necesario parte de un material granular remanente con exceso de humedad y remplazarlo con 0.15m de rajón, la estructura se cimento sobre un material granular remanente clasificado según la SUSC como Arena Limosa SM y espesor de 0.25m, promedio donde se reconforma la siguiente estructura; 1) 0,25 m de rajón, 0,15m de subbase granular, 0,15m de base granular y 0,10 m de concreto asfáltico tipo MGR-19.

Estructura Sector IV

Esta estructura se cimenta sobre un material granular remanente, clasificado según la SUSC como Arena Limosa SM y espesor de 0,55m promedio, posteriormente se instaló un geotextil fibrilado como capa de separación, la primera capa instalada corresponde a un fresado reforzada con el sistema de confinamiento celular en un espesor de 0,15m, compuesto por un geotextil fibrilado referencia Syntex Guatex 3*3 HF y una geocelda de referencia Syntex RoadRunner EGA 30-15, con sello de fresado de 0.05m, y un sello de base granular tipo A de 0.08m y 0.075 m de concreto asfáltico tipo MGR-19.

Estructura Sector V

Esta estructura se cimenta sobre un material granular remanente clasificado según la SUSC como Arena Limosa SM y espesor de 0.53m promedio, posteriormente se instaló un geotextil fibrilado como capa de separación, la primera capa instalada corresponde a una base granular reforzada con el sistema de confinamiento celular en un espesor de 0.15m, compuesto por un geotextil fibrilado referencia Syntex Geotex 3*3 HF y una geocelda de referencia Syntex RoadRunner EGA 30-15, seguida de una capa 0.12m de base granular y 0.075m de concreto asfáltico tipo MGR-19.

A continuación, se presenta gráficamente las estructuras construidas en el tramo de prueba, la estructura I inicia desde la cota K0+025 hasta la K0+065, la estructura II inicia desde la cota K0+065 hasta la K0+105, la estructura III inicia desde la cota K0+105 hasta la K0+145, la estructura IV inicia desde la cota K0+145 hasta la K0+185, y la estructura V inicia desde la cota K0+185 hasta la K0+225.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

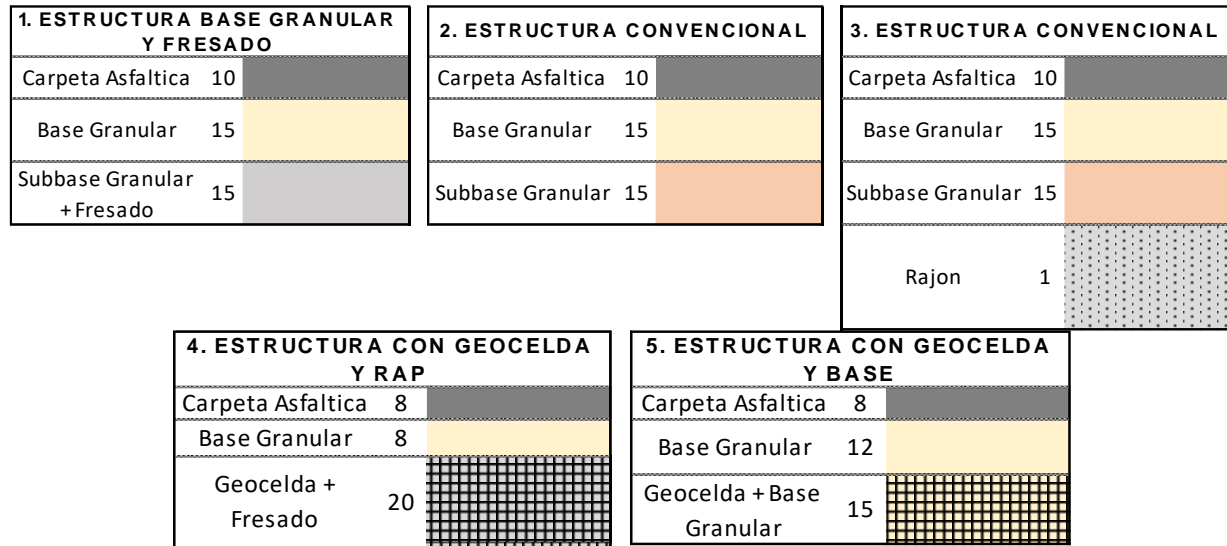


Ilustración 3 Estructuras implementadas

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Los resultados del CBR a partir de los de los ensayos de PDC, mostraron variación de hasta 13 veces para dos puntos diferentes, cabe mencionar que estos datos se desconocían en el momento de realizar los diseños, por lo tanto el tramo III con mejoramiento de la subrasante con piedra rajón estaba diseñado desde la abscisa K0+000 hasta la K0+145, una vez conocidos los estos datos de CBR, se tomó la decisión de rediseñar y por lo tanto se agregaron dos diseños diferentes.

Cabe resaltar que los CBR malos son los del carril izquierdo, debido a la presencia de individuos arbóreos en este costado; todos los tramos contemplan la instalación de un Geodrén para garantizar el flujo del drenaje.

Tabla 8 Resumen caracterización materiales y subrasante existente

SECTOR	ABSCIAS	AASHTO	USCS	Subrasante AASHTO	Subrasante USCS	PDC
I	K0+040	A-1-B	SM	A-7-5	CH	1%
I	K0+040	A-1-B	SM	A-7-6	CH	3.8%
II	K0+080	A-2-5	SM	A-7-5	MH	1%
II	K0+080	A-1-B	SM	A-7-5	MH	1%
III	K0+130	A-2-5	SM	A-7-5	MH	1%
III	K0+130	A-2-5	SM	A-7-5	MH	1%
IV	K0+170	A-2-4	SM	A-7-5	MH	1%
IV	K0+170	A-2-4	SM	A-7-5	MH	1%
V	K0+210	A-2-4	GM	A-7-5	MH	2%
V	K0+210	A-2-4	GM	A-7-5	MH	2.3%

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

6.2 Retrocálculo de los módulos de las capas estructurares.

Utilizando la metodología de retrocálculo directo, una vez realizado el ensayo FWD se inició al procesamiento de los datos, primero las deflexiones obtenidas se corrigieron por carga a 40 KN y la deflexión central fue corregida por carga y temperatura a 20°C.

Por cada tramo se tomaron dos puntos de deflexiones, uno en el carril derecho y el otro en el carril izquierdo esto con el fin de observar la diferencia ya que como se observó anteriormente hay una variación de CBR entre los carriles, en la Tabla 9 se observan las abscisas donde se tomaron cada uno de los puntos.

El ensayo FWD se realizó con el equipo JILS, de la empresa Geotecnia y Cimentaciones, se utilizaron 9 sensores los cuales se encontraban en las siguientes distancias: -20cm, 0cm, 30cm, 45cm, 60cm, 90cm, 120cm y 150cm. Para el procesamiento de la información no se tuvo en cuenta el sensor en -20cm y el sensor en 150cm.

Tabla 9 Corrección de las deflexiones por carga y temperatura

ABSCISA	Condiciones Ensayo		DEFLEXIONES MEDIDAS (Df_r), mm							DEFLEXIONES CORREGIDAS POR CARGA (Df_r), mm						DEFLEXIÓN CENTRAL corregida por carga y temperatura Df_0, mm	
	Carga aplicada (kN)	Temperatura pavimento °C	Df_0	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	Df_0	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5		Df_6
			Distancias al eje de la carga (r), mm							Distancias al eje de la carga (r), mm							
			0	200	300	450	600	900	1200	0	200	300	450	600	900		1200
K00+035	38.12	23.0	417.38	330.65	274.06	207.19	164.38	122.06	99.24	438	347	288	217	172	128	104	427
K00+035	38.44	23.0	410.45	328.02	272.53	206.49	162.96	121.04	98.30	427	341	284	215	170	126	102	417
K00+035	38.66	23.0	410.16	328.92	275.25	208.15	164.86	121.87	100.15	424	340	285	215	171	126	104	414
K00+055	38.44	23.0	391.10	321.03	267.52	194.85	150.66	104.42	83.61	407	334	278	203	157	109	87	397
K00+055	38.99	23.0	384.79	318.76	267.76	196.04	151.85	106.00	85.23	395	327	275	201	156	109	87	385
K00+055	39.09	23.0	381.98	318.00	268.35	196.79	152.70	106.72	85.74	391	325	275	201	156	109	88	381
K00+075	38.33	23.0	591.85	485.72	414.53	320.83	252.61	169.06	118.62	618	507	433	335	264	176	124	603
K00+075	38.55	23.0	583.91	483.72	413.29	321.47	253.29	169.75	119.53	606	502	429	334	263	176	124	591
K00+075	38.33	23.0	574.26	478.15	409.86	318.58	252.18	169.12	119.07	599	499	428	332	263	176	124	585
K00+095	37.68	23.0	607.05	491.64	406.72	303.27	228.60	151.33	112.30	644	522	432	322	243	161	119	629
K00+095	38.66	23.0	612.36	500.15	415.14	310.58	235.14	154.76	114.08	634	517	430	321	243	160	118	618
K00+095	38.99	23.0	611.22	500.67	418.27	312.40	235.69	155.78	115.13	627	514	429	320	242	160	118	612
K00+115	39.42	23.0	530.20	448.22	383.61	298.73	236.33	161.57	117.65	538	455	389	303	240	164	119	525
K00+115	39.85	23.0	524.72	445.76	383.84	300.87	238.29	164.07	119.60	527	447	385	302	239	165	120	514
K00+115	39.96	23.0	518.72	442.55	381.69	299.04	238.01	164.12	119.82	519	443	382	299	238	164	120	507
K00+135	39.31	23.0	435.47	358.63	299.76	227.25	175.03	117.77	88.70	443	365	305	231	178	120	90	432
K00+135	40.29	23.0	439.04	363.62	305.62	232.39	178.89	120.58	91.65	436	361	303	231	178	120	91	425

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

ABSCISA	Condiciones Ensayo		DEFLEXIONES MEDIDAS (Df_r), mm							DEFLEXIONES CORREGIDAS POR CARGA (Df_r), mm							DEFLEXIÓN CENTRAL corregida por carga y temperatura Df_0, mm
	Carga aplicada (kN)	Temperatura pavimento °C	Df_0	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	Df_0	Df_1	Df_2	Df_3	Df_4	Df_5	Df_6	
			Distancias al eje de la carga (r), mm							Distancias al eje de la carga (r), mm							
			0	200	300	450	600	900	1200	0	200	300	450	600	900	1200	
K00+135	40.18	23.0	432.10	360.09	303.20	231.13	178.28	120.25	90.75	430	358	302	230	177	120	90	420
K00+155	39.31	23.0	661.92	509.90	390.51	262.75	181.73	113.96	86.27	674	519	397	267	185	116	88	657
K00+155	38.77	23.0	638.65	496.65	383.10	259.05	179.53	112.24	85.94	659	512	395	267	185	116	89	643
K00+155	38.99	23.0	634.95	496.29	382.64	259.69	181.69	112.52	86.18	651	509	393	266	186	115	88	636
K00+175	39.42	23.0	614.86	498.16	408.09	303.70	227.33	146.81	108.04	624	505	414	308	231	149	110	609
K00+175	38.88	23.0	593.31	482.33	397.55	296.54	222.00	143.33	106.87	610	496	409	305	228	147	110	596
K00+175	39.64	23.0	599.17	488.33	402.61	300.74	225.92	146.49	108.79	605	493	406	303	228	148	110	590
K00+195	38.23	23.0	907.86	727.94	575.84	405.07	285.92	172.76	128.67	950	762	603	424	299	181	135	927
K00+195	38.55	23.0	889.75	719.44	568.24	400.69	283.26	170.17	125.87	923	747	590	416	294	177	131	901
K00+195	38.66	23.0	883.57	713.94	566.40	398.66	284.02	171.67	127.92	914	739	586	412	294	178	132	892
K00+210	38.77	23.0	793.50	635.20	510.01	358.17	257.10	154.95	109.86	819	655	526	370	265	160	113	799
K00+210	38.77	23.0	767.01	624.77	503.01	355.58	257.16	156.05	109.88	791	645	519	367	265	161	113	772
K00+210	39.20	23.0	757.24	618.32	500.00	354.19	256.85	156.55	110.55	773	631	510	361	262	160	113	754

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Una vez realizada la corrección se promediaron las deflexiones por cada abscisa, y estas fueron el dato de entrada para realizar el retrocálculo por EVERCALC.

Tabla 10 Deflexiones promedio

CARRIL	ABSCISA	Distancias al eje de la carga (r), mm						
		0	200	300	450	600	900	1200
D	K00+035	420	343	286	216	171	127	104
I	K00+055	388	329	276	202	157	109	88
D	K00+075	593	503	430	334	264	177	125
I	K00+095	620	518	431	322	243	161	119
D	K00+115	516	449	386	302	240	165	120
I	K00+135	426	362	304	231	178	120	91
D	K00+155	646	514	396	268	186	116	89
I	K00+175	599	499	410	306	230	149	110
D	K00+195	907	749	593	418	296	179	133
I	K00+210	775	644	519	366	265	161	114

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Inicialmente se modelizaron las estructuras con cada una de las capas correspondientes, pero los módulos obtenidos no estaban dentro de un rango de magnitud correcto, esto pasa cuando las estructuras son complejas y tienen más de tres capas, por lo anterior se tomaron las capas de geocelda y de piedra rajón como mejoramiento de la subrasante y las capas de base granular y subbase granular se tomaron como solo una, a continuación, se presenta los espesores de las estructuras modelizadas.

Tabla 11 Espesores de las estructuras modelizadas

Carpeta Asfáltica (cm)	Base Granular+ Subbase Granular (cm)	Base Granular + Fresado (cm)	Subrasante Mejorada (cm)
10		30	NO
10	30		NO
10	30		Piedra Rajón (25cm)
7.5	8		Geocelda con fresado (20cm)
7.5	12		Geocelda con subbase (15cm)

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

En el Anexo 2. Se presentan los resultados en detalle del procesamiento que se realizado en el software EVERCACL, a continuación, se observan los modulo obtenidos de cada uno de los cuencos de deflexiones, se puedo notar que hay variaciones entre los módulos retrocalculados en el mismo tramo, esto se debe a que en el carril izquierdo se presentaban daños severos por desecación debido a la presencia de individuos arbóreos los cuales invadían la vía con las raíces. Lo anterior también se notó en los resultados de CBR ya que también se encontró variación entre los carriles de los mismos tramos.

Tabla 12 Módulos Obtenidos por EVERCACL

CARRIL	ABSCISA	Carpeta Asfáltica	Base Granular+ Subbase Granular	Base Granular + Fresado	Subrasante
D	K00+035	3673		344	97
I	K00+055	5781		259	111
D	K00+075	7084	106		73
I	K00+095	4714	114		78
D	K00+115	8168	138		78
I	K00+135	7105	186		103
D	K00+155	6512	98		102
I	K00+175	7917	530		84
D	K00+195	6394	54		67
I	K00+210	8615	54		77

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Se realiza una comparación del módulo resiliente de la subrasante inicialmente obtenido con el ensayo PCD con el módulo final obtenido con el ensayo FWD, la estructura que obtuvo un mayor aporte de mejoramiento en la subrasante fue la IV con geoceldas llena de fresado, el aporte fue hasta 10 veces el módulo inicial; y la que menos aportó fue la estructura V, ya que esta era la de mejor CBR inicial, el aporte fue de tres veces el módulo inicial.

Tabla 13 Comparación del módulo resiliente de la subrasante

Modulo Resiliente Subrasante Mpa				
SECTOR	PDC	FWD	INCREMENTO	EQUIVALENCIA
I	10	97	87	10
I	38	111	73	3
II	10	73	63	7
II	10	78	68	8
III	13.5	78	64	6
III	11.1	103	92	9
IV	10	102	92	10
IV	10	84	74	8
V	23	67	44	3
V	23	77	54	3

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Adicionalmente se calcularon los parámetros de cada cuenco de deflexiones; el área es un indicador entre el pavimento y su soporte, el índice de curvatura superficial ICS da una idea de la rigidez de las capas asfálticas, el índice de daño de la base indica la deformación compresiva sobre la base granular y el índice de curvatura de la base que indica la deformación de la subrasante.

Tabla 14 Parámetros del cuenco de deflexión

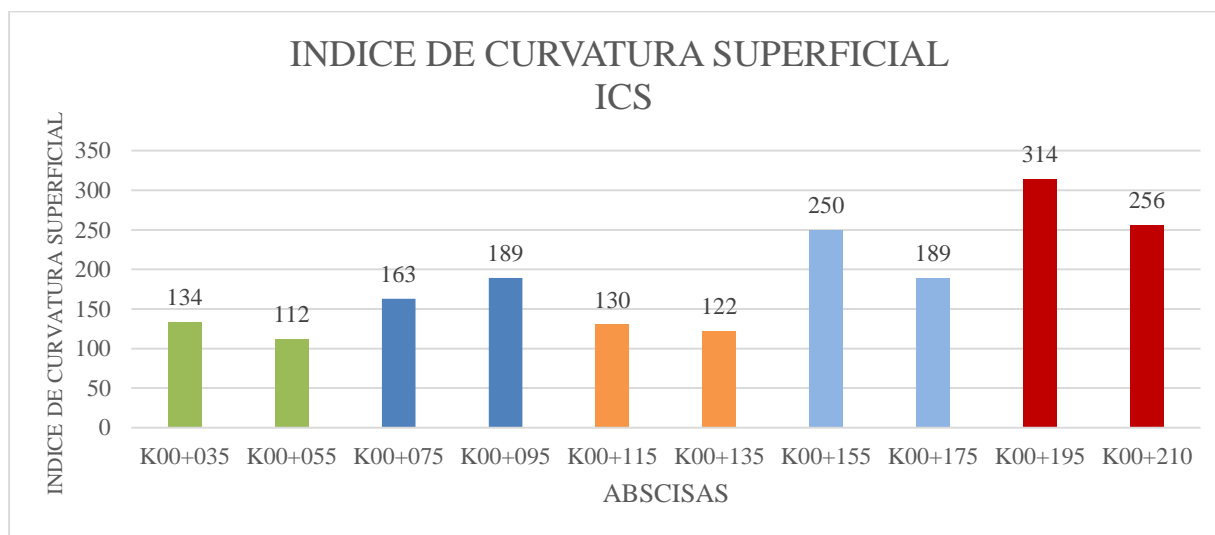
CARRIL	ABSCISA	DEFLEXIONES CORREGIDAS							PARAMETROS DEL CUENCO			
		0	200	300	450	600	900	1200	AREA	ICS	IDB	ICB
D	K00+035	420	343	286	216	171	127	104	21	134	115	44
I	K00+055	388	329	276	202	157	109	88	21	112	119	48
D	K00+075	593	503	430	334	264	177	125	22	163	166	87
I	K00+095	620	518	431	322	243	161	119	21	189	188	82
D	K00+115	516	449	386	302	240	165	120	22	130	146	75
I	K00+135	426	362	304	231	178	120	91	21	122	126	58
D	K00+155	646	514	396	268	186	116	89	18	250	210	70
I	K00+175	599	499	410	306	230	149	110	20	189	180	81
D	K00+195	907	749	593	418	296	179	133	19	314	297	117
I	K00+210	775	644	519	366	265	161	114	19	256	254	104

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

El parámetro área según los rangos presentados (INVIAS, 2008), los valores entre el 21 y 30 son estructuras con capas asfálticas gruesas, lo cual se refleja en el tramo I, II, III y los valores entre 16 y 21 representan estructuras con capas asfálticas delgadas como lo es el tramo IV y V.

En la Grafica 1 se observa que los ICS más altos son los de las estructuras que tienen menor capacidad estructural, es decir las estructuras con la geocelda, los otros tramos tienen un comportamiento similar, este índice da una idea de la rigidez de la carpeta asfáltica, lo anterior se presenta porque los primeros tramos tienen un espesor de 10 cm y los tramos de geocelda tienen un espesor de 7.5 cm.

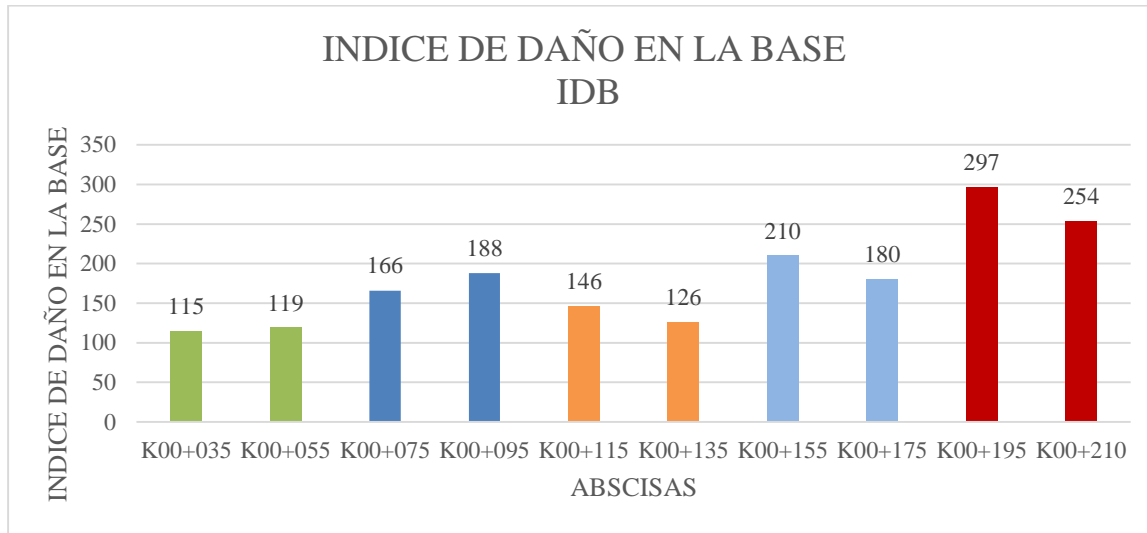
Grafica 1 Índice de Curvatura Superficial



Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

El índice de daño en la base indica que el tramo V tienen menor desempeño con respecto a las otras, y la que mejor se desempeña es la estructura I que se compone de la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase mezclada con fresado en una proporción de 70% - 30%.

Grafica 2 Índice de Daño en la Base



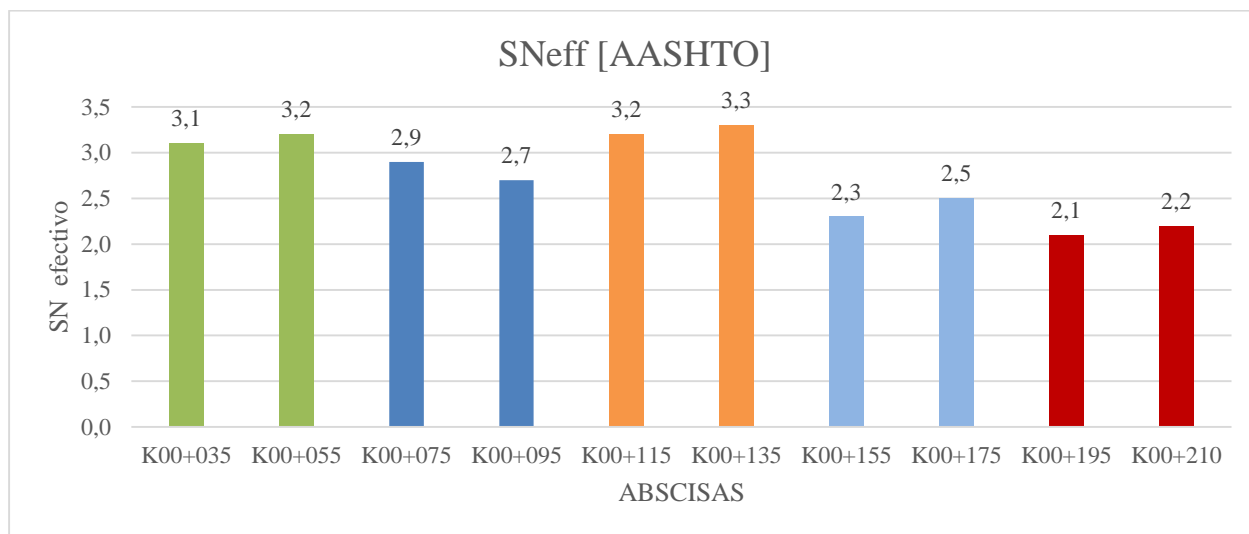
Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Existen varias aproximaciones para la estimación de la capacidad estructural de un pavimento asfáltico en servicio a partir de las deflexiones FWD, una de ellas es la determinación del número estructural efectivo (S_{Neff}), definido en la guía de diseño AASHTO-93, la presente guía no establece niveles jerárquicos de información. En la Grafica 3 se reitera lo anterior mencionado, los tramos I, II y III tienen mejor capacidad estructural en comparación con los tramos IV y V.

ABSCISA	Ep [Módulo del pavimento] MPa	S _{Neff} [AASHTO]
K00+035	565	3.1
K00+055	611	3.2
K00+075	430	2.9
K00+095	372	2.7
K00+115	485	3.2
K00+135	542	3.3
K00+155	306	2.3
K00+175	418	2.5
K00+195	244	2.1
K00+210	298	2.2

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Grafica 3 Numero Estructural Efectivo



Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

6.3 Análisis económico y rendimiento

Se realizó la consolidación proveniente de campo con las cantidades utilizadas en cada uno de los tramos, estas cantidades son verificadas y costeadas por el personal a cargo, cabe mencionar que durante la ejecución se presentaron tiempos muertos los cuales no fueron tenidos en cuenta para sacar un rendimiento óptimo.

Para la entidad el costo de este tramo de prueba se sacó como un global, por lo tanto para determinar las cantidades y el costo por tramo se volvieron a revisar tramo por tramo, se aclara que los costos de ferretería, y de los arreglos de las rampas de acceso que se arreglaron se dividieron en cantidades iguales, ya que el objetivo es sacar el costo de la intervención vial y no la del espacio público, esto para poder comparar las estructuras viales establecidas.

En la Tabla 15 y la Grafica 4 se presentan los valores totales por cada tramo, el tramo más costoso fue el V el cual corresponde a la geocelda llena con subbase granular, luego base granular y por último la carpeta asfáltica; y el más económico es el tramo II, el cual es el convencional sin

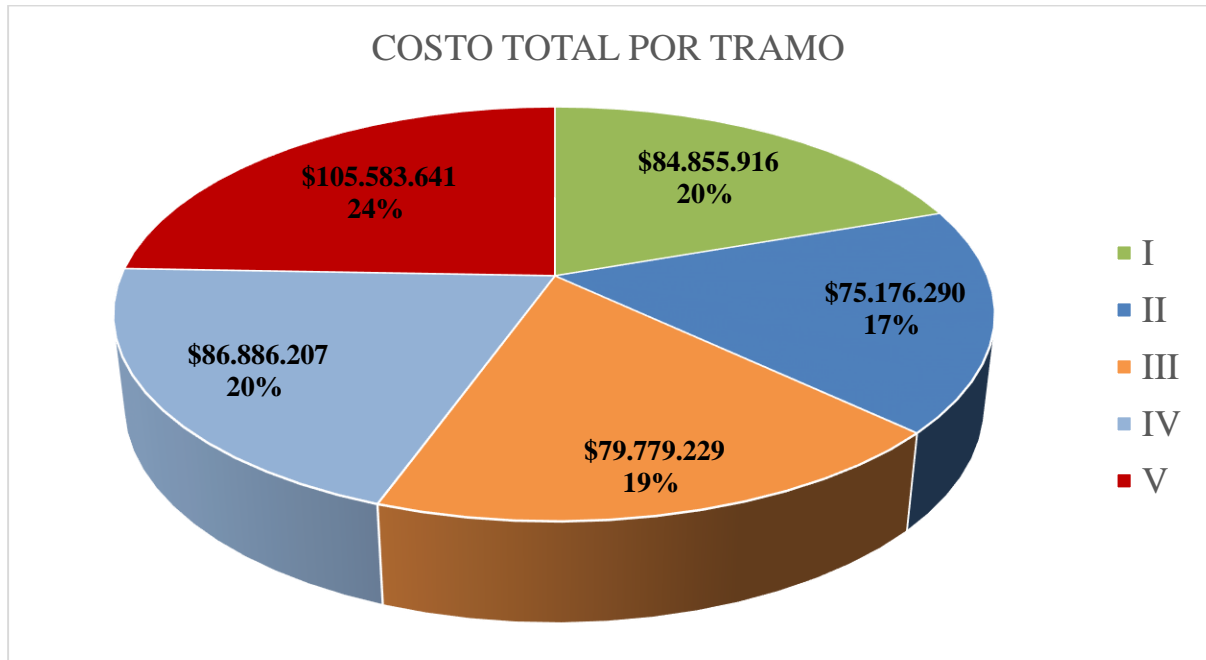
piedra rajón. Comparando los tramos IV y V que son con geoceldas se observa que la utilizada con fresado sale más económica, por lo tanto, es una buena alternativa en cuanto a costos.

Tabla 15 Costo total por tramo intervenido

TRAMO	VALOR TOTAL	% GASTADO
I	\$ 84.855.916	20%
II	\$ 75.176.290	17%
III	\$ 79.779.229	18%
IV	\$ 86.886.207	20%
V	\$ 105.583.641	24%
\$ 432.281.283		

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Grafica 4 Costo total por tramo



Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

A continuación, se presentan los costos por tipo de insumos consumidos para cada tramo, en todos los tramos se observa el mismo comportamiento donde predominan los costos de materiales

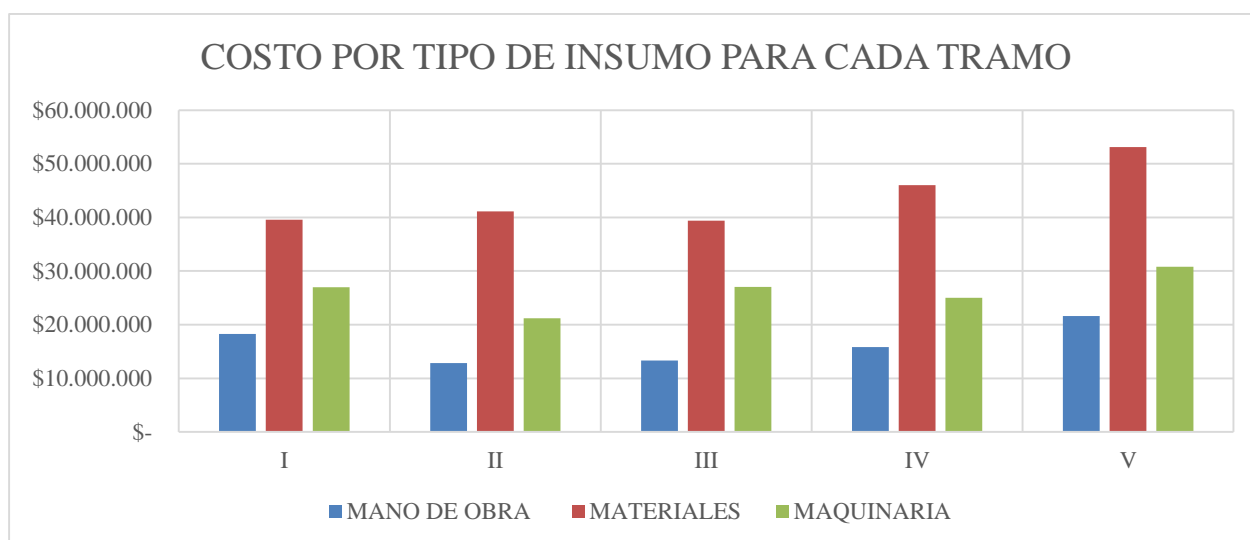
en un 51% aproximadamente, luego los costos de maquinaria en un 30% aproximadamente y por último los costos de mano de obra en un 19% aproximadamente.

Tabla 16 Costos por tipo de insumos para cada tramo

INSUMOS	I	II	III	IV	V
MANO DE OBRA	\$ 18.301.277	\$ 12.856.649	\$ 13.351.028	\$ 15.852.897	\$ 21.604.599
MATERIALES	\$ 39.583.298	\$ 41.130.041	\$ 39.405.022	\$ 46.013.057	\$ 53.147.157
MAQUINARIA	\$ 26.971.342	\$ 21.189.599	\$ 27.023.179	\$ 25.020.252	\$ 30.831.885
TOTAL	\$ 84.855.916	\$ 75.176.290	\$ 79.779.229	\$ 86.886.207	\$ 105.583.641

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Grafica 5 Costos por tipo de insumos para cada tramo



Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

En cuanto a los rendimientos se obtuvieron en metro cubico por horas cuadrilla, estos datos se obtuvieron una vez revisada la hoja de vida del segmento vial, se aclara que no se tuvieron en cuenta los tiempos muertos para obtener el rendimiento óptimo.

Tabla 17 Detalle del rendimiento por tramo

1. ESTRUCTURA (BG- SBG+FRESADO)		2. ESTRUCTURA CONVENCIONAL (BG - SBG)		3. ESTRUCTURA CONVENCIONAL (BG - SBG - RAJON)	
LONGITUD [m]	40	LONGITUD [m]	40	LONGITUD [m]	40
ANCHO IDEAL [m]	6.01	ANCHO IDEAL [m]	6.01	ANCHO IDEAL [m]	6.01
ESPESOR [m]	0.40	ESPESOR [m]	0.40	ESPESOR [m]	0.65
VOLUMEN COMP [m3]	96.16	VOLUMEN COMP [m3]	96.16	VOLUMEN COMP [m3]	156.26
JORNADAS	22.25	JORNADAS	16.15	JORNADAS	15.94
HORA CUADRILLA	178.00	HORA CUADRILLA	129.20	HORA CUADRILLA	127.52
RENDIMIENTO [m3/hc]	0.54	RENDIMIENTO [m3/hc]	0.74	RENDIMIENTO [m3/hc]	1.23

4. ESTRUCTURA (BG - GEOCELDA+FRESADO)		5. ESTRUCTURA (BG - GEOCELDA+BG)	
LONGITUD [m]	40	LONGITUD [m]	40
ANCHO IDEAL [m]	6.01	ANCHO IDEAL [m]	6.01
ESPESOR [m]	0.36	ESPESOR [m]	0.35
VOLUMEN COMP [m3]	86.54	VOLUMEN COMP [m3]	84.14
JORNADAS	21.13	JORNADAS	27.36
HORA CUADRILLA	169.04	HORA CUADRILLA	218.88
RENDIMIENTO [m3/hc]	0.51	RENDIMIENTO [m3/hc]	0.38

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

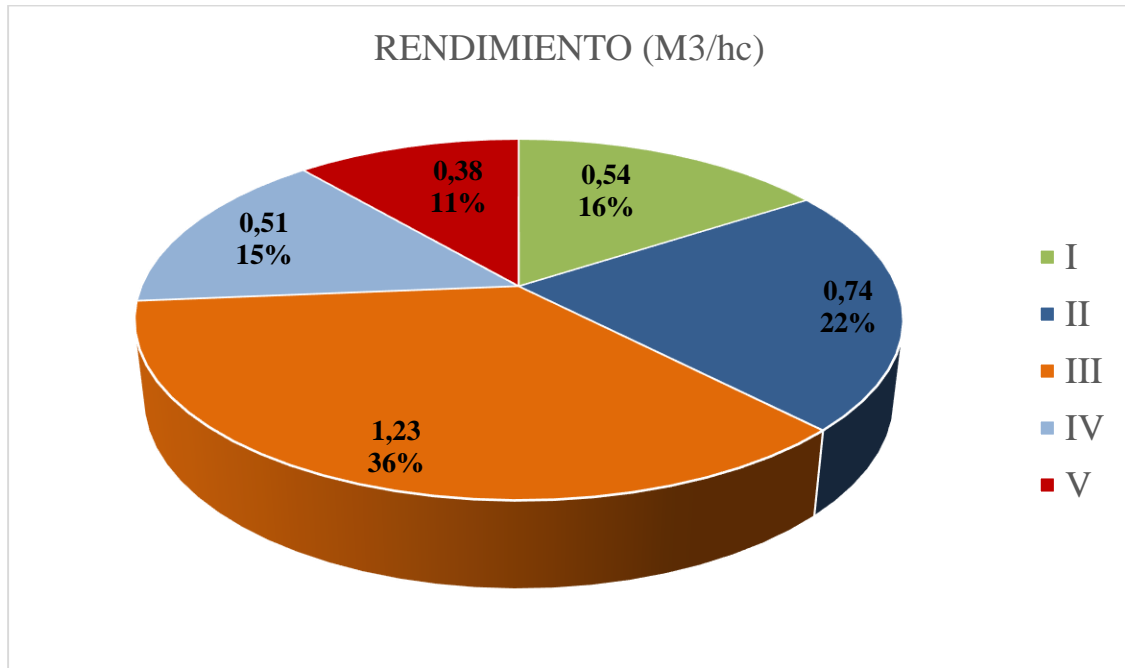
En la Tabla 18 y Grafica 6 se observa el comportamiento de los rendimientos obtenidos en cada tramo, donde el tramo III es el de mayor rendimiento, luego le sigue el tramo II, en seguida el tramo I, y los tramos que tienen menor rendimiento son los de geocelda ósea el tramo IV y el tramo V; esto quiere que al personal le rindió hacer los tramos convencionales ya que conocen y tienen la experticia para realizar estas actividades, en cuanto a los tramos con geocelda las actividades fueron pausadas ya que al personal se capacito en el sitio.

Tabla 18 Resumen de los rendimientos por tramo

TRAMOS	RENDIMIENTO [m3/hc]
I BG- SBG+FRESADO	0.54
II BG - SBG	0.74
III BG - SBG - RAJON	1.23
IV BG - GEOCELDA+FRESADO	0.51
V BG - GEOCELDA+BG	0.38

Fuente: (Elaborado por los Autores, 2018)

Grafica 6 Rendimientos por tramo



Fuente:

(Elaborado por los Autores, 2018)

7 CONCLUSIONES

Se definieron 5 tramos con estructuras diferentes, los cuales I, II y III fueron diseñados por la UAERMV y los tramos IV y V por el proveedor de las geocelda. Una vez iniciadas las actividades de excavación se tomaron ensayos de CPD con los cuales se obtuvieron el CBR, este parámetro vario un poco en el carril izquierdo debido a la presencia de individuos arbóreos, los cuales invadían la calzada afectándola con deformación debido a la presencia de humedad.

Las estructuras planteadas se modelizaron con el número de capas existente pero los datos obtenidos no estaban en un rango que representaran la capacidad estructural de pavimento construido, por lo tanto, las estructuras se modelizaron en tres capas.

La estructura que obtuvo un mayor aporte de mejoramiento en la subrasante con respecto a la tomada inicialmente con el ensayo PCD, fue la IV con geoceldas llena de fresado, el aporte fue hasta 10 veces el módulo inicial; y la que menos apporto fue la estructura V, ya que esta era la de mejor CBR inicial, el aporte fue de tres veces el módulo inicial.

Según los rangos del parámetro área, los valores entre el 21 y 30 son estructuras con capas asfálticas gruesas, lo cual se refleja en el tramo I, II, III y los valores entre 16 y 21 representan estructuras con capas asfálticas delgadas como lo es el tramo IV y V.

El índice de curvatura superficial ICS más altos son los de las estructuras que tienen menor capacidad estructural, es decir las estructuras con la geocelda, lo anterior se presenta porque los primeros tramos tienen un espesor de 10 cm y los tramos de geocelda tienen un espesor de 7.5 cm.

El índice de daño en la base IDB indica que el tramo V tienen menor desempeño con respecto a las otras, y la que mejor se desempeña es la estructura I que se compone de la carpeta asfáltica, la base granular y la subbase mezclada con fresado en una proporción de 70% - 30%.

El número estructural efectivo (SN eff) en los tramos I, II y III tienen mejor capacidad estructural en comparación con los tramos IV y V.

El tramo más costoso fue el V el cual corresponde a la geocelda llena con subbase granular y el más económico es el tramo II, el cual es el convencional sin piedra rajón; comparando los tramos IV y V que son con geoceldas se observa que la utilizada con fresado sale más económica.

El tramo III obtuvo el mayor rendimiento, luego le sigue el tramo II, en seguida el tramo I, y los tramos que tienen menor rendimiento son los de geocelda ósea el tramo IV y el tramo V; esto quiere que al personal le rindió hacer los tramos convencionales ya que conocen y tienen la experticia para realizar estas actividades.

La Unidad de Mantenimiento Vial puede mitigar la generación de RCD, utilizando bases mezcladas con el fresado o el fresado como lleno de las Geoceldas, ya que este material tiene un comportamiento favorable.

8 RECOMENDACIONES

Se debe contar con personal capacitado para realizar las actividades que conlleva la instalación y lleno de Geoceldas. Para las cuadrillas y operadores de maquinaria fue un proceso de enseñanza y aprendizaje, lo que prolongo el tiempo de intervención en los tramos 4 y 5. El tiempo óptimo de intervención se alcanza con buenas prácticas de manejo y procedimientos de instalación en obra.

Las Geoceldas no se debe instalar el CBR menores al 1% ya que esta puede llegar a enterrarse, ya que tiene un buen comportamiento lateral pero no vertical, se debe revisar la posibilidad de instalar un geotextil no tejido para evitar esto.

Las Geoceldas se debe implementar en tramos viales en los que se encuentren limitantes en cuanto a profundidad de las redes, presencia de deformaciones severas a causa de la presencia de zonas verdes.

La Unidad de Mantenimiento Vial deberá realizar un protocolo, donde se describa la maquinaria a utilizar para cada una de las actividades y el procedimiento de estas, para las intervenciones de rehabilitación con Geocelda.

Según los proveedores de las Geoceldas, si los tramos son más largos se pueden obtener mejores rendimientos, si el personal está capacitado.

9 BIBLIOGRAFÍA

AASHTO, A. A. (1993). Guide for Design of Pavement Structures.

Acosta, M. A. (2010). *Guía de uso de geosintéticos*. Bogotá: IDU.

CONFICELL LS. (s.f.). Guía de Manejo e Instalación de Geoceldas para Sistemas de Soporte de Carga Aplicación de Geoceldas .

Corredor, G. (2008). Maestría en Vías Terrestres, Modulo III Diseño de pavimentos I.

El Concejo de Bogotá, D. (2016). Auerdo 645. *Por el cual se adopta El Plan de Desarrollo Económico, Social, Ambiental y de Obras Públicas para Bogotá D.C. 2016 - 2020 "Bogotá Mejor Para Todos"*.

El Concejo de Bogotá, D. C. (2006). Acuerdo 257. *Por el cual se dictan normas básicas sobre la estructura, organización y funcionamiento de los organismos y de las entidades de Bogotá, Distrito Capital, y se expiden otras disposiciones*.

Elaborado por los Autores. (2018).

GI. (2017). IMV-PC Planes de Calidad de las Actividades Version 4.

Gonzalez, C. C. (2014). Comparativo técnico, económico, de tiempos de ejecución y tiempos de servicio entre sistemas constructivos convencionales y sistemas donde se usa la geo-celda tridimensional, en vías secundarias de la ciudad de bogotá, con características similares en la . Bogota: Universidad Catolica De Colombia .

IDU. (2010). Guía Para el Buen Uso de Geosintéticos.

IDU. (2013). Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá D.C.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

IDU, I. d. (2018). *GISIDU*. Obtenido de <http://gisidu.idu.gov.co>

IDU-ET. (2011). Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para
Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público. Bogotá D.C.

INV-E. (2007). Método para medir deflexiones mediante deflectómetro de impacto FWD. Bogotá

INVIAS. (2008). *Guia de Rehabilitacion*.

Javeriana, U. (2011). *Tesis de pregrado, Estudio del comportamiento de un material de subrasante típico de Bogotá estabilizado con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga mediante pruebas de laboratorio* . Bogotá. Colombia.

Movilidad, S. D. (2017). Concepto Técnico No 16: Procedimiento para gestionar los Planes de Manejo de Tránsito.

PAVCO. (2014). Ficha técnica Refuerzo de vías permanentes con GEOCELDA.

Reyes, R. (2015). *Materiales Contruccion y Diseño*. Bogotá: ECO Ediciones.

Rondón&Reyes. (2015). *Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: ECO Ediciones.

SA, G. (Argentina de 2014). *Geoceldas SA tecnología de confinamiento celular*. Obtenido de <https://www.geoceldas.com/historia>

Sabaneta, M. d. (2009). Aforos y estudios de tránsito en Carrera 46 entre calles 75 y 77 sur, vías adyacentes y obras complementarias.

Sabogal, F. S. (2008). *Diseño de Paviemntos Asfalticos Para Calles y Carreteras* . Bogotá: Escuela Colombiana de Ingenieros.

Sanat Pokharel, M. N. (2010). Innovation in geotechnical and materials engineering . *Conference of the Transportation Association of Canada.*

Sanat Pokharel, M. N. (2017). Innovation in geotechnical and materials engineering,. *Conference of the, Transportation Association of Canada.*

Secretaria de Medio Ambiente Distrital. (2014). Resolución No. 0242. *Por la cual se adoptan los lineamientos para la formulación, concertación, implementación, evaluación, control y seguimiento del Plan Institucional de Gestión Ambiental –PIGA.*

SMVL. (2016). PDV-CP-001 Caracterizacion Planificacion del Desarrollo Vial Local Version 5.

SMVL. (2016). PDV-PR-001 Procedimiento Evaluacion de Vias Version 4.0.

UAERMV. (2017). *Prestar el servicio de transporte de residuos de construcción y demolición RCD, ya sean reutilizables o aprovechables, o de disposición final en escombreras autorizadas.*

UAERMV. (2018). Prestar el Servicio de Laboratorio de Suelos para la Elaboración de Estudios y Diseños de Pavimentos en la Subdirección Técnica de Mejoramiento de la Malla Vial Local de la UAERMV Ficha Técnica - Requerimientos y Especificaciones Mínimas De Contrato.

UMV. (2018). *Unidad Administrativa Especial de Rehabilitacion y Mantenimiento Vial.*

Obtenido de <http://www.umv.gov.co/portal/>

Valparaiso, U. C. (2003). Determinación de Modulo de Reacción.

Varela, L. R. (2002). *Pavement Condition Index (PCI) para pavimentos.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

10 ANEXOS

10.1 Registro fotográfico de la intervención realizada, antes, durante, después y toma de los ensayos.



Ilustración 4 Fotografías del antes de la intervención

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 5 Fotografías de la toma de ensayos.



Ilustración 6 Fotografías inicio de excavación y fresado acopiado.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 7 Fotografías instalación de geotextil fibrilado



Ilustración 8 Fotografías instalación de geoceldas.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 9 Fotografías llenado de las geoceldas con subbase granular y con fresado.



Ilustración 10 Fotografías ensayos de placa a los tramos de geoceldas con subbase granular y con fresado.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 11 Fotografías instalación de carpeta asfáltica del tramo de las geoceldas con subbase granular y con fresado.



Ilustración 12 Fotografías instalación de Geodrén, adecuación de sumideros reglo de rampas de acceso.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 13 Fotografías inicio del tramo con piedra rajaón.



Ilustración 14 Fotografías inflación de base en los tramos convencionales, liberación de la capa.



Ilustración 15 Fotografías imprimación de los tramos convencionales.



Ilustración 16 Fotografías rampas de acceso.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 17 Fotorgrafías instalación de carpeta asfáltica.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.



Ilustración 18 Fotografías toma de datos del ensayo FWD.

Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

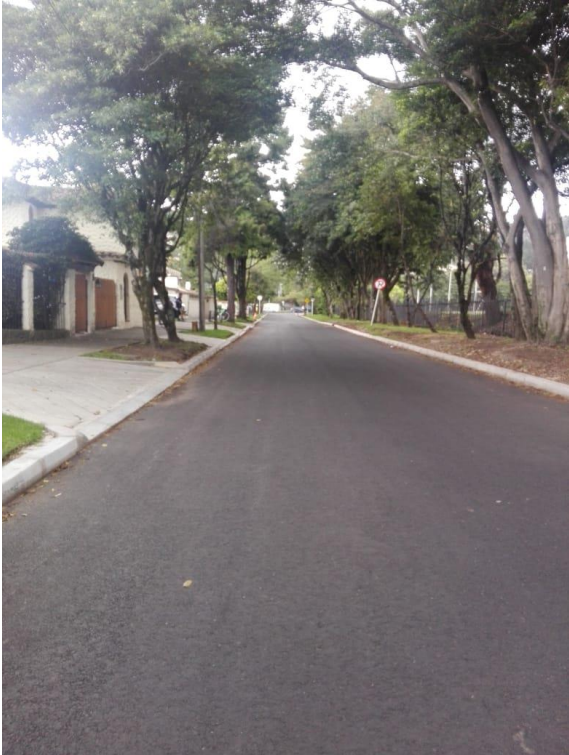


Ilustración 19 Fotografías de terminado del segmento vial.

10.2 Resultados obtenidos por el software EVERCACL

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

Route: TRAMO 1 CARRIL DERECHO K0+035
 Plate Radius (cm): 15.0
 No of Sensors: 7
 Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0

No of Layers: 3
 Stiff Layer: No
 P-Ratio: .350 .350 .400

Station: 1
 Thickness (cm): 10.00 30.00

No of Drops: 1
 Average RMS Error(%): 3.63
 Pavement Temperature (C): N/A

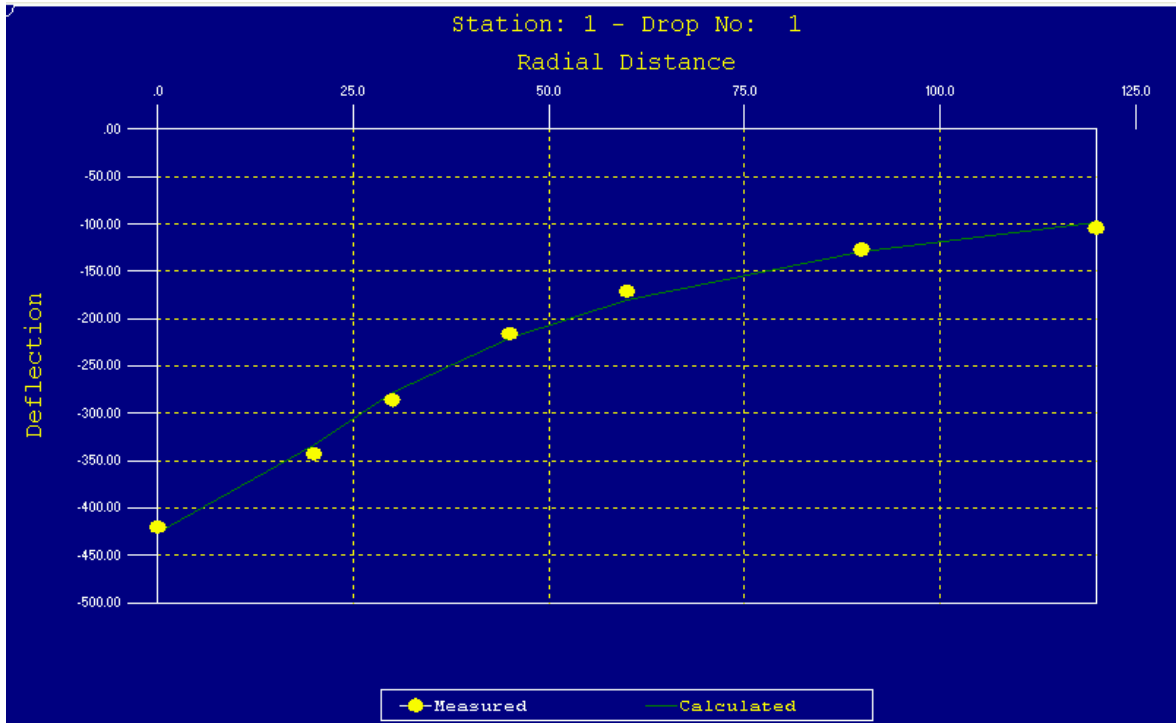
Drop No: 1
 Convergence: Close to Optimum (4)

Load (N): 40000.0
 No of Iterations: 5
 RMS Error (%): 3.63

Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	420.000	343.000	286.000	216.000	171.000	127.000	104.000
Calculated Deflection (microns):	425.586	332.772	278.490	220.403	180.589	129.188	97.744
Difference (%):	-1.33	2.98	2.63	-2.04	-5.61	-1.72	6.02

Layer No:	1	2	3
Seed Moduli (MPa):	1500.00	100.00	50.00
Calculated Moduli (MPa):	3672.77	344.49	96.64

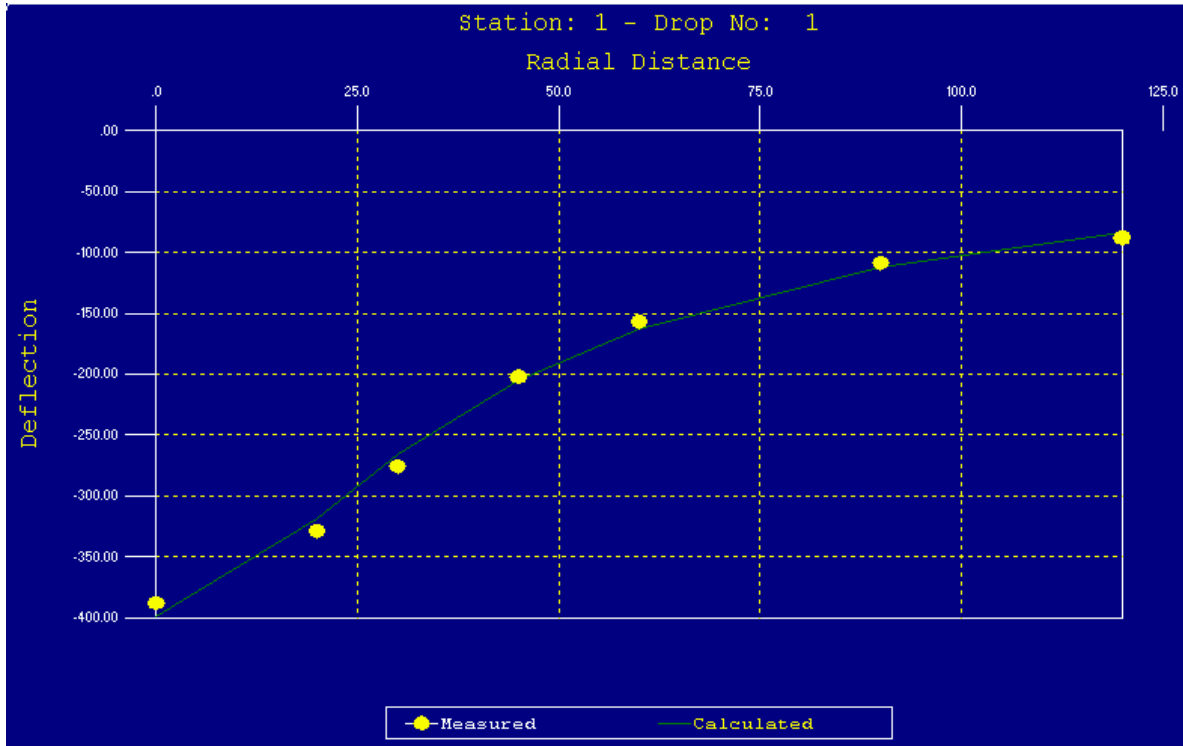
Layer No:	1	2	3
Radial Distance (cm):	.00	.00	.00
Position:	Bottom	Middle	Top
Vertical Stress (kPa):	-261.21	-106.55	-43.70
Radial Stress (kPa):	1032.89	23.38	.98
Bulk Stress (kPa):	1804.58	-59.79	-41.73
Deviator Stress (kPa):	-1294.10	-129.93	-44.68
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-267.98	-356.80	-460.31
Radial Strain (10 ⁻⁶):	207.69	152.37	186.98



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

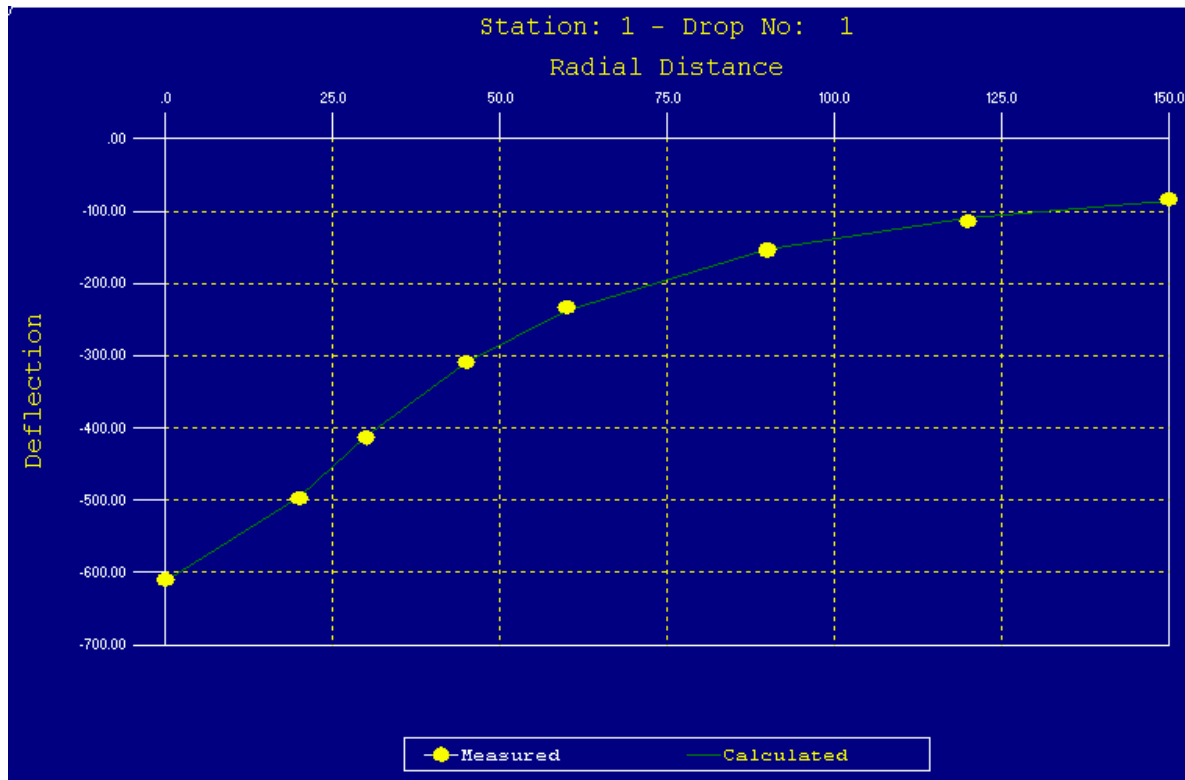
Route: TRAMO 1 CARRIL IZQUIERDO K0+055							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): 3.49			
Thickness (cm): 10.00 30.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 6			
Convergence: Close to Optimum (4)				RMS Error (%): 3.49			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	388.000	329.000	276.000	202.000	157.000	109.000	88.000
Calculated Deflection (microns):	398.841	318.358	265.854	205.357	163.273	112.056	83.425
Difference (%):	-2.79	3.23	3.68	-1.66	-4.00	-2.80	5.20
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		100.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	5781.13		259.37		111.37		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-193.21		-90.73		-45.54		
Radial Stress (kPa):	1635.38		11.12		.10		
Bulk Stress (kPa):	3077.54		-68.49		-45.35		
Deviator Stress (kPa):	-1828.59		-101.85		-45.64		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-231.44		-379.81		-409.63		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	195.57		150.29		164.09		



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

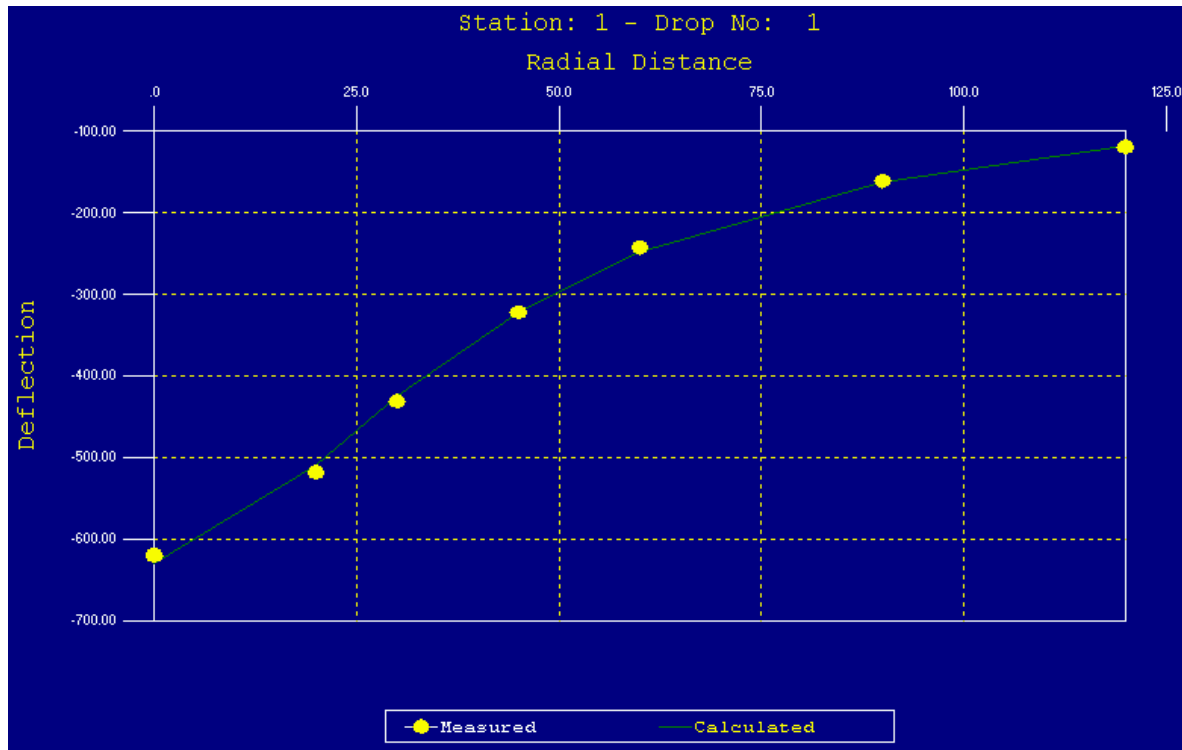
Route: TRAMO 2 CARRIL DERECHO K0+075							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): .74			
Thickness (cm): 10.00 30.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 4			
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): .74			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	593.000	503.000	430.000	334.000	264.000	177.000	125.000
Calculated Deflection (microns):	594.726	499.786	429.000	336.453	265.179	174.502	125.965
Difference (%):	-.29	.64	.23	-.73	-.45	1.41	-.77
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		100.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	7084.43		105.66		73.46		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-113.45		-65.17		-40.50		
Radial Stress (kPa):	2573.75		-.80		-2.37		
Bulk Stress (kPa):	5034.05		-66.77		-45.25		
Deviator Stress (kPa):	-2687.21		-64.38		-38.12		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-270.32		-611.55		-525.46		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	241.75		210.98		201.13		



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

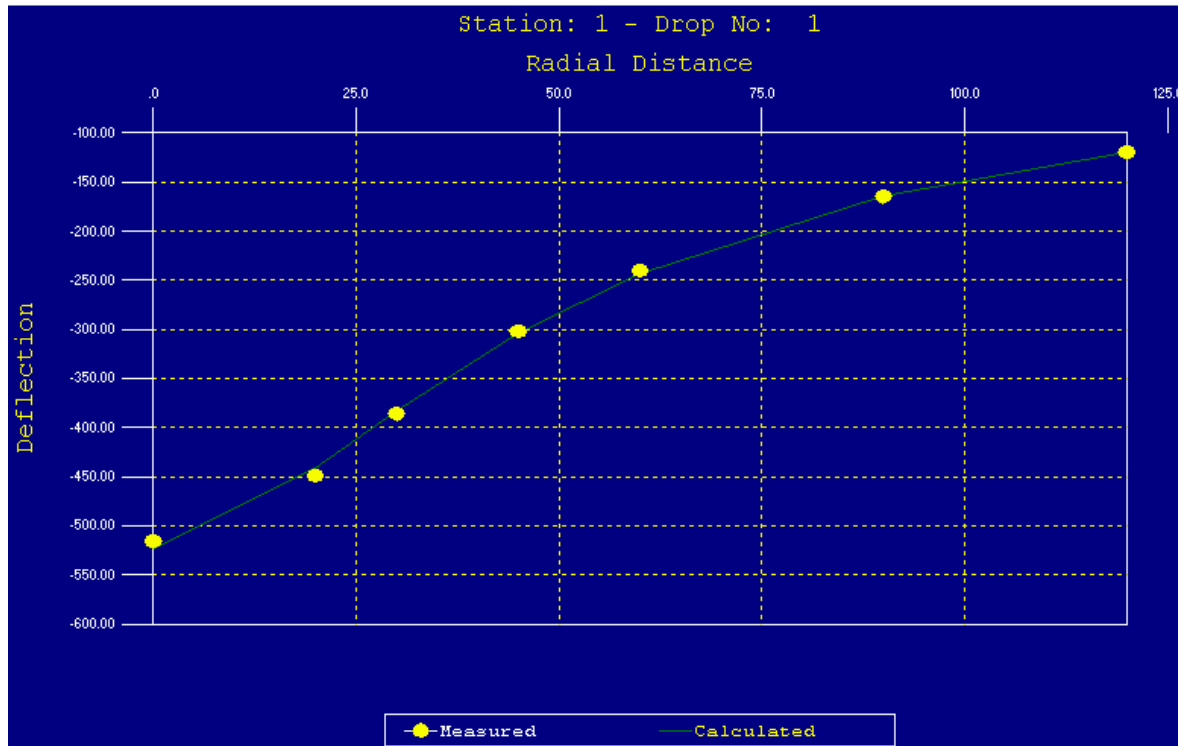
Route: TRAMO 2 CARRIL IZQUIERDO K0+095							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): 1.40			
Thickness (cm): 10.00 30.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 5			
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.40			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	620.000	518.000	431.000	322.000	243.000	161.000	119.000
Calculated Deflection (microns):	630.552	509.480	424.848	321.780	248.196	161.575	117.579
Difference (%):	-1.70	1.64	1.43	.07	-2.14	-.36	1.19
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		100.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	4713.91		113.70		77.75		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-146.29		-79.33		-46.79		
Radial Stress (kPa):	2134.01		.52		-1.84		
Bulk Stress (kPa):	4121.73		-78.29		-50.48		
Deviator Stress (kPa):	-2280.31		-79.86		-44.95		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-347.93		-700.93		-582.88		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	305.12		247.19		226.51		



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

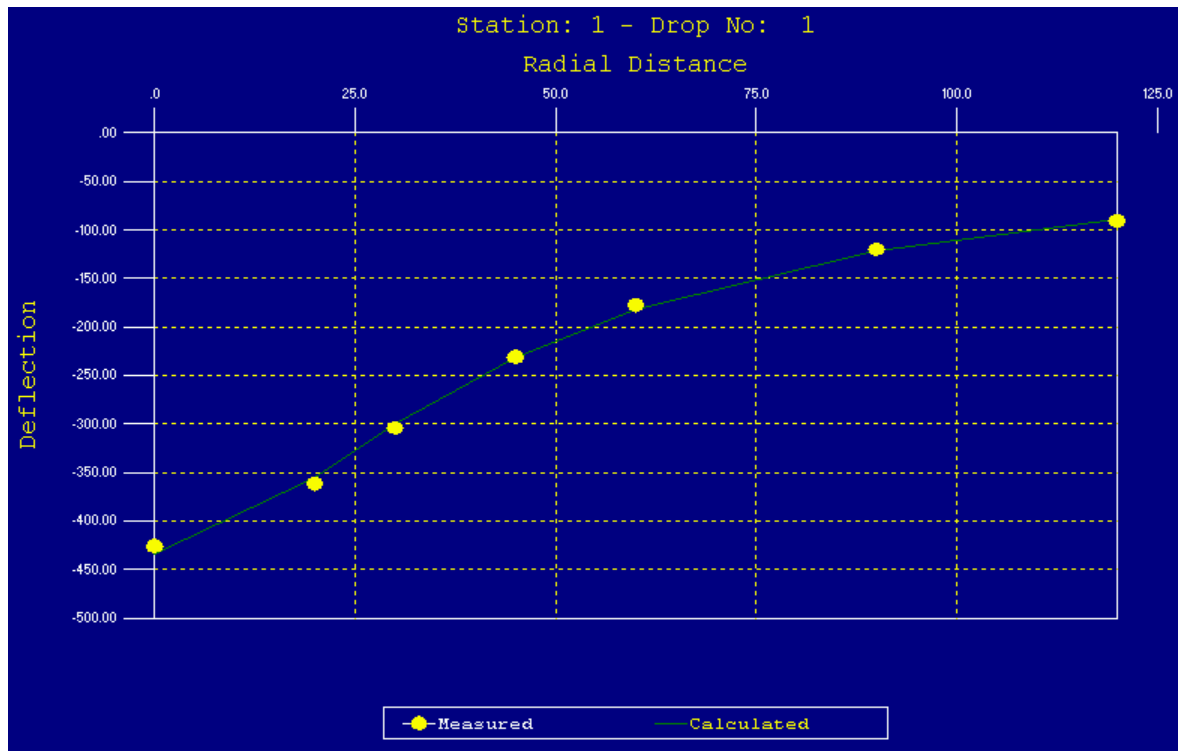
Route: TRAMO 3 CARRIL DERECHO K0+115							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): 1.03			
Thickness (cm): 10.00 30.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 5			
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.03			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	516.000	449.000	386.000	302.000	240.000	165.000	120.000
Calculated Deflection (microns):	522.707	442.045	382.138	303.808	243.054	164.011	119.884
Difference (%):	-1.30	1.55	1.00	-.60	-1.27	.60	.10
Layer No:			1			2	3
Seed Moduli (MPa):			1500.00			100.00	50.00
Calculated Moduli (MPa):			8168.34			138.39	77.73
Layer No:			1			2	3
Radial Distance (cm):			.00			.00	.00
Position:			Bottom			Middle	Top
Vertical Stress (kPa):			-119.43			-65.41	-38.75
Radial Stress (kPa):			2502.65			2.71	-1.57
Bulk Stress (kPa):			4885.87			-60.00	-41.90
Deviator Stress (kPa):			-2622.08			-68.12	-37.18
Vertical Strain (10 ⁻⁶):			-229.09			-486.36	-482.38
Radial Strain (10 ⁻⁶):			204.27			178.14	187.28



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

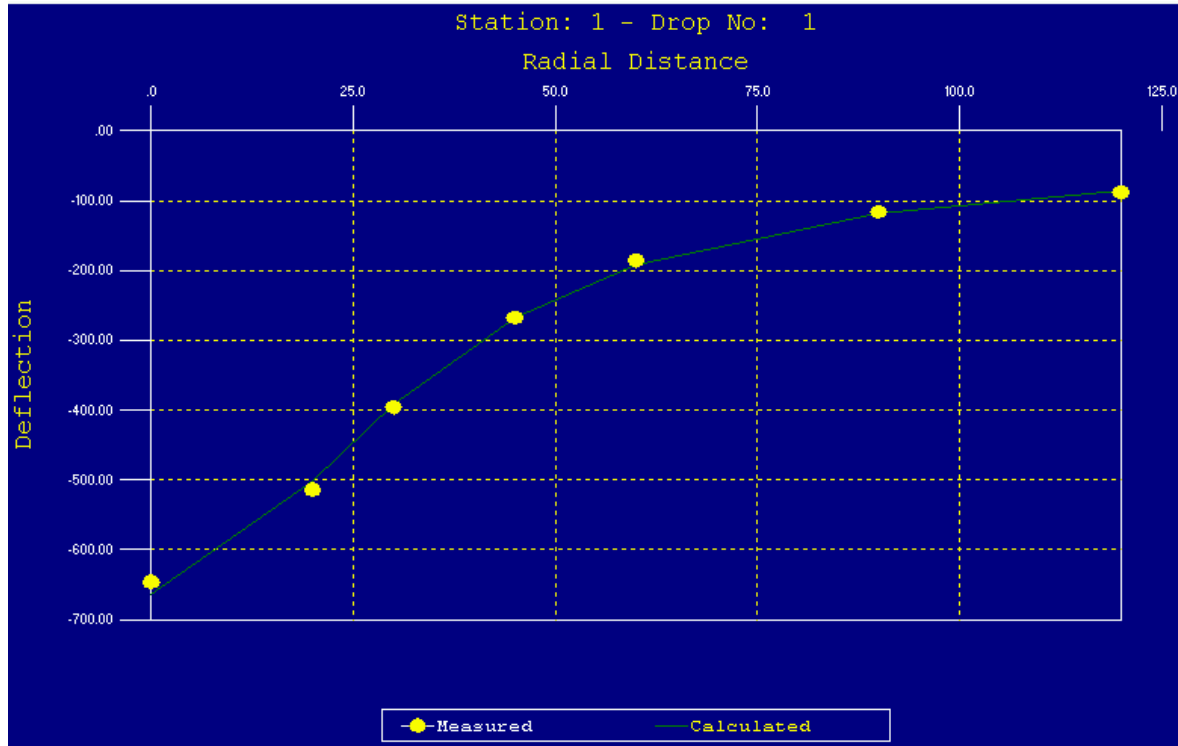
Route: TRAMO 3 CARRIL IZQUIERDO K0+135		No of Layers: 3					
Plate Radius (cm): 15.0		Stiff Layer: No					
No of Sensors: 7		P-Ratio: .350 .350 .400					
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0							
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): 1.69			
Thickness (cm): 10.00 30.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 6			
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.69			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	426.000	362.000	304.000	231.000	178.000	120.000	91.000
Calculated Deflection (microns):	434.180	354.768	299.233	231.165	181.764	121.489	89.197
Difference (%):	-1.92	2.00	1.57	-.07	-2.11	-1.24	1.98
Layer No:			1		2		3
Seed Moduli (MPa):			1500.00		100.00		50.00
Calculated Moduli (MPa):			7105.13		186.39		103.47
Layer No:			1		2		3
Radial Distance (cm):			.00		.00		.00
Position:			Bottom		Middle		Top
Vertical Stress (kPa):			-150.55		-78.28		-44.10
Radial Stress (kPa):			2092.39		4.25		-1.07
Bulk Stress (kPa):			4034.23		-69.79		-46.25
Deviator Stress (kPa):			-2242.95		-82.53		-43.03
Vertical Strain (10 ⁻⁶):			-227.33		-435.95		-417.91
Radial Strain (10 ⁻⁶):			198.84		161.81		164.25



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

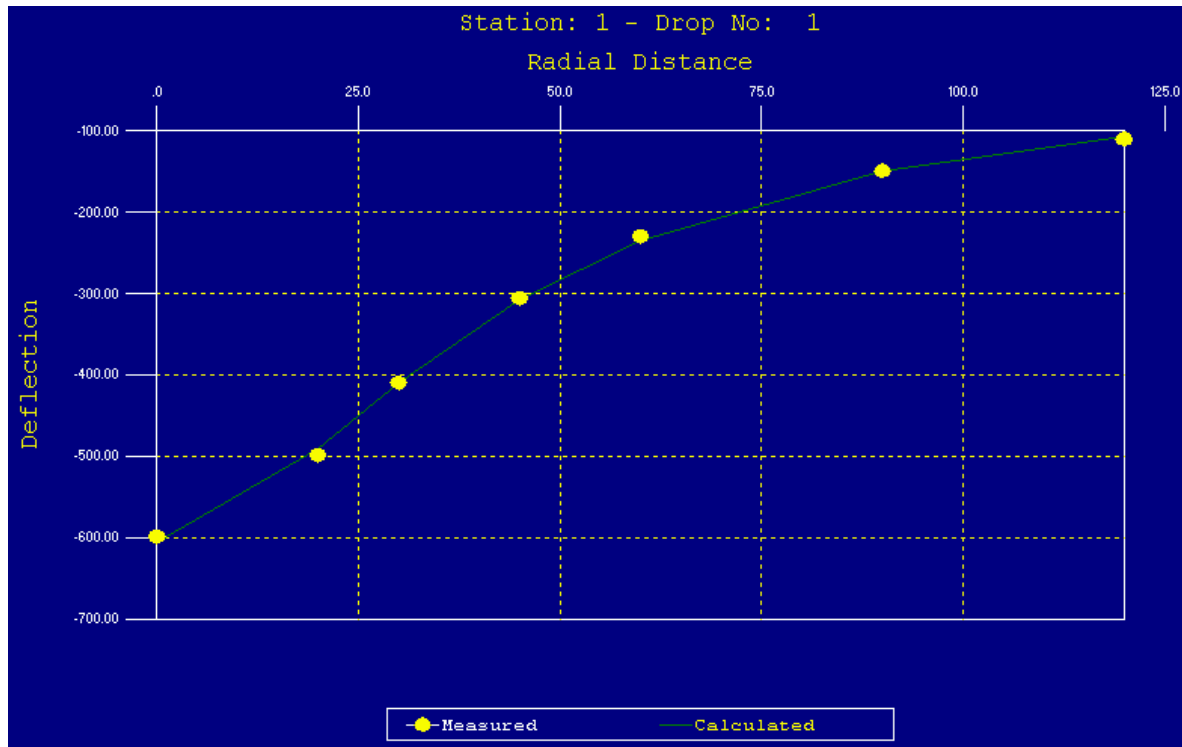
Route: TRAMO 4 CARRIL DERECHO K0+155							
Plate Radius (cm): 15.0				No. of Layers: 3			
No. of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No. of Drops: 1			Average RMS Error(%): 2.27		
Thickness (cm): 7.50 8.00					Pavement Temperature (C): N/A		
Drop No: 1		Load (N): 40000.0			No. of Iterations: 5		
Convergence: Close to Optimum (4)					RMS Error (%): 2.27		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	646.000	514.000	396.000	268.000	186.000	116.000	89.000
Calculated Deflection (microns):	662.950	501.051	390.571	267.815	191.507	117.453	86.120
Difference (%):	-2.62	2.52	1.37	.07	-2.96	-1.25	3.24
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		50.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	6511.56		97.70		101.91		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-178.77		-155.33		-134.33		
Radial Stress (kPa):	3281.59		-28.09		-27.52		
Bulk Stress (kPa):	6384.41		-211.52		-189.38		
Deviator Stress (kPa):	-3460.36		-127.23		-106.81		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-380.23		-1388.53		-1102.09		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	337.19		369.52		365.21		



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

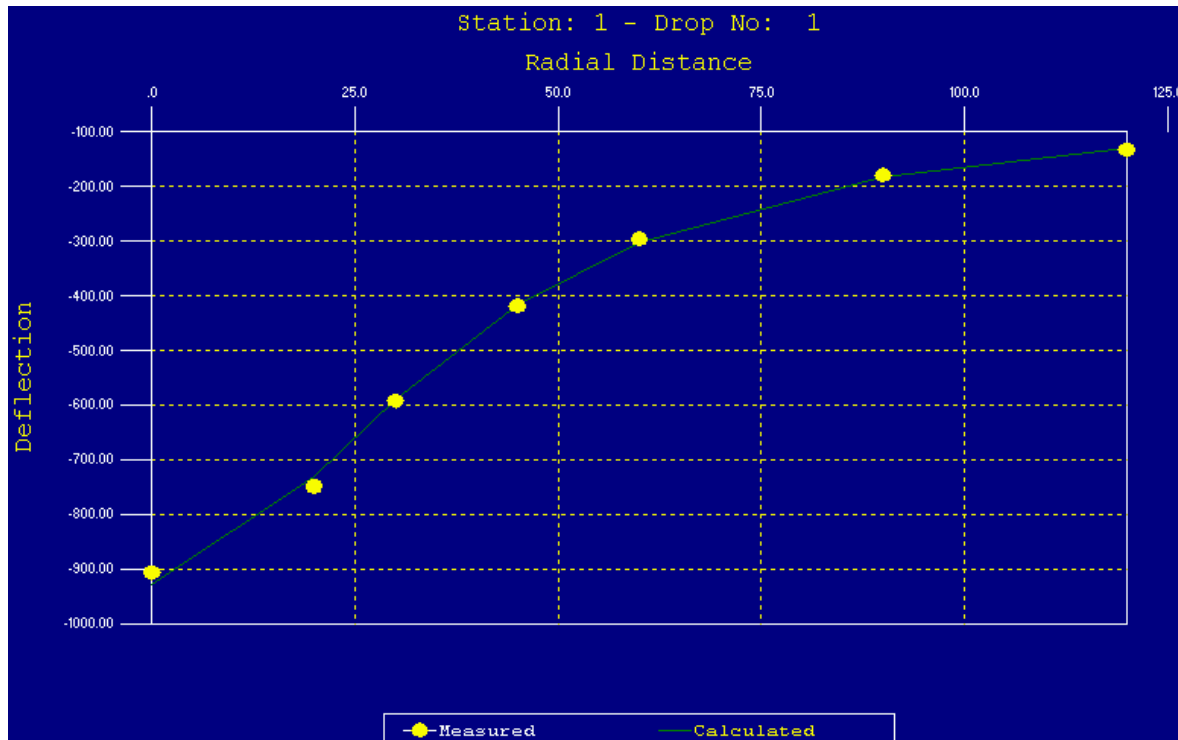
Route: TRAMO 4 CARRIL IZQUIERDO K0+175							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): 1.56			
Thickness (cm): 7.50 8.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 8			
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.56			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	599.000	499.000	410.000	306.000	230.000	149.000	110.000
Calculated Deflection (microns):	605.697	490.576	408.593	308.085	235.393	149.467	107.144
Difference (%):	-1.12	1.69	.34	-.68	-2.34	-.31	2.60
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		100.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	7917.30		529.85		83.98		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-215.79		-143.55		-103.65		
Radial Stress (kPa):	2508.30		162.63		-8.91		
Bulk Stress (kPa):	4800.81		181.72		-121.47		
Deviator Stress (kPa):	-2724.09		-306.18		-94.73		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-249.02		-485.79		-1149.24		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	215.47		294.34		429.98		



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

Route: TRAMO 5 CARRIL DERECHO K0+195							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1			Average RMS Error(%): 1.71		
Thickness (cm): 7.50 12.00					Pavement Temperature (C): N/A		
Drop No: 1		Load (N): 40000.0			No of Iterations: 5		
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied					RMS Error (%): 1.71		
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	907.000	749.000	593.000	418.000	296.000	179.000	133.000
Calculated Deflection (microns):	928.271	731.082	587.891	416.506	301.119	181.278	130.419
Difference (%):	-2.35	2.39	.86	.36	-1.73	-1.27	1.94
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		50.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	6394.08		54.43		67.36		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-140.05		-117.22		-97.43		
Radial Stress (kPa):	3969.79		-24.94		-20.21		
Bulk Stress (kPa):	7799.52		-167.09		-137.84		
Deviator Stress (kPa):	-4109.84		-92.28		-77.22		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-456.50		-1832.80		-1206.43		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	411.22		455.95		398.58		



Tramo de Prueba con Estructura Convencional y la Implementación de Geoceldas en la CL 128A entre TV 60 y AK 72 Bogotá.

BACKCALCULATION by Evercalc® 5.0 - Detail Output

Route: TRAMO 5 CARRIL IZQUIERDO K0+210							
Plate Radius (cm): 15.0				No of Layers: 3			
No of Sensors: 7				Stiff Layer: No			
Offsets (cm): .0 20.0 30.0 45.0 60.0 90.0 120.0				P-Ratio: .350 .350 .400			
Station: 1		No of Drops: 1		Average RMS Error(%): 1.22			
Thickness (cm): 7.50 12.00				Pavement Temperature (C): N/A			
Drop No: 1		Load (N): 40000.0		No of Iterations: 5			
Convergence: Modulus Tolerance Satisfied				RMS Error (%): 1.22			
Sensor No:	1	2	3	4	5	6	7
Measured Deflections (microns):	775.000	644.000	519.000	366.000	265.000	161.000	114.000
Calculated Deflection (microns):	788.691	630.997	513.575	368.750	267.986	160.036	113.902
Difference (%):	-1.77	2.02	1.05	-.75	-1.13	.60	.09
Layer No:	1		2		3		
Seed Moduli (MPa):	1500.00		100.00		50.00		
Calculated Moduli (MPa):	8615.26		54.37		77.20		
Layer No:	1		2		3		
Radial Distance (cm):	.00		.00		.00		
Position:	Bottom		Middle		Top		
Vertical Stress (kPa):	-124.13		-106.14		-89.83		
Radial Stress (kPa):	4292.68		-26.50		-21.18		
Bulk Stress (kPa):	8461.22		-159.13		-132.18		
Deviator Stress (kPa):	-4416.81		-79.64		-68.66		
Vertical Strain (10 ⁻⁶):	-363.19		-1611.03		-944.17		
Radial Strain (10 ⁻⁶):	328.91		366.46		300.87		

