

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SISTEMAS DE
GEOCELDA Y MATERIALES RECICLADOS (RAP Y CALAMINA)



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

SILVIA ESTEFANY PUENTES ZUÑIGA
EDWIN ANIBAL RODRIGUEZ GUTIERREZ

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SISTEMAS DE
GEOCELDA Y MATERIALES RECICLADOS (RAP Y CALAMINA)

SILVIA ESTEFANY PUENTES ZUÑIGA
EDWIN ANIBAL RODRIGUEZ GUTIERREZ

Monografía para optar por el título de Ingeniería Civil
Tutor: Ingeniero Rodolfo Felizzola Contreras

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2020

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., junio de 2020.

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a nuestro Dios, quien nos otorgó fuerza, sabiduría y constancia ante las adversidades del camino.

A nuestros familiares quienes estuvieron acompañándonos en este proceso, largo y extenuante; siendo el bastión y soporte principal en cada uno de nuestros pasos, ascensos y caídas. En especial a nuestros padres que a pesar de nuestras angustias, sufrimientos, lágrimas, decepciones y alegrías; siempre estuvieron presentes con dedicación y brindando apoyo moral y ejemplo constante de superación ante las dificultades.

AGRADECIMIENTOS

Por su aporte en el crecimiento que le dieron a nuestras vidas, les agradecemos a todas las personas que participaron en ello directa o indirectamente, y en especial queremos agradecer a:

Nuestros compañeros, profesores, amigos y profesionales; quienes con sus buenos consejos y enseñanzas forjaron criterio y templanza para asumir retos en nuestra vida académica y profesional.

Al Ingeniero Rodolfo Felizzola, director de nuestro proyecto de grado; por acompañarnos y guiarnos con sus conocimientos y paciencia, en el proceso de la generación del presente escrito.

A la empresa Servicios de Ingeniería y consultoría SECOIN SAS y al Ingeniero Luis Rincón Triana por abrirnos las puertas, brindarnos todo su apoyo y colaboración, además de su permanente disponibilidad para resolver todas nuestras inquietudes.

A la empresa Concretos Asfálticos de Colombia – CONCRESCOL S.A. por brindar su apoyo logístico en la consecución de insumos y suministros para desarrollo del presente documento. Al ingeniero Oscar Julián Moreno por brindar su guía y apoyo respecto a estadísticas y desarrollo del componente gerencial de la investigación.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica; por ser el formador de profesionales dotados de excelente ética profesional y de conocimientos necesarios para poder ejercer nuestra profesión y nuestra retribución a la sociedad.

RESUMEN

Los sistemas de confinamiento celular (geoceldas) mejoran las condiciones y propiedades mecánicas de los suelos; trabajando en conjunto con materiales granulares de común uso, extraídos de canteras. Por otro lado, debido al impacto ambiental generado por el tratamiento de estos granulares, se ha implementado la reutilización de materiales provenientes de procesos de demolición. Por medio de este proyecto de investigación se busca analizar el comportamiento mecánico de sistemas de mejoramiento de subrasantes empleando geoceldas y una mezcla de Pavimentos asfálticos reciclados (RAP) y Calamina (cascarilla de laminación de acero).

Este análisis se realiza mediante la aplicación ensayos de laboratorio con el objeto de encontrar la caracterización de los materiales granulares de acuerdo con la normatividad IDU. Una vez obtenida la caracterización, se determinó la llamada “fórmula de trabajo” la cual busca mejorar y complementar las características físico-mecánicas de una muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP) con adición de calamina.

Una vez obtenida la caracterización de los materiales, mediante el uso del software PITRAPAVE se realiza la modelación de 3 alternativas de estructura pavimento flexible típicas en la ciudad de Bogotá; considerando en una las mismas el uso del sistema de mejoramiento propuesto (geocelda en conjunto con la “fórmula de trabajo” obtenida). Lo anterior, con el objetivo de obtener parámetros de comparación (esfuerzos verticales, laterales y deformaciones), que nos brindarán a su vez criterios para determinar si el conjunto funciona óptimamente. Por último se realiza un análisis presupuestal y de tiempos de ejecución; para así determinar si es viable o no, implementar el sistema geocelda, RAP, Calamina en actividades de ingeniería.

ABSTRACT

Cellular confinement systems (geocells) improve the conditions and mechanical properties of soils; working together with commonly used granular materials, extracted from quarries. Additionally, due to the environmental impact generated by the treatment of these granules, the reuse of materials from demolition processes has been implemented. This research project seeks to analyze the mechanical behavior of subgrade improvement systems using geocells and a mixture of recycled asphalt pavements (RAP) and Calamine (steel rolling mill).

This analysis is carried out by applying laboratory tests in order to find the characterization of granular materials in accordance with IDU regulations. Once the characterization was obtained, the so-called "working formula" was determined, which seeks to improve and complement the physical-mechanical characteristics of a sample of recycled asphalt pavement (RAP) with the addition of calamine.

Once the characterization of the materials has been obtained, through the use of the PITRAPAVE software, the modeling of 3 typical flexible pavement structure alternatives in the city of Bogotá is carried out; considering in one the use of the proposed improvement system (geocell in conjunction with the obtained "work formula"). The foregoing, with the aim of obtaining comparison parameters (vertical, lateral and deformation stresses), which in turn will provide us with criteria to determine if the set works optimally. Finally, a presupstantial analysis and execution times are carried out; In order to determine if it is feasible or not, implement the geocell, RAP, Calamine system in engineering activities.

CONTENIDO

Pág

INTRODUCCIÓN	31
OBJETIVOS	33
OBJETIVO GENERAL	33
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	33
JUSTIFICACIÓN	34
4. MARCO TEÓRICO	35
4.1. SISTEMAS DE CONFINAMIENTO CELULAR	35
4.1.1. Historia de los sistemas de confinamiento celular:	36
4.1.2. Funcionamiento de los sistemas de confinamiento celular.	38
4.1.2.1. Efecto de resistencia lateral o confinamiento.....	38
4.1.2.2. Efecto de dispersión del Esfuerzo vertical:	39
4.1.2.3. Efecto de dispersión del esfuerzo vertical.....	40
4.1.3. Mecanismo de trabajo de las geoceldas	41
4.1.4. Beneficios del empleo de sistemas de confinamiento celular:	43
4.1.4.1. Ventajas de la implementación de sistemas de Geocelda:	43
4.1.5. Caracterización de los sistemas de confinamiento:	46
4.2. CALAMINA.....	47
4.2.1. Composición de la calamina:	48
4.2.2. Antecedentes del uso de la calamina en Colombia:	49

4.3. CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO).....	51
4.4. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO – RAP.....	51
4.4.1. Antecedentes del pavimento asfáltico reciclado (RAP):.....	52
4.4.2. Propiedades generales del pavimento asfáltico reciclado (RAP):.....	54
4.4.3. Ventajas y desventajas del uso del RAP:.....	55
4.4.4. El reciclado de pavimento asfáltico en Bogotá.....	56
4.4.5. Normativa vigente sobre el reciclado de pavimento asfáltico en Bogotá:	58
4.4.5.1. Gestión Integral de residuos de construcción y demolición RCD.....	58
4.4.5.2. Resolución 26700 de 2015:	61
4.4.5.3. Resolución 1115 de 2012:	62
4.4.5.4. Parcheo con material de pavimento asfáltico reciclado MBR (Instituto de Desarrollo Urbano, 2015):.....	62
4.4.5.5. Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar, empleando ligantes bituminosos (INV – E 461 – 07) y Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica (IDU – 450 – 11):	62
4.4.5.6. Resolución 2397 de 2011:	63
4.5. SUBRASANTE.....	64
4.6. ECUACION DE IVANOV PARA EL CÁLCULO DEL CBR EQUIVALENTE EN SISTEMAS MULTICAPA REFORZADOS.....	64
4.6.1. Definición de la ecuación:	64
4.6.2. Hipótesis de partida:	65
4.6.3. Análisis de capas de conformación mediante modelos elásticos de dos capas a partir de la ecuación de IVANOV:.....	66
4.6.4. Limitaciones en el uso de la ecuación de IVANOV y ecuaciones constituyentes del modelo multicapa:	69
4.6.5. Verificación in situ de las hipótesis de diseño:.....	71

4.7. MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO	72
4.7.1. Concepto de modelación:	73
4.7.2. Desarrollo histórico de la modelación de pavimentos:	74
4.7.3. Teorías de modelación de pavimentos (Unicapa):.....	75
4.7.3.1. Modelo de Boussinesq (1885):	75
4.7.3.2. Modelo de Westergaard (1926):	76
4.7.4. Teorías de modelación multicapa elástica de pavimentos (MCE):.....	76
4.7.4.1. Modelo de Hogg (1944):	77
4.7.4.2. Modelo de Burmister (1945):.....	77
4.7.5. Generalización del sistema modelo multicapa por Yoder y Witzack (1975):	78
4.7.6. Algunos software empleados para la modelación de pavimentos en Colombia:.....	80
4.7.6.1. Bisar 3.0:.....	81
4.7.6.2. 3D Move:.....	82
4.7.6.3. WINDEPAV:.....	83
4.7.6.4. PITRA-PAVE:.....	85
4.8. MODULO DE ELASTICIDAD – E	86
4.9. CARGAS DE TRÁFICO – TPDA.....	87
4.10. RELACIÓN DE POISSON – ν	88
4.11. PRESIÓN DE INFLADO – q	90
4.11.1. Relación entre presión de inflado y pavimento:	90
5. ANTECEDENTES A LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	92
5.1. ARTÍCULOS, TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN Y CARTILLAS.....	92

6.	METODOLOGIA.....	100
7.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	104
7.1.	UNIDADES DE CONFINAMIENTO CELULAR O GEOCELDAS	104
7.2.	PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)	107
7.2.1.	Caracterización de la muestra de pavimento asfáltico reciclado(RAP):.....	109
7.3.	CALAMINA	111
7.3.1.	Caracterización de la muestra de calamina:	112
8.	DETERMINACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO.....	115
8.1.	COMBINACIÓN NO. 1: 90% PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) + 10% CALAMINA.....	116
8.2.	COMBINACIÓN NO. 2: 85% PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) + 15% CALAMINA.....	119
8.3.	COMBINACIÓN NO. 3: 80% PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) + 20% CALAMINA.....	120
8.4.	CARACTERIZACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO (85% RAP+15% CALAMINA.....	123
9.	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE LAS ESTRUCTURAS DEL PAVIMENTO PROPUESTAS	132
10.	PARÁMETROS DE ENTRADA REQUERIDOS PARA LA EJECUCIÓN DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES	135
10.1.	SISTEMA DE UNIDADES DE TRABAJO	135
10.2.	DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A EMPLEAR EN LA MODELACIÓN.	135

11. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ARROJADOS POR EL SOFTWARE	137
12. DETERMINACIÓN DE VARIABLES PREVIO A LA MODELACIÓN CON EL SOFTWARE PITRAPAVE	138
12.1. DEFINICIÓN DEL CORREDOR OBJETO DE MODELACIÓN	138
12.1.1. Ubicación del corredor a modelar:	138
12.1.2. Contrato de Obra Pública asociado a la intervención (COP):	140
12.1.3. Características geométricas del tramo de prueba:.....	140
12.1.4. Tipo de Estructura de Pavimento Existente:	141
12.1.5. Dinámica del tránsito:	141
12.1.6. Evaluación condición superficial del pavimento:	142
12.1.7. Caracterización de los materiales granulares remanentes:	144
12.1.7.1. Exploraciones in situ:	144
12.1.7.2. Caracterización física y perfiles estratigráficos:	145
12.1.8. Estudio de suelos:.....	147
12.1.8.1. Composición y caracterización física de la subrasante:.....	148
12.1.8.2. Caracterización mecánica de la subrasante:	148
12.1.8.3. CBR de diseño:.....	149
12.1.8.4. Módulo resiliente natural:	149
12.1.9. Alternativas propuestas por el especialista de pavimentos para el mejoramiento de la subrasante:.....	153
12.1.9.1. Alternativa 1:	154
12.1.9.2. Alternativa 2:	154
12.1.10. Calculo del CBR equivalente de la subrasante:.....	156

12.1.11. Número de ejes equivalentes empleados para el diseño de la estructura del pavimento:.....	158
12.1.12. Diseño estructural del pavimento:.....	160
12.1.12.1. Material granular tipo base (BG):.....	160
12.1.12.2. Material granular tipo sub base granular reciclada (SBG):.....	161
12.1.12.3. Material granular estabilizado (GEEA y MGEA):.....	161
12.1.12.4. Concreto asfáltico (MD-12 y MD-GCR para tránsito T4):.....	161
12.2. ALTERNATIVAS DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FORMULADAS.....	162
12.2.1. Alternativa 1:.....	163
12.2.2. Alternativa 2:.....	164
12.2.3. Alternativa 3 (Sistema de mejoramiento planteado):.....	165
12.3. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA MODELACIÓN DEL SISTEMA DE MEJORAMIENTO CON GEOCELDA, RAP Y CALAMINA.....	166
12.3.1. Determinación de módulo resiliente y el coeficiente de Poisson de la fórmula de trabajo:.....	166
12.3.2. Cálculo del módulo elástico del nuevo sistema de mejoramiento:.....	172
13. MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO.....	179
13.1. CREACIÓN DEL ARCHIVO.....	181
13.2. SISTEMA DE UNIDADES DE TRABAJO.....	182
13.3. DEFINICIÓN DE CAPAS DE LA ESTRUCTURA.....	182
13.4. DEFINICIÓN DE LAS CARGAS ACTUANTES.....	183
13.5. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE ANÁLISIS.....	185
14. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA MODELACIÓN.	190

14.1. ADMISIBILIDAD DE LOS MATERIALES	190
14.2. COMPROBACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES MÍNIMAS	193
14.2.1. Verificación de deformaciones a tracción en carpetas asfálticas:	193
14.2.2. Verificación de la deformación vertical de la subrasante:	194
14.3. EVALUACIÓN INDIVIDUAL DE LAS ALTERNATIVAS	196
14.3.1. Alternativa 1 (Estructura convencional con mejoramiento en rajón y sello):	196
14.3.1.1. Variación del esfuerzo vertical (σ_{zz}) en función de la profundidad:	196
14.3.1.2. Variación de los esfuerzos laterales impuestos (σ_{xx}, σ_{yy}) en función de la profundidad:	198
14.3.1.3. Deflexión en función de la profundidad (δz):	200
14.3.2. Alternativa 2 (Variante estructural con mejoramiento en geocelda y lleno en material granular remanente):	201
14.3.2.1. Variación del esfuerzo vertical (σ_{zz}) en función de la profundidad:	201
14.3.2.2. Variación de los esfuerzos laterales impuestos (σ_{xx}, σ_{yy}) en función de la profundidad:	203
14.3.2.3. Deflexión en función de la profundidad (δz):	205
14.3.3. Alternativa 3 (Variante estructural con mejoramiento en geocelda y lleno propuesto RAP y Calamina):	206
14.3.3.1. Variación del esfuerzo vertical (σ_{zz}) en función de la profundidad:	206
14.3.3.2. Variación de los esfuerzos laterales impuestos (σ_{xx}, σ_{yy}) en función de la profundidad:	208
14.3.3.3. Deflexión en función de la profundidad (δz):	210
14.4. COMPARACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CUMPLIMIENTO POR ALTERNATIVA	211

15. ANÁLISIS PRESUPUESTAL DE LOS SISTEMAS DE MEJORAMIENTO PLANTEADOS.....	216
15.1. DEFINICIÓN DE LAS ACTIVIDADES CONSTRUCTIVAS	216
15.2. ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO	218
15.3. ANÁLISIS DE LOS PRESUPUESTOS DESARROLLADOS.....	224
15.4. ANÁLISIS EN TIEMPOS DE EJECUCIÓN POR ALTERNATIVA	227
16. COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE OTRAS INVESTIGACIONES Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA IMPLEMENTACIÓN DE GEOCELDAS Y MATERIALES RECICLADOS	239
17. CONCLUSIONES	241
18. RECOMENDACIONES.....	247
BIBLIOGRAFIA.....	249
ANEXOS.....	255

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema de confinamiento celular	35
Figura 2. Efecto de la resistencia lateral del reforzamiento con geocelda.	38
Figura 3. Efecto dispersión del esfuerzo vertical del reforzamiento con geocelda.	39
Figura 4. Efecto de membrana del reforzamiento con geocelda.....	40
Figura 5. Esquema de funcionamiento de geoceldas.	41
Figura 6. Comportamiento de la Subrasante ante la aplicación de esfuerzos en su superficie.	41
Figura 7. Esfuerzos laterales en geocelda.....	42
Figura 8. Bulbo de presiones en la estructura del pavimento.	42
Figura 9. Muestra de Calamina.....	48
Figura 10. Ventajas y desventajas del uso del RAP	55
Figura 11. Componentes de gestión ambiental en obra	56
Figura 12. Esquema general de la modelación de un pavimento.	73
Figura 13. Modelo de Boussinesq (1885) - Difusión del esfuerzo vertical σ_z	75
Figura 14. Modelo de Westergaard (1926).	76
Figura 15. Modelo de Hogg (1944)	77
Figura 16. Modelo de Burmister (1945)	78
Figura 17. Generalización del Sistema Elástico Multicapa.	79
Figura 18. Captura de pantalla de Bisar 3.0.	81

Figura 19. Captura de Pantalla software 3D Move	83
Figura 20. Captura de Pantalla software DEPAV.....	83
Figura 21. Captura de pantalla software WinDEPAV 2.6.....	84
Figura 22. Captura de Pantalla Software Windepav.....	84
Figura 23. Captura de pantalla software PITRA PAVE.....	85
Figura 24. Representación gráfica de Esfuerzos en un punto.....	85
Figura 25. Relación de Poisson, efecto de la aplicación de carga en un elemento.	88
Figura 26. Comportamiento bajo carga de neumáticos diagonales (izquierda) y radiales (derecha).....	91
Figura 27. Esquema del resumen de la metodología.....	100
Figura 28. Localización de Corredor Vial de donde provienen las muestras de RAP (Fresado).....	108
Figura 29. Muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP)	109
Figura 30. Ejecución ensayo de granulometría.....	109
Figura 31. Tasa Representativa del Mercado (Diciembre 2019 - Enero 2020) ...	112
Figura 32. Muestra de calamina.....	112
Figura 33. Mezcla 90% RAP + 10% calamina	123
Figura 34. Ubicación general del CIV a modelar.....	138
Figura 35. Localización detallada del segmento a modelar.....	139
Figura 36. Características geométricas del segmento a modelar.....	140
Figura 37. Tipo de pavimento Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur	141
Figura 38. Rutas de Transporte Público en Zona de Estudio	142

Figura 39. Localización de Apiques.	145
Figura 40. Perfiles estratigráficos.....	146
Figura 41. Separación entre llantas del eje tándem posterior.	180
Figura 42. Creación de modelos Paso 1.....	181
Figura 43. Configuración del sistema de unidades.	182
Figura 44. Definición de las propiedades para las capas (Alternativa 1)	182
Figura 45. Definición de las propiedades para las capas (Alternativa 2)	183
Figura 46. Definición de las propiedades para las capas (Alternativa 3)	183
Figura 47. Definición de las cargas (Alternativas 1,2 y 3)	184
Figura 48. Verificación del Radio de carga.	184
Figura 49. Asignación de puntos a analizar (Alternativa 1).....	185
Figura 50. Asignación de puntos a analizar (Alternativas 2 y 3)	187
Figura 51. Captura de pantalla (Esfuerzos calculados por PITRE PAVE)	188
Figura 52. Captura de pantalla (Deformaciones calculadas por PITRE PAVE) ..	188
Figura 53. Captura de pantalla (Deflexiones calculadas por PITRE PAVE)	189
Figura 54. Cálculo de la duración del proyecto implementando la alternativa 1. 235	
Figura 55. Cálculo de la duración del proyecto implementando la alternativa 2. 236	
Figura 56, Cálculo de la duración del proyecto implementando la alternativa 3. 237	

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Materiales Reciclados en Estados Unidos de Norte América en la década del 90.	53
Gráfica 2. Volumen de fresado entregado a Alcaldías locales (m ³).....	57
Gráfica 3. Resultados granulometría y curva granulométrica: Pavimento asfáltico recuperado (RAP).....	110
Gráfica 4. Resultados y curva granulométrica: Calamina	113
Gráfica 5. Curva granulométrica combinación No. 1.....	118
Gráfica 6. Curva granulométrica combinación No. 2.....	120
Gráfica 7. Curva granulométrica combinación No. 3.....	122
Gráfica 8. Resultados y curva granulométrica fórmula de trabajo.....	124
Gráfica 9. Curva granulométrica para una SB_Gr2	131
Gráfica 10. Variación del MIF para un E de lleno de 80 MPa	174
Gráfica 11. Variación del MIF para un E de lleno de 110 MPa	174
Gráfica 12. Variación del MIF para un E de lleno de 150 MPa.	175
Gráfica 13. Variación del MIF para un E de lleno de 200 MPa.	175
Gráfica 14. Variación del MIF para un E de lleno de 300 MPa.	176
Gráfica 15. Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad. Alternativa 1	197
Gráfica 16. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección longitudinal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 1	198

Gráfica 17. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 1	199
Gráfica 18. Comportamiento de la deflexión en función de la profundidad. Alternativa 1	201
Gráfica 19. Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad. Alternativa 2	202
Gráfica 20. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 2	203
Gráfica 21. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 2	204
Gráfica 22. Comportamiento de la deflexión en función de la profundidad. Alternativa 2	206
Gráfica 23. Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad. Alternativa 3	207
Gráfica 24. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 3	208
Gráfica 25. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 3	209
Gráfica 26. Comportamiento de la deflexión en función de la profundidad. Alternativa 3	210
Gráfica 27. Comparación entre deformaciones por tracción admisible y calculada en sentido del tránsito. Alternativas 1, 2 y 3)	211
Gráfica 28. Comparación entre deformaciones por tracción admisible y calculada en sentido perpendicular del tránsito. Alternativas 1, 2 y 3).....	212
Gráfica 29. Comparación entre deformaciones verticales admisibles y calculadas. (Alternativas 1, 2 y 3).....	214

Gráfica 30. Comparación entre esfuerzos verticales admisibles y calculados.
(Alternativas 1, 2 y 3).....215

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características dimensionales de las geoceldas.	46
Tabla 2. Propiedades mecánicas de las geoceldas.	46
Tabla 3. Propiedades de Estabilidad dimensional de las geoceldas.....	47
Tabla 4. Propiedades Fisicoquímicas de la Calamina.	48
Tabla 5. Análisis químico y mineralógico de cascarilla de laminación.	49
Tabla 6. Porcentaje de asfalto reciclado, utilizado en algunos estados de EEUU.	54
Tabla 7. Clasificación de residuos de construcción y demolición RCD.....	59
Tabla 8. Alternativas de gestión de uso de residuos.....	60
Tabla 9. Diferencias entre normativa IDU e INVIAS.	63
Tabla 10. Investigaciones relacionadas a nivel Nacional e Internacional.	93
Tabla 11. Descripción del lote de geocelda analizado.	105
Tabla 12. Resumen de propiedades Unidades de confinamiento celular empleados en el estudio.	106
Tabla 13. Listado de CIV de la muestra de RAP obtenida para la ejecución de los ensayos de laboratorio	108
Tabla 14. Resultados ensayos de laboratorio: pavimento asfáltico reciclado (RAP)	110
Tabla 15. Resultados ensayos de laboratorio: calamina.....	113
Tabla 16. Granulometrías admisibles para la construcción de bases y subbases granulares.....	115
Tabla 17. Tolerancias granulométricas	115
Tabla 18. Mezcla teórica 1: 90% RAP + 10% CALAMINA	117

Tabla 19. Mezcla teórica 2: 85% RAP + 15% CALAMINA	119
Tabla 20. Mezcla teórica 3: 80% RAP + 20% CALAMINA	121
Tabla 21. Requisitos de los agregados para bases granulares	124
Tabla 22. Resultados ensayos de laboratorio: base granular reciclada tipo BG_A	126
Tabla 23. Características granulométricas de la fórmula de trabajo	130
Tabla 24. Análisis cualitativo del software PITRAPAVE.	132
Tabla 25. Análisis cualitativo del software WINDEPAV.	133
Tabla 26. Análisis cualitativo del software WINDEPAV.	133
Tabla 27. Análisis cualitativo del software WINDEPAV.	134
Tabla 28. Nomenclatura del CIV a modelar.	139
Tabla 29. Características geométricas del segmento a modelar.	141
Tabla 30. Rangos de Clasificación PCI.....	143
Tabla 31. Tipos de daño en pavimentos flexibles.	143
Tabla 32. Evaluación Condición Actual de Pavimento.....	144
Tabla 33. Espesores de Estructura Existente Adoptados.	146
Tabla 34. Índices de Liquidez y Consistencia del Suelo de Subrasante.	148
Tabla 35. Resultados de CBR.....	149
Tabla 36. Correlaciones entre CBR vs Mr (Avaladas por el IDU)	150
Tabla 37. Calculo de valores del Módulo Resiliente de la subrasante.	151
Tabla 38. Clasificación de Subrasantes en Bogotá.....	153
Tabla 39. CBR y Módulo Equivalente Subrasante Mejorada por medio de Rajón	157

Tabla 40. CBR y Módulo Equivalente Subrasante Mejorada por medio de geocelda y lleno en MGR.	157
Tabla 41. Número de Ejes Equivalentes de Diseño para Varios Años.	159
Tabla 42. Categorías de tránsito IDU.....	159
Tabla 43. Resumen de propiedades mecánicas de los materiales a emplear en la modelación.	162
Tabla 44. Definición de la estructura de pavimento del CIV 800661. Alternativa 1	163
Tabla 45. Definición de la estructura de pavimento del CIV 800661. Alternativa 2.	164
Tabla 46. Definición de la estructura de pavimento del CIV 8006661. Alternativa 3	165
Tabla 47. Valores de módulo resiliente en función del CBR (Valor relativo de soporte - VRS para México), clasificación del suelo (AASHTO y USC), módulo de reacción de la subrasante (K) y peso unitario seco.	168
Tabla 48. Valores típicos de Mr para materiales granulares.....	169
Tabla 49. Valores típicos de la relación de Poisson.....	172
Tabla 50. Valores Típicos de MIF (Modulus Improvement Factor)	173
Tabla 51. Ecuación que representa el comportamiento aproximado del MIF, respecto al módulo de elasticidad del material de Lleno	176
Tabla 52. Valores ampliados del MIF.....	177
Tabla 53.CBR y Módulo Equivalente Subrasante Mejorada por medio de geocelda y lleno RAP + Calamina.....	178
Tabla 54. Módulos de elasticidad y coeficientes de Poisson, de materiales a modelar.....	181
Tabla 55. Coeficientes de Calaje, Método Shell.	191
Tabla 56. Datos de entrada para el cálculo de esfuerzos y deformaciones admisibles.....	193

Tabla 57. Deformaciones y esfuerzos admisibles.....	193
Tabla 58. Verificación de deformaciones a tracción en Capas asfálticas.	194
Tabla 59. Verificación de las deformaciones verticales en la subrasante.	195
Tabla 60. Verificación de los esfuerzos verticales en la subrasante	196
Tabla 61. Ítems o actividades típicas a desarrollar en la Rehabilitación de una estructura de pavimento flexible.	217
Tabla 62. Evaluación presupuestal de alternativa 1.....	218
Tabla 63. Evaluación presupuestal de alternativa 2.....	220
Tabla 64. Evaluación presupuestal de alternativa 3.....	222
Tabla 65. Análisis presupuestal detallado por alternativa de estructura de pavimento.	225
Tabla 66. Histórico de costos de intervención de redes, en contratos ejecutados por CONCRESCOL S.A.....	227
Tabla 67. Rendimientos de obra (Alternativa 1).....	228
Tabla 68. Rendimientos de obra (Alternativa 2).....	230
Tabla 69. Rendimientos de obra (Alternativa 3).....	232
Tabla 70. Conclusiones reportadas en otras investigaciones del comportamiento de la geoceldas y un lleno de material reciclado	239

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Cálculo de deformaciones en sentido z con el modelo multicapa.	79
Ecuación 2. Cálculo de deformaciones en sentido y con el modelo multicapa.	80
Ecuación 3. Cálculo de deformaciones en sentido x con el modelo multicapa.	80
Ecuación 4. Ecuación de IVANOV para determinar el módulo de elasticidad equivalente en interacciones subrasante - mejoramiento	156
Ecuación 5. Ecuación para determinar el factor n en la ecuación de IVANOV	156
Ecuación 6. Correlación para determinar el E en capas de subbase granular in situ.	167
Ecuación 7. Correlación para determinar el E en capas de base granular in situ.	167
Ecuación 8. Correlación para determinar el E en capas de base y subbase granular in situ.	167
Ecuación 9. Correlación para determinar el E en capas de subbase granular in situ.	168
Ecuación 10. Ecuación para el cálculo del Factor de mejoramiento de módulos en sistemas con geocelda.	173
Ecuación 11. Cálculo del módulo de elasticidad del sistema reforzado con geocelda.	178
Ecuación 12. Ecuación de Shell para determinar deformación Máxima en capas asfálticas.....	190
Ecuación 13. Ecuación de Shell para el cálculo de deformaciones admisibles en subrasantes.	192

Ecuación 14. Ecuación de Dormon y Kerhoven para el cálculo de esfuerzo máximos admisibles en subrasantes. (Método Shell).....	192
--	-----

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Caracterización de la geocelda.

Anexo 2. Ensayos de laboratorio muestra: Pavimento asfáltico reciclado.

Anexo 3. Ensayos de laboratorio muestra: Calamina.

Anexo 4. Fórmula de trabajo

Anexo 5. Ensayos de laboratorio muestra: Mezcla.

Anexo 6. Registro fotográfico.

Anexo 7. Ensayos de laboratorio apique No. 33

Anexo 8. Memorias de cálculo – Modelación

Anexo 9. Programación – Análisis de tiempos de ejecución

GLOSARIO

AGREGADO: material granular de composición mineralógica como arena, grava, escoria, o roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.

ASFALTO: betún negro, solido o semisólido, pegajoso, que se derrite al calentarlo; es una mezcla de hidrocarburos y se obtiene comercialmente como derivado del petróleo, aunque también se encuentran depósitos naturales; mezclado con agregados minerales (arena, etc.) se emplea para pavimentar calles y caminos, como revestimiento impermeable en construcciones y en la fabricación de barnices y pinturas.

BASE: capa intermedia entre la subbase y la carpeta del pavimento, generalmente constituida por agregados pétreos convenientemente graduados y compactados.

CARPETA ASFÁLTICA: conjunto de capas que se colocan sobre la base, constituidas por material pétreo y un producto asfáltico.

GRANULOMETRÍA: se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo a los granos de un suelo.

MATERIAL: se refiere a suelo, roca y mezclas de suelo o agregado

NORMA: documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que suministra, para uso común y repetido, reglas, directrices o características para las actividades o sus resultados, encaminados al logro del grado óptimo que orden en un contexto dado.

PAVIMENTO: estructura construida sobre la subrasante de la vía, para resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por las siguientes capas: subbase, base y rodadura.

RECICLAJE: proceso físico químico o mecánico para la obtención de materias primas a partir de desechos introduciéndolos de nuevo en el ciclo de vida y se produce ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales, macro

económico y para eliminar de forma eficaz los desechos de los humanos que no necesitamos.

REGISTRO: documento que presenta resultados obtenidos o proporciona evidencia de actividades desempeñadas.

SUBRASANTE: terreno de fundación de los pavimentos, pudiendo estar constituida por el suelo natural del corte o de la parte superior de un relleno debidamente compactado.

SUBBASE: capa generalmente constituida por agregados pétreos convenientemente graduados y compactados, construida sobre la subrasante, y sobre la cual puede construirse la base cuando sea necesaria.

INTRODUCCIÓN

Con el fin de incentivar el uso de tecnologías, que aprovechen al máximo los residuos de procesos constructivos se ha venido implementando y regulando en Colombia políticas y reglamentos que optimicen todo tipo de recursos (materiales, tiempo y monetarios o de capital de inversión) de forma responsable y amigable con el medio ambiente.

Para dicho fin las entidades gubernamentales como el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y en el caso de Bogotá el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), han desarrollado decretos orientados principalmente al uso de materiales provenientes de procesos de demolición y construcción como el RCD, pavimentos asfálticos reciclados (RAP), entre otros.

Por otro lado, si se tiene en cuenta que en diferentes sectores de la ciudad de Bogotá se encuentran suelos donde los valores del CBR oscilan entre el 1% y el 4%; es necesario implementar técnicas de mejoramiento de subrasantes, las cuales aporten al aumento de la capacidad portante de las mismas.

En vista de lo anterior se han desarrollado e implementado diversas técnicas de construcción y nuevas tecnologías como el caso de los materiales geosintéticos; de los cuales se destacan los geotextiles, las geomallas y las geoceldas (sistema de confinamiento de material granular). Estas últimas aportan sustancialmente a la mejora de la capacidad de soporte, las propiedades de confinamiento y de cohesión aparente de los materiales de lleno, que son empleados para estas actividades.

Ahora bien, si se incluye en el análisis del desarrollo de las obras de infraestructura vial factores como la meteorología, la morfología y la topografía de la ciudad de Bogotá, se puede inferir que; la actividad de mejoramiento de subrasantes requiere la implementación de técnicas de optimización de los trabajos, dado que influyen positivamente en la calidad del producto entregable tanto técnica y económicamente, debido a la optimización de recursos como el tiempo y el dinero. Por tal motivo, la implementación de dichos materiales geosintéticos, se ha convertido en una alternativa eficiente, pero sobre todo sostenible y sustentable.

En ese sentido, por medio del desarrollo de éste proyecto de investigación, se analiza el comportamiento mecánico de la mezcla de pavimento asfáltico reciclado con adición de calamina a través de los ensayos de caracterización y los que posteriormente son empleados en la generación del sistema de mejoramiento (Geocelda, RAP, Calamina).

Dichos materiales son evaluados en etapas diferentes del proyecto, dentro de las que se destacan, la etapa previa a la construcción, y la etapa en la que los materiales son puestos en servicio. Además, se realiza un análisis técnico y de viabilidad en el que se exponen los beneficios ambientales generados al usar los materiales mencionados; sumado a un análisis presupuestal en donde se puede verificar el impacto que se obtiene económicamente y en tiempos de ejecución tras la implementación de dicho sistema en la construcción de estructuras de pavimentos.

Adicionalmente, se estudian factores determinantes de la subrasante como el caso de esfuerzos y deformaciones, haciendo uso de software basados en el modelo de multicapa elástica, los cuales a su vez serán comparados con los resultados obtenidos tras emplear un sistema de mejoramiento convencional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico del conjunto Geocelda – RAP – Calamina, empleado en el mejoramiento de sub rasantes o suelos de fundación para vías locales de la ciudad de Bogotá, por medio de la optimización de un material granular reciclado, teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la normatividad vigente para construcción de estructuras viales en Bogotá.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener una combinación o fórmula de trabajo, a partir de materiales reciclados provenientes del pavimento asfáltico reciclado y sub productos de procesos siderúrgicos (Calamina); que cumpla con los parámetros de calidad establecidos por el IDU, para materiales granulares de lleno y conformación de capas de estructuras de pavimento de tipo base granular y evaluar si la misma es apta para el lleno de geoceldas y a su vez analizar las diferencias obtenidas en materia de deformaciones y esfuerzos respecto a los sistemas de mejoramiento convencionales.
- Evaluar y analizar el impacto económico y las bondades inherentes a la implementación del sistema de mejoramiento de subrasantes planteado (geocelda, RAP, calamina); en la construcción de vías de orden local en la ciudad de Bogotá.
- Estimar los beneficios económicos y de tiempos de ejecución en obras de infraestructura vial; antes, durante y después de implementar los sistemas de mejoramiento de sub rasantes geocelda – RAP – calamina.

JUSTIFICACIÓN

En el sector de la infraestructura vial se presenta el uso frecuente de sistemas tradicionales de construcción, razón por la cual se considera importante fomentar la aplicación de nuevas tecnologías, las cuales una vez implementadas de manera correcta pueden calificar como un sistema no costoso, ítem de gran importancia al momento de evaluar la viabilidad de un proyecto.

En la actualidad existen materiales geo sintéticos como la geocelda (Sistema de confinamiento celular) la que ha venido fomentándose como nueva tecnología. Algunas ventajas y por lo que ha presentado una buena acogida es la mejora a la capacidad portante de la subrasante en suelos cuyos valores de CBR son bajos, reduce los espesores de las capas granulares en una estructura de pavimento convencional y permite la utilización de materiales granulares locales los cuales suelen no ser competentes y que en la ejecución de una obra vial tradicional no podrían utilizarse.

Se ha observado que la geocelda, permite reutilizar materiales de demolición. En este proyecto de investigación se pretende mezclar dos tipos de materiales reciclados: RAP (Reciclado de Pavimento Asfáltico) y calamina de tal manera que cumplan con las especificaciones técnicas establecidas por el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU para un material típico de base granular, e investigar a través de la ejecución de diferentes ensayos de laboratorio el aporte del uso de este sistema más materiales reciclados en el mejoramiento de la capacidad portante del suelo para una sub rasante de una vía local en la ciudad de Bogotá.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. SISTEMAS DE CONFINAMIENTO CELULAR

Los sistemas de confinamiento celular (CCS, también conocidos como geoceldas), hacen parte de las nuevas tecnologías de materiales geosintéticos, empleados en la búsqueda del mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos. Dicho sistema es ampliamente usado en la industria de la construcción; principalmente en obras civiles como el caso de estructuras para el control de erosión, estabilización de suelos sobre superficies planas, estabilización de laderas escarpadas, protección de canales hidráulicos, refuerzo estructural de soporte de carga en infraestructura vial, retención de capas vegetales, entre otras.

Las Geoceldas están compuestas de tiras de polietileno, unidas con soldadura por medio de ultrasonidos de alta densidad (HDPE) u otras tiras de aleación de polímeros, que se expanden en el lugar, para formar una estructura en forma de panal, que puede ser llenado con arena, tierra, piedra u hormigón. La investigación y el desarrollo de los sistemas de confinamiento celular (CAC) se iniciaron con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. en septiembre del año 1975, para probar la viabilidad de la construcción de los caminos de acceso táctico de Los Puentes, sobre suelo blando.¹

Figura 1. Sistema de confinamiento celular



Fuente: Presentación Sistema Roadrunner Sintex

¹ ARQUYS ARQUITECTURA [sitio web]. Bogotá. ARQUYS. Construcción – confinamiento celular [consultado el 09 de Diciembre de 2019]. Disponible en <https://www.arqhys.com/arquitectura/confinamiento-celular.html>

4.1.1. Historia de los sistemas de confinamiento celular: El cuerpo de ingenieros del ejército de Los Estados Unidos de América desarrolló el primer sistema de confinamiento celular, a finales del año 1970 como un medio, para la construcción de caminos, pistas de aterrizaje, etc., sobre suelos blandos y a su vez con el fin de 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 sub-rasante de suelo suelto; podía proveer significativamente una mayor capacidad de carga y de apoyo que solamente capas de suelo compactado.

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 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 geoceldas para su uso en varias aplicaciones militares durante la operación “Desert Storm” o Tormenta del Desierto.²

Luego de implementado en la construcción de caminos y proseguir con las investigaciones, los ingenieros descubrieron que los sistemas de confinamiento de arena se desempeñaron mejor que las secciones convencionales de piedra triturada.

Llegaron a la conclusión de que un sistema de confinamiento de arena se podría desarrollar con una técnica de construcción conveniente para la construcción de caminos de acceso, sobre suelos blandos y que el sistema no se vería afectado negativamente por las condiciones de clima húmedo. Estos primeros esfuerzos condujeron a la comercialización civil del producto por parte de la empresa de Productos Presto, para producir el primer sistema de confinamiento celular

² GEOELDAS S.A. TECNOLOGÍA DE CONFINAMIENTO CELULAR [sitio web]. Argentina. GEOELDAS. Historia. [consultado el 09 de Diciembre de 2019]. Disponible en <https://www.geoceldas.com/historia>

depolietileno de alta densidad (HDPE), que fue de peso ligero, resistente y duradero.³

Este nuevo sistema de confinamiento celular fue utilizado por primera vez para:

- Las aplicaciones de soporte de carga en los Estados Unidos, a principios del año 1980.
- El control de la erosión de taludes y el revestimiento de canales en los Estados Unidos, en el año 1984.
- La contención de masas de suelo en Canadá, en el año 1986.

En la investigación realizada por los Doctores Bathurst y Jarrett, se descubrió que el confinamiento celular de reforzamiento, aplicado en bases de grava son equivalentes a aproximadamente a una capa del doble de espesor de suelo compactado de bases de grava sin reforzar. Además fue más eficaz en la reducción del desplazamiento lateral del material de relleno, bajo cargas convencionales de bases reforzadas.⁴

En cuanto a la efectividad del confinamiento, las geoceldas tienen características más atractivas, debido a su estructura en 3D, mejor que cualquier otro plano de refuerzo geosintético. Los resultados de la prueba triaxial, de gran escala en geoceldas aisladas, han demostrado que el confinamiento celular imparte la cohesión aparente del material granular, compactado en el orden de 169kPa – 190kPa (3500 libras por pie cuadrado – 4000 libras por pie cuadrado).

Los sistemas de confinamiento celular son ahora reconocidos como una tecnología importante cuando se aplica a:

³ ARQUYS ARQUITECTURA [sitio web]. Bogotá. ARQUYS. Construcción – confinamiento celular [consultado el 09 de Diciembre de 2019]. Disponible en <https://www.arqhys.com/arquitectura/confinamiento-celular.html>

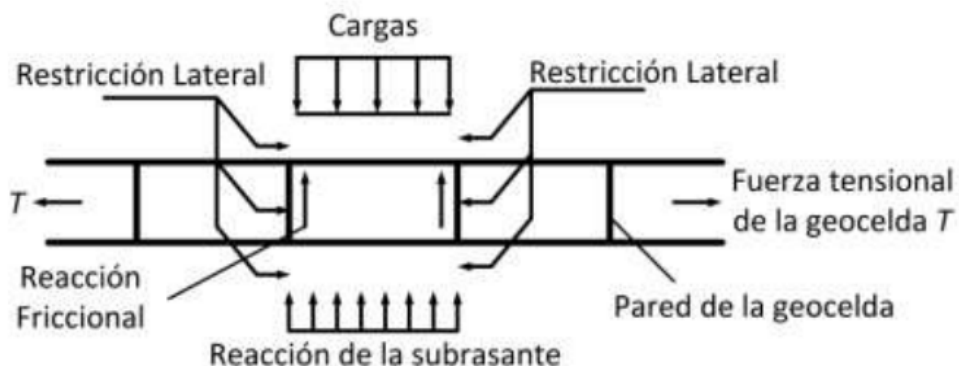
⁴ ARQUYS ARQUITECTURA [sitio web]. Bogotá. ARQUYS. Construcción – confinamiento celular [consultado el 09 de Diciembre de 2019]. Disponible en <https://www.arqhys.com/arquitectura/confinamiento-celular.html>

- Las carreteras y líneas ferroviarias.
- Reforzamiento de sistemas de muros de contención (Crowe, Bathurst y Alston, año 1989).
- La estabilización de taludes (Bathurst, Crowe y Zehaluk, 1993).
- Sistemas de control de erosión.
- Sistemas de revestimiento de canales (Engel, P. y Flato, G. 1987) (Simons, Li & Associates, 1988) (Wu y Austin, 1992).

4.1.2. Funcionamiento de los sistemas de confinamiento celular. En los apartados 4.1.2.1, 4.1.2.2 y 4.1.2.3, se presenta el mecanismo de funcionamiento de los sistemas de confinamiento celular o geoceldas, bajo la acción de cargas dinámicas y estáticas, según lo establecido por Zhang, Zhao, Shi, & Zhao, 2008.

4.1.2.1. Efecto de resistencia lateral o confinamiento. Al tener estructura tridimensional, éste geo-sintético confina y refuerza los materiales de relleno, logrando detener considerablemente la propagación lateral; y a su vez, aumenta la resistencia al corte de materiales de relleno, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Efecto de la resistencia lateral del reforzamiento con geocelda.



Fuente: Zhang, Zhao, Shi & Zhao (2008)

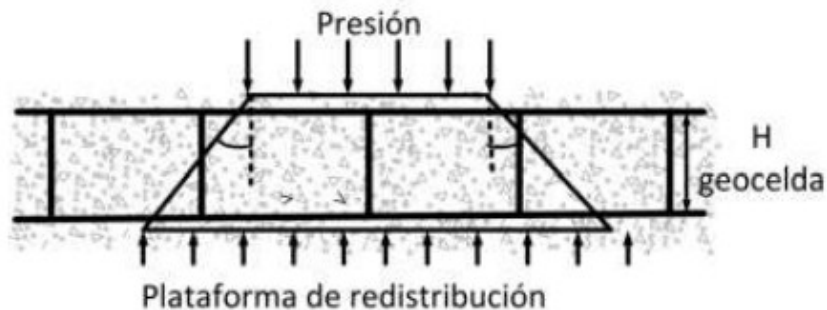
Las resistencias interfaciales, que resultan de la interacción entre la geocelda y los suelos existentes debajo (subrasante) y encima del refuerzo (sello u otra capa granular), aumentan el confinamiento lateral y disminuyen la tensión lateral, resultando así en un aumento en el módulo de la capa de refuerzo, una mejora en la distribución del esfuerzo vertical soportado llamado “efecto de dispersión del esfuerzo vertical”, y la reducción de la presión vertical sobre la parte superior de la capa de suelo correspondiente.⁵

Las investigaciones realizadas por Han y otros (2008), mostraron que el confinamiento con las geoceldas podría aumentar la capacidad de carga y el módulo de elasticidad de la arena. (Han, Yang, Leshchinsky, & Parsons, 2007).

Así mismo, Mhaiskar en 1992, concluyó que la resistencia a tensión generada en la pared de la geocelda, era el factor que más contribuía sobre el efecto de confinamiento.

4.1.2.2. Efecto de dispersión del Esfuerzo vertical: La capa horizontal reforzada con la geocelda se comporta como una plataforma de trabajo que redistribuye la carga por unidad de superficie sobre un área más amplia. Se refiere al efecto de dispersión del esfuerzo vertical, ilustrado en la Figura 3. Como resultado, la presión sobre la superficie del suelo es menor que sobre el suelo en ausencia de geocelda.

Figura 3. Efecto dispersión del esfuerzo vertical del reforzamiento con geocelda.



Fuente: Zhang, Zhao, Shi & Zhao (2008)

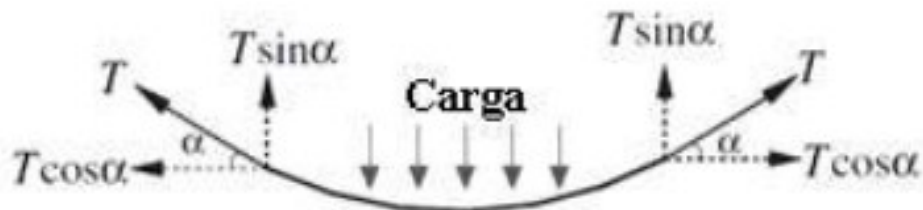
⁵ Martín Garzón, Laura Mercedes. Trabajo de Grado Maestría. Pontificia Universidad Javeriana de Colombia. Repositorio

Mhaiskar (1992), encontró que las geoceldas con un relleno denso proporcionan una mayor capacidad de carga, logrando distribuir la carga sobre un área más amplia; efecto que también se logra con refuerzo de bases con geosintéticos planos, ya que logran distribuir la carga aplicada, a un área más amplia en comparación con la base no reforzada, de acuerdo con Wayne y otros (1998). Con la distribución de la carga en la capa reforzada con la geocelda, se reduce la presión en la interfaz entre las capas subyacentes y suprayacentes.⁶

4.1.2.3. Efecto de membrana: El principal efecto del reforzamiento con geoceldas, consiste en el hecho de que estas sostienen el suelo horizontalmente, encapsulándolo dentro de él, y de este modo, se limitan las deformaciones laterales del suelo bajo presión; luego, el comportamiento de la fuerza de deformación del suelo es mejorado. (Figura).

La estructura interconectada, absorbe las presiones a través de la fuerza de tracción de los anillos y las fuerzas de oposición.

Figura 4. Efecto de membrana del reforzamiento con geocelda.

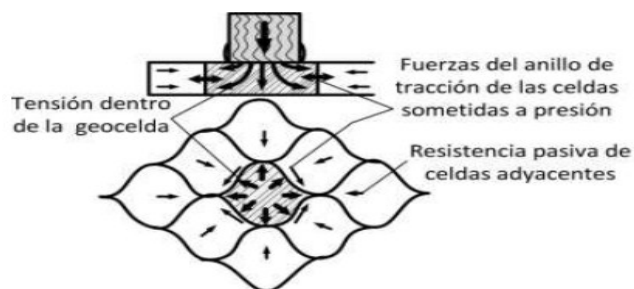


Fuente: Zhang, Zhao, Shi & Zhao (2008)

En otras palabras, cuando un suelo reforzado con geoceldas es sometido a presiones, cuanto mayor rigidez tiene el suelo reforzado que el suelo adyacente y circundante, se ejerce una reacción hacia arriba por el suelo encapsulado, que reduce la presión neta aplicada a las capas inferiores. Internamente, en el suelo reforzado, la dilatación lateral del material reforzado es limitada por la fuerza de tracción de los anillos y la resistencia de las celdas adyacentes (Meyer & Emerleben, 2005), como se ilustra en la Figura 5.

⁶ Martín Garzón, Laura Mercedes. Trabajo de Grado Maestría. Pontificia Universidad Javeriana de Colombia. Repositorio

Figura 5. Esquema de funcionamiento de geoceldas.

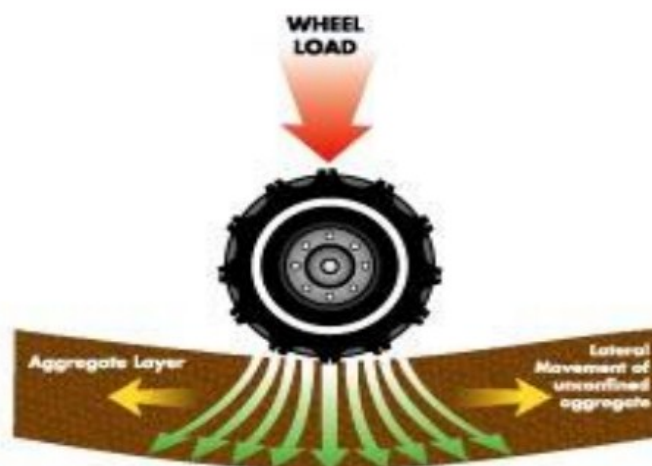


Fuente: Meyer & Emersleben (2005)

Meyer y Emersleben, 2005, concluyeron que las tres funciones de las geoceldas sobre el suelo tienen un efecto de adherencia entre partículas, actuando como si hubiera una cohesión sobre ellas, denominada “aparente”, efecto que genera un aumento de la capacidad de carga, y rigidez de suelo reforzado con geocelda.

4.1.3. Mecanismo de trabajo de las geoceldas: En el siguiente apartado, se presenta el mecanismo de trabajo de una estructura de pavimento sin reforzar y con presencia de suelos blandos; respecto a un suelo blando mejorado con sistemas de confinamiento celular o geoceldas.

Figura 6. Comportamiento de la Subrasante ante la aplicación de esfuerzos en su superficie.

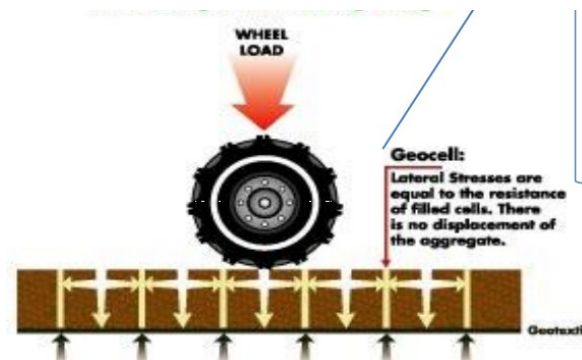


Fuente: Presentación Syntex geosynthetics Soluciones de ingeniería

En la Figura 6, se aprecia cómo se transmiten los esfuerzos desde la superficie de apoyo de las ruedas hacia las capas subyacentes de la estructura de pavimento.

En el caso de los suelos blandos dichos esfuerzos exceden la resistencia al corte del suelo, causando la formación de surcos y deformaciones irreversibles en la estructura de soporte.

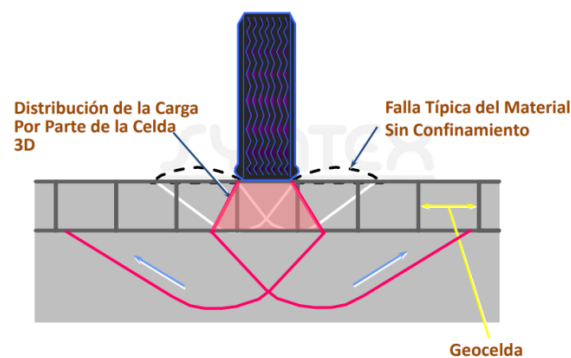
Figura 7. Esfuerzos laterales en geocelda.



Fuente: Presentación Syntex geosynthetics Soluciones de ingeniería

En la Figura 7 se observa como las tensiones laterales llegan a igualar a la resistencia de las células o celdas llenas. Este efecto evita el desplazamiento del agregado.

Figura 8. Bulbo de presiones en la estructura del pavimento.



Fuente: Presentación Syntex geosynthetics Soluciones de ingeniería

En la Figura 8, se evidencia la diferencia en el bulbo de presiones y el respectivo plano de falla asociado. En línea punteada se observa el ahuecamiento generado por el plano de falla en el suelo sin confinamiento y por otro lado se observa en

color rojo una distribución uniforme y mejor transferencia de esfuerzos hacia la subrasante reforzada con sistemas de confinamiento celular.

Ahora bien, según el fundamento teórico expuesto; se puede afirmar que la instalación de la geocelda reduce eficazmente la cantidad y la calidad de los agregados requeridos para el mejoramiento de los suelos con baja capacidad portante.⁷ El empleo de unidades de confinamiento celular evita que las cargas aplicadas ejerzan un empuje y desplacen los agregados, debido a que las celdas de material están conectadas entre sí, por lo tanto, las cargas aplicadas se reparten en zonas más amplias. Éste supuesto, los altos costes de los agregados y de su transporte hacen que la geocelda sea una elección más que recomendable por precio y eficacia.

4.1.4. Beneficios del empleo de sistemas de confinamiento celular: Los sistemas de confinamiento celular o geoceldas, han demostrado ser una solución eficiente y económica para los complejos problemas de estabilidad de suelos. El sistema estructural tridimensional ofrece múltiples beneficios en los sitios en donde existe presencia de suelos de consistencia blanda, sin disponibilidad de materiales de lleno económicos y de calidad, o donde los métodos de construcción de vías convencionales son de difícil ejecución debido a condiciones topográficas, meteorológicas, etc.

En vista de lo anterior, se presenta las ventajas y/o beneficios atribuibles a la implementación de los sistemas de mejoramiento de subrasantes basados en modelos de confinamiento celular o geoceldas.

4.1.4.1. Ventajas de la implementación de sistemas de Geocelda: Una de las principales ventajas de implementar el sistema de confinamiento celular en los diseños de estructuras de pavimento, bien sea para rehabilitación vial u obras nuevas; es la capacidad que brindan dichos elementos a las propiedades de confinamiento y estabilidad de los materiales de lleno, como el caso de bases y subbases granulares de origen de cantera o tratamientos de reciclaje. A su vez, dicho sistema aporta propiedades de control de cizallamiento y restricciones importantes ante la acción de desplazamientos laterales y verticales.

⁷ TEXDELTA NONWOVENS TEJIDOS TÉCNICOS [sitio web]. Cocentaina España. TEXDELTA. Geosintéticos. Geoceldas. Funciones y aplicaciones principales [consultado el 10 de diciembre de 2019]. Disponible en texdelta.com/blog/geoceldas-funciones-y-aplicaciones-principales/

Por otro lado, el hecho de incluir este sistema de confinamiento a los diseños de las estructuras de pavimento, garantiza el aumento del número estructural efectivo, lo cual, también permite la reducción de costos de construcción y los requerimientos técnicos en cuanto a los materiales de lleno. Dicha disminución ronda aproximadamente entre el 30 y 50% del valor de una estructura convencional, debido a que se reducen costos de excavación, de transporte de materiales, renovación de redes de servicios públicos, entre otros parámetros que serán explicados detalladamente en el desarrollo del presente documento.

Por otro lado, se obtienen beneficios en materia de capacidad de carga, debido a que las unidades de confinamiento celulares permiten que los materiales de subsuelo soporten más de 10 veces la cantidad de aplicaciones de carga cíclica, antes de acumular deformación permanente; ya que existe una distribución adecuada y uniforme de los esfuerzos sobre los suelos de fundación. Además, este sistema de mejoramiento de subrasantes brinda más del 30% de reducción de la presión si se utiliza como capa de soporte debajo del pavimento.

Por último, se aporta en la reducción de la resistencia al rodamiento, la estabilización de base para superficies pavimentadas, el control de baches en superficies no pavimentadas y la reducción de la necesidad de mantenimiento.⁸

A continuación; se enumeran otras ventajas y beneficios que brinda la implementación de sistemas de confinamiento celular en proyectos ingenieriles.

- Alta resistencia a la tensión.
- La estructura de las geoceldas presenta una estructura similar a la de un panal de abejas, lo cual permite que el terreno no se deforme excesivamente en sentido lateral.
- Las cavidades de la geocelda pueden ser rellenas con grava o arena, o materiales de cantera como bases y subbases granulares. Por otro lado puede evaluarse la posibilidad de realizar llenos con material remanente o reciclado.

⁸ TEXDELTA NONWOVENS TEJIDOS TÉCNICOS [sitio web]. Cocentaina España. TEXDELTA. Productos. Control de erosión. DLT Geocelda [consultado el 10 de diciembre de 2019]. Disponible en <https://texdelta.com/geocelda-dlt/>

- Permite el drenaje en sentido horizontal y vertical gracias a la perforación de la lámina.
- Facilidad de almacenaje e instalación, la geocelda se presenta en forma comprimida de acordeón para mejorar la manipulación y el almacenamiento.
- Mejor rendimiento de los materiales de relleno al tiempo que incrementa la capacidad de soporte de carga de las capas de pavimento estructural.
- Se incrementa la rigidez de relleno y de la celda por la tensión de los aros desarrollada en la pared de la celda.
- Evita el movimiento y protege el relleno del suelo de cargas constantes, manteniendo la compactación y reduciendo el desgaste.
- Reducción de la cantidad de relleno en un 50% o más.
- Permite usar material excavado en sitio como material de relleno.
- Además de brindar refuerzo al suelo, evita la formación de cárcavas.
- Permite el paso de agua y nutrientes en el suelo, al mismo tiempo que lo protegen de las condiciones climatológicas adversas.
- Permite la colocación del sustrato vegetal y la fijación de las especies vegetales mejorando el enraizamiento.
- Instalación rápida y sencilla.
- Reducción del mantenimiento.
- Menos costes y tiempo en la regeneración de espacios degradados y a su vez reducción del impacto ambiental.

4.1.5. Caracterización de los sistemas de confinamiento: En las tablas 1, 2 y 3, se presentan las características tipo de los sistemas de confinamiento celular o geoceldas, los cuales nos indican las propiedades, dimensiones y parámetros de evaluación de calidad requeridos en proyectos de construcción.

Tabla 1. Características dimensionales de las geoceldas.

Dimensiones de los paneles y las celdas	
Propiedad	Vías
Distancia entre costillas	330 mm ($\pm 2.5\%$) / 356 mm ($\pm 2.5\%$)
Altura de las celdas	120 mm ($\pm 5\%$) / 150 mm ($\pm 5\%$)
Dimensiones de la celda abierta	245 x 210 mm ($\pm 3\%$) / 260 x 224 mm ($\pm 3\%$)
No. De celdas /m ²	39/35
Tamaño de sección expandida	2.5 x 8.0m ($\pm 3\%$ máx.) / 2.7 x 7.4m ($\pm 3\%$ máx.)
Área de sección expandida	20 m ²

Fuente: Propia

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las geoceldas.

Propiedades Mecánicas			Categoría de Geocelda			
Propiedad	Unidad	Norma	A	B	C	D
Resistencia en la Soldadura (Valor mínimo) ($\pm 7\%$)	kN/m	ISO 13426 -1	18	17	17	16
Esfuerzo de Rotura del Material ($\pm 7\%$)	MPa	ASTM D638 - ISO 527	22	21	20	20
Resistencia Última (Tira Ancha sin Perforaciones) ($\pm 11\%$)	kN/m	ISO 10319	25	23	21	20
Resistencia última (Tira ancha con perforaciones) ($\pm 11\%$)	kN/m	ISO 10319	18	17	16	15
Notas: Para categoría A y B es una carga de 6.6 kN/m, para categoría C y D es una carga 4.4 kN/m						

Fuente: Propia

Tabla 3. Propiedades de Estabilidad dimensional de las geoceldas.

Estabilidad Dimensional			
Propiedad	Unidad	Norma	Valor
Coefficiente de expansión Térmica (CTE)	ppm/°C	ISO 11359-2 (TMA) ASTM E831	≤135
Coefficiente de interacción entre suelo y celda	-	ASTM D5321	0.95
Resistencia a la degradación ultravioleta	Minutos	ASTM D5885 (HPOIT @ 200°C) GRI GM13	≥400
Deformación plástica promedio por el método acelerado Paso 1 a 44°C Paso 2 a 51°C Paso 3 a 58°C Paso 4 a 65°C	% deformación	ASTM D6992 (SIM) (2)	≤0.5 ≤ 0.6 ≤ 0.9 ≤ 1.0
Módulo flexural para cada temperatura +30°C +45°C +60°C	MPa	ISO 6721-1 ASTM E 2254 (DMA)	> 725 > 625 > 475

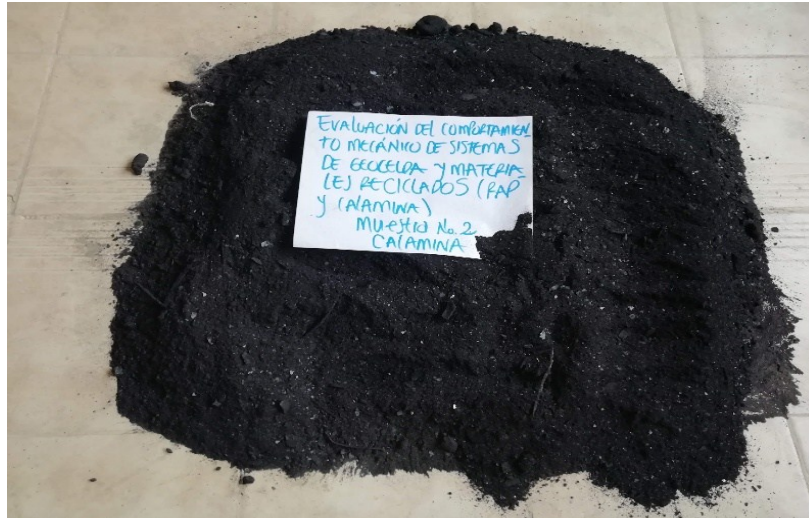
Fuente: Propia

4.2. CALAMINA

La calamina se obtiene durante el proceso de terminado específicamente en el paso del temple, que consiste en calentar la lámina de acero por encima de la temperatura crítica superior y posteriormente es enfriado bruscamente. En este proceso, se obtiene la homogenización del grano de acero y como resultado se obtiene una pieza mucho más dura pero frágil (“efecto similar a un vidrio que esta duro, pero si es golpeado se quiebra”). Además, se desprenden partículas del mismo material en formas de escamas lo que se conoce como des carbonización u oxidación del acero (a las escamas también se les llama calamina) y son consideradas como un residuo sólido.⁹

⁹ Mejía y López, 2012

Figura 9. Muestra de Calamina.



Fuente: Propia

La calamina es una capa dura y lisa, de color gris azulado, que se forma de inmediato sobre los productos de acero que resulta del proceso de tratamientos térmicos, Además es un material no corrosivo su pH es de 6 unidades y su humedad es de 0.63% (Mejía y López, 2012).

4.2.1. Composición de la calamina: La calamina presenta varios componentes y propiedades, esenciales para comprender los efectos que pueden provocar en las mezclas asfálticas, estos son presentados en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Propiedades Físicoquímicas de la Calamina.

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO	MÉTODO ANALÍTICO
Textura	N/A	Frágil y poco flexible	Visual
Color	N/A	Gris Azulado	Visual
Humedad	%	0.63	Gravimétrica
pH	Unidades	6.00	Potenciómetro
Grasas y Aceites	mg/L	462,90	Extracción soxhlet
Corrosividad		No corrosivo	Potenciómetro
Densidad	g/ml	2.12	m/v

Fuente: (Mejía y López, 2012)

Tabla 5. Análisis químico y mineralógico de cascarilla de laminación.

Parámetros	Resultado (%)	Parámetros	Resultado (%)
Aluminio	0.007	Manganeso	0.13
Cadmio	0.000002	Níquel	0.016
Calcio	0.003	Silicio	0.37
Plomo	0.0008	Titanio	0.00062
Cobre	0.002	Cinc	0.003
Cromo	0.004	Aceites y grasas	0.252
Magnesio	0.002	Humedad	0.08

Fuente: (Macedo Pereira, Krause de Verne, & María Lenz, 2011)

4.2.2. Antecedentes del uso de la calamina en Colombia: En Colombia, no se ha incursionado el uso de la Calamina en temáticas relacionadas con pavimentos; sólo han sido vistos unos casos. Sin embargo, la calamina ha sido usada en algunos proyectos de investigación, realizados en Brasil, en donde se han podido encontrar algunos beneficios y algunas novedades con este producto.¹⁰

- Respecto a la capacidad de resistencia, Macedo Pereira, Kruse de Verney, & María Lenz (2011), presentaron algunas investigaciones donde la calamina mejoró o empeoró ciertos materiales. Primero se demostró que el uso de calamina en los hormigones, con una relación agua/ cemento de 0,55 y 0,66, estaba reduciendo la resistencia a la compresión, presentando la hipótesis de que los aceites que tiene la calamina, influyen en las reacciones de hidratación del cemento de Portland.
- Por otro lado, Almeida (2009), realizó la incorporación de calamina libre de aceite, para la producción de bloques de hormigón, encontrando un mejor rendimiento.

¹⁰Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Cristhian DAVid. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

- Prado et al. (2008), usó la Calamina para sustituir el agregado fino, mostrando que el material es una alternativa viable para proteger el hormigón de la radiación. Es decir, reveló ser una alternativa a los establecimientos de salud de blindaje con las actividades de teleterapia.
- Así mismo, Mejía y López (2012) demostraron que usando un máximo de 5% de Calamina en la mezcla usada para realizar 12 especímenes cilíndricos, y dejándolos 14 días en proceso de secado, la resistencia de la mezcla aumenta (con un punto máximo de 2200 psi). No obstante, en la elaboración de 24 bloques, no se encontró una mejora significativa en la resistencia, en 7 y en 14 días en proceso de secado, mostrando un beneficio bastante reducido. Este último, es uno de los pocos proyectos que ha usado la calamina en Colombia, presentando una base de algunos efectos positivos en la capacidad de resistencia que produce este producto.
- Rincón & Reina (2017) realizaron la sustitución del agregado pétreo natural con 6% de calamina (hasta el pasa 200) y adicionaron el aditivo Husil. Obtuvieron resultados positivos, en variables tales como la estabilidad, el porcentaje de vacíos, la rigidez, entre otros, en comparación con la mezcla de control. Demostraron que la mezcla MDC-19 pudo mejorar sus propiedades con la inclusión de la Calamina. Es decir, presentaron un punto de partida para el progreso de las mezclas asfálticas en Colombia (en lugares que presenten clima de alta temperatura).¹¹
- Respecto a los beneficios ambientales de usar calamina, Ferreira da Cunha, Gomes Mol, Eleotério Martins, & Santos Assis (2006) presentaron el origen de la calamina, obtenida en los procesos de fabricación de acero, explicando por qué es nombrada “cascarilla de laminación” y por qué se considera un producto reciclado.

Este estudio demostró como en la industria del acero, a veces se desperdician los residuos de la laminación, es decir lo que se denomina calamina. En los últimos años, estos residuos fueron usados en distintos materiales para comprobar su funcionalidad. Estos procesos no siempre mejoraron las propiedades, pero al menos las mantuvieron en los rangos deseados. Determinaron la importancia de considerar que, al ser un producto reciclado, usarlo beneficia los parámetros ambientales, económicos y productivos. Por lo tanto, varias empresas empezaron

¹¹Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Cristhian DAVid. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

a producir una política sobre la gestión ambiental, debido a la amplia cifra de toneladas de acero producido.¹²

4.3. CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

Índice de resistencia de los suelos de subrasante, subbase y base. El ensayo CBR se utiliza en el diseño de pavimentos. En el ensayo, un pistón circular penetra una muestra de suelo a una velocidad constante. El CBR se expresa como la relación porcentual entre el esfuerzo requerido para que el pistón penetre 2.54 o 5.08 mm (0.1 o 0.2 pulgadas) dentro de la muestra de ensayo, y el esfuerzo que se requirió para penetrar las mismas profundidades una muestra patrón de grava bien gradada.¹³

4.4. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO – RAP

Es el término que se le da a los materiales del pavimento removidos y/o reprocesados que contienen asfalto y agregados. Estos materiales se generan cuando los pavimentos asfálticos son removidos para reconstrucción o rehabilitación. Cuando se tritura y tamiza apropiadamente, el RAP consiste en agregados de alta calidad, bien distribuidos recubiertos por asfalto.

Las características del RAP dependen en gran parte de las propiedades de los materiales constituyentes y el tipo de mezcla asfáltica (capa de rodadura, capa de base, etc.). Puede haber diferencias sustanciales entre mezclas asfálticas con respecto a la calidad del agregado, tamaño y consistencia.

El pavimento asfáltico reciclado es un material que se produce a partir de los procedimientos de fresado de las carpetas asfálticas. En el caso particular de estudio, estos residuos son transportados hasta un lugar de disposición temporal hasta que se requieran para ser reutilizados en estructuras de pavimento nuevas o en rehabilitaciones.¹⁴

¹²Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Cristhian David. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

¹³Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013, Sección 100 – Suelos, Pág. E 148-3.

¹⁴ Buitrago Zarabanda, Juan Felipe y González Méndez, Ashley Nataly. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD

Dicho lo anterior, se puede afirmar que el pavimento asfáltico reciclado RAP, posee las propiedades de un material de composición heterogénea; debido a los contenidos de cemento asfáltico residual, su gradación variada y su bajo contenido de material fino.

Ahora bien, teniendo en cuenta la composición mencionada del RAP; se infiere que éste tipo de materiales debe ser caracterizado teniendo en cuenta dos metodologías distintas. La primera desde el punto de vista de la distribución granulométrica y la segunda desde el punto de vista del envejecimiento del cemento asfáltico. En nuestro caso se tendrá en cuenta únicamente la caracterización granulométrica y las propiedades mecánicas de las partículas dado que se busca aprovechar el material de fresado como lleno de unidades de confinamiento celular en reemplazo de materiales de bases y subbases granulares.

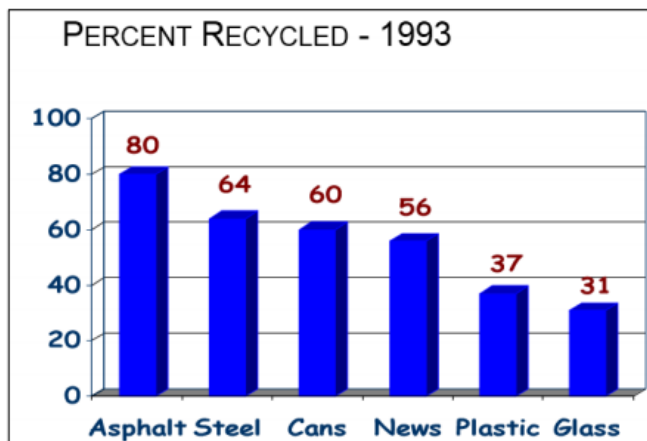
4.4.1. Antecedentes del pavimento asfáltico reciclado (RAP): El reciclado de pavimento asfáltico, es un método que se basa en la reutilización de materiales del pavimento deteriorado. A estos materiales generalmente se les añade nuevo elementos como son agentes rejuvenecedores, agregado pétreo, mezcla asfáltica nueva, etc. Se puede decir que el 100% de los materiales recuperados de un pavimento asfáltico pueden ser reutilizados o reciclados, ya sea en la misma obra en la que son generados o en otro pavimento en la que se vaya a utilizar el reciclado como método de conservación.¹⁵

La historia del pavimento asfáltico reciclado se remonta a principios del siglo pasado (1915). No obstante, esto no ocurrió sino hasta el embargo de los años 70's cuando se difundió esta técnica.

Fue en 1956 que en Estados Unidos fue concebida esta técnica y en Europa en los años setenta. En esos años había poca experiencia en tecnología de colocación y sobretodo diseño. La evolución de los métodos de construcción se dio entre 1978 y 1980. Desde entonces el reciclado se ha convertido en algo común.

¹⁵ Cobarruvias Limón, Pedro. Presentación fundamentos del reciclado de mezclas asfálticas. Grupo Surfex México

Gráfica 1. Materiales Reciclados en Estados Unidos de Norte América en la década del 90.



Fuente: North Central Superpave Center

En 2001 el método de diseño Superpave fue modificado para considerar las mezclas con reciclado (McDaniel y Anderson). Se mejora la técnica de fresado, las plantas continuas y discontinuas ya contemplan el uso de este material. Las empresas productoras de mezcla en el año 2006, se encontraron una situación similar que en los años 70's, ya que hubo aumento de los costos de energía y del asfalto.¹⁶

En estados Unidos son muy pocos los estados que no han permitido el uso de material reciclado dado que la normatividad AASHTO permite un porcentaje de reciclado de mezcla asfáltica menor o igual a un 25%. Actualmente es una técnica muy importante en todo el mundo y, redituable desde el punto de vista económico como ambiental.

El Asphalt Institute menciona que se considera a un pavimento asfáltico reciclado de bajo porcentaje, cuando este es menor al 15%, y un reciclado alto cuando este es mayor al 15%, limitando siempre el porcentaje de reciclado a 30%. De acuerdo al Asphalt Institute los parámetros más comunes de reciclado son entre 15 y 25%. En la Tabla 6, se presentan los porcentajes de uso de este material en proyectos de relevancia en Estados Unidos. Adicionalmente, la Federal Highway Administration reporta que aproximadamente, están siendo utilizados entre el 80 y 85% de todo el pavimento que están extrayendo de vías viejas o deterioradas, es

¹⁶ Cobarruvias Limón, Pedro. Presentación fundamentos del reciclado de mezclas asfálticas. Grupo Surfex México

decir que están aprovechado la mayoría de ese material que extraen de sus vías para nuevos proyectos.

La aplicación de dicho material proveniente del reciclado de carpetas asfálticas presenta como restricción de acopio en centros especializados del 20%, dadas las cantidades de RAP que producen anualmente, además fue declarado como el material reciclado No. 1 en este país según la Federal Highway Administration Research and Technology en el año 2012.

Tabla 6. Porcentaje de asfalto reciclado, utilizado en algunos estados de EEUU.

Location	% RAP	Dates of Construction
North Carolina	40 %	September 2007
South Carolina	30 and 50 %	October 2007
Wisconsin	25 %	November 2007
Florida	45 %	December 2007
Kansas	30 to 40 %	May 2008
Delaware	35 %	Summer 2008
Minnesota (MnROAD)	30 %	2008
Illinois	10 to 50 % allowed	2008

Fuente. Federal Highway Administration

4.4.2. Propiedades generales del pavimento asfáltico reciclado (RAP): Las características del RAP, dependen en gran parte de las propiedades de los materiales constituyentes y el tipo de mezcla asfáltica (capa de rodadura, capa de base, etc.). Puede haber diferencias sustanciales entre mezclas asfálticas con respecto a la calidad del agregado, tamaño y consistencia.

Durante su procesamiento, virtualmente todo el RAP es triturado a un tamaño de 38 mm o menos, con un tamaño máximo permitido de 51 mm o 63 mm. La mayoría de fuentes de RAP son agregados gruesos bien distribuidos, comparables a, o ligeramente más finos y variables que los agregados triturados naturales.¹⁷

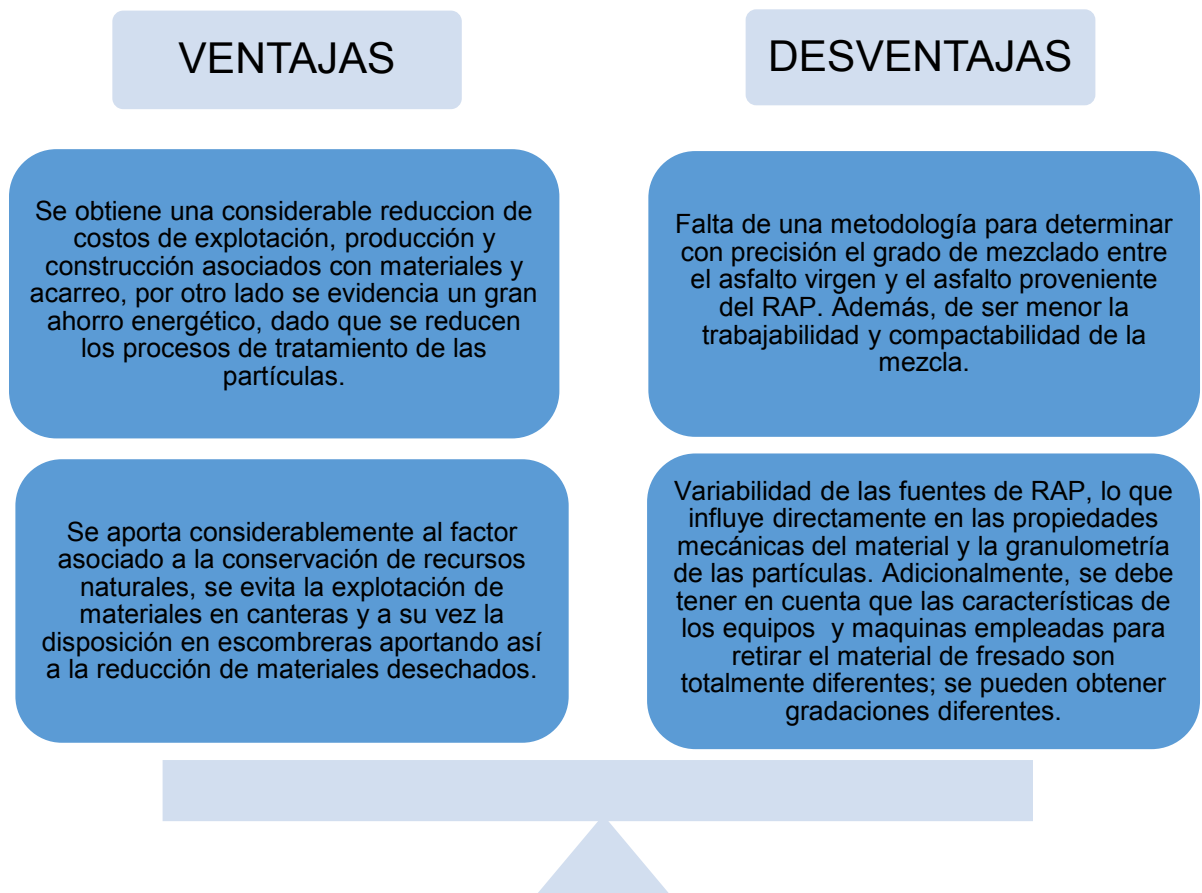
El contenido de asfalto del RAP se encuentra típicamente en el rango de 3% a 7% por peso. El asfalto adherido al agregado es más rígido que el asfalto virgen debido a la oxidación y el envejecimiento del pavimento.

¹⁷Laboratorio Nacional de materiales y modelos estructurales, LamanuelUCR, PAVIMENTOS VERDES. Ficha técnica PAVimento Asfáltico Reciclado. Universidad de Costa Rica.

4.4.3. Ventajas y desventajas del uso del RAP: El uso de material reciclado en la construcción, va argumentado en la búsqueda constante de la disminución del impacto ambiental y la optimización de recursos tanto físicos y monetarios, asimismo la reducción del impacto social, al momento de realizar las intervenciones requeridas, todo lo anterior en aras de llegar a un desarrollo sostenible. Es por eso, que se debe analizar las ventajas y desventajas inherentes al desarrollo de obras civiles, que trae consigo la implementación de éste tipo de materiales.

Con referencia a lo anterior, se presentan algunas de las ventajas y desventajas asociadas al uso de pavimentos asfálticos recuperados o reciclados RAP desde el punto de vista técnico, ambiental y económico.

Figura 10. Ventajas y desventajas del uso del RAP

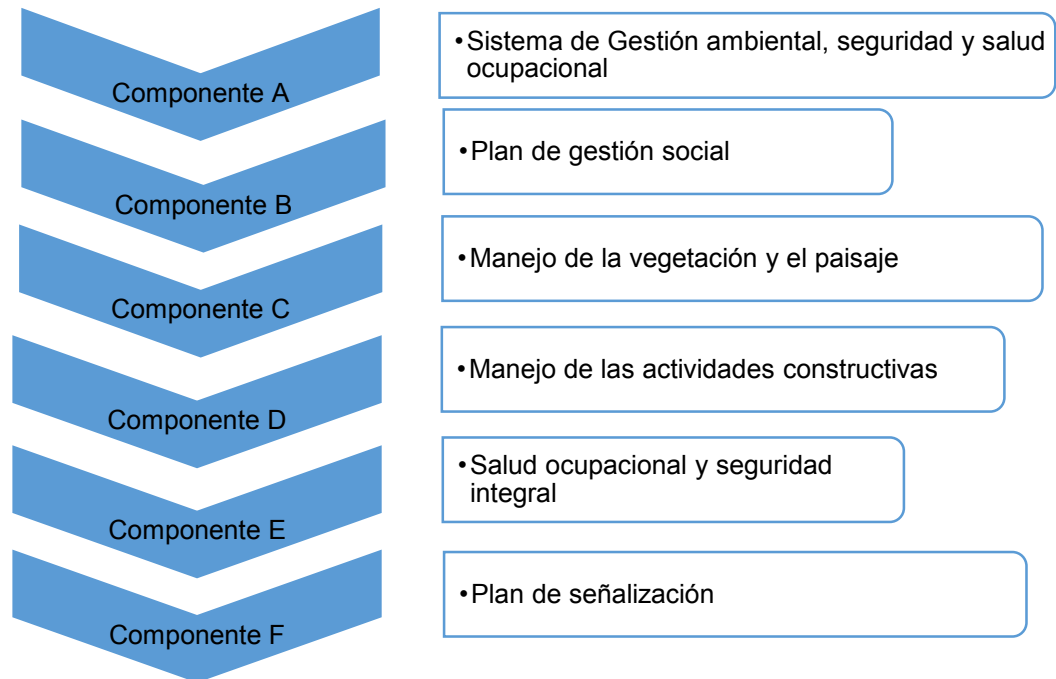


Fuente: Propia

Se recomienda realizar la caracterización del material de RAP para cada proceso de reutilización a implementar.

4.4.4. El reciclado de pavimento asfáltico en Bogotá: El Instituto de Desarrollo Urbano IDU, cuenta con la Guía de Manejo Ambiental, avalada por la Secretaría Distrital de Ambiente, mediante la Resolución No. 991 de 2001. En ella, se establecen las medidas necesarias en materia de GESTIÓN AMBIENTAL EN OBRA para prevenir, controlar, mitigar y/o compensar los impactos y alteraciones, que se puedan generar durante la ejecución de cada proyecto de infraestructura vial adelantada por parte del IDU. Dicha guía cuenta con los 6 Componentes base, relacionados abajo:

Figura 11. Componentes de gestión ambiental en obra



Fuente: Propia

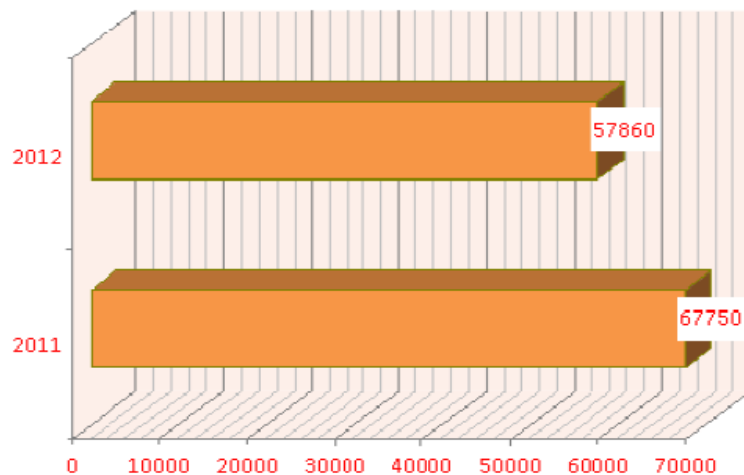
Siendo el componente D, el que contempla el programa que debe desarrollar cada contratista, para realizar el manejo adecuado de escombros, material reutilizable, material reciclable y desechos que se generan dentro de cada frente de obra. ¹⁸

¹⁸ Presentación Primer Foro Internacional para el Manejo Integral de RCD en el Programa Basura Cero - Escombros Cero”. Instituto de Desarrollo Urbano IDU, Bogotá 2012.

Durante la ejecución de las obras públicas en la ciudad de Bogotá, se puede acotar que se produce actualmente unos volúmenes de materiales (escombros, demolición, excavación entre otros) que demandan el aprovechamiento, reutilización y/o en su defecto la disposición final en sitios autorizados. A su vez se menciona que, para realizar el tratamiento de dichos residuos RCD producidos durante la ejecución de los proyectos, se asigna la responsabilidad directa a los contratistas, los cuales se encargarán directamente de disponer dichos materiales aprovechables en los sitios de acopio y/o tratamiento autorizados por las autoridades ambientales y referenciados por medio del directorio de proveedores IDU, de los cuales se destacan el Greco, Cyclomat, Reciclados Industriales de Colombia y los patios del IDU y la UMV (Unidad de Mantenimiento Vial).

En materia de estadísticas, se puede mencionar que para el año 2019 se han beneficiado las Veinte (20) Alcaldías Locales de la ciudad, a través de sus programas con el apoyo de la UMV (Unidad Administrativa Especial e Rehabilitación y Mantenimiento Vial).¹⁹ En la Gráfica 2 se presenta, la estadística entregada por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, relacionando el volumen en metros cúbicos de material de fresado suministrado a las 20 Alcaldías Locales, para los años de 2011 y 2012, aclarando que anualmente estos porcentajes varían entre el 5 y 10% de su volumen en función de la ejecución presupuestal de cada administración, la cual tiende a aumentar progresivamente.

Gráfica 2. Volumen de fresado entregado a Alcaldías locales (m³)



Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano IDU

¹⁹ Presentación Primer Foro Internacional para el Manejo Integral de RCD en el Programa Basura Cero - Escombros Cero”. Instituto de Desarrollo Urbano IDU, Bogotá 2012.

4.4.5. Normativa vigente sobre el reciclado de pavimento asfáltico en Bogotá:

En los siguientes subcapítulos, se presenta resumidamente la reglamentación o normatividad vigente en la ciudad de Bogotá, relacionada al manejo de los residuos de demolición y reconstrucción generados durante la etapa de construcción de obras de infraestructura. Se hace énfasis en la normatividad relacionada al reciclaje de pavimentos asfálticos.

4.4.5.1. Gestión Integral de residuos de construcción y demolición RCD: Este documento oficial, hace las veces de guía para el desarrollo del documento base conocido como Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra. Dicha guía fue desarrollada en apoyo interadministrativo ejecutado por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU y la Secretaría Distrital de Ambiente SDA.

El objeto del plan mencionado, es desarrollar e implementar en obras que generen movimientos de materiales superiores a 1000 m³, estrategias que permitan disminuir la producción de residuos y maximizar la utilización de RCD durante el desarrollo de la misma (Secretaría Distrital de Ambiente, 2015).

La generación de dicho documento, debe ceñirse a los lineamientos establecidos por la Resolución 1115 de 2012, en la cual se adoptan “Los lineamientos técnico ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital” (Secretaría Distrital de Ambiente, 2012) y debe ser desarrollado por la constructora encargada de la obra.

Para el desarrollo del documento, deben clasificarse los materiales de acuerdo a los lineamientos expuestos en la tabla 7.

Allí se puede evidenciar que los materiales granulares provenientes de las diferentes etapas de construcción no son los únicos que pueden ser reciclados ya que, por ejemplo, los residuos de carácter metálico también pueden ser aprovechables (rejillas, señales de información, etc.). Adicionalmente, establece los materiales que no son aprovechables, es decir los cuales deben ser dispuestos en sitios autorizados por la misma Secretaría de Ambiente.

En la Tabla 7 se presenta en resumen, la clasificación de los residuos de construcción y demolición según la Secretaría Distrital de Ambiente, para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Demolición y Reconstrucción.

Tabla 7. Clasificación de residuos de construcción y demolición RCD.

Categoría	Grupo	Clase	Componentes
A. RCD Aprovechables	I- Residuos mezclados	I- Residuos mezclados	Concretos, cerámicos, ladrillos, arenas, gravas, cantos, bloques o fragmentos de roca, baldosín, mortero y materiales inertes que no sobrepasen el tamiz No. 200 de granulometría
A. RCD Aprovechables	II-Residuos de material fino	1. Residuos finos no expansivos	Arcillas (caolín), limos y residuos inertes, poco o no plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz No. 200 de granulometría (1).
		2. Residuos finos expansivos	Arcillas (montmorillonitas) y lodos inertes con gran cantidad de finos altamente plásticos y expansivos que sobrepasen el tamiz # 200 de granulometría (1) (2).
	III- Otros Residuos	1. Residuos no pétreos	Plásticos, PVC, maderas, cartones, papel, siliconas, vidrios, cauchos.
		2. Residuos de carácter metálico	Acero, hierro, cobre, aluminio, estaño y zinc.
		3. Residuos orgánicos de pedones	Residuos de tierra negra.
		4. Residuos orgánicos de cespedones	Residuos vegetales y otras especies bióticas.
	B. RCD No Aprovechables	IV-Residuos peligrosos	1. Residuos corrosivos, reactivos, radioactivos, explosivos, tóxicos, patógenos (biológicos)

Categoría	Grupo	Clase	Componentes
B. RCD No Aprovechables	V-Residuos especiales	No definida	Poliestireno - Icopor, cartón-yeso (drywall), llantas entre otros
	VI- Residuos contaminados con otros residuos	1. Residuos contaminados con residuos peligrosos	Materiales pertenecientes a los grupos anteriores que se encuentren contaminados con residuos peligrosos. Estos deben ser dispuestos como residuos peligrosos.
		No definida	Residuos contaminados con otros residuos, que hayan perdido las características propias para su aprovechamiento.
	VII- Otros residuos	No definido	Residuos que por requisitos técnicos no es permitido su reúso en las obras.
<p>Notas:</p> <p>(1) De acuerdo al Sistema internacional unificado de clasificación de suelos (Unified Soil Classification System -USCS-), la diferencia entre los residuos y materiales gruesos y los finos se establece por el paso de la malla o tamiz # 200 de granulometría (0,075mm), al igual que sus propiedades para usos de construcción.</p> <p>(2) Es de considerar que las lutitas o rocas arcillosas de tamaño semejante a un residuo pétreo que se presentan en algunas partes de la ciudad, tienen propiedades expansivas que no permiten emplearlas para el uso de las cimentaciones en la construcción por su composición (mezcla de arcillas y limos expansivos).</p>			

Fuente. Secretaría Distrital de Ambiente, 2015

Una vez conocida la clasificación de cada uno de los residuos de Construcción y demolición, la Secretaria de Ambiente por medio de la guía mencionada; establece los destinos y usos de cada uno de los residuos, los cuales se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Alternativas de gestión de uso de residuos.

Residuo	Alternativa
Concretos	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar como masa para rellenos •Reutilizar como suelos en carreteras •Reciclar como grava suelta •Reciclar para producción de morteros y cemento •Reciclar como granulado

Residuo	Alternativa
Cerámicos	<ul style="list-style-type: none"> •Reciclar como adoquín •Reciclar como fachada •Reciclar para acabados
Asfaltos	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar como masa para rellenos •Reciclar como asfalto
Metales	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar para aplicación en otros productos •Reciclar como aleación
Madera	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar para casetones, vallados y linderos •Reciclar para tableros y aglomerados
Vidrio	<ul style="list-style-type: none"> •Reciclar para vidrio
Pétreos	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar como áridos finos y gruesos
Plásticos	<ul style="list-style-type: none"> •Reciclar como plásticos
Telas, bloques, entre otros	<ul style="list-style-type: none"> •Reciclar como base para nuevos productos
Residuos de excavación	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar como relleno y recuperación de taludes •Reutilizar como estabilización de suelos
Elementos arquitectónicos	<ul style="list-style-type: none"> •Reutilizar como nuevos productos

Fuente. Secretaría Distrital de Ambiente, 2015

4.4.5.2. Resolución 26700 de 2015: En esta resolución se adopta el “Manual para la supervisión, control, manejo y operación de los sitios de almacena

miento transitorio de pavimento asfáltico fresado SATPAF versión 1.0” (Secretaría Distrital de Ambiente, 2012). Ésta tiene como objetivo reducir los costos ocasionados por el tratamiento de los residuos generados en una obra, mediante la correcta utilización de los mismos. Este manual tiene por objetivo principal la

búsqueda del aprovechamiento máximo de los recursos, permitiendo reutilizar algunos de los desechos generados.²⁰

4.4.5.3. Resolución 1115 de 2012: En ésta se adoptan los lineamientos técnico - ambientales para las actividades de aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital.

La resolución busca establecer normativas respecto a la producción y disposición de materiales y residuos. Adicionalmente, establece que se debe hacer uso de un 15% de ese material reciclado reutilizable, con aumentos anuales del 5%. Lo anterior busca mejorar las condiciones ambientales de Bogotá y reducir el impacto ambiental que las obras constructivas le generan a la ciudad.

4.4.5.4. Parcheo con material de pavimento asfáltico reciclado MBR (Instituto de Desarrollo Urbano, 2015): Esta normativa tiene como objetivo describir el parcheo de baches con material asfáltico reciclado, emulsión asfáltica de rompimiento rápido y algunos agregados que se requieren para completar granulometrías faltantes. Teniendo en cuenta el tipo de emulsión utilizada, es necesario que la mezcla sea fabricada entre 5 y 10 minutos antes de la colocación de la misma. Adicional a esto, la normativa establece áreas máximas a intervenir, especificaciones de los materiales a utilizar, preparación de la superficie existente y proceso constructivo correcto (Instituto de Desarrollo Urbano, 2015).

4.4.5.5. Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar, empleando ligantes bituminosos (INV – E 461 – 07) y Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica (IDU – 450 – 11): En estas normativas se establece el procedimiento a seguir cuando se va a realizar una capa asfáltica, empleando RAP y emulsiones asfálticas, in situ. En estas normas se establece la granulometría a emplear en este tipo de intervenciones y las condiciones para agregar material diferente al reciclado, es decir material virgen.

Así mismo establece los tipos de emulsión asfáltica a utilizar y algunos modificadores que pueden mejorar las mezclas. Estas especificaciones también incluyen procesos constructivos para las vías. La Tabla 9 muestra las diferencias entre las normas IDU e INVIAS (Instituto Nacional de Vías) (Instituto de Desarrollo Urbano, 2013).

²⁰Alba Burgos, Paula Alejandra. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes. Repositorio.

Tabla 9. Diferencias entre normativa IDU e INVIAS.

DIFERENCIAS NORMAS IDU E INVIAS		
ENSAYO	NORMA IDU	NORMA INVIAS
DUREZA		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (% máximo)	SBG-B: 40%, SBG-A: 40%, BG-C y BG-B: 40% y BG-A:35%	NT1, NT2 y NT3: 40%
Degradación en el equipo Micro-Deval (% máximo)	SBG-C Y SBG-B: 35%, SBG-A: 30%, BG-C: 30%, BG-B: 25% y BG-A:20%	NT1: 30% y NT2 y NT3: 25%
10% de finos (valor en seco [kN])	SBG-B: 50kN, SBG-A: 60kN, BG-C: 60kN, BG-B: 75kN y BG-A: 100kN	NT1 y NT2: no aplica y NT3: 70kN
DURABILIDAD		
Pérdidas en ensayo de solidez (% máximo de sulfato de magnesio)	Base y subbase granular: 18%	Base y subbase granular: 18%
LIMPIEZA		
Límite líquido (% máximo)	SBG-A y SBG-B: 25% y BG_A, BG-B y BG-C: 25%	El INVIAS no tiene establecido parámetros de límite líquido
Índice de plasticidad (% máximo)	SBG-A y SBG-B: 3%, BG_A y BG-B: NP y BG-C: 3%	El INVIAS, para el material de aporte, estipula que el índice de plasticidad debe ser NP
Equivalente de arena (% mínimo)	SBG-B: 18%, SBG-A: 20% y bases granulares: 20% (en caso de que el equivalente de arena sea inferior pero se cumpla plasticidad y azul de metileno, se aceptará el material)	30%
Valor de azul de metileno (máximo)	Base y subbase granular: 10mg/g	Base y subbase granular: 10mg/g (el ensayo de azul de metileno sólo será exigido cuando el equivalente de arena es igual o mayor al 25%)
Terrones de arcilla y partículas deleznales (% máximo)	Base y subbase granular: 2%	Base y subbase granular: 2%
GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS		
Alargamiento y aplanamiento	NA, para material de subbase granular. Para base granular se establece un valor máximo de 35%	El INVIAS establece un % de partículas planas y alargadas, relación 5:1. Máximo 10%
Partículas fracturadas mecánicamente (1 cara y 2 caras)	SBG-A 1 cara: 50% y 2 caras 30%. Para base granular se requiere un porcentaje mínimo de trituración. BG-C 1 cara: 60%, BG-C 2 caras: 40%, BG-A y BG_B 1 cara: 85% y BG-A y BG-B 2 caras: 60%	1 y 2 caras: 50%
CAPACIDAD DE SOPORTE		
CBR (% mínimo)	SBG-B: 40%, SBG-A: 60%, BG-A y BG-B: 100% y BG-C: 80%	80%
ADHESIVIDAD (AGREGADO COMBINADO)		
Resistencia conservada Inmersión-Compresión (% mínimo)	NA	50%

Fuente: Instituto de Desarrollo Urbano, 2015

4.4.5.6. Resolución 2397 de 2011: Por medio de la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital y además se establece que a partir de abril del año 2012 las entidades públicas que desarrollen obras de infraestructuras al interior del perímetro urbano del Distrito Capital deberán incluir desde la etapa de estudios y diseños los requerimientos técnicos necesarios con el fin de lograr la utilización de elementos reciclados provenientes de los centros de tratamiento y/o aprovechamiento de escombros legalmente

constituidos y/o la reutilización de los generados por las etapas constructivas y de desmantelamiento, en un porcentaje no inferior al 10%, del total de los metros cuadrados a construir por la entidad anualmente.²¹

4.5. SUBRASANTE

La subrasante es la superficie terminada de la estructural vial, a nivel de excavaciones o movimientos de tierra (corte y relleno), sobre el cual se realizará la instalación de los componentes de la estructura del pavimento o afirmado. También se puede definir como el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la estructura vial, que se construye entre el terreno natural conformado y la cota rasante.

4.6. ECUACION DE IVANOV PARA EL CÁLCULO DEL CBR EQUIVALENTE EN SISTEMAS MULTICAPA REFORZADOS

El diseño racional o mecánico – empírico de pavimentos asfálticos permite una mayor versatilidad en la definición de espesores y calidades para las capas constitutivas de la fundación y la estructura de los mismos. En el diseño de capas de fundación sobre subrasantes de baja capacidad portante suele requerirse la evaluación analítica de una capa de conformación con el fin de satisfacer los requerimientos del tráfico del equipo de construcción a corto plazo y del tráfico vehicular durante la operación del pavimento. Algunas de estas herramientas numéricas disponibles para el análisis de capas de conformación son las generadas por Burmister, Odemark, Ivanov, Kirk y la Guía Francesa de Diseño, surgidas a raíz de las teorías de modelación descritas en el capítulo 4.7.²²

4.6.1. Definición de la ecuación: En cuanto a la ecuación de IVANOV, se puede mencionar que nos permite hacer el cálculo de la capacidad portante equivalente del material de apoyo de la estructura de un pavimento, empleándose la siguiente expresión.

²¹ Secretaría Distrital de Ambiente SDA. Decreto 2397 de Abril 15 de 2011. Publicado en el Registro Distrital 4646 de mayo 3 de 2011

²² Vásquez Varela, Luis Ricardo y García Orozco, Francisco Javier, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales - ANÁLISIS RACIONAL DE CAPAS DE CONFORMACIÓN PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS -XIXCILA – Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017

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

Dónde:

E_{eq} = Módulo elástico equivalente del sistema

E_{sbr} = Módulo elástico de la subrasante

E_{mej} = Módulo elástico del mejoramiento

e_{mej} = Espesor de la capa de mejoramiento

a = Radio del área de carga, 15.27cm

n : Parámetro adimensional determinado con la expresión

$$n = \sqrt[2.5]{E_{mej} / E_{sbr}}$$

4.6.2. Hipótesis de partida: La teoría elástica multicapa de IVANOV para el cálculo del CBR y modulo elástico equivalente de un suelo reforzado, hace las siguientes suposiciones para la solución analítica del estado de esfuerzos, deformaciones y espesores de capas de mejoramiento de una estructura de pavimento²³:

- Las propiedades de cada capa son homogéneas.
- Cada capa tiene un espesor finito, excepto la subrasante.
- Cada capa es isotrópica.
- En cada interfaz entre capas se desarrolla una fricción total.

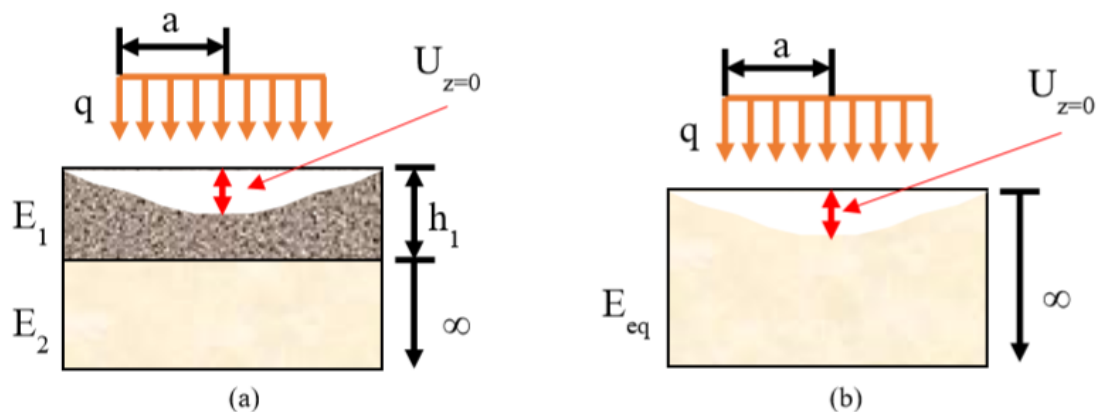
²³Yoder, E y Witczak. Principles of Pavement Desing. Segunda Edición.

- Entre dos estratos existe continuidad de esfuerzos.
- Los estratos se caracterizan por su módulo de elasticidad, espesor y la razón de Poisson.

4.6.3. Análisis de capas de conformación mediante modelos elásticos de dos capas a partir de la ecuación de IVANOV: El análisis mecanicista de capas de conformación estima un módulo elástico efectivo de la fundación a partir de los módulos elásticos de la subrasante y la capa de conformación y del espesor de esta última. A mayor espesor y rigidez de la capa de conformación se obtiene un mayor módulo efectivo para el diseño estructural del pavimento.²⁴

La transformación se hace igualando la deflexión superficial del sistema de dos capas elásticas con la deflexión de un semiespacio de Boussinesq bajo una presión uniforme, q , aplicada en un área circular de radio, a ; tal como se ilustra en la Figura 12.

Figura 12. Transformación de un sistema de dos capas (a) en un sistema de una capa con rigidez equivalente (b).



Fuente: Vásquez y García (2017)

²⁴ Vásquez Varela, Luis Ricardo y García Orozco, Francisco Javier, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales - ANÁLISIS RACIONAL DE CAPAS DE CONFORMACIÓN PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS -XIXCILA – Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017

La deflexión del sistema de dos capas se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$U_z = 0 = \frac{1.5(q)(a)}{E_2} (F_2)$$

Donde $U_z = 0$ es la deflexión en la superficie del sistema bajo el centro del área cargada, q es la presión uniforme aplicada, a es el radio del área circular cargada, E_2 es el módulo de la capa inferior y F_2 es un factor que depende de las relaciones h_1/a y E_1/E_2 .

La deflexión del sistema de una sola capa se calcula mediante la ecuación:

$$U_z = 0 = \frac{1.5(q)(a)}{E_{eq}}$$

Donde E_{eq} es el módulo del material. Los demás términos son iguales a la ecuación para determinar la deflexión en un sistema de dos capas.

Igualando las dos ecuaciones, se encuentra que el módulo equivalente del sistema de una sola capa para que su deflexión sea igual a la del sistema de dos capas es:

$$E_{eq} = \frac{E_2}{F_2}$$

El factor F_2 se puede obtener mediante la aplicación de la teoría de capas elásticas o mediante ecuaciones como las propuestas por Odemark, Kirk e Ivanov, mostradas a continuación.

$$F_2 = \left\{ \frac{1}{\sqrt[2]{1 + \left(\alpha \cdot \frac{h_1}{\alpha} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} + \frac{\left[1 - \frac{1}{\sqrt[2]{1 + \left(\alpha \cdot \frac{h_1}{\alpha} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} \right]}{\left(\frac{E_1}{E_2}\right)} \right\} \quad (a)$$

$$F_2 = \left\{ \left[1 - \frac{1}{\sqrt[2]{1 + \left(\alpha \cdot \frac{h_1}{\alpha} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} \right] \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right) + \frac{1}{\sqrt[2]{1 + \left(\alpha \cdot \frac{h_1}{\alpha} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}\right)^2}} \right\} \quad (b)$$

$$F_2 = 1 - \left\{ \frac{2}{\Pi} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{1.40}} \right] \cdot \tan^{-1} \left[\alpha \cdot \frac{h_1}{\alpha} \cdot \frac{\left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{0.40}}{2} \right] \right\} \quad (c)$$

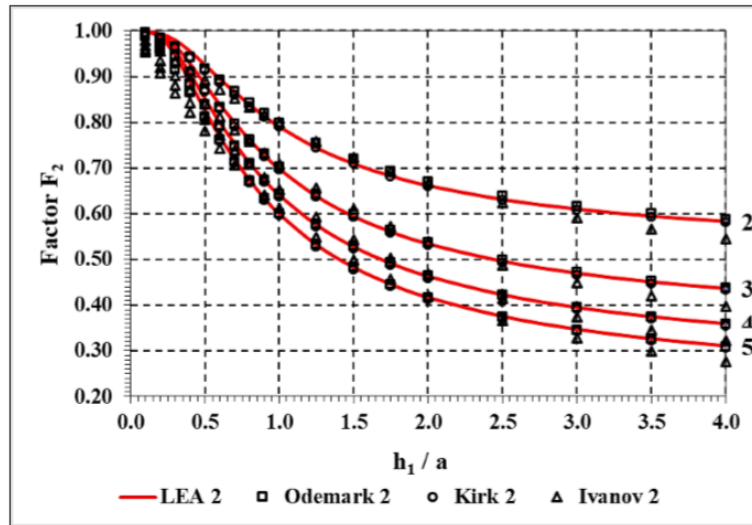
Donde α es un factor que permite ajustar las ecuaciones con las respuestas del modelo elástico multicapa. En la ecuación original de Odemark $\alpha = 1.0$, en la ecuación original de Kirk $\alpha = 0.8$ y en la ecuación original de Ivanov $\alpha = 1.0$. Los demás términos de las ecuaciones (a), (b) y (c) ya fueron definidos anteriormente.

Se observa que las ecuaciones (a) y (b) son idénticas, salvo por el valor de α con el cual se presentaron en sus referencias originales.

En la Figura 13 se presentan las tres ecuaciones comparadas con la solución obtenida mediante la teoría de capas elásticas de Burmister (LEA). El ajuste de los tres modelos con los coeficientes α propuestos en cada caso es evidente. El uso de cualquiera de las ecuaciones es equivalente a un análisis del sistema de capas mediante cualquier software disponible para tal fin (BISAR, DEPAV, KENLAYER, PITRA-PAVE).²⁵

²⁵ Vásquez Varela, Luis Ricardo y García Orozco, Francisco Javier, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales - ANÁLISIS RACIONAL DE CAPAS DE CONFORMACIÓN PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS -XIXCILA – Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017

Figura 13. Solución de las ecuaciones de Odemark ($\alpha=0.90$), Kirk ($\alpha=0.90$) e Ivanov ($\alpha=0.85$) ajustadas a la solución del sistema elástico de capas. Los números de curva son E_1/E_2



Fuente: Vásquez y García (2017)

Tal como se mencionó en el apartado 4.6.2. Hipótesis de partida; las ecuaciones (a), (b) y (c) son función de la relación modular E_1/E_2 .

4.6.4. Limitaciones en el uso de la ecuación de IVANOV y ecuaciones constituyentes del modelo multicapa: El uso de la ecuación de IVANOV, se ve limitada por el hecho de que se puede trivializar todos los potenciales beneficios de emplear el método mecanicista en el análisis de pavimentos asfálticos.

Además, cuando se emplean dichas ecuaciones sumadas al uso de correlaciones para calcular los módulos elásticos de los materiales de las capas de un sistema multicapa, surgen múltiples incertidumbres dado que los materiales realmente no presentan un comportamiento isotrópico, generando que la transmisión de esfuerzos no presente un comportamiento lineal y a su vez que los materiales en ciertas ocasiones no presenten el comportamiento elástico adecuado.

Adicionalmente, debido a que los estratos se caracterizan por su módulo de elasticidad, espesor y la razón de Poisson, los cuales son determinados en su mayoría por medio de correlaciones generadas a partir del CBR de la subrasante como las descritas en el capítulo 12, tabla 37.

Dichas ecuaciones de acuerdo a lo mencionado por Rondón y Reyes (2015); generan incertidumbres principalmente fundamentadas en que el CBR es una medida indirecta de la resistencia al corte y de la rigidez del material de la subrasante en condiciones no drenadas, a su vez dichos valores de CBR son medidos bajo la aplicación de cargas monotónicas (Se sabe que en un pavimento las cargas aplicadas son cíclicas).

Por otro lado, los niveles de esfuerzo en un pavimento son muchos más bajos que aquellos que se generan en la muestra cuando se realiza en ensayo del CBR; adicionalmente por medio de la expresión de IVANOV y las demás ecuaciones empleadas en análisis de sistemas multicapa, no se tienen en cuenta los efectos del medio ambiente sobre las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de las capas.

Por último es pertinente aclarar que a pesar de los avances en el área del desarrollo de programas y ecuaciones constitutivas, la deformación que experimentan los materiales es difícil de predecir principalmente por las siguientes razones:

- Bajo carga cíclica la respuesta de estos materiales es fuertemente no lineal. Además, cuando se experimentan esfuerzos de corte ellos exhiben dilatación y deformación tanto resiliente como permanente (Uzan, 1999).
- La estructura del pavimento está compuesta por diferentes materiales que experimentan diversos comportamientos bajo carga cíclica y condiciones del medio ambiente; lo anterior debido a que los materiales granulares presentan anisotropía inherente, bien sea por la geometría de las partículas, los efectos de la compactación y la acción de la gravedad lo que infiere que a diferencia de las hipótesis ya presentadas estos no son isotrópicos. Dicho comportamiento anisotrópico no es tenido en cuenta por la mayoría de ecuaciones constitutivas, ya que es de difícil obtención numérica y experimental. Rondón y Reyes (2015).
- Las capas asfálticas presentan un comportamiento viscoso con componentes elásticas y plásticas.
- La temperatura y humedad de las capas granulares varía en el tiempo y, por lo tanto, también lo hace su comportamiento con cada repetición de carga.

- El tipo y la magnitud de la carga cíclica cambian constantemente y no son conocidos con exactitud previa a los ensayo de laboratorio y a las simulaciones computacionales. Además, las trayectorias de esfuerzos en el laboratorio son limitadas y no reproducen las reales en el pavimento.
- El tamaño máximo del agregado para conformar sistemas multicapa, por lo general se encuentran entre los 2 y 5 cm, y se requieren en los ensayos experimentales grandes especímenes, de al menos 12.5 cm de diámetro.
- El comportamiento de las muestras en el laboratorio es diferente al que se presenta en campo.
- En el laboratorio, por lo general, el efecto de la compactación y la historia de carga durante la construcción del pavimento no se tiene en cuenta.

4.6.5. Verificación in situ de las hipótesis de diseño: El diseño de capas de conformación no debe limitarse a la estimación de los módulos elásticos de las capas mediante correlaciones ni al cálculo de un módulo elástico efectivo para los análisis en el sistema de capas elásticas. Se requiere seguimiento y control de calidad durante la construcción con el fin de depurar las hipótesis de trabajo que actualmente se emplean en el diseño. Las ecuaciones de correlación entre el CBR y las constantes de un modelo no lineal del módulo resiliente del suelo (k_1 & k_2) deben alimentarse con datos de deflectometría de campo durante los procesos constructivos. Se deben elaborar bases de datos de comportamiento para diferentes tipos de suelos y materiales de capa de conformación. ²⁶

La deflectometría para esta actividad no puede ser una réplica de los procedimientos de evaluación de pavimentos en servicio, es decir, mediante la evaluación de cargas similares a las del tráfico real con equipos como el deflectómetro de impacto (FWD). Para lograr una adecuada representación de los niveles de esfuerzo de trabajo en el largo plazo se deben emplear deflectómetros livianos de impacto (LWD) con un método de ensayo como el ASTM E2583, lo cual permite simular intensidades de esfuerzo similares a las que se presentarán

²⁶ Vásquez Varela, Luis Ricardo y García Orozco, Francisco Javier, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales - ANÁLISIS RACIONAL DE CAPAS DE CONFORMACIÓN PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS -XIXCILA – Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017

en la fundación del pavimento una vez la estructura se encuentre en servicio. En la evaluación in situ de los módulos movilizados por la fundación del pavimento debe tenerse en cuenta que el valor de diseño a largo plazo corresponde a la peor situación hídrica, situación que podría no coincidir con el momento de evaluación del pavimento en construcción.²⁷

Por tanto de acuerdo a lo expuesto por Vásquez y García (2017), se sugiere que:

- Los suelos finos de subrasante y las capas granulares son materiales de reología compleja y requieren un estudio detallado de sus propiedades mecánicas más allá del uso rutinario de correlaciones entre parámetros de resistencia, como el CBR, y un valor único de módulo elástico.
- Es necesario implementar la medida in situ de los módulos elásticos movilizados por los suelos de subrasante y las capas de conformación considerando la no linealidad de los materiales, es decir, evaluándolos con niveles de esfuerzo representativos de las condiciones a largo plazo durante la operación del pavimento. En ese sentido son útiles equipos como los LWD, los ensayos de placa o incluso la viga Benkelman pero bajo una carga reducida.²⁸

4.7. MODELACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

En los siguientes ítems se presentan algunos conceptos clave y teorías desarrolladas con el objetivo de la creación, ejecución de modelos y análisis de estructuras de pavimento a nivel mundial.

El empleo de modelos, permite desarrollar un entendimiento lógico matemático de los fenómenos físicos lo cual a su vez brinda herramientas que facilitan la comprensión de los problemas a resolver.

²⁷ LCPC - SETRA, Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique, Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Service d'études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements, 1994, p. 266.

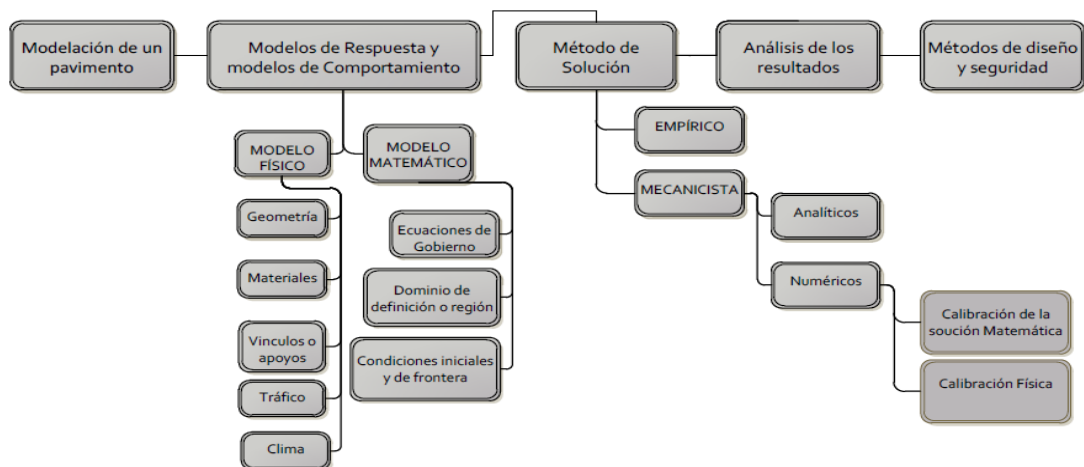
²⁸ Vásquez Varela, Luis Ricardo y García Orozco, Francisco Javier, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales - ANÁLISIS RACIONAL DE CAPAS DE CONFORMACIÓN PARA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS -XIXCILA – Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Medellín 2017

4.7.1. Concepto de modelación: La modelación juega un papel fundamental como medio de solución de problemas existentes en el campo de la ingeniería. Por tal motivo, el desarrollo y utilización de los modelos para sistemas en general es una de las tareas científicas más importantes a desarrollar en la actualidad. Los modelos y los métodos de modelación se convierten por tanto en importantes herramientas de trabajo. (Recarey 1999)

Se define la modelación como el método de manejo práctico o teórico de un sistema por medio del cual se estudiará este, pero no como tal, sino por medio de un sistema auxiliar natural o artificial, el que, desde el punto de vista de los intereses planteados, concuerda con el sistema real que se estudie. Es decir, es el método que opera de forma práctica o teórica como un “objeto”, no de forma directa, sino utilizando cierto sistema auxiliar (natural o artificial) el cual se encuentra en una determinada correspondencia objetiva con el “objeto” modelado y está en condiciones de sustituir al “objeto” que se estudia en determinadas etapas de la investigación, permitiendo obtener información susceptible de comprobaciones experimentales. (Recarey 1999), (Ibañez 2001)

El comportamiento que sigue el proceso de la modelación se basa en etapas por las que se debe transitar, manteniendo una relación directa y continua desde la concepción del problema real. A continuación se muestra el esquema correspondiente a la concepción de la modelación de un pavimento.

Figura 12. Esquema general de la modelación de un pavimento.



Fuente: Estado del conocimiento en la modelación de pavimentos rígidos (modelos de respuesta) Ing. Félix Michael Hernández López, Ing. Anabel Badía Herrera, Dr. Ing. Eduardo Tejeda Piusseaut, Dr. Ing. Luis Emilio Serrano.

En los siguientes apartados, se presenta de forma cronológica como ha ido evolucionando históricamente la modelación de pavimentos a través de las diferentes teorías.

4.7.2. Desarrollo histórico de la modelación de pavimentos: La modelación de pavimentos comenzó a desarrollarse a finales del siglo XIX en Francia de la mano del matemático Valentín Boussinesq, quien en el año de 1885 planteó la primera teoría de modelación. Posteriormente en 1926 en Dinamarca el Ingeniero Westergaard partió del trabajo de Boussinesq para crear su modelo, agregando variaciones debido a temperatura y cargas de tránsito.²⁹

Entre 1938 y 1944 en Inglaterra Albert Hubert Arthur Hogg presentó su modelo considerando para el análisis por primera vez al pavimento como una estructura multicapa. Para 1945 en Estados Unidos de América, Donald M. Burmister propuso su propia teoría de modelación de pavimentos considerando cada capa, sus espesores, composición y características como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.³⁰

A partir de lo propuesto por Burmister, en 1975 los estadounidenses Yoder y Witzack publicaron una generalización del modelo multicapa definiendo los parámetros sobre los cuales se basan los softwares utilizados al día de hoy para la modelación.

En base a todos estos estudios, se comenzó a programar software para que pudieran realizar los cálculos de manera más eficiente. Los Softwares que actualmente son más utilizados en el modelado MCE (Multicapa Elástica), son los siguientes:

- 3D MOVE de la Universidad de Nevada.
- BISAR de la empresa SHELL.
- WinDEPAV de la Universidad del Cauca.

²⁹ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

³⁰ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

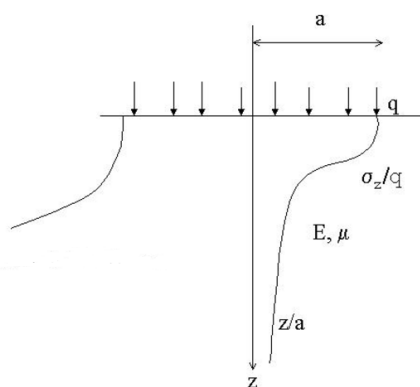
- PITRA-PAVE de LanammeUCR.

4.7.3. Teorías de modelación de pavimentos (Unicapa): En los siguientes numerales, se presentan las teorías más representativas empleadas para el desarrollo de modelos de pavimentos de una sola capa.

4.7.3.1. Modelo de Boussinesq (1885): El primer modelo usado para determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento surge gracias al matemático francés Joseph Valentín Boussinesq, quien en 1885 propuso una serie de ecuaciones para determinar los esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones a cualquier profundidad de la masa de suelo, su estudio se basó en una carga estática concentrada que puede ser extrapolada como un área circular, dicha carga actúa sobre un semi-espacio infinito en planta y profundidad, considerando además que el mismo es continuo, homogéneo, isótropo y elástico lineal, con un módulo de elasticidad “E” y una relación de Poisson “v” (Figura 13).

Este primer modelo desarrollado por Boussinesq puede ser aplicado solamente en pavimentos cuya estructura y subrasante posean módulos de elasticidad muy similares, estando lejos de representar una masa de suelo real, no obstante, se simplifica el análisis matemático que impone dicha masa.³¹

Figura 13. Modelo de Boussinesq (1885) - Difusión del esfuerzo vertical σ_z .



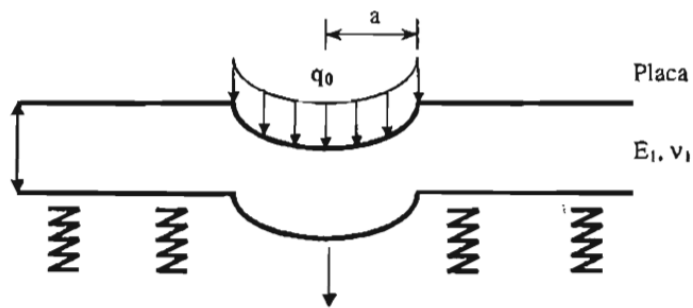
Fuente: Fredy Alberto Reyes. Diseño Racional de Pavimentos.

³¹ Fredy Alberto Reyes Lizcano. Diseño racional de pavimentos. Primera edición. 2003. Bogotá CEJA – Centro Editorial Javeriano.

4.7.3.2. Modelo de Westergaard (1926): Westergaard en 1926 utilizó la teoría elástica de capas para predecir la respuesta de las cargas aplicadas por las ruedas en el pavimento, partiendo de la hipótesis de Boussinesq, obtuvo soluciones analíticas para las tensiones y las deflexiones debido a las variaciones de temperatura y a las cargas de tráfico aplicadas. En este análisis se asumió que el pavimento actúa como un sólido elástico homogéneo e isotrópico en equilibrio y el suelo soportante se asimila a una serie de resortes, y su funcionamiento se basa en que la reacción que el apoyo neumático trasmite es proporcional al desplazamiento producido. (Figura 14)

La teoría de Westergaard difiere de otros modelos por las hipótesis que plantea, básicamente no coinciden en cuanto a la naturaleza de los materiales (elástica o viscoelástica), la tipología de las cargas, las condiciones de contacto entre capas (adherencia total, parcial o nula) y las condiciones de contorno.³²

Figura 14. Modelo de Westergaard (1926).



Fuente: Fredy Alberto Reyes. Diseño Racional de Pavimentos.

4.7.4. Teorías de modelación multicapa elástica de pavimentos (MCE): Las teorías mencionadas anteriormente idealizaban el pavimento flexible como una estructura de una sola capa, claramente esta idealización no proporciona datos verídicos, para presentar un modelo más apegado a las condiciones reales se plantearon teorías considerando el pavimento como una estructura multicapa.³³

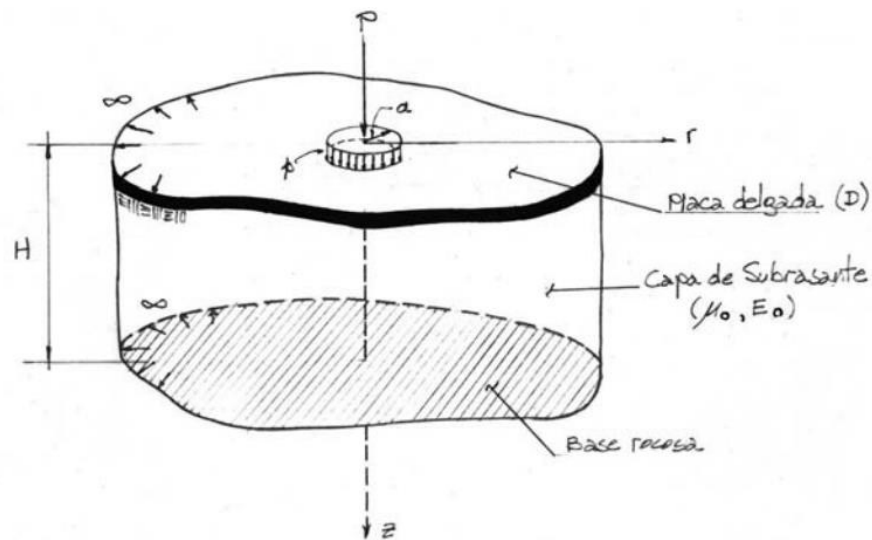
Existen dentro de la teoría de capas elásticas dos modelos fundamentales, el modelo de Hogg y el modelo multicapas de Burmister.

³² Fredy Alberto Reyes Lizcano. Diseño racional de pavimentos. Primera edición. 2003. Bogotá CEJA – Centro Editorial Javeriano.

³³ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

4.7.4.1. Modelo de Hogg (1944): Albert Hubert Arthur Hogg presentó una solución matemática práctica con la cual simplificó el sistema multicapa elástico típico por un modelo equivalente bicapa el cual se compone de una capa rígida sobre un medio elástico. Su procedimiento se centraba en utilizar las deflexiones producidas en el centro de la carga y una deflexión adicional fuera del punto inicial de carga. Además, sus cálculos toman en cuenta las variaciones en el espesor del pavimento y la relación entre la rigidez de pavimento y la rigidez de la subrasante. Lo anterior puede apreciarse en la Figura 15.

Figura 15. Modelo de Hogg (1944)



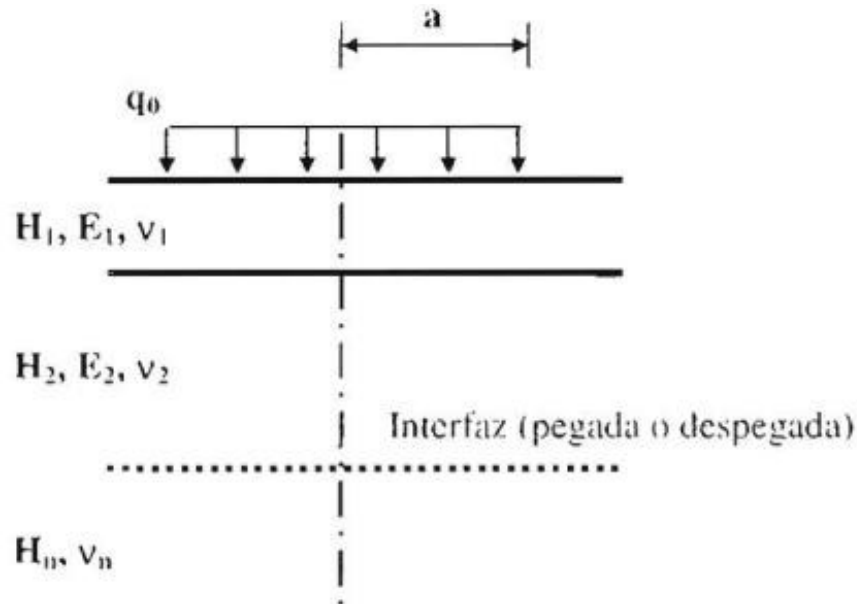
Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos basados en la interpretación de curvas de deflexiones.

4.7.4.2. Modelo de Burmister (1945): Luego de la revolucionaria teoría Bicapa de Hogg, Donald M. Burmister propuso una teoría de modelación en la cual se tomaba en cuenta cada capa con su espesor, composición y características específicas (módulo de elasticidad y módulo de Poisson) con el fin de poder determinar el estado de esfuerzos a cualquier profundidad de la masa de suelos, lo anterior se puede observar en la Figura 16.

Los estudios de Burmister introducen cálculos más complejos que los primeros modelos, ya que éste utiliza transformadas de Fourier, que a su vez necesitan funciones de basel para encontrar su solución, si se usan más de dos capas

resulta casi imposible determinarlo en un periodo corto sin la ayuda de una computadora.³⁴

Figura 16. Modelo de Burmister (1945)



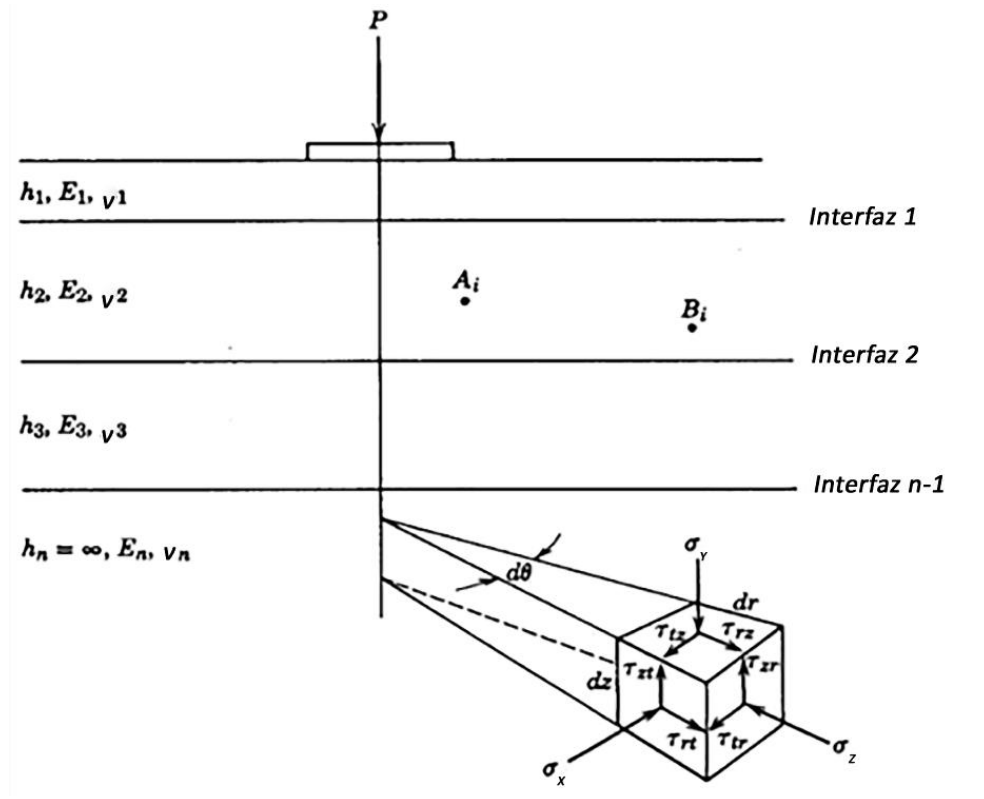
Fuente: Fredy Alberto Reyes. Diseño Racional de Pavimentos.

4.7.5. Generalización del sistema modelo multicapa por Yoder y Witzack (1975): En 1975 Yoder y Witzack publicaron la primera edición del libro titulado "Principles of Pavement Design", en el cual hicieron una generalización del modelo multicapa. Ellos definieron que en un punto dado dentro de cualquier capa del pavimento el equilibrio estático requiere de la existencia de nueve esfuerzos. Estos esfuerzos se componen de tres esfuerzos normales ($\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x$) actuando perpendicularmente a la cara de cada elemento y seis esfuerzos cortantes ($\tau_{yx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$) actuando de manera paralela en cada cara, que por el equilibrio estático son iguales.

La orientación de los elementos en el sistema es de tal forma que los esfuerzos de corte en cada cara son cero y los esfuerzos normales entonces son los principales.³⁵

³⁴ Fredy Alberto Reyes Lizcano. Diseño racional de pavimentos. Primera edición. 2003. Bogotá CEJA – Centro Editorial Javeriano.

Figura 17. Generalización del Sistema Elástico Multicapa.



Fuente: Principles of Pavement Design.

Cuando se aplica una carga simple sobre un área circular, los esfuerzos, deformaciones y deflexiones más críticos ocurren bajo el centro de la carga circular. En ese punto, los esfuerzos tangenciales y radiales son iguales. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones debajo de la placa pueden ser determinados con las siguientes ecuaciones.

Ecuación 1. Cálculo de deformaciones en sentido z con el modelo multicapa.

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)]$$

³⁵ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

Ecuación 2. Cálculo de deformaciones en sentido y con el modelo multicapa.

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

Ecuación 3. Cálculo de deformaciones en sentido x con el modelo multicapa.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_x)]$$

Donde,

ν = Relación de Poisson.

E = Módulo de elasticidad.

σ_z = Esfuerzo en dirección radial.

σ_y = Esfuerzo en dirección vertical.

σ_x = Esfuerzo en dirección tangencial.

4.7.6. Algunos software empleados para la modelación de pavimentos en Colombia: La modelación con software es una herramienta que ha vuelto mucho más práctico el diseño mecanicista-empírico; ya que mediante los diferentes software que existen en el mercado y también de manera libre es mucho más fácil poder obtener los comportamientos de los pavimentos y facilitar de manera notoria la toma de decisiones durante el diseño de la estructura de pavimento que se está evaluando.³⁶

³⁶ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

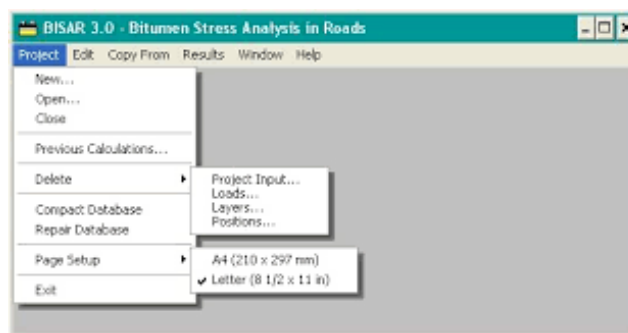
A continuación se presentan las generalidades de los software con más uso en el diseño y análisis estructural de pavimentos en Colombia y en otras países de Latinoamérica.

4.7.6.1. Bisar 3.0: BISAR es un software desarrollado y patentado por Shell Research, comenzó como una herramienta virtual para facilitar el procesamiento de los datos relacionados al análisis y diseño de pavimentos. Inicialmente era utilizado para dibujar y leer nomogramas además de las cartas de diseño, gracias a esto se permitió el laborioso trabajo de interpolar en ellas.

La introducción del programa de computadora (software) BISAR 3.0 al entorno de Windows se origina al remplazar el trabajar en DOS que tenía la versión BISAR PC 2.0 a un ambiente el cual puede ser soportado por el sistema operativo. (Figura 18). El programa puede ser aceptado por Windows desde sus primeras versiones como lo fue la Windows 3.1 y sus respectivas sucesoras.

El programa actualmente ofrece la capacidad del cálculo de las deflexiones, los esfuerzos y las tensiones en el pavimento además que es capaz de determinar los desplazamientos y las fuerzas horizontales entre cada una de las capas de las estructuras de pavimento que se están analizando incluyendo cargas provocadas por aeronaves. Esto nos ofrece la oportunidad de calcular los esfuerzos de compresión y los perfiles de tensión en la estructura a través de la variedad de los patrones de carga.

Figura 18. Captura de pantalla de Bisar 3.0.



Fuente: Propia.

BISAR3.0 es una herramienta muy generosa para el cálculo la cual puede usarse para refinar diseños de SPDM3.0, para esto BISAR3.0 cuenta con acceso a la

configuración SDW (Standar Dual Wheel Configuration que es traducida como Configuración del Eje Doble Estándar) para poder determinar de manera automática la posición en las capas bajo la estructura que se está considerando. Nuestro software permite tener dos tipos de salida de datos el denominado "DR (Detailed Report-Reporte Detallado) el cual provee de una visión de los resultados principales de manera que pueda ser comprendida más fácilmente, además de contar con un reporte más avanzado con información particular acerca de los cálculos hechos en la capa seleccionada.³⁷

4.7.6.2. 3D Move: 3D MOVE (Figura 19) es un software que nos permite realizar el análisis de multicapa elástica de manera apropiada y que se enfoca en la teoría de que las capas que componen cada estructura de pavimento se comportan como medios continuos y que tiene su base en los modelos matemáticos que implementan la transformada de Fourier.

El modelo analítico que 3D-MOVE adopta, utiliza la respuesta del pavimento ingresada usando la aproximación de que este se comporta como un pavimento que posee una base formada por una capa finita continua. El Modelo Analítico del 3D MOVE permite contabilizar factores importantes de respuesta del pavimento como lo es el movimiento del tráfico inducido por la compleja distribución de esfuerzos ocasionada por el contacto en 3 dimensiones (normal y cortante) de cualquier cuerpo, velocidad del vehículo, y características del material visco-elástico que conforma cada una de sus capas. Esta aproximación considera cada capa del pavimento como continua además de utilizar la técnica de la transformada de Fourier; por lo tanto, se pueden manejar superficies cargadas por completo ya sea con cargas múltiples y distribuciones de esfuerzos no uniformes provocadas por las llantas.

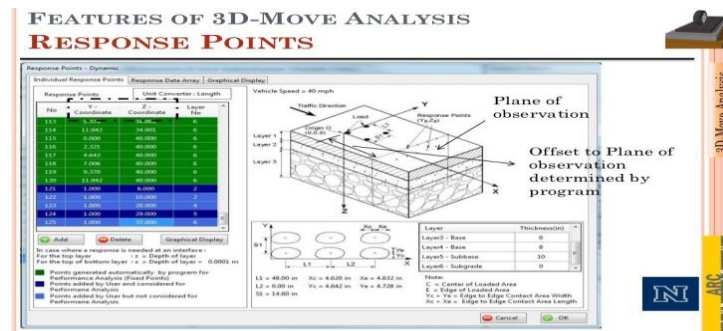
Desde que los grabados pueden ser de cualquier manera, estas consideraciones permiten analizar todo tipo de llantas incluidas aquellas que tienen bases amplias. (Siddharthan et al. 1998; 2000; 2002). El método de capas finitas es mucho más eficiente (en termino de ingreso de datos que los modelos basados en las cargas móviles por elementos finitos (Huhtala and Pihlajamaki 1992; Al-Qadi and Wang 2009).

Esto es porque la mayoría de veces los pavimentos están compuestos de capas colocadas de manera horizontal y sus respuestas son habitualmente requeridas

³⁷ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

por solo unas pocas estacionamientos seleccionados, para este tipo de problemas o condiciones es muy útil hacer uso del Modelo Analítico 3D-MOVE. Desde que la relación de dependencia de los materiales (visco-elástico) puede ser establecida con este análisis, es una herramienta ideal para modelar el comportamiento de las capas del concreto asfáltico (AC) y que también está en función de la velocidad del vehículo.³⁸

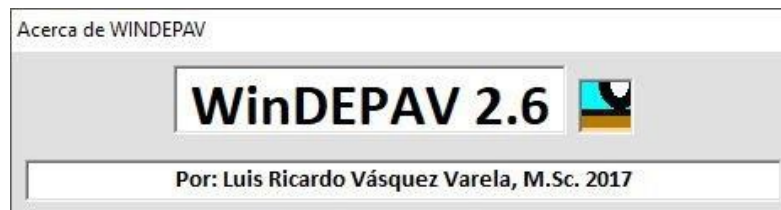
Figura 19. Captura de Pantalla software 3D Move



Fuente: Propia.

4.7.6.3. WINDEPAV: WINDEPAV es una interface para el sistema operativo Windows del software predecesor denominado DEPAV (Figura 20), el cual fue desarrollado por la Universidad de El Cauca para el Ministerio de Transporte de Colombia durante la Investigación Nacional de Pavimentos de Colombia (INPACO) en 1994. El programa original fue creado por los Profesores Alfonso Murgueitio Valencia, Carlos Alberto Benavides y Efrain Solano Fajardo, es una interfase en MS-DOS del programa francés Alizé.

Figura 20. Captura de Pantalla software DEPAV

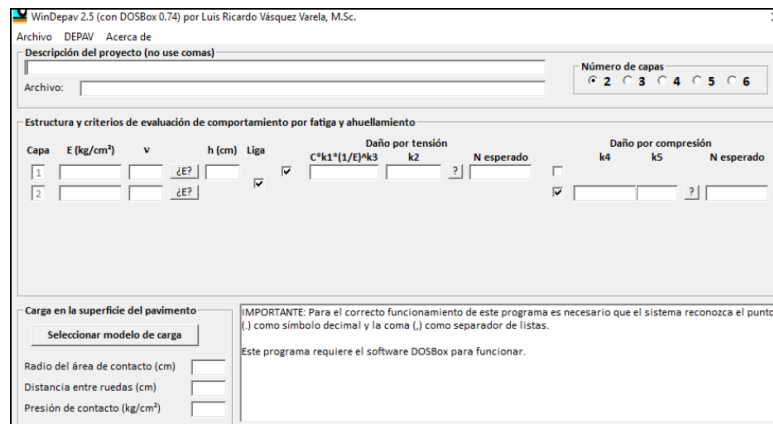


Fuente: Propia.

³⁸ Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

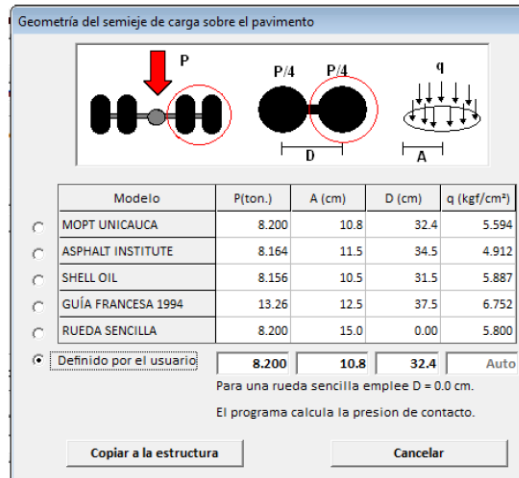
Su función principal es la de calcular los esfuerzos y deformaciones máximas que una rueda doble colocada en la superficie produce en los niveles de interface de un Sistema Elástico Multicapa, constituido de (2) Dos a (6) Seis capas, caracterizadas por el Espesor, Modulo de Elasticidad y Relación de Poisson. Además, que es capaz de calcular la Deflexión y el radio de Curvatura al centro de la Rueda Doble Ha habido muchas actualizaciones de Win DEPAV siendo la más reciente WinDEPAV 2.6 se publica en el año 2017 la cual incluye mejoras sustanciales que facilitan el uso del software (Figuras 21 y 22).

Figura 21. Captura de pantalla software WinDEPAV 2.6.



Fuente: Propia.

Figura 22. Captura de Pantalla Software Windepav.



Fuente: Propia.

4.7.6.4. PITRA-PAVE: Este software fue creado y patentado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), es una entidad académica de investigación adscrita a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, en Costa Rica Centroamérica.

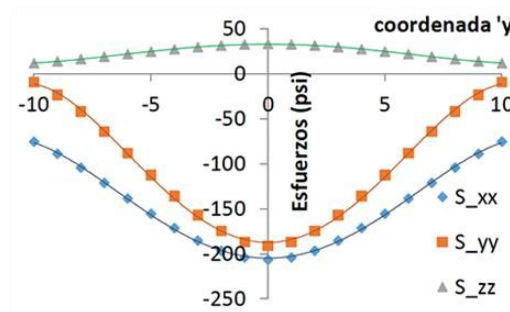
Figura 23. Captura de pantalla software PITRA PAVE.



Fuente: Propia.

PITRA PAVE es un software de multicapa elástica general para el análisis estructural de pavimentos flexibles, el cual permite obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones ante determinadas cargas. Una de las características de PITRA-PAVE es que por su lógica de programación permite que pueda ser utilizado en casi cualquier sistema operativo y con una cantidad de recursos mínimos consumidos por el equipo, siendo su interfaz casi la misma en cada uno de ellos permitiendo que el rendimiento sea muy similar en cada plataforma operativa.³⁹

Figura 24. Representación gráfica de Esfuerzos en un punto.



Fuente: Manual software PITRA_PAVE v.1.0.0.

³⁹ Manual de operación Software PITRA-PAVE 1.0.0. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

En numerosas ocasiones se ha comparado este software con muchos otros de esta misma clase y de gran reconocimiento y son pocos los casos donde se han obtenido diferencias en las soluciones, pero a diferencia de estos tiene una capacidad y velocidad de procesamiento mayor.

Las principales ventajas que se pueden resaltar de PITRA-PAVE son:

- Software multiplataforma (Windows, MacOS, Linux).
- Interface propia para ver resultados.
- Exportación a archivos “csv” para Excel, OpenOffice, Pages, Matlab y otros.
- Mucho más rápido que otros programas.
- Estructuras con hasta 40 capas elásticas.
- Número de cargas y puntos ilimitados.
- Sistemas de Unidades Ingles y Métrico.

En la Figura 23 podemos apreciar el logo que caracteriza al software y en la Figura 24 se aprecia la manera gráfica en que el software produce los datos de salida.

4.8. MODULO DE ELASTICIDAD – E

El módulo de elasticidad es una constante que se aplica para todos los materiales isotrópicos y homogéneos que cumplen con la ley de Hooke la cual permite a los sólidos que son sometidos a esfuerzos disipar esa energía gracias a la capacidad elástica que es característica de cada material.

Esta manera de disipar energía consiste en deformarse hasta el punto que sean capaces de soportar el esfuerzo al cual se están sometiendo, posteriormente a esto gracias a la elasticidad del material estos pueden regresar a sus dimensiones originales. Cabe resaltar que la esta capacidad elástica de los cuerpos es propia y característica de cada tipo de material por lo cual es correcto asumir que esta propiedad variara de un sólido a otro. Este módulo de elasticidad puede ser

determinado mediante ensayos de laboratorio, el ensayo utilizado para poder obtener la información requerida se denomina Ensayo de Tracción y también puede realizarse mediante un Ensayo de Compresión.⁴⁰

Una manera general de describir este término es la siguiente: se define como la relación lineal elástica entre un esfuerzo aplicado y la correspondiente deformación producida en dicha dirección de aplicación.

Dicho de otra manera, el módulo de elasticidad es la relación esfuerzo deformación que solo puede existir cuando el suelo se comporta de una manera relativamente elástica, es decir que al ser sometido a una carga y deformarse, éste recupera su estado inicial al ser retirada la carga, desapareciendo la deformación. La definición anterior, está basada en el modelo elástico lineal que en 1678 estableció Robert Hooke.⁴¹

4.9. CARGAS DE TRÁFICO – TPDA

La principal y casi exclusiva carga a la cual se ven expuestos los pavimentos es el tránsito, los vehículos que a diario transitan sobre ellos. Para el análisis y diseño de vías se realiza una estimación de la acumulación de vehículos que soportará a lo largo de toda su vida útil lo cual se simplifica al convertirse en un sistema de Ejes Equivalentes.

Uniformizar el tipo de carga permite un mejor análisis para el diseño de los espesores de las capas que conforman la estructura de pavimento. Para esto se define un tipo en particular de vehículo, a partir del cual se hacen los análisis en base a la influencia que este genera en la estructura que se está estudiando.

El manual de la SIECA considera para efectos de cálculo que un Eje Equivalente corresponde a un Eje de Carga que produzca el mismo daño y efecto físico que el de un camión que pese 80kN o como su equivalente de 18 kips. De la misma manera el manual AASHO considera la carga como 80 kN o como su equivalente de 18 kips).

⁴⁰ Fredy Alberto Reyes Lizcano. Diseño racional de pavimentos. Primera edición. 2003. Bogotá CEJA – Centro Editorial Javeriano.

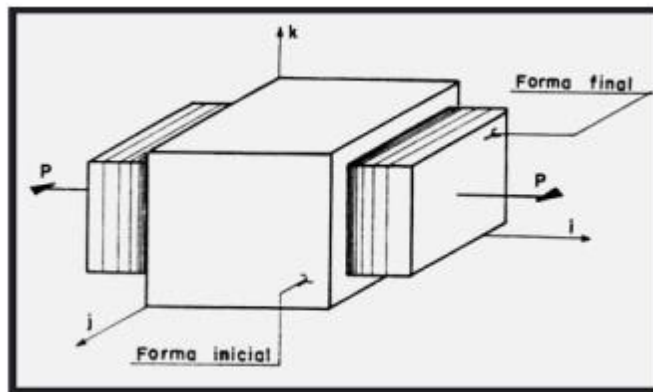
⁴¹ Fredy Alberto Reyes Lizcano. Diseño racional de pavimentos. Primera edición. 2003. Bogotá CEJA – Centro Editorial Javeriano.

El tránsito es la carga a la que estará expuesta la estructura de pavimento la cual se medirá o se registrará en base al TPDA, el cual se puede definir como el Tránsito Promedio Diario Anual. Y se mide en base al tráfico registrado a cierta hora en cierta vía el cual es extrapolado con factores diurnos, nocturnos, diarios, semanales, mensuales y anuales.⁴²

4.10. RELACIÓN DE POISSON – ν

El módulo de elasticidad no es suficiente parámetro para determinar la relación esfuerzo-deformación de un suelo en todas las direcciones. Al aplicarse al cuerpo una carga de tensión en la dirección i , a pesar que la deformación unitaria causada en dicha dirección obedece la Ley de Hooke, el cuerpo no sólo se extiende en la dirección de la tensión, sino que se contrae en los otros dos ejes (j y k), sufriendo deformaciones respectivas ϵ_j y ϵ_k .

Figura 25. Relación de Poisson, efecto de la aplicación de carga en un elemento.



Fuente: Avendaño, 2005

Este comportamiento fue definido por el científico Francés Simeón Denis Poisson quien observó que cuando un cuerpo se acortaba por efecto de una compresión, éste se alargaba en la dirección perpendicular a la compresión, de igual manera, si el cuerpo se alargaba por efecto de tracción, éste disminuía su ancho en la dirección perpendicular a la tensión. (Ver Figura 25). La relación de Poisson es una propiedad de los materiales elásticos y es definida como: La relación entre la

⁴² Chávez Avilés, Carlos Mauricio. Echevarría Chávez, José Orlando. Iriondo Tobar, Víctor Hugo. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad de El Salvador. Repositorio.

deformación unitaria en una dirección no esforzada (ϵ_j ó ϵ_k) y la deformación unitaria en la dirección esforzada (ϵ_i).

Se conoce como relación de Poisson al comportamiento de un cuerpo el cual cuando se somete a una fuerza se deformará en dirección a esta fuerza. Sin embargo, siempre que se producen deformaciones en dirección de la fuerza aplicada, también se producen deformaciones laterales.⁴³

Las deformaciones laterales tienen una relación constante con las deformaciones axiales, por lo que esta relación es constante, siempre que el material se encuentre en el rango elástico de esfuerzos, o sea que no exceda el esfuerzo del límite proporcionalidad; la relación es la siguiente:

$$\nu = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

Donde ϵ es la deformación unitaria y ν es el coeficiente de Poisson, llamado así en honor de Siméon Denis Poisson el que propuso este concepto en 1828. El coeficiente de Poisson depende indirectamente del módulo de elasticidad o módulo de Young (E), del módulo de rigidez o de cizalladura (G), la cual se puede expresar de esta manera:

$$E = 2G(\nu + 1)$$

Cabe recalcar que el rango de valores para el coeficiente es muy pequeño, oscila dentro del rango comprendido entre 0,25 y 0,35; habiendo excepciones. Muy bajos como para algunos concretos ($\nu = 0,1$), o muy altos como lo es para el hule ($\nu = 0,5$), el cual es el valor más alto posible.⁴⁴

⁴³ Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de El Salvador. "página 106

⁴⁴ Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de El Salvador. "página 106

4.11. PRESIÓN DE INFLADO – q

La presión de hinchado o inflado es un valor que se expresa en varias unidades de medida (kg/cm^2 , bar, atm y p.s.i.), que indica la presión de la masa de aire introducida en el neumático a través de la válvula. Dicho valor es medido con manómetros aplicados a la propia válvula.

La masa de aire introducida en el neumático tiene la función de soportar elásticamente la carga que gravita sobre cada una de las ruedas del vehículo y de absorber las solicitaciones a que son sometidas las propias ruedas durante la marcha. El valor exacto de la presión de hinchado consta en el libro de uso y entretenimiento de cada vehículo y en las publicaciones técnicas de los fabricantes de neumáticos. Dicho valor debe establecerse en función de varios parámetros, como el peso del vehículo, el destino de uso, la carga, la velocidad para obtener el mejor compromiso entre la adherencia, la estabilidad, el desgaste uniforme de la banda de rodadura y el confort de la marcha. El valor exacto de la presión debe medirse en frío, es decir, después de que el vehículo ha permanecido parado durante un determinado período de tiempo (como mínimo algunas horas). De hecho, durante el movimiento, el calor producido por los rozamientos internos del neumático y por el rozamiento entre el suelo y la banda de rodadura, produce un aumento de la temperatura de la masa de aire, cuya presión crece. Por consiguiente, una medición efectuada en caliente suministraría valores inexactos, falseados precisamente por el aumento de la temperatura del aire.⁴⁵

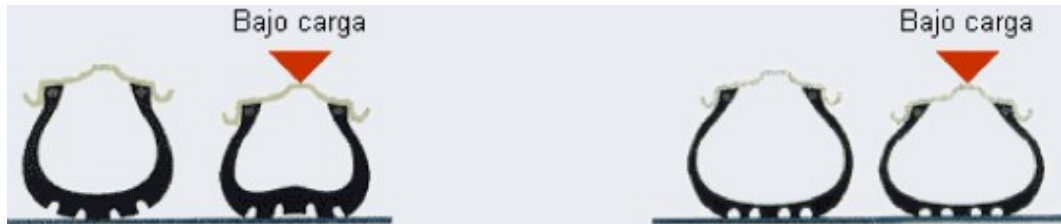
4.11.1. Relación entre presión de inflado y pavimento: La presión de inflado para los vehículos de carga, es especificada por el productor del neumático con el fin de permitir la totalidad de su carga útil, a ciertas velocidades estipuladas, evitando el sobrecalentamiento y obteniendo a cambio una manejabilidad adecuada y confortable (Roberts, 1986).

Debido al aumento de las cargas, la tendencia a aumentar la presión de inflado del neumático se ha vuelto común, dado que un aumento permite reducir el área de contacto y por ende la fricción entre el neumático y la superficie de ruedo (resistencia al deslizamiento). Dicho aumento va en detrimento del pavimento,

⁴⁵ Unidad de Gestión Municipal PITRA – LanammeUCR Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. Documento técnico denominado Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta a la estructura del pavimento. San José de Costa Rica. Febrero de 2013

pues aumentan los esfuerzos que se transmiten al mismo, contribuyendo así con mayores deformaciones en pavimentos flexibles que se manifiestan mediante ahuellamientos de alta severidad bajo la huella del neumático, en los cuales se puede acumular agua y permitir el hidropilado afectándose directamente la seguridad vial. Además de esto, el aumento de las cargas aplicadas promueve un agrietamiento por fatiga más severo (Kim, 1989).

Figura 26. Comportamiento bajo carga de neumáticos diagonales (izquierda) y radiales (derecha).



Fuente: <http://www.viarural.com.ar/viarural.com.ar/insumosagropecuarios/agricolas/cubiertas/indices/el-neumatico-radial.htm>

Es por ello que nace la importancia de tomar en cuenta una presión de inflado de neumático adecuada a la hora de realizar un diseño de pavimento, provocándose así una reducción considerable en la vida útil del mismo. Lo anterior debido a que la magnitud de la máxima deformación por tensión, aumenta al aumentarse la presión de inflado.⁴⁶

Lo anterior justifica decir que para predecir el desempeño o deterioro de un pavimento existente o nuevo, es imprescindible tomar en cuenta la interfaz neumático – pavimento (esfuerzo de contacto) y para ello los parámetros esenciales son la presión de inflado, el tipo de neumático y la carga sobre el mismo (Marshek, 1985)

⁴⁶ Unidad de Gestión Municipal PITRA – LanammeUCR Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. Documento técnico denominado Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta a la estructura del pavimento. San José de Costa Rica. Febrero de 2013

5. ANTECEDENTES A LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

5.1. ARTÍCULOS, TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN Y CARTILLAS

En Colombia, las actividades relacionadas al manejo y la implementación de los sistemas de confinamiento celular o geoceldas es relativamente reciente por tanto es mínima la existencia de documentos científicos relacionados al tema. Sin embargo las empresas productoras de dicho material geosintético en alianza con el Instituto de Desarrollo Urbano IDU desarrolló en el año 2010, una guía titulada “*Guía uso de geosintéticos*” actualizada por medio de resolución número 4218 del 10 de Octubre de 2018.

En cuanto a la implementación de dicho sistema de confinamiento celular, se encuentra valiosa bibliografía, como artículos técnicos y trabajos de grado producidos en universidades como la Universidad Javeriana, La Universidad de los Andes, La Universidad Santo Tomás, La Universidad Militar Nueva Granada y La Universidad Católica de Colombia.

Con respecto al material de lleno de dichas unidades de confinamiento celular; en nuestro caso del RAP (Pavimento Asfáltico Reciclado) y la Calamina; se puede encontrar una gran cantidad de artículos técnicos y trabajos de grado a su vez desarrollados por las universidades mencionadas anteriormente; resaltando que dichos materiales han sido analizados en búsqueda de optimizar mezclas asfálticas en caliente. El caso más representativo es el de los proyectos de grado o monografías generadas por estudiantes de ingeniería topográfica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, denominados “*MODIFICACIÓN DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MDC-19 MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN DEL LLENANTE MINERAL NATURAL POR CALAMINA*”⁴⁷ y “*MODIFICACIÓN DEL CONCRETO ASFÁLTICO (MDC-19) CON LA SUSTITUCIÓN DEL LLENANTE MINERAL POR CALAMINA Y LA INCORPORACIÓN DEL ADITIVO “HUSIL”*”⁴⁸

⁴⁷ AMÉZQUITA, Jesús y GANTIVA, Crithian. Trabajo de grado Ing. Topográfico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio.

⁴⁸ RINCÓN, Jesenia y SANABRIA, Yudith. Trabajo de grado Ing. Topográfico. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio.

Por otro lado, a nivel internacional se han desarrollado diversos estudios en donde se evalúa el comportamiento mecánico de sistemas de mejoramiento de subrasantes empleando unidades de confinamiento celular y pavimento asfáltico reciclado (RAP); como el caso de diversas ponencias realizadas en congresos de ingeniería de la ASCE (American Society of Civil Engineers). No obstante, no se encontró información sobre investigación relacionada con la implementación y estudio del comportamiento mecánico de sistemas de mejoramiento de subrasantes, compuestos por unidades de confinamiento celular o geocelda y reciclado de pavimento asfáltico más calamina.

Con referencia a lo anterior, se presentan los resultados obtenidos mediante la investigación

Tabla 10. Investigaciones relacionadas a nivel Nacional e Internacional.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
Guía para el buen uso de los geosintéticos, GU-GE-007 V_01 ⁴⁹	2011	Bogotá, Colombia	Instituto de Desarrollo Urbano – IDU	Se buscan los criterios y fundamentos para hacer un buen uso e implementación de los materiales geosintéticos en la construcción de vías, mejoramiento de taludes y demás obras de amplia extensión de la Ciudad de Bogotá.
<i>Experimental Study on Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases under Static and Cyclic Loading</i> ⁵⁰	2007	Tribhuvan Nepal	Jitendra Kumar Thakur, B.E	Los objetivos de este estudio son evaluar las características del pavimento de asfalto reciclado molido (RAP) recolectado de una calle de la ciudad en Lawrence, Kansas, e investigar el comportamiento de fluencia y cíclico de las bases RAP reforzadas con geoceldas sobre subsuelo rígido bajo carga estática y sobre subsuelo débil bajo carga cíclica a través de pruebas de laboratorio respectivamente.

⁴⁹ Guía para el buen uso de los geosintéticos, GU-GE-007 V_01. Instituto de Desarrollo Urbano IDU. Gestión Documental

⁵⁰ Geo Congress, March 25 a 29 / 2012 - ASCE – American Society Civil Engineers. Oakland California.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
Guía para el buen uso de los geosintéticos, GU-GE-007 V_01 ⁵¹	2011	Bogotá, Colombia	Instituto de Desarrollo Urbano – IDU	Se buscan los criterios y fundamentos para hacer un buen uso e implementación de los materiales geosintéticos en la construcción de vías, mejoramiento de taludes y demás obras de amplia extensión de la Ciudad de Bogotá.
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. ⁵²	2011	Bogotá, Colombia	Duarte Duarte, María Camila y Sierra Parra, Valeria	Se evalúa el comportamiento de un material de subrasante tipo en la ciudad de Bogotá, por medio de la implementación de sistemas de confinamiento celular o geoceldas.
<i>A Large Test Box Study on Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases over Weak Subgrade under Cyclic Loading.</i> ⁵³	2012	Oakland, California, EEUU	Jitendra K. Thakur ; Jie Han ; Sanat K. Pokharel ; and Robert L. Parsons	En este estudio, se evaluó el comportamiento mecánico de un sistema de mejoramiento compuesto por una nueva geocelda de aleación polimérica (NPA) tridimensional para confinar las bases RAP, con el fin de determinar el efecto del confinamiento de las geoceldas en el rendimiento de las bases de carreteras, por medio de la construcción de estructuras con RAP no reforzadas y reforzadas con geoceldas sobre una subrasante débil (CBR objetivo del 2%) en una caja de prueba geotécnica grande (2 mx 2.2 mx 2m de altura) y se probaron bajo carga cíclica.
<i>Experimental Study On Resilient Behavior Of Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement Base</i>	2012	Texas Arligton, EEUU	Manikanta, Saladhi	Estudio realizado en la Universidad de Arlington en el estado de Texas EEUU, en donde se evalúa por medio de la aplicación de ensayos de carga cíclica a gran escala y de

⁵¹ Guía para el buen uso de los geosintéticos, GU-GE-007 V_01. Instituto de Desarrollo Urbano IDU. Gestión Documental

⁵² Duarte Duarte, María Camila y Sierra Parra, Valeria. Trabajo de Grado Pregrado Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Repositorio.

⁵³ Geo Congress, March 25 a 29 / 2012 - ASCE – American Society Civil Engineers. Oakland California.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
<i>Layer: Model Development</i> ⁵⁴				carga estática por placa, en secciones de carreteras con bases en RAP reforzadas con geoceldas. Los resultados de las pruebas mostraron que el refuerzo de geoceldas mejoró el rendimiento de las bases RAP. La alta resistencia del aro del refuerzo de la geocelda proporcionó mayor confinamiento y ofreció resistencia adicional contra el movimiento lateral de la base RAP. El refuerzo de la geocelda redujo significativamente las deformaciones permanentes y elásticas de la base RAP en comparación con la de las bases RAP no reforzadas, aumentando así el módulo elástico de la capa de base reforzada.
<i>Analytical Model for Resilient Modulus and Permanent Deformation of Geosynthetic-Reinforced Unbound Granular Material</i> ⁵⁵	2013	Oklahoma EEUU	Xiaoming Yang, M.ASCE; y Jie Han, M.ASCE	En este estudio, se desarrolló un modelo analítico para predecir el módulo elástico y la deformación permanente de la UGM reforzada con geosintéticos en las pruebas RLT. El modelo analítico es compatible con el módulo elástico y los modelos de deformación permanente presentados en la guía de diseño de pavimento mecánico-empírico actual.
Análisis de alternativas de diseño con geoceldas, en estructuras de pavimento. Estudio De Caso Carrera 12, Funza – Cundinamarca. ⁵⁶	2015	Bogotá, Colombia	Urresta Melo, Yinna Marcela	Se analizan diferentes alternativas para el diseño de estructuras de pavimento, implementando en ellos la tecnología de confinamiento celular o geoceldas en el Municipio de Funza, Cundinamarca.
<i>Experimental Study on Geocell-reinforced Recycled</i>	2016	Ahmedabad, Gujarat	Rahul J. Parmar y Prof. (Dr.) M.	Este artículo técnico se realizó en el <i>College of Engineering de Ahmedabad, Gujarat</i> , con el fin de

⁵⁴ Manikanta, Saladhi. University of Texas at Arlington. Tesis para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil.

⁵⁵ Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - American Society Civil Engineers. Oakland California.

⁵⁶ Urresta Melo, Yinna Marcela. Trabajo de Grado especialista. Universidad Militar Nueva Granada. Repositorio.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
<i>Asphalt Pavement (RAP) Bases Over Weak Subgrade Under Static Loading</i>			V. Shah	verificar el rendimiento de bases RAP reforzadas con geoceldas, aplicadas a subrasantes debilesl bajo carga estática. Un total de tres secciones fueron preparadas y probadas, incluyendo una sección no reforzada, sección reforzada con geocelda. Durante las pruebas, las deformaciones superficiales a las cargas verticales aplicadas se fueron monitoreado arrojando así que la base reforzada con geoceldas redujo las deformaciones y aumento la rigidez en comparación con las bases no reforzadas.
Modificación de un concreto asfáltico MDC-19 mediante la sustitución de llenante mineral natural por calamina. ⁵⁷	2017	Bogotá, Colombia	Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Crithian David	Se evalúa la influencia que genera sustituir la facción fina de un agregado pétreo natural por Calamina, sobre la resistencia bajo una carga monotónica, de una mezcla de concreto asfáltico (MDC-19).
<i>Numerical simulation of the role of a geocell inclusion on deformation behavior of a pavement structure laid on a fissured clayey subgrade.</i> ⁵⁸	2017	Bogotá, Colombia	Baquero Espinosa, Vivian Yineth. Ardila Manrique, Cristian Camilo. Pineda Jaimes, Jorge Arturo PhD y Cruz Wilches, José Andrés MSc	Artículo técnico generado por profesionales de la Universidad Santo Tomás de Colombia y publicado para la 15th LACCEI <i>International Multi Conference for Engineering, Education, and Technology: "Global Partnerships for Development and Engineering Education"</i> , 19-21 July 2017, Boca Raton Fl, United States. En el que, se realiza un análisis numérico y evaluación de variables como el caso de las deformaciones mediante la simulación en el software Phase 2. Dicho estudio de caso se aplica para una estructura de pavimento del occidente de la ciudad de Bogotá construida sobre suelos arcillosos fisurados antes y después de implementar sistemas

⁵⁷ Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Crithian David. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

⁵⁸ Baquero Espinosa, Vivian Yineth. Ardila Manrique, Cristian Camilo. Pineda Jaimes, Jorge Arturo PhD y Cruz Wilches, José Andrés MSc. Artículo técnico 15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. Universidad Santo Tomás de Colombia.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
				de mejoramiento con unidades de confinamiento celular.
Modificación de un concreto asfáltico MDC-19 mediante la sustitución de llenante mineral natural por calamina. ⁵⁹	2017	Bogotá, Colombia	Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Cristhian David	Se evalúa la influencia que genera sustituir la fracción fina de un agregado pétreo natural por Calamina, sobre la resistencia bajo una carga monotónica, de una mezcla de concreto asfáltico (MDC-19).
Modificación del concreto asfáltico (MDC-19) con la sustitución del llenante mineral por calamina y la incorporación del aditivo "HUSIL". ⁶⁰	2017	Bogotá, Colombia	Rincón Villamil, Jesenia María Solange y Sanabria Reina, Yudith Lorena.	Se compara la resistencia bajo carga monotónica del Concreto Asfáltico (MDC-19) y el concreto asfáltico modificado (MDC-19) con el aditivo líquido HUSIL y la sustitución del llenante mineral (filler) por "CALAMINA", con el fin de generar una mezcla asfáltica tibia.
<i>Performance of a reinforced pavement structure with geocells via numerical simulation, considering a discontinuous subgrade</i> ⁶¹	2017	Bogotá, Colombia	Pineda Jaimés, Jorge Arturo PhD. y Orduz Duarte, Ender Jhobany	Por medio del artículo, se presenta la respuesta de simulación numérica de una estructura de pavimento flexible reforzada con geoceldas, como una estrategia para mitigar las deformaciones verticales causadas por fallas en el subsuelo arcilloso debido a la desecación, en el corredor vial Siberia-Tenjo en la Sabana Occidental de Bogotá. Se encontró que el endurecimiento de las capas del pavimento mitiga las deformaciones de la superficie, ya que los desplazamientos verticales disminuyen al comparar el modelo reforzado con la estructura no reforzada.
Evaluación del desempeño estructural de un sistema de confinamiento celular	2017	Bogotá, Colombia	Martín Garzón, Laura Mercedes	Dicho estudio experimental, analizó el comportamiento mecánico de una subrasante blanda ante la incorporación de una geocelda en su estructura, sometida a carga

⁵⁹ Amézquita Andrade, Jesús David y Gantiva Quintero, Cristhian David. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

⁶⁰ Rincón Villamil, Jesenia María Solange y Sanabria Reina, Yudith Lorena. Trabajo de Grado Ingeniería Topográfica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

⁶¹ E. J. Orduz-Duarte and J. A. Pineda-Jaimés, "Performance of a reinforced pavement structure with geocells via numerical simulation, considering a discontinuous subgrade," *2017 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias en Ingeniería (CONIITI)*, Bogotá, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONIITI.2017.8273336.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
como alternativa de mejoramiento de Suelos. ⁶²				estática y dinámica.
Beneficios técnicos y económicos en el uso de geoceldas en estructura de pavimentos frente a los sistemas tradicionales. ⁶³	2018	Bogotá, Colombia	Cañón Leguizamón, Sandra Milena.	Se realiza el estudio Costo-Beneficio del análisis comparativo entre un sistema convencional y el uso de las geoceldas en estructuras de pavimentos para el tramo de vía Parcelas Kilómetro 2 del municipio de Cota Cundinamarca.
"Estudio de caso (parte a): utilización de fresado estabilizado con emulsión catiónica de rompimiento lento como capa de base en la localidad de suba, CL 134 entre Kr 151 a y KR 152 en el barrio Lisboa, Bogotá D.C. ⁶⁴	2018	Bogotá, Colombia	Chaparro Quevedo, Ana María y Hernández Rubio, Maira Alejandra.	Se describe el comportamiento de un tramo de prueba en donde se implementó como capa de base en la estructura de pavimento flexible, material fresado estabilizado en planta con emulsión asfáltica producido por la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV) en planta.
Investigación sobre mezclas asfálticas en frío 100% recicladas con adición de residuos sólidos. ⁶⁵	2018	Barranquilla, Colombia	Castro Cabeza, Andrea Paola.	Se evalúa la posibilidad de producir mezclas recicladas en frío con emulsión asfáltica y adición de ciertos porcentajes de caucho o calamina que cumplan los requisitos mínimos normativos.
Caracterización de mezcla densa en caliente (MDC-25) con adición de calamina. ⁶⁶	2018	Bogotá, Colombia	Ortiz Hurtado, Camilo Andrés y Bautista Prieto, Pedro Alejandro	Se propone la reutilización de la calamina o cascarilla de laminación en mezclas MDC-25 modificadas en mezclas asfálticas, reemplazando los agregados finos en cantidades al 1.0%, 2.0%, 3.0% y 4.0% por vía húmeda, buscando el cumplimiento de los parámetros establecidos en la normatividad Nacional.

⁶²Martín Garzón, Laura Mercedes. Trabajo de Grado Maestría. Pontificia Universidad Javeriana de Colombia. Repositorio.

⁶³ Cañón Leguizamón, Sandra Milena. Trabajo de Grado Especialización. Universidad Católica de Colombia. Repositorio.

⁶⁴ Chaparro Quevedo, Ana María y Hernández Rubio, Maira Alejandra. Trabajo de Grado Especialización. Universidad Militar Nueva Granada. Repositorio.

⁶⁵ Castro Cabeza, Andrea Paola. Trabajo de Grado Magister en Ingeniería Civil. Fundación Universidad del Norte. Repositorio.

⁶⁶ Ortiz Hurtado, Camilo Andrés y Bautista Prieto, Pedro Alejandro. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia. Repositorio.

TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN	FECHA	LUGAR	AUTORES	DESCRIPCIÓN
Tramo de prueba con estructura convencional y la implementación de geoceldas en la CL 128a entre TV 60 y AK 72 Bogotá. ⁶⁷	2018	Bogotá, Colombia	Suspes Paéz, Angie Catalina; Carpio Patiño, Jefferson y Maldonado Tinjacá, Héctor Giovanni.	Se analiza el comportamiento de la implementación de un diseño de pavimento convencional, respecto a una estructura de pavimento generada tras implementar un tramo de prueba en donde se realizó la instalación de Geoceldas.

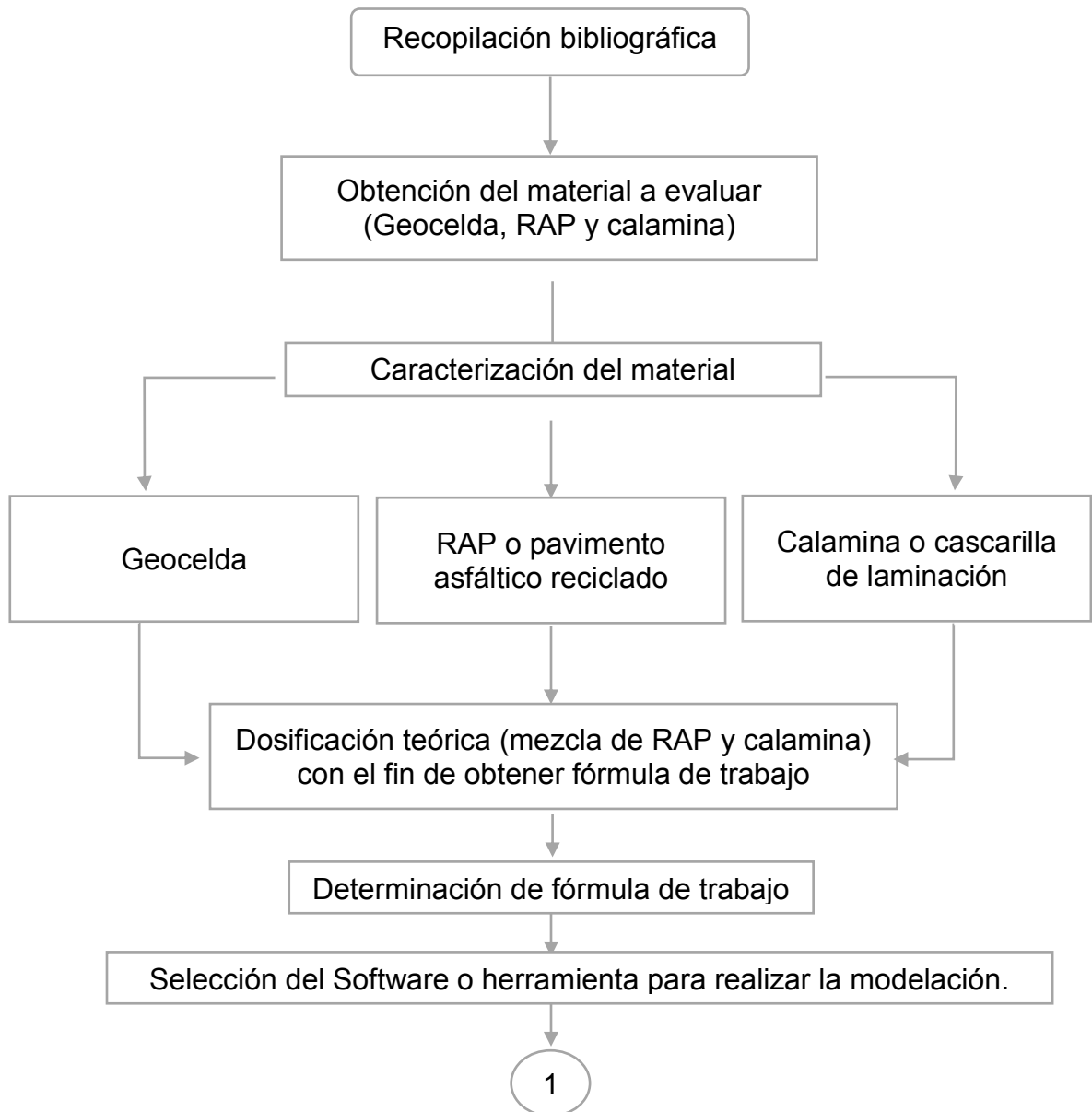
Fuente: Propia

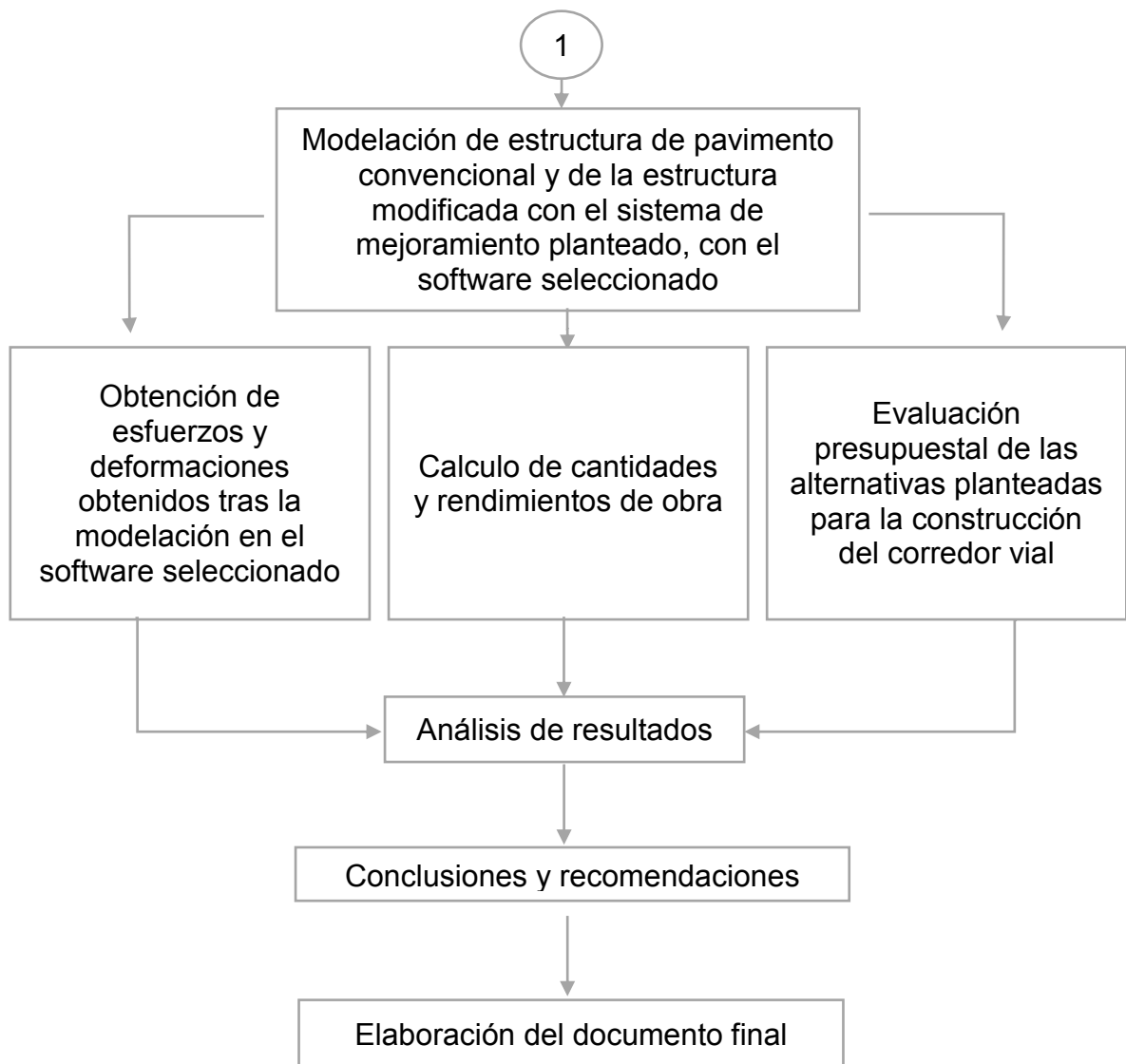
⁶⁷ Suspes Paéz, Angie Catalinda; Carpio Patiño, Jefferson y Maldonado Tinjacá, Héctor Giovanni. Trabajo de Grado Especialización. Universidad Católica de Colombia. Repositorio.

6. METODOLOGIA

En el esquema de la Figura 27, se presenta un esquema de flujo, por el cual se resume la metodología empleada para desarrollar el documento, que tiene por objeto realizar la evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (rap y calamina).

Figura 27. Esquema del resumen de la metodología





Fuente: Propia

- Recopilación bibliográfica: Se llevó a cabo la recopilación y revisión de la información bibliográfica. Para ello se tuvo en cuenta documentación clasificada principalmente como artículos técnicos, manuales de instalación de productos relacionados con el proyecto, manuales de seguimiento de proyectos IDU, normatividad vigente y proyectos de investigación de pregrado, especializaciones y maestrías de diversas instituciones de educación superior pública y privada, como el caso de investigaciones efectuadas en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en las facultades tecnológica y de medio ambiente, la Universidad Católica de Colombia, La Universidad del Norte, entre otras.

- Obtención del material a evaluar (Geocelda, RAP y calamina): se toman y transportan al laboratorio SECOIN SAS las muestras de RAP y calamina que se van a evaluar. Para la geocelda se tienen en cuenta los ensayos de calidad ejecutados por el proveedor.
- Caracterización del material: se ejecutaron ensayos de laboratorio correspondientes a cada una de las muestras obtenidas.
- Dosificación teórica (mezcla de RAP y calamina) con el fin de obtener fórmula de trabajo: Con los ensayos obtenidos en el ensayo de granulometría se plantearon diferentes mezclas, con el objetivo de encontrar la que mejor se ajuste para los propósitos de este proyecto.
- Determinación de fórmula de trabajo: se verificó en laboratorio mediante la ejecución de ensayos de laboratorio que la dosificación teórica cumple con los parámetros establecidos por las especificaciones IDU ET-2011.
- Selección de software: En cuanto a esta etapa del proceso, se realizó la selección del software para realizar la modelación de cada alternativa de la estructura de pavimento, basados principalmente en las bondades que brinda cada uno de los programas mencionados en el capítulo 4.6.5.

El software seleccionado para dicho fin, es el software PITRA-PAVE, dado que cuenta con un acceso garantizado, además de poseer propiedades de análisis de pavimentos con el modelo multicapa elástica (MCE) lo cual permite incorporar al modelo una cantidad de interfaces que van desde las 2 a las 40 capas, haciendo un análisis más detallado en materia de esfuerzos y deformaciones. Por otro lado, cuenta con la propiedad de exportar bases de datos y resultados de cálculos al software Microsoft Excel, trayendo consigo ventajas para presentación de informes, análisis de gráficos, tablas y análisis estadístico.

- Modelación de estructuras de pavimento con sistemas de mejoramiento convencional y sistema de mejoramiento planteado: Se procede a realizar la descripción de los parámetros de entrada al software y a su vez la generación del modelo pertinente, con el objeto de obtener valores asociados a esfuerzos y deformaciones en puntos diferentes de cada una de las estructuras de pavimento planteadas por los especialistas en el respectivo diseño y a su vez el sistema de mejoramiento planteado en el presente documento.

- Análisis de resultados: Se comparan los modelos de una estructura de pavimento de un sistema tradicional contra uno donde se usa la geocelda y la fórmula de trabajo obtenida.
- Conclusiones y recomendaciones

7. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales, que se proceden a caracterizar son la geocelda (sistema de confinamiento celular) y los materiales reciclados (RAP y calamina):

- Para la caracterización del sistema de confinamiento celular empleado para el desarrollo del presente documento; se tuvieron en cuenta las fichas técnicas entregadas por el proveedor, además de los ensayos suministrados y relacionados directamente al lote entregado por parte de Tecnología de Materiales Colombia a la empresa Concretos Asfálticos de Colombia S.A.
- Los materiales reciclados se evaluaron de manera individual de acuerdo a las normas de ensayo descritas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS 2013) que establecen los requisitos de dureza, durabilidad, calidad, limpieza, geometría de partículas y capacidad de soporte que deben cumplir los agregados pétreos y diferentes materiales que van a ser utilizados en la construcción.

7.1. UNIDADES DE CONFINAMIENTO CELULAR O GEOCELDAS

En cuanto a la obtención de las unidades de confinamiento celular, se puede mencionar que las mismas son suministradas por medio de compra directa al proveedor TDM Colombia S.A.S., en la ciudad de Bogotá.

Vale la pena aclarar que, existe gran variedad de proveedores de unidades de confinamiento celular en Bogotá, de los cuales podemos destacar los siguientes:

- Tecnología de Materiales Colombia S.A.S. (TDM Colombia S.A.S.)
- Geomatrix
- Geomembranas S.A.S.
- Geopolímeros S.A.S.

- Syntex Colombia S.A.S.
- Mexichem Colombia – PAVCO
- Otros.

Para la generación del presente documento como se ha mencionado; se realizó la compra de unidades de confinamiento celular o geoceldas al proveedor TDM Colombia, por medio de la gestión realizada para la ejecución de obras de rehabilitación del contrato de Obra COP 116 de 2018.

Posteriormente, la empresa Concretos Asfálticos de Colombia S.A. (Concrescol S.A.), facilita por medio de su director de obra (Ing. Oscar Julián Moreno), el suministro de 40 m² del material geosintético en aras de aportar al proyecto de investigación.

Dichos paneles modulares, cuentan con un rendimiento de 20 m² por tira de geocelda y cuenta con un valor comercial comprendido (precios al mes de Enero de 2020) entre los \$19.000 y \$23.000 pesos colombianos por m², de acuerdo al histórico de compras de la empresa mencionada.

En el Anexo 1 se presentan los respectivos soportes de adquisición de dicho insumo por parte de la empresa Concretos Asfálticos de Colombia CONCRESCOL S.A., para la ejecución física del proyecto COP 116 de 2018.

Se presentan los ensayos y resultados reportados por el proveedor.

Tabla 11. Descripción del lote de geocelda analizado.

PROVEEDOR	TDM COLOMBIA
REFERENCIA	GEOCELDA PERF TW306 15 cm 4.16 X 9.76 m
LOTE	15001559
CANTIDAD(m²)	11530.85

Fuente: Concretos Asfálticos de Colombia - CONCRESCOL S.A.

Tabla 12. Resumen de propiedades Unidades de confinamiento celular empleados en el estudio.

PROPIEDAD	MÉTODO	UNIDAD	VALOR	FRECUENCIA	Reporte TDM
Espesor Nominal de la pared (-10%)	GRI-GS14	mm	1.25 (-10%)	Por lote	1.21
Espesor incluyendo texturado	ASTM D5199	mm	1.5 (-5% - +10%)	Por lote	1.61
Densidad / Density	ASTM D792	g/cm ³	0.935 a 0.955	90.000 kg	0.942
Eficiencia a la soldadura	GRI-GS13	%	100	9.000 kg	135
Resistencia al pelado	USCOE GL-86-19 Apéndice A ISO 13426 - 1 Método A	N	2130	Por lote	3136
Textura indentaciones romboidales	Medido	indentaciones por cm ²	22 a 31	Por lote	23
Diámetro de las perforaciones	Medido	mm	10	Por lote	11
Resistencia a la fluencia	ASTM D6693 - Tipo IV	kN/m	18	9000 kg	20.1
Elongación a la fluencia		%	12		21.2
Resistencia a la Ruptura		kN/m	13		16.7
Elongación a la Ruptura		%	100		304.9
Resistencia al desgarro	ASTM D1004	-	155	20000 kg	182.7
Resistencia al Punzonado	ASTM D4883	N	330	20000 kg	472.3
Contenido negro de humo	ASTM D4218	%	2% - 3%	9000 kg	2.55
Dispersión de negro de humo	ASTM D5596	-	Nota 1	20000 kg	1
Standart OIT	ASTM D3895	min	100	20000 kg	158

Fuente: Concretos Asfálticos de Colombia - CONCRESCOL S.A (Ficha técnica geocelda suministrada por TDM Colombia)

Como se observa en la Tabla 12, el material suministrado (mismo empleado para el desarrollo del presente documento) por el proveedor Tecnología de Materiales TDM Colombia, cumple con cada uno de los parámetros de calidad establecidos por la normatividad vigente en Colombia para su uso. En el Anexo 1, se adjunta copia de la planilla de reportes de resultados suministrada por el proveedor.

7.2. PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)

Para su obtención se contó con el apoyo de la empresa Concretos Asfálticos de Colombia, CONCRESCOL S.A. dado que a la fecha de elaboración del presente proyecto, se cuenta con la ejecución de contratos de obra pública relacionados al mantenimiento, rehabilitación, construcción y/o reconstrucción de obras de infraestructura vial en diversas localidades de la Ciudad de Bogotá.

Para tal caso se tuvo en cuenta el siguiente contrato de obra Pública:

- **COP 259 de 2018** cuyo objeto contractual es “CONTRATAR LAS OBRAS Y ACTIVIDADES PARA LA CONSERVACION DE LA MALLA VIAL Y ESPACIO PUBLICO DE LA LOCALIDAD DE RAFAEL URIBE URIBE A PRECIOS UNITARIOS FIJOS Y MONTO AGOTABLE.”: y cuenta con segmentos viales CIV que según el diagnóstico realizado por medio de la metodología PCI, arrojaron resultados con recomendación de mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico, rehabilitación y/o construcción.

Para la selección del RAP se realizó una inspección visual y de acuerdo a los lineamientos planteados por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU para el reciclaje y almacenamiento de agregados pétreos provenientes del fresado de carpetas asfálticas se buscó un material sin contaminantes, por lo que se consideró como muestra base para realizar los respectivos ensayos y elaboración de la fórmula de trabajo y/o dosificación de los materiales retirados durante la ejecución de mantenimiento periódico del contrato de obra pública COP 259 de 2018, que a su vez se relacionan en la Tabla 13

Tabla 13. Listado de CIV de la muestra de RAP obtenida para la ejecución de los ensayos de laboratorio

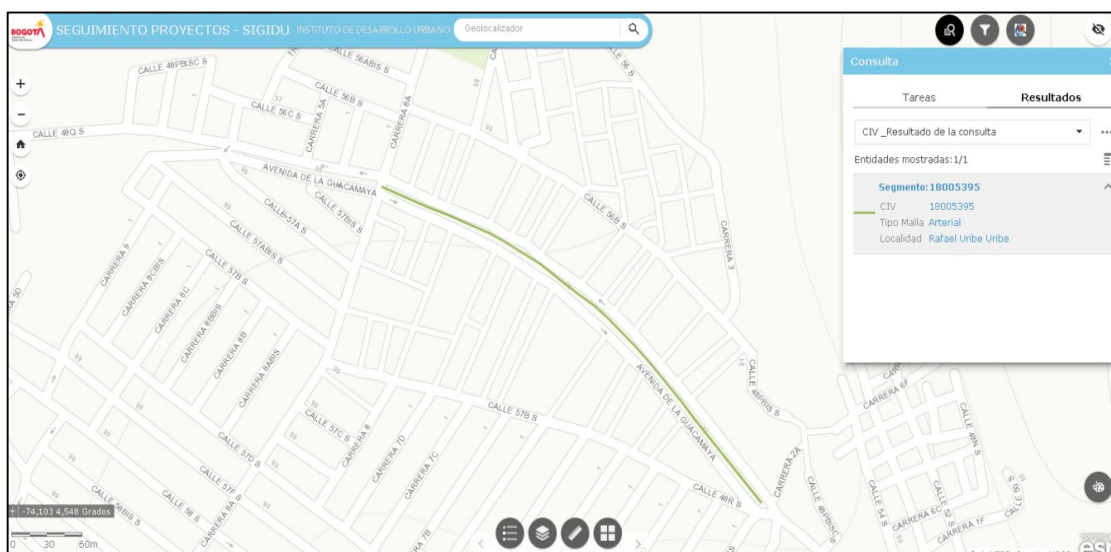
CIV	VIA	DESDE	HASTA	BARRIO	LONGITUD (m)	ANCHO (m)
18005395	AV. Guacamayas	CRA 5	CRA 2A	Molinos II	409.57	7.72
18006975	AV. Guacamayas	CRA 2ª	CRA 2	Molinos II	26.99	17.46
18005419	AV. Guacamayas	CRA 2	CRA 1C	Molinos II	34.04	8.72
18006847	AV. Guacamayas	CRA 1C	CLL 48QBisA Sur	Los Puentes	79.58	9.22
18007845	AV. Guacamayas	CLL 48QBisA Sur	CLL 48QBis Sur	Los Puentes	29.32	9.36

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 13 el material de fresado se obtuvo en el eje vial de la AV. Guacamayas entre la CL 48 Q Bis Sur y la KR 5.

En la Figura 28, se presenta la localización general del tramo de recolección de muestras de material de fresado, de acuerdo al sistema de información geográfica del IDU – SIG IDU.

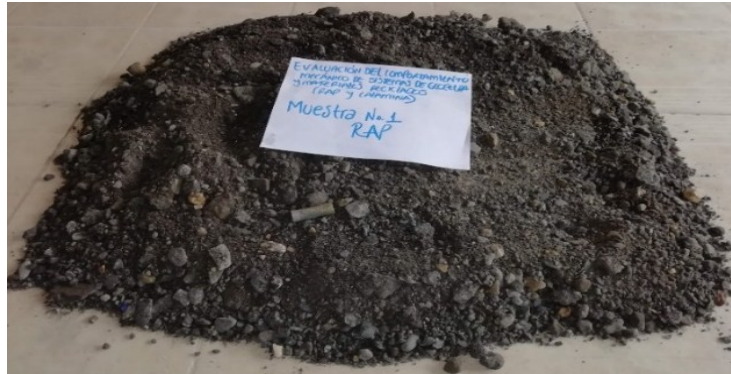
Figura 28. Localización de Corredor Vial de donde provienen las muestras de RAP (Fresado)



Fuente: Sistema de Información Geográfica SIGIDU [Consultado: 20 de Diciembre de 2019]. Disponible en: <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6950db8fa2d440ffbb3946c468eaae4a>

7.2.1. Caracterización de la muestra de pavimento asfáltico reciclado(RAP):Al Laboratorio SECOIN S.A.S., fue remitida una muestra de material de pavimento asfáltico reciclado (RAP), proveniente del fresado de la carpeta asfáltica en el corredor vial localizado en la Avenida Guacamayas entre CL. 48 Q Bis y KR 5.

Figura 29. Muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP)



Fuente: Propia

Se inició con una granulometría, según norma de ensayo INVIAS E-213-07. Mediante este ensayo, se determinó la distribución de los tamaños de las partículas de una cantidad de muestra seca, por separación a través de una serie de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura de malla.

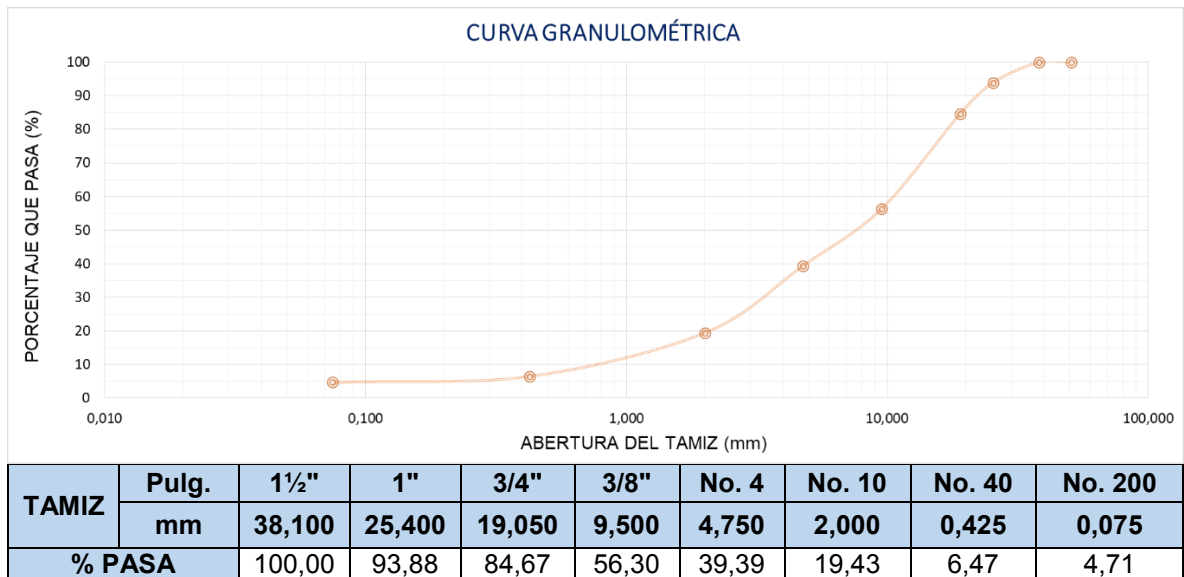
Figura 30. Ejecución ensayo de granulometría



Fuente: Propia

Los resultados del ensayo de granulometría de la muestra de RAP, se reportan en la Gráfica No. 3.

Gráfica 3. Resultados granulometría y curva granulométrica: Pavimento asfáltico reciclado (RAP)



Fuente: Propia

Además, se realizan las pruebas de caracterización, resultados que para el material de RAP se presentan en la Tabla 14:

Tabla 14. Resultados ensayos de laboratorio: pavimento asfáltico reciclado (RAP)

PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)			
Ensayo		Norma de ensayo	Resultado
Dureza			
Desgaste Los Ángeles	•En seco, 500 revoluciones	INV E-218	33,6%
Micro Deval	•Valor en seco	INV E-238	31,2%
10% de finos	•Relación húmedo / seco	INV E-224	151,5
	-Relación húmedo / seco		79,5%
Durabilidad			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos	•Sulfato de Magnesio	INV E-220	5,76%
Limpieza			

PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP)		
Ensayo	Norma de ensayo	Resultado
Límite líquido	INV E-125	No líquido
Índice de plasticidad	INV E-126	No plástico
Equivalente de arena	INV E-133	32%
Valor de azul de metileno	INV E-235	3,8
Terrones de arcilla y partículas deleznable	INV E-211	0
Geometría de las Partículas		
Partículas fracturadas mecánicamente	•1 Cara	100%
	•2 Caras	100%
Índices de aplanamiento	INV E-230	18,0%
Índices de alargamiento	INV E-230	16,3%
Angularidad de la fracción fina	INV E-239	33,9%
Capacidad de soporte		
CBR, (%) mínimo - Referido al 100% de la densidad seca máxima según ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión	INV E-148	94%

Fuente: Propia

Los registros correspondientes a los ensayos de laboratorio se presentan en el **Anexo 2**.

7.3. CALAMINA

La cascarilla de laminación o calamina fue proporcionada por medio de compra directa a la empresa GERDAU DIACO S.A, la cual presentó una oferta de \$17 USD (Dólares) por tonelada del insumo requerido. El dólar para el mes de enero de 2020, según los datos presentados por el Banco de la República de Colombia tuvo un valor promedio de \$3314,44 pesos colombianos al día 10 de enero de 2020 y teniendo en cuenta los últimos diez días del año 2019 y los primeros 10 días del año 2020, como se muestra en la Figura 31.

Ahora bien; teniendo en cuenta los valores asociados al suministro de la cascarilla de laminación, se puede mencionar que el precio de 1 (una) Tonelada de calamina oscila entre los \$45.000 y los \$52.000 pesos colombianos (COP). Éste valor será tenido en cuenta al momento de realizar el análisis costo / beneficio, obtenido al implementar el sistema de mejoramiento Geocelda – RAP – Calamina.

Figura 31. Tasa Representativa del Mercado (Diciembre 2019 - Enero 2020)

Tasa de cambio representativa del mercado

Viernes, 10 de enero de 2020

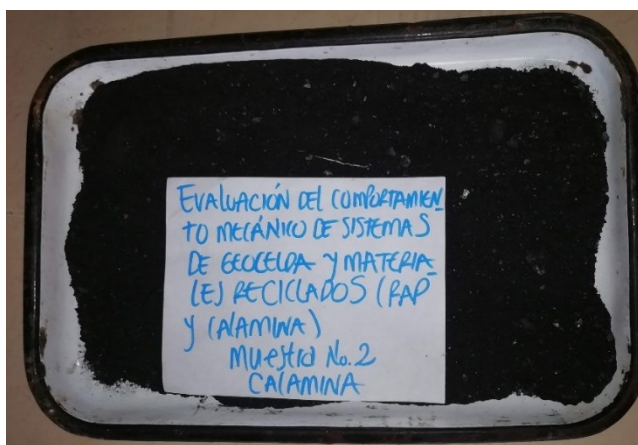
TRM	Promedio móvil 20 días	Devaluación año completo	Devaluación año corrido
3.253,89	3.314,44	4,02%	-0,71%

Fuente: Banco de la República de Colombia [Consultado: 10 de Enero de 2020]. Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/comportamiento-del-mercado-del-dolar-durante-el-dia-informacion-tiempo-real>

GERDAU DIACO S.A., cuenta con once (11) plantas de corte y doble; además de cuatro (4) plantas de laminación y producción de acero en Colombia, dentro de las cuales se destacan las plantas de Cota, Sopo, Medellín, Barranquilla, Cartagena, Tuta – Boyacá, Tocancipá, Muña y Neiva.

7.3.1. Caracterización de la muestra de calamina: La muestra de calamina que se ensayó fue tomada en el acopio de la planta Diaco, ubicada en Sibaté, Cundinamarca.

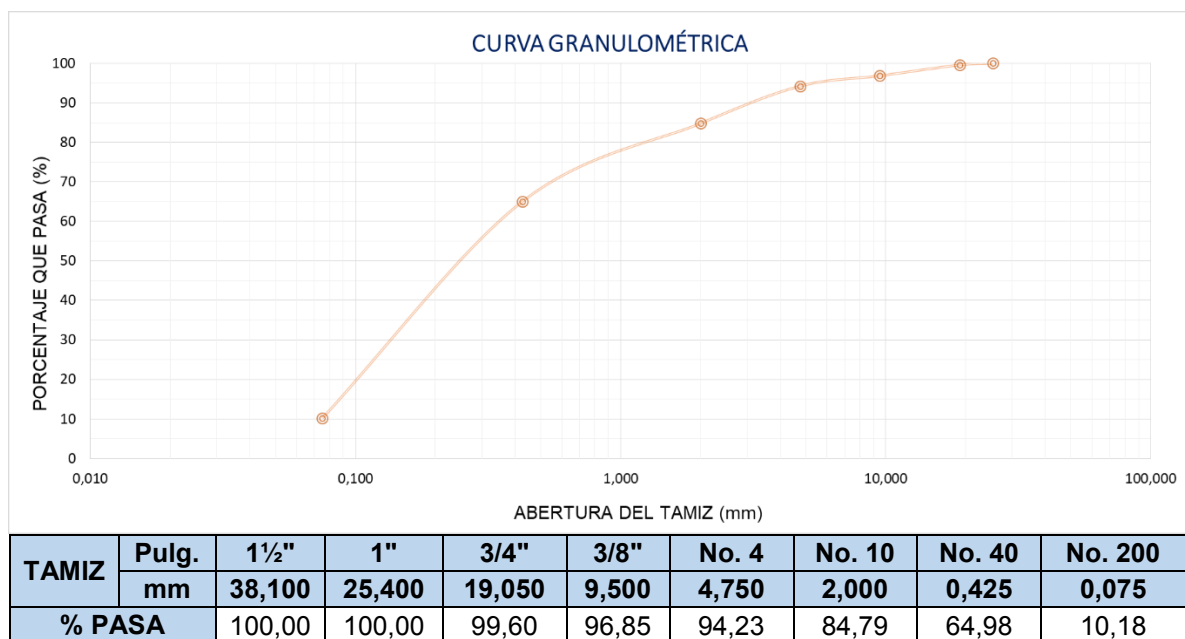
Figura 32. Muestra de calamina



Fuente: Propia

Se procede con el ensayo de granulometría obteniendo los siguientes resultados:

Gráfica 4. Resultados y curva granulométrica: Calamina



Fuente: Propia

Para los ensayos de caracterización se presentan los siguientes resultados:

Tabla 15. Resultados ensayos de laboratorio: calamina.

CALAMINA			
Ensayo		Norma de ensayo	Resultado CALAMINA
Dureza			
Desgaste Los Ángeles	•En seco, 500 revoluciones	INV E-218	16,3%
Micro Deval	•Valor en seco	INV E-238	9,7%
Durabilidad			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos	-Relación húmedo / seco	INV E-220	1,19%
Limpieza			
Límite líquido		INV E-125	NO LÍQUIDO
Índice de plasticidad		INV E-126	N.L. - N.P.
Equivalente de arena		INV E-133	27%

CALAMINA		
Ensayo	Norma de ensayo	Resultado
		CALAMINA
Valor de azul de metileno	INV E-235	8,8
Terrones de arcilla y partículas deleznales	INV E-211	0
Geometría de las Partículas		
Angularidad de la fracción fina	INV E-239	35,9%
Capacidad de soporte		
CBR, (%) mínimo - Referido al 100% de la densidad seca máxima según ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión	INV E-148	143,1

Fuente: Propia

Los registros correspondientes a los ensayos de laboratorio se presentan en el **Anexo 3**.

Los ensayos de caracterización para la muestra de RAP y Calamina se realizaron con el objetivo de conocer las características mecánicas de cada material e individualmente no se comparan con ninguna especificación, ya que el objetivo es encontrar la mezcla de estos dos materiales que cumpla con los requisitos establecidos por las especificaciones IDU ET-2011.

8. DETERMINACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de granulometría de cada material, se combina por tanteo y en diferentes proporciones los porcentajes pasa del RAP y la calamina usando el software Microsoft Office Excel, tal y como se muestra en el *Anexo 4. Fórmula de trabajo*.

Lo anterior con el fin de determinar ¿cuál será la dosificación óptima que al mezclarse cumpla con la distribución granulométrica requerida para un material de tipo base granular? (Tabla 16). A dicha combinación de materiales, que se ajusta mejor dentro de las bandas granulométricas, se denominara “fórmula de trabajo”.

Tabla 16. *Granulometrías admisibles para la construcción de bases y subbases granulares*

TIPO DE CAPA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
		50.0	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
		2"	1 ½"	1"	¾"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
		% PASA								
Base	BG_Gr1	-	100	75-95	60-90	40-70	28-50	15-35	6-20	2-10
	BG_Gr2	-	-	100	75-95	50-80	35-60	20-40	8-22	2-10
Subbase	SB_Gr1	100	80-95	60-90	-	36-68	25-50	15-35	6-20	0-10
	SB_Gr2	-	100	75-95	62-88	42-78	28-55	16-40	6-22	0-12
	SBG -pea	100	75-98	60-90	-	36-66	25-52	15-40	6-25	0-14

Fuente: Especificaciones Técnicas de materiales y construcción, IDU-ET-2011, Tabla 400.4

Posteriormente en el laboratorio, se mezclaron el RAP y la calamina según los porcentajes determinados en la fórmula de trabajo y se ejecutó el ensayo de granulometría. Para el ajuste de la “fórmula de trabajo” se tuvo en cuenta además las tolerancias indicadas en la Tabla 17.

Tabla 17. *Tolerancias granulométricas*

Tamiz	Tolerancias en puntos de porcentaje sobre el peso seco de los agregados
% pasa tamiz de 9.5 mm (3/8") y mayores	± 7 %
pasa tamices de 4.75 mm (Nº 4) a 425 µm (Nº 40)	± 6 %
% pasa tamiz 75 µm (No. 200)	± 3 %

Fuente: Especificaciones Técnicas de materiales y construcción, IDU-ET-2011, Tabla 400.5

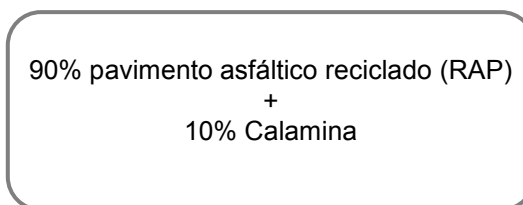
En los ítems 8.1, 8.2 y 8.3, se muestran tres diferentes proporciones y su respectivo análisis granulométrico teórico. Se dedujo previamente, que son las que mejor se ajustan a los requisitos granulométricos requeridos.

Como descripción de las gráficas presentadas para cada combinación de materiales, se tiene que:

- La línea azul, corresponde a los resultados obtenidos después de la ejecución del ensayo de granulometría sobre la mezcla óptima de materiales o fórmula de trabajo que se utilizará para el lleno de la geocelda.
- Las líneas verdes señalan las especificaciones (BG_Gr1 y BG_Gr2), se debe tener en cuenta que según lo indicado en el numeral 400.2.3. Granulometría, el material de base o subbase granular deberá cumplir con la franja granulométrica establecida en los documentos técnicos del proyecto⁶⁸. En este trabajo se comparan los resultados con ambas franjas granulométricas para finalmente escoger la especificación a la que mejor se adapten la fórmula de trabajo. También se incluyeron las tolerancias permitidas (líneas amarillas).

8.1. COMBINACIÓN NO. 1: 90% PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) + 10% CALAMINA

Se toma de cada porcentaje pasa la siguiente proporción:



⁶⁸Especificaciones IDU ET-2011, sección 400.11 Capas granulares de base y subbase, versión 2.0, numeral 400.2.3. Granulometría.

En el software Microsoft Office Excel, se mezclan estas dos proporciones y se analiza si teóricamente el material cumple con las especificaciones para cada tamiz.

En la Tabla 18. Mezcla teórica 1: 90% RAP + 10% CALAMINA se observan los resultados obtenidos:

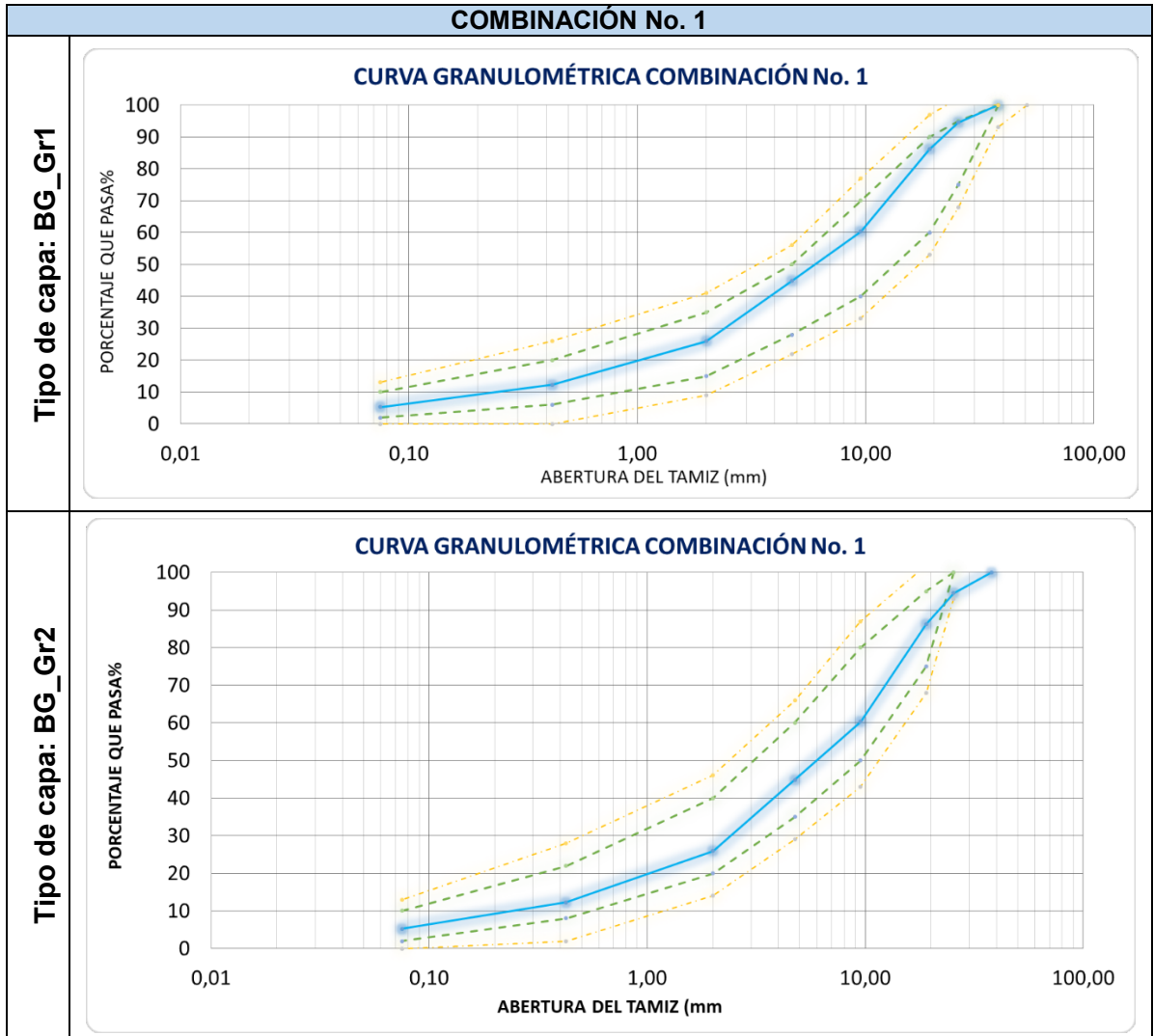
Tabla 18. Mezcla teórica 1: 90% RAP + 10% CALAMINA

TAMIZ		ESPECIFICACIÓN		COMBINACIÓN No. 1			
TAMAÑO		BG_Gr1	BG_Gr2	BG_Gr1		BG_Gr2	
Pulg.	mm						
1½"	38,1	100 -		100,0	Cumple	100,0	Cumple
1"	25,4	95 - 75	100 - 100	94,5	Cumple	94,5	No cumple
¾"	19,05	90 - 60	95 - 75	86,2	Cumple	86,2	Cumple
⅜"	9,5	70 - 40	80 - 50	60,4	Cumple	60,4	Cumple
No. 4	4,75	50 - 28	60 - 35	44,9	Cumple	44,9	Cumple
No. 10	2	35 - 15	40 - 20	26,0	Cumple	26,0	Cumple
No. 40	0,425	20 - 6	22 - 8	12,3	Cumple	12,3	Cumple
No. 200	0,075	10 - 2	10 - 2	5,3	Cumple	5,3	Cumple

Fuente: Propia

Con el propósito de analizar la composición granulométrica de la combinación No. 1, se procede a elaborar las respectivas curvas granulométricas para los dos tipos de gradaciones permitidas por la especificación IDU ET-2011:

Gráfica 5. Curva granulométrica combinación No. 1



Fuente: Propia

Se observa para el tipo de capa BG_Gr2, se requiere un material que presente tendencia hacia la fracción fina, comparándola con el tipo de capa BG_Gr1.

Se tiene que las proporciones combinadas cumplen con todos los parámetros para una base granular tipo BG_Gr1, aunque el material retenido en el tamiz de 25,4 mm se encuentra en el límite de la banda granulométrica.

8.2. COMBINACIÓN NO. 2: 85% PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) + 15% CALAMINA

La mezcla de porcentaje pasa de la combinación No. 2 es la siguiente:

85% pavimento asfáltico reciclado (RAP)
+
15% Calamina

Los resultados obtenidos para la combinación No. 2 se presentan en la Tabla 19

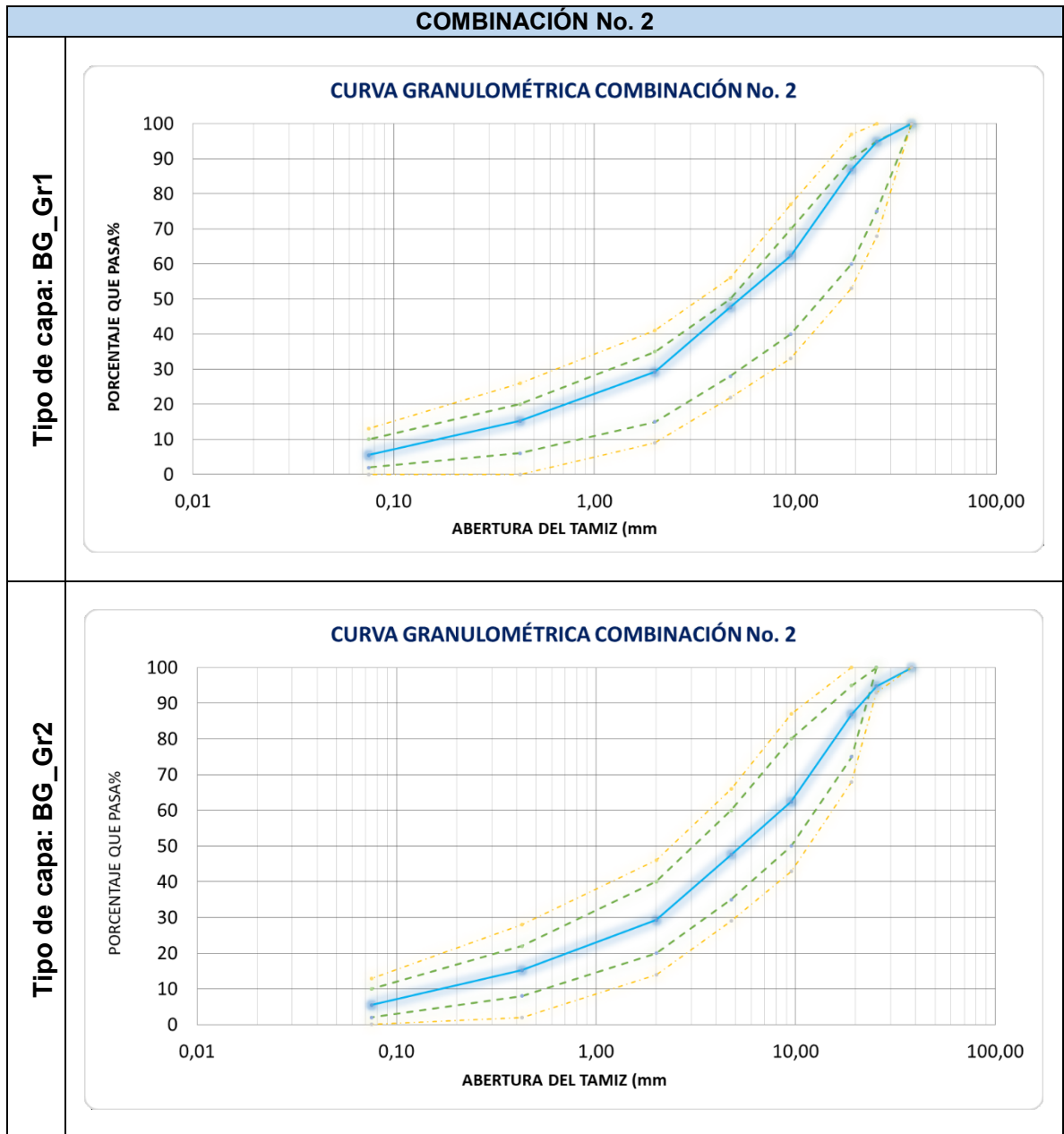
Tabla 19. Mezcla teórica 2: 85% RAP + 15% CALAMINA

TAMIZ		ESPECIFICACIÓN		COMBINACIÓN No. 2			
TAMAÑO		BG_Gr1	BG_Gr2	BG_Gr1		BG_Gr2	
Pulg.	mm						
1½"	38,1	100 -		100,0	Cumple	100,0	Cumple
1"	25,4	95 - 75	100 - 100	94,8	Cumple	94,8	No cumple
¾"	19,05	90 - 60	95 - 75	86,9	Cumple	86,9	Cumple
⅜"	9,5	70 - 40	80 - 50	62,4	Cumple	62,4	Cumple
No. 4	4,75	50 - 28	60 - 35	47,6	Cumple	47,6	Cumple
No. 10	2	35 - 15	40 - 20	29,2	Cumple	29,2	Cumple
No. 40	0,425	20 - 6	22 - 8	15,2	Cumple	15,2	Cumple
No. 200	0,075	10 - 2	10 - 2	5,5	Cumple	5,5	Cumple

Fuente: Propia

La combinación La curva granulometría para cada especificación granulométrica se presenta en la Gráfica 6

Gráfica 6. Curva granulométrica combinación No. 2



Fuente: Propia

8.3. COMBINACIÓN NO. 3: 80% PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) + 20% CALAMINA

La combinación No. 3 consideró las proporciones que se muestran a continuación:

80% pavimento asfáltico reciclado (RAP)
+
20% Calamina

Teóricamente los resultados que se obtendrían si se mezclaran estos porcentajes son los presentados en la Tabla 20

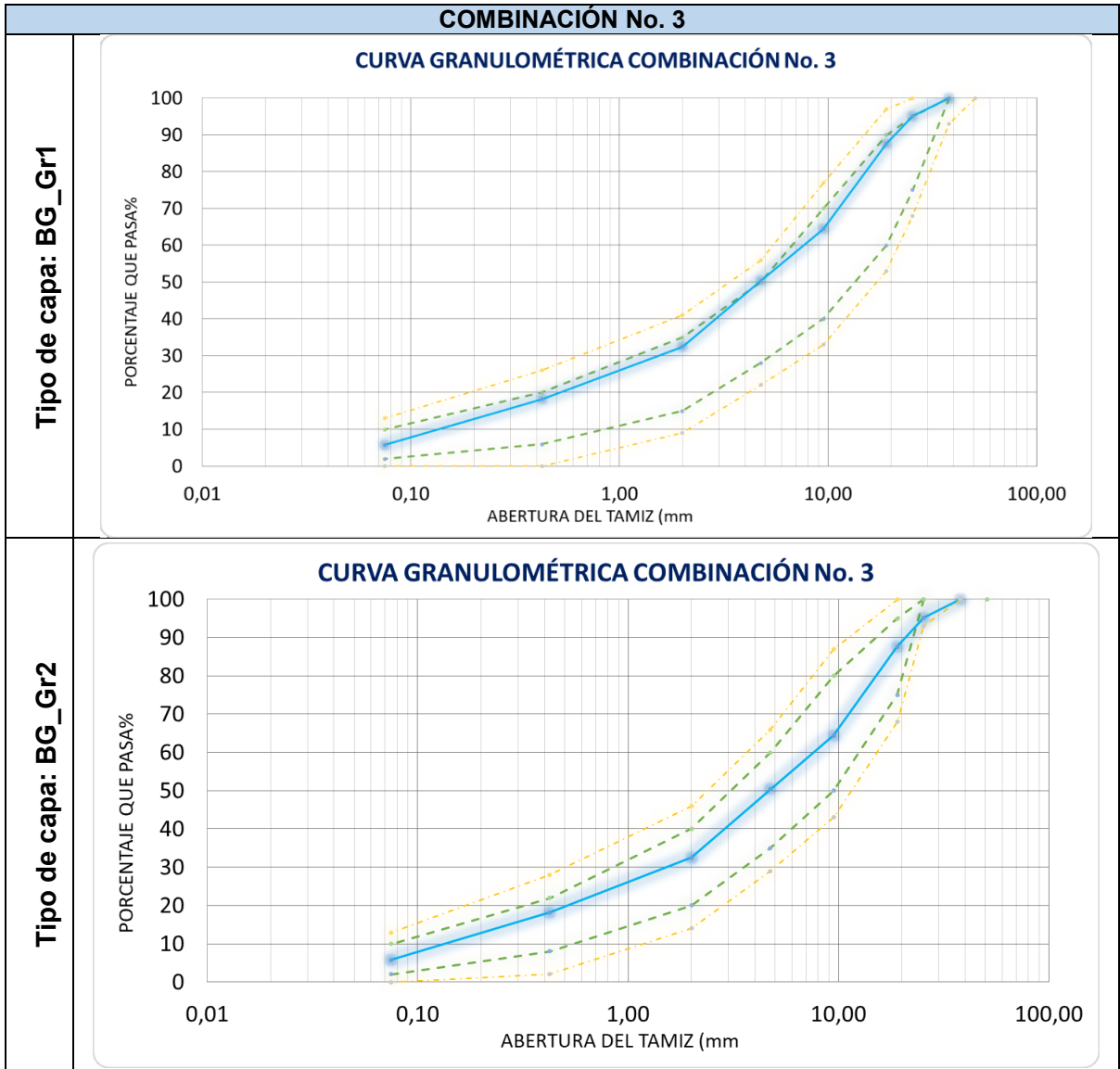
Tabla 20. Mezcla teórica 3: 80% RAP + 20% CALAMINA

TAMIZ		ESPECIFICACIÓN		COMBINACIÓN No. 3			
TAMAÑO		BG_Gr1	BG_Gr2	BG_Gr1		BG_Gr2	
Pulg.	mm						
1½"	38,1	100 -		100,0	Cumple	100,0	Cumple
1"	25,4	95 - 75	100 - 100	95,1	Cumple	95,1	No Cumple
¾"	19,05	90 - 60	95 - 75	87,7	Cumple	87,7	Cumple
3/8"	9,5	70 - 40	80 - 50	64,4	Cumple	64,4	Cumple
No. 4	4,75	50 - 28	60 - 35	50,4	No cumple	50,4	Cumple
No. 10	2	35 - 15	40 - 20	32,5	Cumple	32,5	Cumple
No. 40	0,425	20 - 6	22 - 8	18,2	Cumple	18,2	Cumple
No. 200	0,075	10 - 2	10 - 2	5,8	Cumple	5,8	Cumple

Fuente: Propia

No se cumple con todos los requisitos para los dos tipos de base granular, ya que, como se puede observar, en uno de los tamices para cada una de las granulometrías el porcentaje es mayor al permitido por la especificación, comportamiento que se puede observar en las curvas granulométricas presentadas en la Gráfica 7.

Gráfica 7. Curva granulométrica combinación No. 3



Fuente: Propia

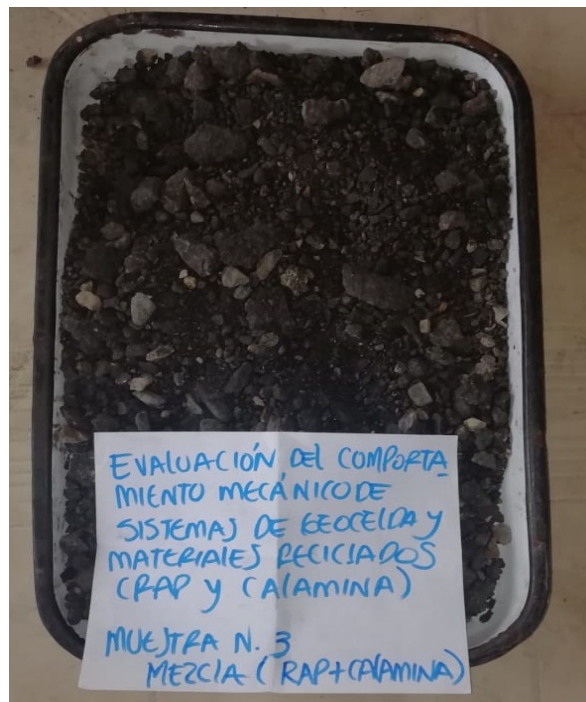
Una vez analizadas las 3 combinaciones planteadas, se considera que la que mejor se ajusta y cumple con los requisitos establecidos por las especificaciones IDU ET-2011 para una base granular tipo BG_Gr1 y con los propósitos de este documento, es la combinación No. 2:

COMBINACIÓN No. 2
85% pavimento asfáltico reciclado
(RAP)
+ 15% Calamina

8.4. CARACTERIZACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO (85% RAP+15% CALAMINA)

Con base en la fórmula de trabajo determinada, se mezclaron los materiales en el laboratorio y se verificó la distribución granulometría ejecutando el ensayo de granulometría.

Figura 33. Mezcla 90% RAP + 10% calamina

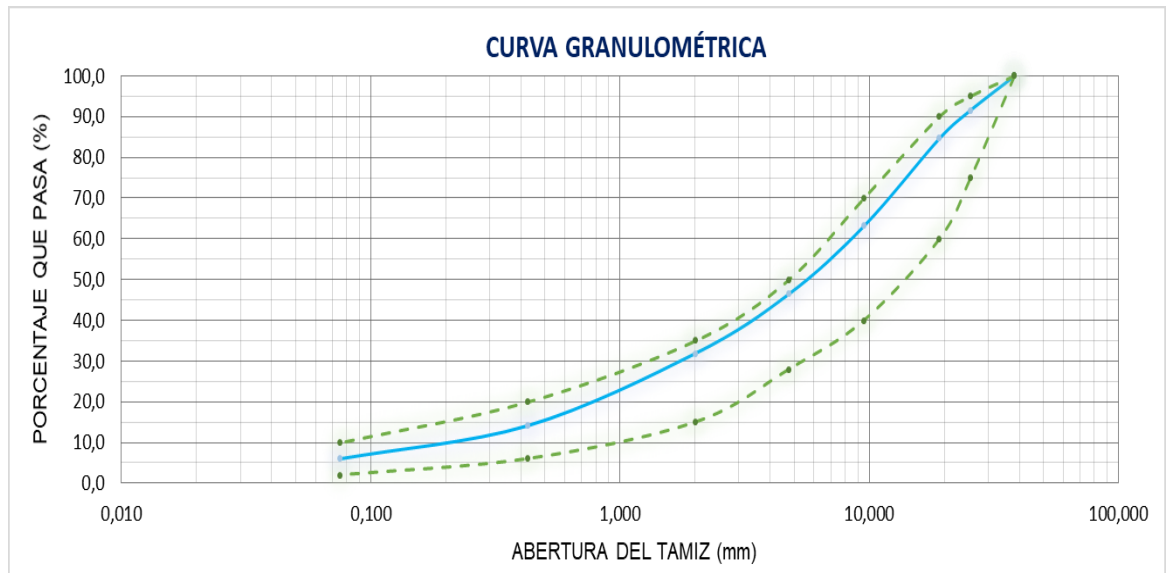


Fuente: Propia

Se presentan a continuación los resultados y curva granulometría (Gráfica 8) de la fórmula de trabajo, donde se observa que la combinación escogida cumple con los

parámetros establecidos por el Artículo 400 del Instituto de Desarrollo Urbano IDU, para una base granular tipo BG_Gr1.

Gráfica 8. Resultados y curva granulométrica fórmula de trabajo



TAMIZ	1½"	1"	¾"	⅜"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
TAMAÑO	38,100	25,400	19,050	9,500	4,750	2,000	0,425	0,075
% PASA	100,00	91,60	84,66	63,18	46,48	31,90	14,15	6,00

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta el buen comportamiento granulométrico de la fórmula de trabajo, se procede a la ejecución de los ensayos de laboratorio establecidos por las especificaciones IDU ET-2011, indicados en la Tabla 21:

Tabla 21. Requisitos de los agregados para bases granulares

Ensayo	Norma de Ensayo	Clase de Base Granular			
		BG_C	BG_B	BG_A	
Dureza					
Desgaste Los Ángeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E-218-07	40	40	35
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV-E-238-07	30	25	20
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo - Relación húmedo/seco, % mínimo	INV-E-224-07	60	75	100
			75	75	75

Durabilidad						
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, % máximo	- Sulfato de Magnesio	INV E-220-07	18	18	18	
Limpieza						
Límite Líquido, % máximo		INV E-125-07	25	25	25	
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E-126-07	3	No plástico	No plástico	
Equivalente de Arena, % mínimo (1)		INV E-133-07	20	20	20	
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV-E-235-07	10	10	10	
Terrones de arcilla y partículas deleznable, % máximo		INV E-211-07	2	2	2	
Geometría de las Partículas						
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara - 2 caras	INVE-227-07	60 40	85 60	85 60	
Índice de Aplanamiento, % máximo (2)		INV E-230-07	35	35	35	
Índice de Alargamiento, % máximo (3)		INV E-230-07	35	35	35	
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo		INV-E-239-07	35	35	35	
Capacidad de Soporte						
CBR, % mínimo - Referido al 100 % de la densidad seca máxima, según el ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión.		INV E-148-07	80	100	100	

NA = No Aplica

(1) En caso de que el equivalente de arena sea inferior pero se cumpla plasticidad y azul de metileno, se aceptará el material con un concepto del desempeño por parte del especialista de geotecnia y/o pavimentos

(2) Partículas planas son aquellas cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción.

(3) Partículas alargadas son aquellas cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción.

Fuente: Especificaciones Técnicas de materiales y construcción, IDU-ET-2011, Tabla 400.2

En la Tabla 22, se presenta de manera comparativa los resultados y el requisito asociado para cada ensayo para una base granular tipo BG_A y se puede determinar que la fórmula de trabajo considerada cumple con todos los requisitos.

Los reportes de los ensayos ejecutados para la subbase granular reciclada (fórmula de trabajo) se pueden consultar en el **Anexo 5**.

Tabla 22. Resultados ensayos de laboratorio: base granular reciclada tipo BG_A

Ensayo		Norma de ensayo	Resultado 85% RAP + 15% Calamina
Dureza			
Desgaste Los Ángeles	•En seco, 500 revoluciones	INV E-218	27,6%
Micro Deval	•Agregado grueso	INV E-238	17,3%
10% de finos	•Valor en seco	INV E-224	202,5 kN
	•Relación húmedo / seco		86,7%
Durabilidad			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos	•Sulfato de Magnesio	INV E-220	6,22%
Limpieza			
Límite líquido		INV E-125	NO LÍQUIDO
Índice de plasticidad		INV E-126	NO PLÁSTICO
Equivalente de arena*		INV E-133	31%
Valor de azul de metileno		INV E-235	4,5
Terrones de arcilla y partículas deleznable		INV E-211	0%
Geometría de las Partículas			
Partículas fracturadas mecánicamente	•1 Cara	INV E-227	100%
	•2 Caras		100%
Índices de aplanamiento		INV E-230	23,6%
Índices de alargamiento		INV E-230	25,8%
Angularidad de la fracción fina		INV E-239	35,5%
Capacidad de Soporte			
CBR - Referido al 100% de la densidad seca máxima según ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión		INV E-148	114,5%

Fuente: Propia

A continuación se presentan algunos comentarios, de acuerdo a lo observado en los resultados de la tabla 22.

- **Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los Ángeles:** Este ensayo busca determinar la resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 1 ½" tras ser sometidos a la acción de cargas abrasivas y 500 revoluciones en la máquina de los Ángeles evaluando así su dureza.

Porcentaje de desgaste en la máquina de los Ángeles = 27,6%.

Cumple con la especificación que para ensayo es máximo = 35%, evidenciando su alta competencia en cuanto a la dureza del agregado en el momento de compactación en terreno garantizando un mínimo de fatigamiento.

- **Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval:** A través de este método se busca medir la resistencia al desgaste de los agregados gruesos tras ser sometidos a la acción de cargas abrasivas y agua. Los resultados de este ensayo son de gran importancia por permitir evaluar la tenacidad o abrasión de agregados grueso

Porcentaje de desgaste en el aparato Micro-Deval = 17,3%.

Cumple con la especificación que para ensayo es máximo = 20%, por lo que se cuenta con un buen comportamiento del agregado evaluado.

- **Determinación del valor del 10% de finos:** Este ensayo evalúa una fracción de material grueso, sometiéndola a una carga por aplastamiento y generando una esfuerzo a compresión para evaluar el porcentaje de finos producidos por la carga.

Carga necesaria para producir un 10% de finos = 202,5 kN.

Cumple con la especificación que para este ensayo es mínimo 100 kN.

Porcentaje de relación húmedo / seco = 86,7%.

Cumple con la especificación que requiere sea mínimo del 75%.

Los resultados obtenidos con este ensayo, indican la capacidad de soporte de la muestra ensayada frente a los esfuerzos producidos por la acción de cargas de tránsito después de la conformación y uso de la capa.

- **Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio:** Éste ensayo busca examinar la durabilidad del agregado pétreo cuando se somete a la alteración producida por agentes químicos en este caso el sulfato de magnesio. El agregado se sumerge en la solución durante 24 horas y luego se seca en el horno. Se repite este proceso cinco (5) veces. Se busca simular el efecto de expansión del agua por congelamiento y el efecto de agentes atmosféricos y de intemperie.

Para la base granular reciclada se obtuvo un 6,22% de pérdida sometido a cinco (5) ciclos en solución de sulfato de magnesio.

Cumple con la especificación que para este ensayo el valor máximo es 18%, garantizando durabilidad de la muestra ensayada, si es sometida a los agentes mencionados anteriormente.

- **Determinación del Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos:** Estos ensayos determinan las condiciones de consistencia del suelo con cambios de humedad

Límite líquido = No líquido

Cumple con la especificación que para este valor es máximo 25%

Índice de plasticidad = No plástico

Cumple con la especificación que para este valor es No plástico

- **Equivalente de arena, mínimo: Mediante este procedimiento se determina el porcentaje de polvo nocivo material arcilloso presente en la fracción fina (Material que pasa el tamiz No. 4):** Por medio de una solución floculante se separan las arenas de la cobertura arcillosa

Porcentaje de equivalente de arena (EA) = 31%.

Cumple con la especificación que para este valor es mínimo 20%, es decir que la muestra evidencia una baja cantidad de finos nocivos.

- **Valor de azul de metileno en agregados finos:** Estima el potencial de nocividad presente en la parte fina de la muestra de suelo a través de una reacción química

Valor de azul (VA) = 4,5.

Cumple con la especificación que para este valor es máximo 10, lo que nos indica que el potencial de nocividad de la muestra analizada es bajo, lo que permite deducir que la fórmula de trabajo está limpia y tiene una baja segregación en el momento de su manipulación.

- **Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en agregados:** Determina la fracción aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznales.

Porcentaje de terrones de arcilla = 0%

Cumple con la especificación que para este valor es máximo 2%

- **Partículas fracturadas mecánicamente:** Este ensayo determina el grado de fracturación de los agregados gruesos, analizando las partículas con una y con dos o más caras fracturadas.

Porcentaje de partículas fracturadas mecánicamente, una cara = 100%

Cumple con la especificación que para una cara este valor es mínimo 85%

Porcentaje de partículas fracturadas mecánicamente, dos cara = 100%

Cumple con la especificación que para dos caras este valor es mínimo 60%

- **Índices de aplanamiento y alargamiento:** Define la forma de las partículas en un agregado, característica importante en materiales utilizados en la construcción de carreteras.

23,6% y 25,8% de alargamiento y aplanamiento respectivamente.

Estos parámetros cumplen con la especificación que para este ensayo es máximo 35% en ambos casos.

- **Angularidad de la fracción fina:** Mediante este ensayo se calcula el porcentaje de vacíos en el agregado que pasa el tamiz No. 8 (2.36 mm) y sin compactar.

Porcentaje de vacíos (U) = 35,5%

Cumple con la especificación que para este valor es mínimo 35%

- **CBR referido al 100% de la densidad seca máxima según ensayo INV E-142 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión:** Mide el índice de resistencia de suelos y para muestras alteradas está referido al 100% de la densidad seca máxima según ensayo INV E-142 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión

Densidad seca máxima = 2,186 g/cm³

Humedad óptima = 5.7%

Porcentaje mínimo de CBR al 100% de la densidad máxima= 134,5%

Cumple con la especificación que para este valor es mínimo 100%

En este ensayo se puede determinar que la muestra puede ser compactada aproximadamente al 90% de la densidad seca máxima, y cumplir con el 100% del valor de CBR establecido por la especificación. La adición de calamina por contener partículas de hierro hace que la mezcla o fórmula de trabajo se densifique y presente un comportamiento rígido. Es importante tener en cuenta que para verificar las condiciones de compactación, debe usarse el procedimiento establecido por la norma I.N.V. E-164 (determinación de la densidad empleando medidores nucleares)

Respecto al análisis realizado a cada uno de los ensayos de laboratorio se puede concluir que la fórmula de trabajo cumple con todos los parámetros indicados por las especificaciones IDU ET-2011 para un material de base granular tipo BG_A. además es importante mencionar que los requisitos para este material son los más exigentes en comparación con la base granular tipo BG_B y BG_C, en consecuencia también se puede adaptar a alguna de estas dos capas granulares.

Además la muestra es clasificada según lo indicado en la norma I.N.V. E-180 para sistema AASTHO e I.N.V. E-181 para el sistema unificado de clasificación de suelos, teniendo en cuenta las siguientes características:

Tabla 23. Características granulométricas de la fórmula de trabajo

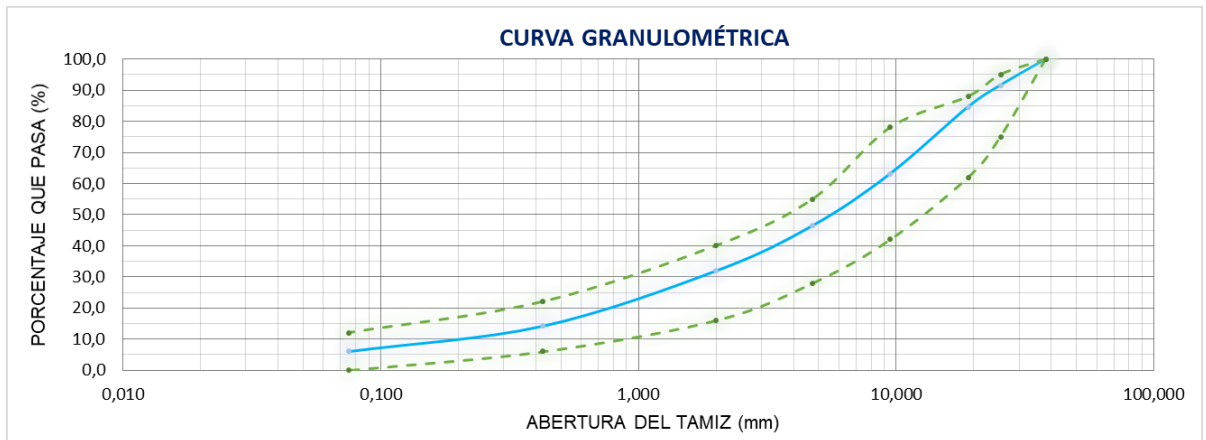
Granulometría	% que pasa	Tamiz No. 10 (2.00 mm)	31.90
		Tamiz No. 40 (425 µm)	14.15
		Tamiz No. 200 (75 µm)	6.00
	D10 (mm)		0.247
	D30 (mm)		1.832
	D60 (mm)		8.596
	Cc: Coeficiente de curvatura		1.581
	Cu: Coeficiente de uniformidad		34.818
Límite líquido			No líquido
Índice de plasticidad			N.P. – N.L.

Fuente: Propia

- Clasificación de grupo sistema AASTHO: A-1-a
- Sistema unificado de clasificación de suelos: GW-GM

Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría para las franjas requeridas para un material de subbase granular, y se tiene que también encaja para una SB_Gr2, como se muestra en la Gráfica 9

Gráfica 9. Curva granulométrica para una SB_Gr2



Fuente: Propia

9. ANÁLISIS Y SELECCIÓN DEL SOFTWARE PARA EJECUCIÓN DEL MODELO DE LAS ESTRUCTURAS DEL PAVIMENTO PROPUESTAS

En el siguiente apartado, se realiza la descripción de las características, ventajas y desventajas del software que fue seleccionado para el ejercicio de modelación de cada una de las estructuras de pavimento planteadas tanto por el especialista de pavimento (Alternativas 1 y 2), las cuales serán presentadas respectivamente en el capítulo 10 del presente documento.

Por medio de la modelación con el software seleccionado, se busca comparar los resultados obtenidos en parámetros claves para el diseño de estructuras de pavimento flexible, como el caso de los esfuerzos actuantes y deformaciones generadas en diferentes puntos de las construcciones.

9.1. PITRA-PAVE

Las ventajas y desventajas inherentes al uso del software PITRAPAVE, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 24. Análisis cualitativo del software PITRAPAVE.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none">• Es un software de descarga fácil y gratuita.• Su interfaz es en español.• Permite seleccionar en que sistema de unidades trabajar (sistema métrico).• Cuenta con un manual de manejo.• Se ajusta a la nueva guía Mecánico Empírico MEPDG AASHTO 2015.• Exportación de archivos “csv” a Excel, Open Office.• Numero de cargas y puntos ilimitados.• Permite la obtención de los resultados en términos de deformación y deflexión, en los puntos de evaluación.• Software multiplataforma (Windows, MacOS, Linux).• Mucho más rápido que otros programas.• Estructuras con hasta 40 capas elásticas.	<ul style="list-style-type: none">• No permite la modelación para pavimentos rígidos.• No arroja imágenes de apoyo.• No guarda automáticamente los archivos.• Solo permite un análisis estático.

Fuente: Propia

9.2. WINDEPAV

El análisis cualitativo realizado al uso del software WINDEPAV, se presenta en la siguiente tabla 25, exponiendo las ventajas y desventajas asociadas a su uso.

Tabla 25. Análisis cualitativo del software WINDEPAV.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Es un software de descarga fácil y gratuita. • Su interfaz se encuentra en español. • cuenta con un manual de manejo. • Exportación de archivos “csv” a Excel, Open Office. • El software WINDEPAV, es uno de los programas más implementados a nivel Nacional. (Colombia). • Posee una interfaz amigable con el usuario. • Presenta imágenes de apoyo, que permiten mejor el ingreso de datos. • Exhibe gráficos en datos de salida que permiten la obtención de la respuesta de la posición del valor máximo para una carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se ajusta a la nueva guía Mecánico Empírico MEPDG AASHTO 2015. • No permite seleccionar en que sistema de unidades trabajar. • No permite obtener la respuesta del material en puntos específicos de cualquier parte de la estructura. • WINDEPAV no funciona en sistemas de 64 bits. • Solo permite el análisis para pavimentos flexibles. • Su instalación solo es compatible para el sistema operativo Windows. • Se debe de realizar una modificación en la configuración regional del computador, que permita su debido funcionamiento.

Fuente: Propia

9.3. BISAR 3.0

En cuanto al software BISAR 3.0, se presentan las siguientes ventajas y desventajas asociadas a su uso.

Tabla 26. Análisis cualitativo del software BISAR 3.0.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Es un software de descarga fácil y gratuita. Su interfaz se encuentra en español y es de fácil entendimiento. • Exportación de archivos “csv” a Excel, Open Office. • Presenta imágenes de apoyo, que permiten mejor el ingreso de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se ajusta a la nueva guía Mecánico Empírico MEPDG AASHTO 2015. • BISAR está diseñado para usar en plataforma XP, lo cual restringe el acceso al uso de nuevos sistemas operativos • Solo permite el análisis para pavimentos flexibles. • No cuenta con un manual de manejo.

Fuente: Propia

9.4. 3D MOVE

El software 3D MOVE, presenta al usuario las siguientes bondades y restricciones.

Tabla 27. Análisis cualitativo del software 3D MOVE.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Es un software de descarga fácil y gratuita. • Emplea un modelo de análisis por medio de la teoría de elementos finitos, lo cual mejora la precisión de los resultados obtenidos. • Su interfaz se encuentra en inglés, sin embargo es de fácil entendimiento. • Exportación de archivos “csv” a Excel, Open Office. • Presenta imágenes de apoyo, que permiten mejor el ingreso de datos. • El modelo puede tener en cuenta importantes factores de respuesta del pavimento, como las distribuciones complejas de tensión de contacto 3D inducidas por el tráfico (normal y cortante) de cualquier forma. • Puede ejecutarse en equipos de 32 y 64 Bits • Se ajusta a la nueva guía Mecánico Empírico MEPDG AASHTO 2015. • Cuenta con espacio para selección de unidades a trabajar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Solo permite el análisis para pavimentos flexibles. • No cuenta con un manual de manejo. • Sólo es compatible con sistema operativo Windows. • No existe retro compatibilidad con versiones anteriores del software, lo cual imposibilita trabajar archivos en equipos con diferentes características a las exigidas por el sistema. • Es compatible con Microsoft Windows XP, Windows Vista o Windows 7; sin embargo para equipos con tecnología nueva no cuenta con funcionamiento.

Fuente: Propia

Luego de realizar el análisis de las ventajas y desventajas que trae el uso de cada uno de los software (PITRAPAVE, WINDEPAV, BISAR 3.0 y 3D MOVE), se llega a la conclusión de que los software de mejores características son el PITRAPAVE y 3D MOVE, sin embargo se seleccionó para el ejercicio de modelación el software PITRAPAVE, dado que cuenta con un acceso garantizado, además de poseer propiedades de análisis de pavimentos con el modelo multicapa elástica (MCE), con interfaces que van desde las 2 a las 40 capas, haciendo un análisis más detallado en materia de esfuerzos y deformaciones. Por otro lado, cuenta con la propiedad de exportar bases de datos y resultados de cálculos al software Microsoft Excel, trayendo consigo ventajas para presentación de informes, análisis de gráficos y tablas y análisis estadístico.

10. PARÁMETROS DE ENTRADA REQUERIDOS PARA LA EJECUCIÓN DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES

A continuación se presenta una breve definición de los parámetros o propiedades de los materiales, que son requeridas como datos de entrada por el Software PITRAPAVE, con el fin de realizar el análisis multicapa elástico (MCE).

10.1. SISTEMA DE UNIDADES DE TRABAJO

Por defecto PITRA PAVE abre un archivo en unidades del Sistema Internacional, por lo que para el caso de nuestro proyecto, las unidades están en el sistema correcto. Sin embargo si se requiere utilizar el Sistema Inglés se deberá seleccionar las mismas en la Barra de Menú, Opciones, Sistema de Unidades, Sistema Inglés (in, lb, psi), como se observa en la Figura 25. Las unidades cambiarán inmediatamente después de activar la opción.⁶⁹

10.2. DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES A EMPLEAR EN LA MODELACIÓN.

El software solicita como parámetro de entrada, propiedades inherentes a los materiales a emplear en la construcción de la estructura de pavimento.

Dentro de las propiedades requeridas, se encuentran las siguientes:

- Módulo de Elasticidad E , de los materiales en Mega Pascales (MPa)
- Coeficiente de Poisson ν , de los materiales (Adimensional)
- Espesor h , de las capas (m)
- Descripción preliminar de la capa (Tipo de material, Ej. Base granular, Sub Base Granular, etc)

⁶⁹ Manual de operación Software PITRA-PAVE 1.0.0. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica.

- Carga P , en Newton (N), la cual es definida para el vehículo de diseño.
- Presión de inflado o de contacto q , en Pascales (Pa), la cual es adoptada según la metodología de diseño y definida para el vehículo de diseño.
- Coordenadas X (m), Y (m), los cuales dan la ubicación del punto de aplicación de la carga P .
- Coordenadas X (m), Y (m) de los puntos de medición en el pavimento, en los cuales se determinaran los esfuerzos y deformaciones a nivel de las fibras superiores e inferiores de las capas de la estructura de pavimento.

11. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS ARROJADOS POR EL SOFTWARE

Una vez consignados en los espacios respectivos, los datos de entrada mencionados en el numeral 10.3, se procederá a realizar el respetivo cálculo de los siguientes parámetros:

- Esfuerzos: Se calculan los siguientes esfuerzos en Pascales.
 - ✓ Esfuerzo vertical (S_{zz})
 - ✓ Esfuerzos normales (S_{xx} , S_{yy}): Positivos representan compresión y negativos representan tensión.
 - ✓ Esfuerzos cortantes (S_{xy} , S_{xz} , S_{yz})

De forma análoga a la anterior, se pueden interpretar los resultados arrojados por el software en materia de:

- Deformaciones
- Deflexiones

12. DETERMINACIÓN DE VARIABLES PREVIO A LA MODELACIÓN CON EL SOFTWARE PITRAPAVE

A continuación, se describe la secuencia de pasos que se adoptó, con el fin de obtener los resultados de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, luego de aplicar cada una de las alternativas del sistema de pavimento propuesto por el especialista de pavimentos quien suministro el respectivo diseño y a su vez por el sistema de pavimento propuesto en el presente documento, el cual presenta modificaciones en la capa de mejoramiento (Geocelda, RAP y calamina).

12.1. DEFINICIÓN DEL CORREDOR OBJETO DE MODELACIÓN

En primer lugar, se debe tener en cuenta para la modelación de nuestro caso de estudio, características claves del tramo o corredor de estudio como el caso de estudios geotécnicos, caracterización de los materiales a emplear, características de las solicitaciones, ubicación, entre otros. A continuación se presenta la definición del corredor de estudio.

12.1.1. Ubicación del corredor a modelar: El segmento vial objeto de modelación se encuentra ubicado en el sur occidente de la ciudad de Bogotá, Localidad octava (8) Kennedy, tal y como se muestra en la siguiente figura.

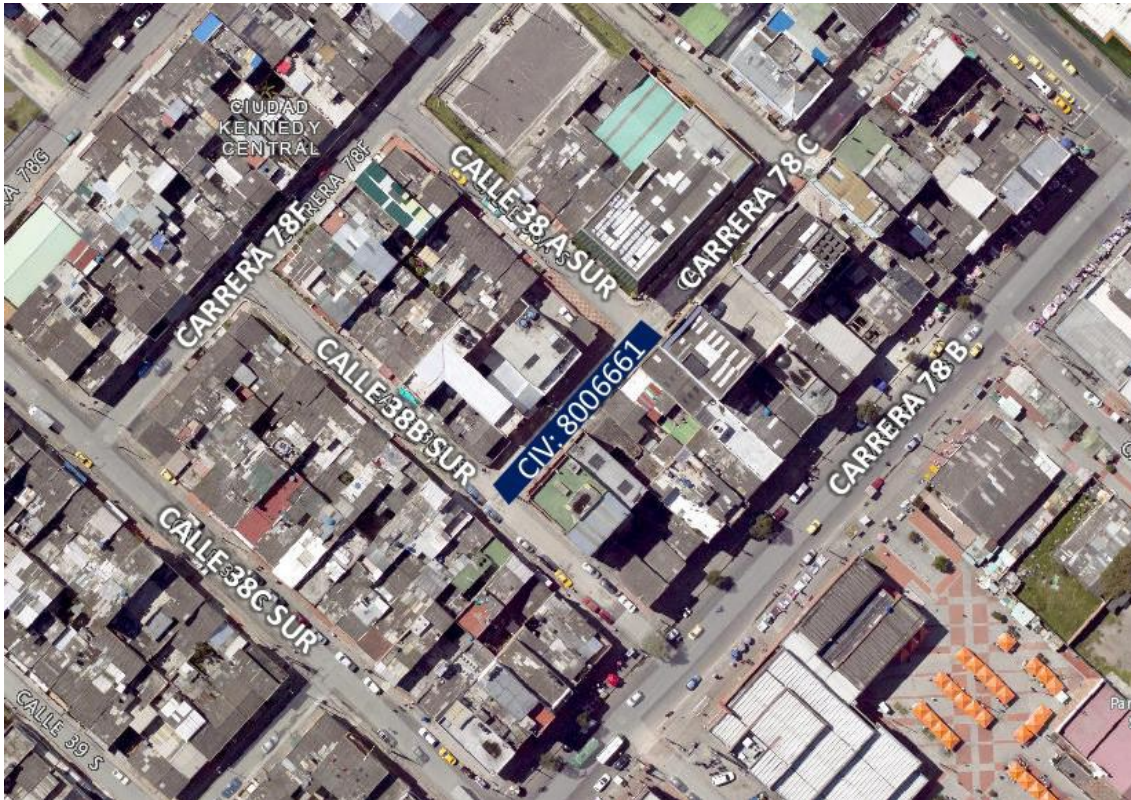
Figura 34. Ubicación general del CIV a modelar.



Fuente: Anexo Técnico 1 FDLK-LP-2-2019

A continuación, se especifica la localización del segmento vial que será objeto del presente estudio, con su respectivo CIV y la nomenclatura de las vías entre las que se encuentra localizada la vía.

Figura 35. Localización detallada del segmento a modelar.



Fuente: Propia a partir de Mapas Bogotá

En la siguiente tabla, se resume la nomenclatura y CIV (Código de identificación vial), asignado por el IDU para seguimiento del corredor vial.

Tabla 28. Nomenclatura del CIV a modelar.

LOCALIDAD	UPZ	CIV	EJE VIAL	DESDE	HASTA	CONTRATO EJECUCIÓN
Kennedy	Kennedy central	8006661	Carrera 78C	Calle 38A Sur	Calle 38B Sur	COP-315-2019

Fuente: Propia

12.1.2. Contrato de Obra Pública asociado a la intervención (COP): El Fondo de Desarrollo Local de Kennedy (FDLK) en conjunto con el Consorcio Urbano IM, mediante la suscripción del Contrato de Obra COP-315-2019/Grupo 2, ha acordado EJECUTAR A PRECIOS UNITARIOS Y A MONTO AGOTABLE, LAS ACTIVIDADES NECESARIAS PARA LA EJECUCIÓN DE LAS OBRAS DE CONSERVACIÓN DE LA MALLA VIAL LOCAL INTERMEDIA, Y ESPACIO PÚBLICO DE LA LOCALIDAD DE KENNEDY EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.” GRUPO 2 en lo correspondiente al Grupo 2 de segmentos a intervenir.⁷⁰

EL CIV a modelar, ha sido priorizado para intervención por el FDLK tal y como se relaciona en la Tabla 28.

12.1.3. Características geométricas del tramo de prueba: Para la caracterización geométrica inicial del segmento vial de estudio, se emplea la información oficial reportada por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y el IDECA respecto de la malla vial existente de la ciudad de Bogotá, las cuales fueron tomadas en campo durante el levantamiento de daños, cuyos resultados se exponen más adelante en el informe.

Así entonces, en la Figura 36 y la Tabla 29, se muestran y condensan las características geométricas de longitud, ancho y área de calzada del segmento.

Figura 36. Características geométricas del segmento a modelar.



Fuente: Tomado de IDECA (mapas.bogota.gov.co)

⁷⁰ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

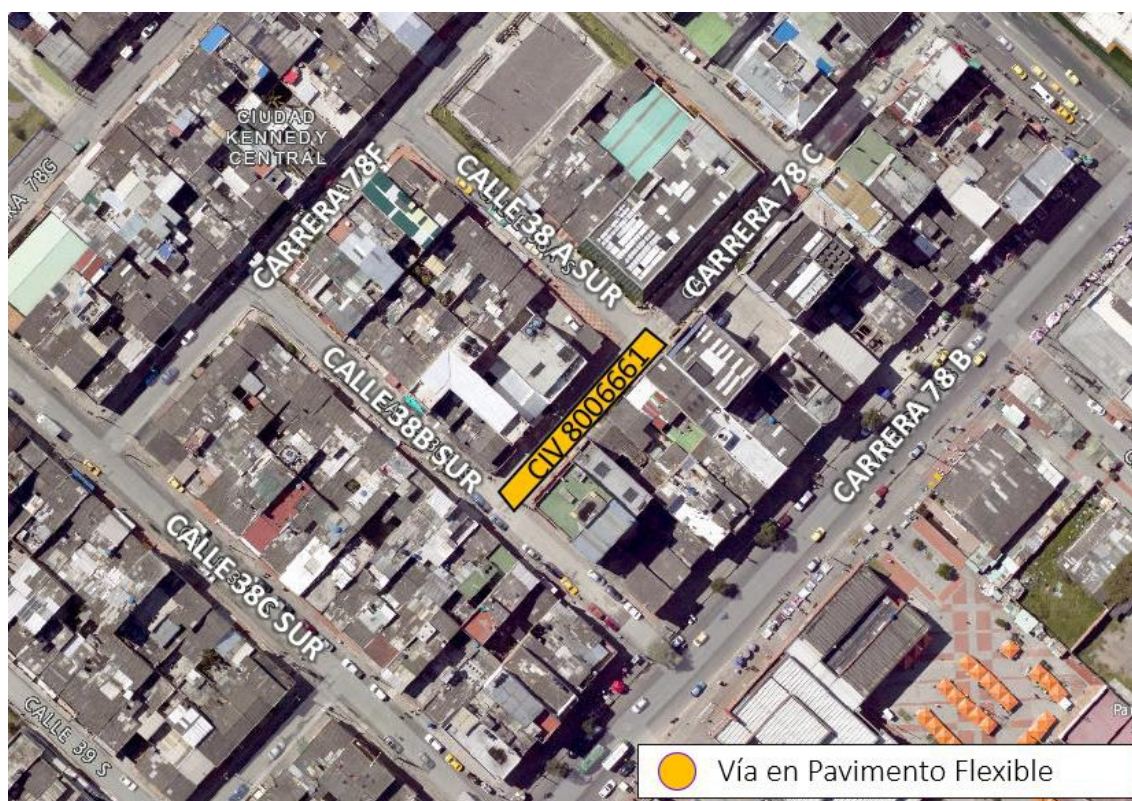
Tabla 29. Características geométricas del segmento a modelar.

LOCALIDAD	UPZ	CIV	LONGITUD (m)	ANCHO DE CALZADA (m)	ÁREA DE CALZADA (m ²)
Kennedy	Kennedy central	8006661	47.10	6.10	290.36

Fuente: Propia

12.1.4. Tipo de Estructura de Pavimento Existente: En este apartado se muestran las características de operación principales del segmento vial de estudio. En primer lugar, se tiene que el pavimento existente corresponde a una estructura de pavimento flexible como se esquematiza a continuación.

Figura 37. Tipo de pavimento Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur



Fuente: Propia a partir de Mapas Bogotá

12.1.5. Dinámica del tránsito: De acuerdo con la información del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de la ciudad cargada en el IDECA, se observa a continuación en la Figura 38, que el segmento de estudio no se

encuentra asociado a ninguna de las rutas de transporte público perteneciente al SITP. Sin embargo, en segmentos viales contiguos se tiene el paso de rutas alimentadoras que eventualmente podrían efectuar algún desvío empleando el corredor de estudio.⁷¹

Figura 38. Rutas de Transporte Público en Zona de Estudio



Fuente: Propia a partir de Mapas Bogotá

Por demás el segmento vial se encuentra localizado en una zona aparentemente residencial en la cual no se aprecia la presencia de algunos vehículos pesados que incrementan las solicitudes estructurales del pavimento.

12.1.6. Evaluación condición superficial del pavimento: Para la evaluación superficial de la estructura de pavimento existente en las vías contempladas en el

⁷¹ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

alcance del presente documento, se tuvo en cuenta la metodología de evaluación del índice de condición del pavimento PCI, para la evaluación y clasificación objetiva de pavimentos según lo especificado en la norma de ensayo ASTM D6433 del año 2018, como lo establece el Anexo Técnico.

El índice de condición del pavimento es un valor numérico que varía entre 0 y 100, con 0 como el valor que describe al pavimento en condición de falla y 100 en perfecto estado. El índice es función de la clase de daño, su severidad y densidad con respecto al área del segmento de estudio. En la siguiente tabla se presenta la clasificación del estado del pavimento en función del PCI:

Tabla 30. Rangos de Clasificación PCI

PCI	Código de Clasificación	Color	Descripción
0 – 25	D		Malo
26 – 55	C		Regular
56 – 85	B		Bueno
86 – 100	A		Excelente

Fuente: Propia

En la metodología se establecen diferentes tipos de daños, para cada uno la severidad debe seleccionarse entre baja, media y alta, y por último, la extensión depende del tipo de falla, generando valores de longitud o área. A continuación, en la Tabla 31 se enumeran los daños del pavimento flexible a inventariar.

Tabla 31. Tipos de daño en pavimentos flexibles.

Código	Nombre de la falla	Unidad
1	Piel de cocodrilo	m ²
2	Exudación	m ²
3	Agrietamiento en bloque	m ²
4	Abultamiento y hundimiento	m ²
5	Corrugación	m ²
6	Depresión	m ²
7	Grieta de Borde	m
8	Grieta de reflexión de juntas	m
9	Desnivel carril / Berma	m
10	Grietas Longitudinales y Transversales	m
11	Parqueo y Acometida de Servicios Públicos	m ²
12	Pulimento de Agregados	m ²
13	Huecos	Un

Código	Nombre de la falla	Unidad
14	Cruce de Vía Férrea	m ²
15	Ahuellamiento	m ²
16	Desplazamiento	m ²
17	Grietas parabólicas	m ²
18	Hinchamiento	m ²
19	Desprendimiento de agregados	m ²

Fuente: Propia

Una vez realizados los respectivos levantamientos e inspecciones visuales de parte del equipo de especialistas de pavimentos, se obtiene la siguiente información.

Tabla 32. Evaluación Condición Actual de Pavimento.

No.	CIV	PCI	Clasificación PCI	
UM-1	8006661	5.90	D	Malo
PROMEDIO		5.90	D	Malo

Fuente: Propia

Los resultados de la evaluación realizada arrojan valores de PCI correspondientes a condición de pavimento MALO con valores de PCI por debajo de 26 en la unidad de muestreo considerada. De esta manera, se tiene un PCI promedio para el segmento de 5.90, correspondiente a condiciones de funcionamiento malas con un pavimento fallado. Estas condiciones, requieren intervenciones a nivel de RECONSTRUCCIÓN para alcanzar los niveles de transitabilidad adecuados.

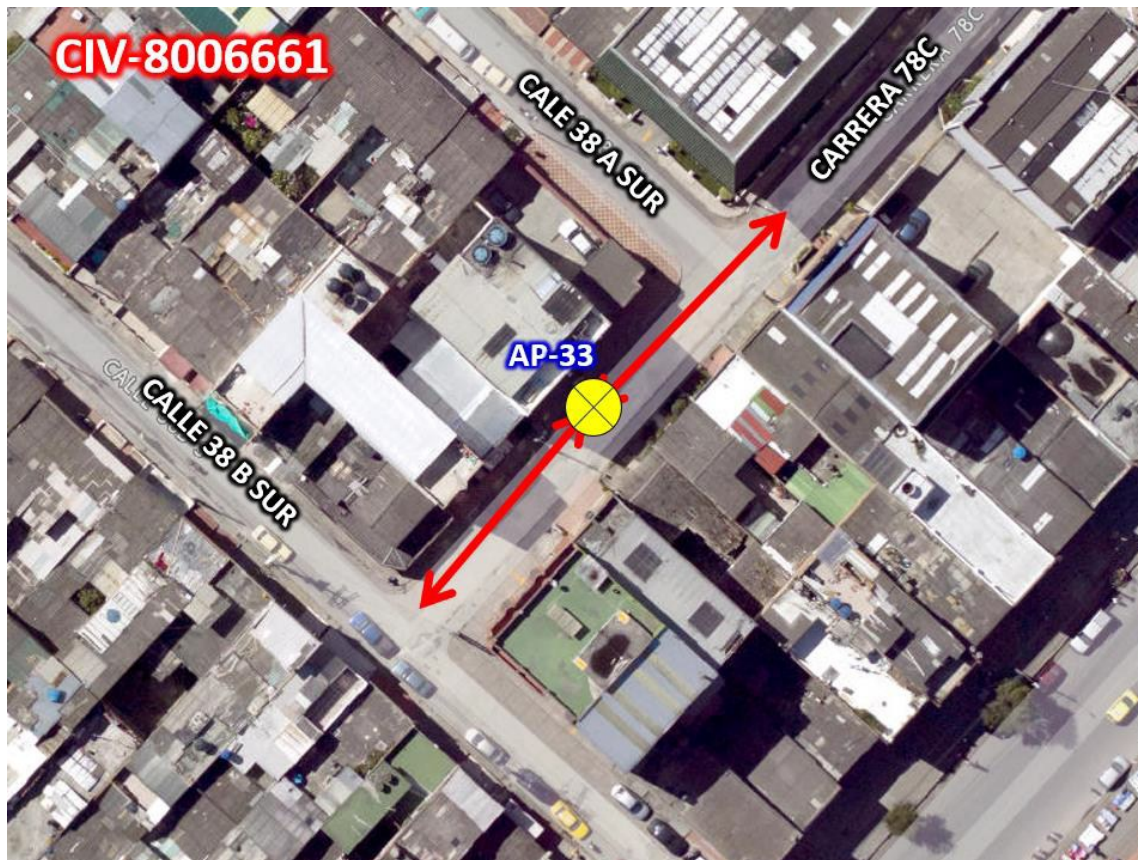
12.1.7. Caracterización de los materiales granulares remanentes: A continuación se presenta la descripción de los materiales granulares encontrados en el sector de estudio.

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

Para llevar a cabo la caracterización física y mecánica de los materiales que componen la estructura de pavimentos existente en el segmento vial a intervenir, se programó una exploración geotécnica intrusiva, constituida por la excavación un (1) apique a una profundidad de 1.50 metros, con extracción de muestras alteradas de los materiales encontrados para la realización de ensayos de clasificación física y caracterización mecánica.

La localización de las excavaciones programadas se presenta en la ilustración que aparece a continuación.

Figura 39. Localización de Apiques.

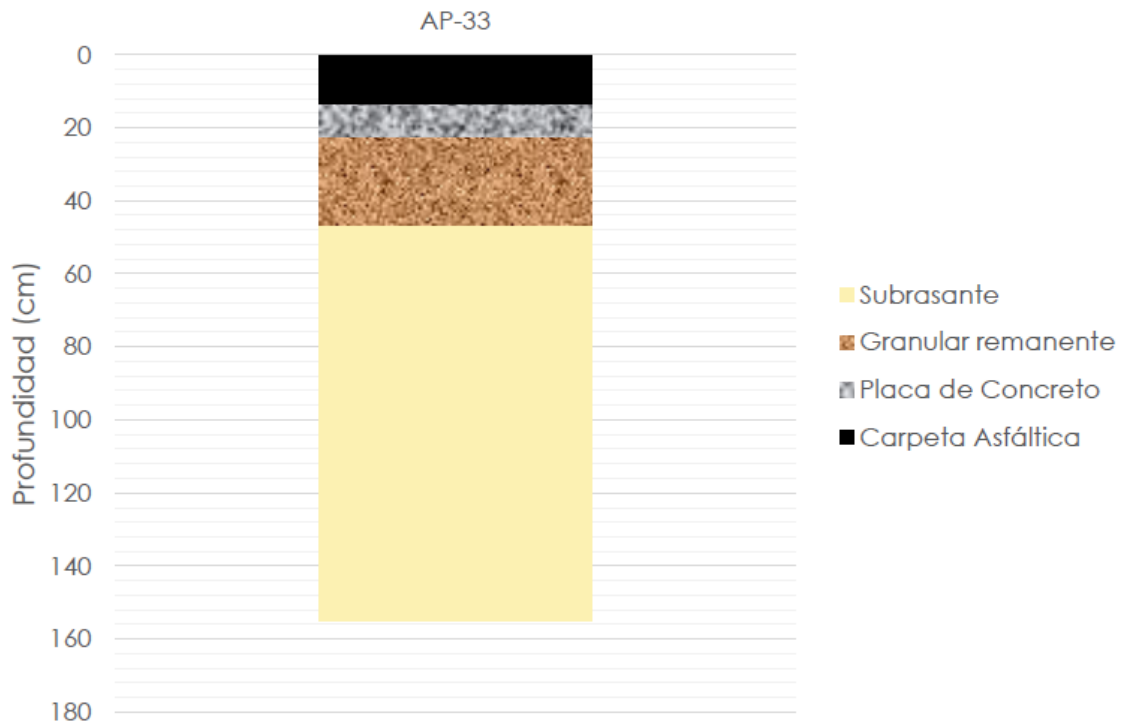


Fuente: Propia a partir de Mapas Bogotá

12.1.7.2. Caracterización física y perfiles estratigráficos: A continuación, se presenta el perfil estratigráfico encontrado en el apique realizado en el segmento de estudio de acuerdo con el registro de la exploración realizada al subsuelo.

Luego, se muestra la caracterización y clasificación de los materiales que componen el perfil hallado.

Figura 40. Perfiles estratigráficos.



Fuente: Propia.

A partir del perfil estratigráfico encontrado en el apique realizado se encontró que la estructura de pavimento existente en el segmento de estudio es la que se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33. Espesores de Estructura Existente Adoptados.

Capa	AP-33	Espesor adoptado (cm)
Carpeta Asfáltica	14	14
Placa en concreto hidráulico	9	9
Granulares remanentes	24	24
Total	47	47

Fuente: Propia.

Así, se tiene que un espesor de 47 cm no sería suficiente para efectuar actividades de rehabilitación, por lo tanto se manejarán actividades a nivel de reconstrucción de la estructura, se observa a continuación la caracterización física y mecánica de los materiales granulares remanentes, dichos materiales pueden ser utilizados en las actividades de mejoramiento, como se presenta a continuación.⁷²

Apique AP-33

De acuerdo con el perfil estratigráfico encontrado en el punto explorado y las pruebas de caracterización intrínseca realizadas a las muestras extraídas, (anexo 04) se encontró en el AP-33 una estructura de pavimento de tipo flexible con un espesor total de 47 cm, de los cuales 14 cm corresponden a una carpeta asfáltica soportada sobre una placa de concreto de 9 cm y 24 cm de granulares remanentes contruidos en 2 capas.

La primera capa corresponde a un gravo arenoso (GM) de color gris con presencia de detritos de asfalto y lentes de limo, con un espesor de 17cm, contenido de finos de 4.8% e índice de plasticidad de 2.7%. La segunda capa corresponde a un gravo arenoso (GC) de color café claro con presencia de detritos de construcción, de 7 cm de espesor, un contenido de finos de 23.1% y que exhibe un índice de plasticidad de 18.3%.

De acuerdo con la caracterización de los materiales granulares remanentes se tiene que si bien estos no resultan suficientes para llevar a cabo actividades de rehabilitación sobre el segmento de estudio, estos se encuentran en una condición de limpieza adecuada con índices de plasticidad que no superan el 15% requerido para un terraplén, estos granulares existentes podrán ser aprovechados en las actividades de mejoramiento de la subrasante natural en caso que se requiera como material de sello de la capa de mejoramiento o lleno de geoceldas.⁷³

12.1.8. Estudio de suelos: Como parámetro fundamental en el diseño de la estructura de pavimento del tramo de estudio, se hace necesaria la determinación

⁷² Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

⁷³ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

de las características intrínsecas del subsuelo y sus propiedades mecánicas, con el fin de determinar la capacidad portante de la subrasante que funcionará como soporte de la estructura y resistirá los efectos del paso de vehículos.

12.1.8.1. Composición y caracterización física de la subrasante: De acuerdo con los perfiles estratigráficos encontrados en los puntos explorados, tal y como se muestra en la Figura 40, se encontró que la subrasante natural está compuesta por una arcilla limosa de color café pálido, con un contenido de finos de 95.0% que exhibe un índice de plasticidad de 14.0%.

De acuerdo con la caracterización física de los materiales encontrados en la subrasante natural, a continuación en la Tabla 34 se muestran sus índices de liquidez y consistencia.

Tabla 34. Índices de Liquidez y Consistencia del Suelo de Subrasante.

Propiedad	AP-33
Wn (%)	15.93
LL (%)	28.94
LP (%)	14.99
IP (%)	14.00
IL	0.07
IC	0.93

Fuente: Propia.

A partir de lo anterior, se encontró que en el apique AP-33 el suelo de subrasante en condición natural presenta una consistencia plástica y es susceptible de sufrir deformaciones permanentes importantes.

12.1.8.2. Caracterización mecánica de la subrasante: Ahora, para la caracterización mecánica de los suelos de subrasante, se llevaron a cabo ensayos de CBR en condición natural y luego de 96 horas de inmersión. A continuación, en la Tabla 35 se muestran los resultados encontrados referentes a los ensayos mencionados.

Tabla 35. Resultados de CBR

APIQUE	$CBR_{natural}(\%)$	$CBR_{sumergido}(\%)$	$Expansión_{CBR}(\%)$
AP-33	3.91	1.70	0.016

Fuente: Propia.

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior adjuntos al presente, se encontró que, si bien los materiales que componen la subrasante no son expansivos, su resistencia mecánica si presenta una alta susceptibilidad a los cambios en el contenido de agua. Esto dado que para la muestra tomada en el apique AP-33, se obtuvo una disminución en el valor de CBR del 57% para un incremento en el contenido de agua del 19%.

12.1.8.3. CBR de diseño: De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados y mostrados anteriormente, se selecciona del valor de CBR a emplear en el cálculo del módulo resiliente de los materiales que componen el suelo de subrasante de la estructura de pavimento a adoptar en la intervención del segmento vial de estudio.

A partir de la Tabla 35, con los datos obtenidos y analizando su variabilidad, se decide tomar el CBR igual a 1.70%, que corresponde al mínimo de los CBR sumergidos encontrados, valor con el cual se espera representar una condición crítica para el diseño de las estructuras.

$$CBR_{diseño}(\%) = 1.70\%$$

12.1.8.4. Módulo resiliente natural: En el presente apartado, se expone la metodología seguida para la escogencia del módulo elástico de la subrasante a emplear como parámetro de entrada en el diseño de las estructuras de pavimento a adoptar en la intervención del segmento vial de estudio, de acuerdo con el CBR de diseño seleccionado anteriormente.

En este caso, como se escogió trabajar con un CBR de diseño para el CIV de estudio de 1.70%, se determina el valor del módulo resiliente de la subrasante M_r , de acuerdo con las correlaciones entre módulo resiliente y CBR adoptadas por el

Instituto de Desarrollo Urbano IDU, según lo mostrado a continuación en la Tabla 36.

Tabla 36. Correlaciones entre CBR vs Mr (Avaladas por el IDU)

	Valor de CBR	Módulo Resiliente (MPa)
1	$CBR \leq 4\%$	7.5 CBR
2	$4\% \leq CBR \leq 9\%$	10 CBR

Fuente: Propia.

Adicional a ello, como en la práctica es de difícil determinación experimental el cálculo de esta variable en la subrasante, ya sea por falta de equipos o de la definición acertada de trayectorias de esfuerzo, lo que se hace tradicionalmente es correlacionarla con el valor del CBR a través de múltiples ecuaciones disponibles en la literatura de referencia. Algunas de ellas se presentan a continuación.⁷⁴

- *Ecuación Universidad Nacional (Avalada por el IDU)* $Mr = 10CBR$ (MPa), para CBR < 10%
- *Heukelom y Klomp (1962):* $Mr = 1500CBR$ (psi), para CBR < 10%
- *Poulsen y Stubstad (1980):* $Mr = 10CBR^{0.73}$ (MPa), (Dinamarca)
- *Green y Hall (1975):* $Mr = 5409CBR^{0.711}$ (psi), recomendó por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos (USACE)
- *Uzan et al (1977):* $Mr = 14CBR$ (MPa), para CBR < 10%
- *Powell et al (1984):* $Mr = 17.6CBR^{0.64}$ (MPa), para CBR < 12%
- *Lister y Powell (1987):* $Mr = 2555CBR^{0.64}$ (psi) para CBR < 10%. Dicha ecuación es recomendada por la nueva metodología mecánico empírica de diseño MEPDG (2004) y por el método de diseño INVIAS (2007)
- *Ayres (1997):* $Mr = 21CBR^{0.65}$ (MPa)
- *MOP Chile (2004):* $Mr = 22.1CBR^{0.55}$ (MPa), para $12 < CBR < 80\%$

⁷⁴ Hugo Alexander Rondón Quintana y Fredy Alberto Reyes Lizcano. Pavimentos - Materiales, construcción y diseño. Primera edición. 2015. Bogotá ECOE Ediciones, pág. 356.

Ahora bien, vale la pena mencionar que “cuando se utilizan las anteriores ecuaciones surgen múltiples incertidumbres. Una de ellas es que el ensayo de CBR es una medida empírica indirecta de la resistencia al corte y de la rigidez del material en condiciones no drenadas que se mide bajo una carga monotónica, y en un pavimento la carga es cíclica. Además los niveles de esfuerzo en un pavimento son muchos más bajos que aquellos que se generan en la muestra cuando se realiza el ensayo de CBR”.⁷⁵

Dicho lo anterior se procede a realizar el cálculo del módulo resiliente de la subrasante natural, haciendo uso de cada una de las correlaciones descritas anteriormente (Ver Tabla 37). Al final dichos cálculos se promediarán aritméticamente y se tomará el resultado como el módulo resiliente de la subrasante natural calculado.

Es de aclarar que por recomendaciones del Instituto de Desarrollo Urbano, establecidas en el Manual de diseño de vías urbanas con niveles intermedios de tránsito; se tendrán en cuenta únicamente las correlaciones consignadas en la Tabla 37.

Tabla 37. Cálculo de valores del Módulo Resiliente de la subrasante.

CBR diseño (%)	1.70				
Cálculo del Mr de la subrasante aplicando correlaciones					
Autor	Ecuación	Condición	Mr calculado	Unidad	Mr equivalente (MPa)
Correlación IDU (Tabla 36)	$M_r = 7.5CBR$ (MPa)	$CBR \leq 4$	12.75	MPa	12.75
Correlación IDU (Tabla 36)	$M_r = 10CBR$ (MPa)	$4 \leq CBR \leq 9$	No aplica	MPa	No aplica
Heukelom y Foster (1960)	$M_r = 10CBR$ (MPa)	$CBR \leq 10$	17.00	MPa	17.00
Heukelom y Klomp (1962)	$M_r = 1500CBR$ (MPa)	$CBR \leq 10$	2550.00	psi	17.58
Poulsen y Stubstad (1980)	$M_r = 10CBR^{0.73}$ (MPa)		14.73	MPa	14.73
Green y Hall (1975) **	$M_r = 5409CBR^{0.711}$ (psi)		7887.99	Psi	54.39

⁷⁵ Hugo Alexander Rondón Quintana y Fredy Alberto Reyes Lizcano. Pavimentos - Materiales, construcción y diseño. Primera edición. 2015. Bogotá ECOE Ediciones, pág. 356.

CBR diseño (%)	1.70				
Cálculo del Mr de la subrasante aplicando correlaciones					
Autor	Ecuación	Condición	Mr calculado	Unidad	Mr equivalente (MPa)
Uzan et al (1977)	$M_r = 14CBR$ (MPa)	$CBR \leq 10$	23.80	MPa	23.80
Powell et al (1984)	$M_r = 17.6CBR^{0.64}$ (MPa)	$CBR \leq 12$	24.72	MPa	24.72
Lister y Powell (1987)	$M_r = 2555CBR^{0.64}$ (psi)	$CBR \leq 10$	3588	Psi	24.74
Ayres (1997)	$M_r = 21CBR^{0.65}$ (MPa)		29.65	MPa	29.55
MOP Chile (2004)	$M_r = 22.1CBR^{0.55}$ (MPa)	$12 \leq CBR \leq 80$	No aplica	MPa	No aplica

M_r subrasante (MPa)	20.62
M_r subrasante (MPa) ^{***}	12.75

*1 MPa = 145.038 psi, 1 psi = 0.00689
 **El valor resultante de la ecuación de excluye para el cálculo del promedio, dado que puede alterar el mismo al ser un valor disperso
 ***Valor a tomar en la modelación, de acuerdo a las recomendaciones realizadas por el IDU para el diseño de vías en Bogotá de niveles intermedios de tránsito

Fuente: Propia.

Como se observa, el resultado para el cálculo del módulo resiliente de la subrasante haciendo uso de todas las correlaciones mostradas es de 20.62 MPa, siendo superior en un 61.83% al valor del módulo resiliente de la subrasante calculado teniendo en cuenta las recomendaciones del Instituto de Desarrollo Urbano, el cual es de 12.75 MPa.

Es importante acatar las recomendaciones, dado que un módulo resiliente de la subrasante mayor, puede afectar el diseño de la estructura de pavimento, en éste caso sub dimensionando la estructura diseñada y a su vez incurriendo en deformaciones no admisibles en la subrasante debido a la incorrecta transmisión de las cargas del tránsito a la subrasante.

Una vez establecido lo anterior, se concluye que el módulo resiliente de la subrasante natural a emplear en la modelación es el siguiente:

$$M_r \text{ subrasante} = 12.75 \text{ MPa} = 127.50 \text{ Kg/cm}^2$$

Ahora bien, procedemos a clasificar la subrasante de acuerdo al valor del módulo resiliente de la subrasante obtenido, de acuerdo a lo establecido en la tabla 38.

Tabla 38. Clasificación de Subrasantes en Bogotá.

Tipo de Subrasante	CBR (%)	Módulo Resiliente (MPa)
SR-1	< 1.5	< 11.25
SR-2	1.5 – 2.5	11.00 – 19.00
SR-3	2.5 – 3.5	19.00 – 26.00
SR-4	3.5 – 4.0	26.00 – 40.00
SR-5	> 4.0	> 40.00

Fuente: Propia.

De acuerdo al CBR (1.70%) y al $Mr = 12.75$ MPa, se tiene que el suelo de fundación del segmento vial 8006661, corresponde a una subrasante clase 2 (SR2).

Por lo anterior y teniendo en cuenta las recomendaciones del IDU, para un suelo de subrasante natural que exhibe un mal comportamiento con baja resistencia y alta plasticidad, se recomienda que este sea sometido a técnicas de mejoramiento para incrementar su resistencia.⁷⁶ Para ello, el especialista de pavimentos propone en el documento entregado, dos alternativas descritas en el numeral 12.1.8.

12.1.9. Alternativas propuestas por el especialista de pavimentos para el mejoramiento de la subrasante: A continuación se presentan las alternativas de mejoramiento propuestas en el documento denominado “*Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661*”, el cual fue entregado como insumo al Consorcio Urbano IM y a su vez suministrado como herramienta para el desarrollo del presente documento:

⁷⁶ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

12.1.9.1. Alternativa 1: El especialista de pavimentos propone textualmente lo siguiente:

“Reemplazar 30 cm de espesor del material inadecuado de la subrasante por material granular (Rajón) con CBR mínimo de 10%, y su respectivo sello. Este sello dará uniformidad a la capa de Rajón, rellenando los vacíos que quedan en el por el tamaño de sus partículas y no brindará más aporte estructural. El conjunto de Rajón y sello formaran una capa de 30 cm de espesor.

Adicionalmente, se recomienda la instalación de geotextil T2100, NT4000 o similar (que tenga al menos la misma resistencia al punzonamiento) en la interfaz del mejoramiento y los granulares nuevos de la estructura, con el fin de separarlos de la subrasante y retrasar la propagación de fisuras a través de la estructura propuesta por fallos del material de soporte.⁷⁷

Si bien de acuerdo con la normativa, el sellado de la capa de mejoramiento con este material debe realizarse con el material granular de subbase de acuerdo a lo estipulado en la especificación IDU ET 321-11: “Mejoramiento de Subrasante con Rajón”, para el aprovechamiento de los materiales granulares existentes en la estructura, se recomienda que estos se empleen como material de sello del Rajón dado que sus características de plasticidad son adecuadas tal y como se mostró en el numeral 12.1.6.2.

12.1.9.2. Alternativa 2: Se propone lo siguiente:

Reemplazar 20 cm de espesor del material inadecuado de la subrasante por material granular remanente (MGR) de la estructura existente mejorado por medio de geocelda. Esta será una geocelda de alta densidad de 150 mm de altura. Se recomienda aplicar un sello de 5 cm de espesor en material granular tipo subbase de clase C (SBG-C), para garantizar el correcto funcionamiento y acoplamiento de la capa de mejoramiento con el resto de la estructura de pavimento.

Adicionalmente, se recomienda la instalación de geotextil no tejido NT4000 o similar, en la interfaz de la capa de subrasante natural y la capa de mejoramiento.

⁷⁷ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

Esto con el fin de separar ambas capas y garantizar que los materiales finos inadecuados de la subrasante no contaminen de ninguna manera la capa de mejoramiento ni el resto de la estructura de pavimento. Además se recomienda también la instalación de geotextil tejido T2100 o similar en la interfaz del mejoramiento y los granulares nuevos de la estructura, con el fin de separarlos de la subrasante y retrasar la propagación de fisuras a través de la estructura propuesta por fallos del material de soporte. Lo anterior, toda vez que la siguiente capa de cuerpo de la estructura no se apique en caliente.

Para estimar el CBR a considerar para esta alternativa de mejoramiento, se va a considerar para los granulares remanentes un módulo de 80 MPa en su estado suelto luego de ser excavados. Dado que la alternativa de mejoramiento propone la estabilización de estos por medio de su confinamiento en geoceldas, se estima el módulo de la capa con base en los valores típicos del Factor de Mejoramiento de Módulos (MIF) presentados en el Manual de Diseño con Geosintéticos de PAVCO.⁷⁸

De acuerdo con la caracterización mecánica de la subrasante, se tienen para el cálculo del CBR los siguientes módulos de material de lleno y material de soporte:

$$\begin{aligned} Mr_{GranularLleno} (MPa) &= 80 \\ Mr_{SubrasanteNatural} (MPa) &= 12 \end{aligned}$$

Así se obtiene un valor de MIF de 3.92 y un módulo de la capa mejorada de 314 MPa lo cual equivale a un CBR de la capa aproximado de 30%.

$$CBR_{Geocelda} = 30\%$$

Una vez establecidas las alternativas 1 y 2, para el mejoramiento de la subrasante del corredor objeto de estudio; es necesario determinar el CBR equivalente de la interacción subrasante – mejoramiento. En el capítulo 12.1.9 se describe el procedimiento realizado para el respectivo cálculo.

⁷⁸ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

12.1.10. Calculo del CBR equivalente de la subrasante: Dada la reducida resistencia mecánica de la subrasante natural (CBR menor a 4%) y, la necesidad de considerar un espesor de mejoramiento, el CBR equivalente de la interacción subrasante mejoramiento ha sido calculado con base la teoría de Ivanov para la determinación del módulo elástico equivalente en pavimentos multicapa, a continuación se presenta la ecuación mencionada.

Ecuación 4. Ecuación de IVANOV para determinar el módulo de elasticidad equivalente en interacciones subrasante - mejoramiento

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

Dónde:

E_{eq} = Módulo elástico equivalente del sistema, Kg/cm^2

E_{sbr} = Módulo elástico de la subrasante, Kg/cm^2

E_{mej} = Módulo elástico del mejoramiento, Kg/cm^2

e_{mej} = Espesor de la capa de mejoramiento, cm

a = Radio del área de carga, 15.27cm

n : Parámetro adimensional determinado con la expresión

Ecuación 5. Ecuación para determinar el factor n en la ecuación de IVANOV

$$n = \sqrt[2.5]{E_{mej} / E_{sbr}}$$

A continuación, se calcula el módulo del material granular tipo Rajón y del material granular estabilizado con geocelda, adoptando para los mismos con CBR mínimo

de 10% y 30% respectivamente y empleando las correlaciones propuestas por el IDU:

$$CBR_{Rajón} = 10\%$$

$$Mr_{Rajón} (MPa) = CBR_{Rajón} * 10$$

$$Mr_{Rajón} = 100 MPa$$

$$CBR_{Geocelda} = 30\%$$

$$Mr_{Geocelda} (MPa) = CBR_{Geocelda} * 10$$

$$Mr_{Geocelda} = 300 MPa$$

A continuación, en las Tabla 39 y 40, se muestran los módulos y CBR equivalentes determinados para cada una de las alternativas de la subrasante mejorada, los cuales se emplearán como CBR de diseño para el segmento vial.

Tabla 39. CBR y Módulo Equivalente Subrasante Mejorada por medio de Rajón

CÁLCULO CBR EQUIVALENTE – ECUACIÓN DE IVANOV								
CBR		MODULO		n	h ₁	a (área del radio de carga)	E equivalente	CBR
Subrasante	Mejoramiento	E inferior (subrasante)	E superior (Rajón)					
%	%	Kg/cm ²	Kg/cm ²					
1.70	10.00	127.50	1000.00	2.28	30.00	15.27	413.43	4.13

Fuente: Propia.

Tabla 40. CBR y Módulo Equivalente Subrasante Mejorada por medio de geocelda y lleno en MGR.

CÁLCULO CBR EQUIVALENTE – ECUACIÓN DE IVANOV								
CBR		MODULO		n	h ₁	a (área del radio de carga)	E equivalente	CBR
Subrasante	Mejoramiento	E inferior (subrasante)	E superior (Rajón)					
%	%	Kg/cm ²	Kg/cm ²					
1.70	30.00	127.50	3000.00	3.54	20.00	15.27	475.13	4.75

Fuente: Propia.

De acuerdo a las tablas 39 y 40, se estableció que para la primera alternativa (Rajón de 30 cm), se alcanza un CBR combinado de la subrasante mejorada de **4.13%** y para la segunda alternativa con geoceldas y sello de 20 cm se alcanza un CBR combinado de **4.75%**.

Los resultados obtenidos, serán empleados en las modelaciones de las alternativas de intervención del segmento vial, lo cual cumple con las recomendaciones de la Guía “Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales para Bogotá D.C” y, por tanto resulta adecuado y se adopta en el dimensionamiento de la estructura de pavimento a emplear en el segmento vial.

12.1.11. Número de ejes equivalentes empleados para el diseño de la estructura del pavimento: A continuación se presenta un breve resumen de la determinación del NEE asociado al corredor a modelar, ejecutada por el especialista de pavimentos.

En relación con el estimativo de los ejes equivalentes, se tiene que una vez obtenido el valor del Tránsito Promedio Diario (TPD) para la vía en estudio, y con la proyección del tránsito para cada año durante el período de diseño, se determinó el número de ejes equivalentes según los diferentes tipos de vehículos de la siguiente forma:

- El TPD proyectado se afecta por un factor de 365 que representa los días que conforman un año normal.
- Los valores aforados son multiplicados por el factor de daño, de acuerdo con cada tipo de vehículo que causa daño al pavimento Flexible, y divididos por el TPD total del año en estudio.

Basado en el TPD de diseño se determinó el NEE, utilizando tablas de los factores de daño del INVIAS y AASHTO y los factores de daño descritos anteriormente. Así pues, en la Tabla 41, se presenta el número de ejes equivalentes estimado para distintos períodos de diseño.

Tabla 41. Número de Ejes Equivalentes de Diseño para Varios Años.

RESUMEN DE CÁLCULO DEL NÚMERO DE EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO - NEE							
EJES EQUIVALENTES PARA EL AÑO DE PROYECCIÓN	EJES PAVIMENTO FLEXIBLE (CALCULADO AASHTO)	EJES PAVIMENTO FLEXIBLE (FÓRMULA SIMPLIFICADA AASHTO)	EJES PAVIMENTO FLEXIBLE (PESAJE 2002)	EJES PAVIMENTO FLEXIBLE (PESAJE 2003)	EJES PAVIMENTO FLEXIBLE (PESAJE 1996)	EJES PAVIMENTO FLEXIBLE (MÉTODO IDU)	EJES PAVIMENTO RÍGIDO (CALCULADO AASHTO)
NEE en 2023 (3 Años)	4,86E+05	4,96E+05	3,51E+05	3,24E+05	3,78E+05	6,64E+05	6,32E+05
NEE en 2025 (5 Años)	7,14E+05	7,31E+05	5,27E+05	4,85E+05	5,67E+05	1,01E+06	9,21E+05
NEE en 2027 (7 Años)	9,60E+05	9,84E+05	7,16E+05	6,58E+05	7,70E+05	1,38E+06	1,23E+06
NEE en 2030 (10 Años)	1,36E+06	1,40E+06	1,03E+06	9,42E+05	1,10E+06	1,99E+06	1,74E+06
NEE en 2035 (15 Años)	2,15E+06	2,21E+06	1,64E+06	1,50E+06	1,76E+06	3,19E+06	2,74E+06
NEE en 2040 (20 Años)	3,35E+06	3,45E+06	2,56E+06	2,35E+06	2,75E+06	4,67E+06	4,26E+06

Fuente: Diseño de Pavimentos CIV 8006661

Así, de la tabla anterior, se tiene que el número de ejes equivalentes de 8.2 Toneladas a emplear es de 1.99E+06, lo cual corresponde a un nivel de tráfico T3 de acuerdo con lo establecido en la Guía Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales para Bogotá D.C., tal y como se muestra en la Tabla 42. Categorías de Tránsito IDU.

Tabla 42. Categorías de tránsito IDU

Categoría de tránsito	Nivel de tránsito	
	Criterio 1 (VPDo)	Criterio 2 (NAEE 80, millones)
T0	VPDo < 20	NAEE 80 < 0.2
T1	20 ≤ VPDo < 50	0.2 ≤ NAEE 80 < 0.5
T2	50 ≤ VPDo < 150	0.5 ≤ NAEE 80 < 1.5
T3	150 ≤ VPDo < 300	1.5 ≤ NAEE 80 < 3.0
T4	300 ≤ VPDo < 750	3.0 ≤ NAEE 80 < 7.5
T5	VPDo ≥ 750	NAEE 80 ≥ 7.5

Fuente: Guía “Diseño de Pavimentos para Bajos Volúmenes de Tránsito y Vías Locales para Bogotá D.C.

12.1.12. Diseño estructural del pavimento: Para la modelación del segmento vial de estudio, el especialista de pavimentos plantea las siguientes alternativas de diseño estructural para la intervención del pavimento.

- **Alternativa (1):** consiste en la construcción de una estructura flexible convencional, compuesta por materiales granulares convencionales de tipo base (BG) de clase acorde al tránsito del segmento y subbase (SBG) reciclada, dispuestos sobre la subrasante mejorada con Rajón.⁷⁹
- **Alternativa (2):** consiste en la construcción de una estructura flexible compuesta por material granular estabilizado con asfalto MGEA, denominada también base negra, dispuesta sobre una capa de subbase (SBG) reciclada sobre la subrasante natural o mejorada según sea el caso y que soportan la carpeta asfáltica.

A continuación se describen las características de los materiales de tipo granular y asfálticos, empleados para la modelación de las estructuras de pavimento.

12.1.12.1. Material granular tipo base (BG): El material de base granular sin estabilización empleado para la modelación de las dos (2) alternativas, debe cumplir con todo lo especificado por el IDU en la ET400-11: “Capas Granulares de Base y Subbase”. Para el tránsito del segmento que corresponde a T4, la base granular nueva a emplear será tipo BG_A con CBR asociado a compactación mínima de 100%.

Las características de la BG, se dan a continuación:

- Módulo resiliente: $30000 \text{ psi} = 206.85 \text{ MPa} = 2110 \text{ Kg/cm}^2$
- Coeficiente de aporte estructural = 0.14
- Coeficiente de Poisson = 0.4

⁷⁹ Ing. Fabián Tafur, Consorcio Urbano IM. Diseño de la estructura de pavimentos, reconstrucción Carrera 78C entre Calle 38A Sur y Calle 38B Sur CIV: 8006661. Bogotá, Fondo de Desarrollo Local de Kennedy. Febrero de 2020.

12.1.12.2. Material granular tipo sub base granular reciclada (SBG): El material de subbase granular sin estabilización empleado para la modelación de las distintas alternativas será un material reciclado para el cual se define un CBR asociado a compactación mínima de 30%.

Las características de la SBG reciclada, son:

- Módulo resiliente: $15000 \text{ psi} = 103.42 \text{ MPa} = 1055 \text{ Kg/cm}^2$
- Coeficiente de aporte estructural = 0.11
- Coeficiente de Poisson = 0.40

12.1.12.3. Material granular estabilizado (GEEA y MGEA): Para las modelaciones estructurales a realizar, se tienen dos tipos de materiales granulares Estabilizados. En la alternativa (2) se emplea material granular estabilizado en caliente con cemento asfáltico (MGEA_B) también llamado base negra, para la cual se emplea un valor de la Estabilidad Marshall mínima de 750 kg de acuerdo con lo establecido en la especificación IDU 422-11.

A continuación se presentan las propiedades mecánicas del material mencionado:

- Módulo resiliente: $321429 \text{ psi} = 2216.17 \text{ MPa} = 22598 \text{ Kg/cm}^2$
- Coeficiente de aporte estructural = 0.30
- Coeficiente de Poisson = 0.38

12.1.12.4. Concreto asfáltico (MD-12 y MD-GCR para tránsito T4): Para las mezclas asfálticas a emplear en el diseño, se emplean mezclas densas en caliente (MD) con módulo mayor o igual a 320000 psi (22500 kg/cm²) que corresponden a un coeficiente de aporte estructural a1 de 0,39. Para las dos (2) alternativas consideradas para el diseño, la carpeta asfáltica estará compuesta indistintamente por rodadura asfáltica constituida por mezcla en caliente que podrá ser MD-12 o mezcla con asfalto modificado con caucho que en el presente informe se denominará MDC-GCR.

En el caso de la modelación, se emplearan los siguientes factores:

- Módulo resiliente: 321429 psi = 2216.17 MPa = 22598 kg/cm²
- Coeficiente de aporte estructural = 0.39
- Coeficiente de Poisson = 0.35

La tabla 43, contiene el resumen de las propiedades mecánicas de los materiales, las cuales son requeridas para ejecutar la modelación de la estructura del pavimento junto al respectivo cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones.

Tabla 43. Resumen de propiedades mecánicas de los materiales a emplear en la modelación.

Material o Capa	Módulo Resiliente (kg/cm ²)	Coeficiente de Poisson μ
Carpeta Asfáltica	22500	0.35
MGEA-B	22500	0.38
Base Granular	2100	0.40
SBGR	1050	0.40
Subrasante mejorada (Rajón)	413	0.45
Subrasante mejorada (Geocelda)	475	0.45

Fuente: Propia

12.2. ALTERNATIVAS DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO FORMULADAS

A continuación se presentan las dos (2) alternativas entregadas por el especialista de pavimentos, para ejecutar la evaluación por medio del software PITRAPAVE y así obtener esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cada una de ellas.

Adicionalmente, se determinan los factores mecánicos requeridos para la modelación de una tercera alternativa de estructura, en la cual se emplea el

sistema de mejoramiento propuesto en el presente documento (Geocelda, RAP, Calamina).

12.2.1. Alternativa 1: Para la primera alternativa de estructura flexible convencional con materiales granulares sin tratar, se tiene lo siguiente:

Tabla 44. Definición de la estructura de pavimento del CIV 800661. Alternativa 1

Definición Estructura de Pavimento del CIV		
Capa	Espesor	
Carpeta Asfáltica MD-12 o GCR	0.15	m
BG-A	0.2	m
SBG - A	0.2	m
Sello en SBG - C	0.10	m
Mejoramiento Con Rajón	0.30	m
Total Profundidad Caja	0.85	m

Fuente: Propia

El sistema consta de una estructura de pavimento convencional, con una capa inicial de mejoramiento de subrasante compuesto por piedra rajón de diámetro aproximado a 30 cm; el mismo deberá contar o ser complementado con una capa de sello en material granular de calidad preferiblemente homologa al de una Sub Base Granular tipo C IDU.

Como segunda capa de la estructura de pavimento, se propone la instalación y colocación de un material granular, con mayores especificaciones y mejores cualidades como el caso de una Sub Base Granular Clase A, con un espesor total de 20 cm.

Este material puede ser de origen de cantera o en su defecto procesada con materiales reciclados, por efecto de cumplir con los indicadores solicitados y aprobados por la entidad en cuanto a reutilización y reciclaje de materiales granulares y componente Ambiental del contrato. La capa de SBG-A debe ser instalada, no sin antes instalar un material de separación de materiales granulares; puede ser un Geotextil de referencia NT4000.

Posteriormente se instalará una capa de Base Granular bien sea de origen de cantera o reciclada, de un espesor de 20 cm y que al igual que las demás debe cumplir con los requerimientos y especificaciones técnicas establecidas por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU para el desarrollo de proyectos de infraestructura vial.

Por último se debe instalar una capa de rodadura en mezcla asfáltica tipo MD12 IDU, con un espesor de 15 cm y la cual puede ser instalada en dos capas de 7 cm y 8 cm respectivamente, con el fin de garantizar la correcta compactación y nivelación de la misma. En resumen, la profundidad total o espesor total de la estructura del pavimento será de 85 cm.

12.2.2. Alternativa 2: Para la segunda alternativa de estructura flexible se tiene lo siguiente:

Tabla 45. Definición de la estructura de pavimento del CIV 800661. Alternativa 2.

CIV 800661		
Capa	Espesor	
Carpeta Asfáltica MD-12 o GCR	0.10	m
MGEA (BASE GRANULAR ESTAB. CON ASFALTO)	0.14	m
SBG - A	0.17	m
Geotextil T2100	SI	N.A
Geocelda + MGR + Sello	0.20	m
Geotextil NT 4000	SI	N.A
Total Profundidad Caja	0.61	m

Fuente: Propia

Como segunda opción, la consultoría plantea la modificación del sistema de mejoramiento de subrasante propuesto en la estructura del pavimento de la alternativa 1, por un sistema de mejoramiento que consta de material de confinamiento como el caso de la geocelda y un material granular de lleno convencional, bien sea de cantera o reciclado, dicha capa tendrá un espesor total de 20 cm e ira soportada sobre un geotextil no tejido NT4000.

En segunda instancia se instalará un geotextil tejido T2100, con el fin de separar capas granulares en su interfaz, seguido de una capa granular de tipo subbase granular de las mismas especificaciones a la de la alternativa 1, el espesor de la capa es de 17 cm.

A continuación se propone la instalación de un material granular tratado con asfalto o base negra (MGEA-B) de 14 cm y una carpeta asfáltica de 10 cm de espesor adecuada para el tipo de tránsito y el módulo resiliente de la capa subyacente.

Es de resaltar que para ésta alternativa se reduce, la profundidad de la caja en un espesor de 23 cm, lo cual a primera impresión reducirá costos en materia de excavación, transporte de materiales, costos de operación, manejo ambiental, social y lo más importante; impacto social por los tiempos de ejecución. Todo lo anterior sin afectar la estabilidad de la estructura del Pavimento.

12.2.3. Alternativa 3 (Sistema de mejoramiento planteado): Como tercera opción, se evaluará una estructura de pavimento similar a la de la Alternativa 2, con cambios significativos en el material de lleno. Para tales fines se adoptará el material dosificado y caracterizado de acuerdo a los lineamientos establecidos por el Instituto de Desarrollo Urbano – IDU.

Las propiedades del material propuesto (RAP - Calamina) compuesto de un 85% de material proveniente del fresado (RAP) y 15% de Calamina o cascarilla de laminación, pueden encontrarse en el capítulo 8.4 – CARACTERIZACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO (85% RAP + 15% CALAMINA).

El esquema general de la alternativa de construcción, se muestra en la Tabla 45.

Tabla 46. Definición de la estructura de pavimento del CIV 8006661. Alternativa 3

CIV 8006661		
Capa	Espesor	
Carpeta Asfáltica MD-12 o GCR	0.10	m
MGEA (BASE GRANULAR ESTAB. CON ASFALTO)	0.14	m
SBG - A	0.17	m
Geotextil T2100	SI	N.A
Mejoramiento Con Geocelda y Material de lleno propuesto (RAP 85% + CALAMINA 15%)	0.20	m
Geotextil NT 4000	SI	N.A
Total Profundidad Caja	0.61	m

Fuente: Propia

Ahora bien, dado que se propone el reemplazo de material de lleno propuesto en la alternativa 2, es necesario recalcular los parámetros como el Modulo de

elasticidad equivalente de la nueva interacción subrasante – mejoramiento y a su vez el módulo de elasticidad propio del material propuesto.

Los cálculos respectivos se presentan en el numeral 12.3.

12.3. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS PARA MODELACIÓN DEL SISTEMA DE MEJORAMIENTO CON GEOCELDA, RAP Y CALAMINA

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, se procede a realizar el cálculo de los parámetros necesarios para modelar el tramo de prueba, aplicando las propiedades y características mecánicas inherentes al sistema de mejoramiento Geocelda – RAP – Calamina, desarrollado en el capítulo 8 (*DETERMINACIÓN DE LA FÓRMULA DE TRABAJO*).

Como parámetro inicial, refiriéndonos a la Tabla 22. Resultados ensayos de laboratorio: base granular reciclada tipo BG_A, se menciona que el material analizado, cumple con los parámetros de calidad establecidos por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, por lo tanto puede ser empleada como material de lleno de las unidades de confinamiento celular o geocelda, sin afectar la calidad planteada por el especialista de pavimentos, para la modelación del tramo de estudio en su alternativa 2. Sin embargo, es necesario determinar parámetros de resistencia mecánica del material granular, como el caso del módulo resiliente o módulo de elasticidad, el coeficiente o relación de Poisson y el CBR junto al Módulo de elasticidad equivalente de la interacción subrasante – mejoramiento, el cual requiere implícitamente el modulo mejorado que brinda la combinación geocelda RAP, Calamina.

A continuación se presentan los cálculos respectivos, con el objeto de determinar dichas propiedades.

12.3.1. Determinación de módulo resiliente y el coeficiente de Poisson de la fórmula de trabajo: En Colombia, este valor se determina por medio de la ejecución de ensayos de tipo triaxial cíclico sobre suelos inalterados o sobre materiales compactados, en laboratorio. Dicho ensayo se realiza, con base en lo establecido por el INVIAS en la norma INV. E-156-13 que a su vez está fundamentada en la norma AASHTO T 307-99.

Es de recordar que, el módulo resiliente indica qué tan rígido es un material bajo carga cíclica del tipo resiliente y es un parámetro de gran importancia cuando el diseño de pavimentos se realiza por métodos racionales. A diferencia de la carga dinámica, la resiliente tiene un tiempo de reposo entre cada una de las cargas cíclicas aplicadas. Para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en un pavimento, al utilizar este parámetro el comportamiento de la subrasante se supone como si fuera un medio elástico lineal.⁸⁰

Ahora bien, como se mencionó en el apartado 12.1.7.4., es de difícil determinación el módulo resiliente de los suelos, dado que consiste en un ensayo costoso y a su vez, existen pocos equipos o laboratorios en Colombia que lo ejecuten. Por tal motivo se recomienda el uso de correlaciones a partir del CBR, como las usadas para determinar el módulo resiliente de la subrasante en el numeral mencionado.

De manera homologa, en el caso de los materiales granulares que conforman bases y subbases, el módulo resiliente también puede obtenerse por medio de múltiples ecuaciones empíricas y tablas que brindan un orden de magnitud aproximado, sin embargo se generan incertidumbres similares a las generadas en la determinación del Mr de la subrasante. En seguida, se presentan las ecuaciones empíricas sugeridas por los ingenieros Rondón Quintana y Reyes Lizcano en su libro Pavimentos – Materiales, construcción y diseño; además en las tablas 46 y 47, se presentan los valores típicos del módulo resiliente en función de la clasificación y el CBR del material granular.

Ecuación 6. Correlación para determinar el E en capas de subbase granular in situ.

$$E_{subb} = E_{subr} [5.35 \log h + 0.62 \log E_{subr} - 1.56 \log E_{subr} \log h - 1.13]$$

Ecuación 7. Correlación para determinar el E en capas de base granular in situ.

$$E_{base} = E_i [8.05 \log h + 0.84 \log E_i - 2.11 \log E_i \log h - 2.21]$$

Ecuación 8. Correlación para determinar el E en capas de base y subbase granular in situ.

$$E_{base} = 0.206 h^{0.45} E_i, \text{ según Dormon y Metcalf (1965), válida para } 2 < \frac{E_{base}}{E_i} < 4$$

⁸⁰ Hugo Alexander Rondón Quintana y Fredy Alberto Reyes Lizcano. Pavimentos - Materiales, construcción y diseño. Primera edición. 2015. Bogotá ECOE Ediciones, pág. 355.

Ecuación 9. Correlación para determinar el E en capas de subbase granular in situ.

$$E_{subb} = E_{subr}(1 + 0.003h), \text{ según Smith \& Witczak (1981)}$$

La ecuación 8 puede ser utilizada de igual forma para el cálculo del módulo de la subbase. E_{base} , E_{subb} , E_{subr} y E_i son los módulos de base, subbase, subrasante y de la capa subyacente, respectivamente, medidos en Kg/cm^2 para el caso de las ecuaciones 1 a 3 y en MPa para la ecuación 4, h es el espesor de la capa granular donde se quiere medir el módulo en cm. Este tipo de ecuaciones se obtienen por lo general asumiendo que las capas granulares son elásticas y utilizando medidas de deflexión *in situ*.

Tabla 47. Valores de módulo resiliente en función del CBR (Valor relativo de soporte - VRS para México), clasificación del suelo (AASHTO y USC), módulo de reacción de la subrasante (K) y peso unitario seco.

Tipo de suelo	Descripción	SUCS	γ_d	VRS %	Valor K (Mpa/m)	Módulo resiliente
AASHTO			(kN/m^3)			(MPa)
A-1-a, bien graduado	Grava	GW,GP	19.6 – 22	60 - 80	81.44 – 122.16	70.37 – 140.74
A-1-a, mal graduado			18.9 – 20.4	35 – 60	81.44 – 108.58	70.37 – 140.74
A-1-b	Arena gruesa	SW	17.3 – 20.4	20 – 40	54.29 – 108.58	42.23 – 105.55
A-3	Arena Fina	SP	16.5 – 18.9	15 – 25	40.72 – 81.44	35.18 – 140.74
Suelos A-2 (materiales granulares con alto porcentaje de finos)						
A-2-4, gravosa	Grava limosa	GM	20.4 - 22.8	40 - 80	81.44 - 135.73	70.37 - 211.11
A-2-5, gravosa	Grava areno limosa					
A-2-4, arenosa	Grava limosa	SM	18.9 - 21.2	20 - 40	81.44 - 108.58	70.37 - 140.74
A-2-5, arenosa	Arena limosa con grava					
A-2-6, gravosa	Grava arcillosa	GC	28.9 - 22.0	20 - 40	54.29 - 122.16	56.29 - 140.74
A-2-7, gravosa	Grava arcillosa con arena					
A-2-6, arenosa	Arena arcillosa	SC	16.5 - 20.4	10 - 20	40.72 - 95.00	35.18 - 105.55
A-2-7, arenosa	Arena arcillosa con grava					

Suelos de grano fina						
A-4	Limo	ML-OL	14.1 - 16.5	4 - 8	6.79 - 44.79	14.07 - 42.22
	Grava - arena - Limo		15.7 - 19.6	5 - 15	10.86 - 59.72	28.14 - 56.29
A-5	Limo alta compresibilidad	MH	12.6 - 15.7	4 - 8	6.79 - 51.58	14.07 - 42.22
A-6	Arcilla plástica	CL	15.7 - 19.6	5 - 15	6.79 - 69.22	14.07 - 70.37
A-7-5	Arcilla baja compresibilidad	CL. OL	14.1 - 19.6	4 - 15	6.79 - 58.36	14.07 - 70.37
A-7-6	Arcilla alta compresibilidad	CH, OH	12.6 - 17.3	3 - 5	10.86 - 59.73	28.14 - 70.37

Fuente: Garnica et al., 2001

Tabla 48. Valores típicos de Mr para materiales granulares

Clasificación	Rango de Mr (psi)	Valor típico de Mr (psi)
A-1-a	38500 - 42000	40000
A-1-b	35500 - 40000	38000
A-2-4	28000 - 37500	32000
A-2-5	24000 - 33000	28000
A-2-6	21500 - 31000	26000
A-2-7	21500 - 28000	24000
A-3	24500 - 35500	29000
A-4	21500 - 29000	24000
A-5	17000 - 25500	20000
A-6	13500 - 24000	17000
A-7-5	8000 - 17500	12000
A-7-6	5000 - 13500	8000
CH	5000 - 13500	8000
MH	8000 - 17500	11500
CL	13500 - 24000	17000
ML	17000 - 25500	20000
SW	24000 - 33000	28000
SW-SC	21500 - 31000	25500
SW-SM	24000 - 33000	28000
SP-SC	21500 - 28000	25500
SP-SM	24000 - 33000	28000
SC	21500 - 28000	24000
SM	28000 - 37500	32000
GW	39500 - 42000	41000
GP	35500 - 40000	38000
GW-GC	28000 - 40000	34500
GW-GM	35500 - 40500	38500
GP-GM	31000 - 40000	36000
GC	24000 - 37500	31000
GM	33000 - 42000	38500

Fuente: Papagiannakis y Masad (2007)

Como se observa en las ecuaciones y tablas anteriores, se puede obtener el valor del módulo resiliente del material granular compuesto de 85% RAP y 15% Calamina, sin embargo se recomienda hacer uso de la información consignada en tablas, dado que las ecuaciones solo aplican cuando se tienen estudios minuciosos del material existente en los corredores a rehabilitar.

Ahora bien, para hacer uso de las tablas es indispensable haber clasificado el material según las metodologías AASTHO y USCS, además de contar con el valor respectivo del CBR. Dichos requisitos fueron revisados previamente y revisarse en el Anexo No. 4 – Fórmula de trabajo y en la Tabla 23, sin embargo dichos parámetros se muestran abajo.

- El material (RAP con adición de Calamina), corresponde al Grupo **A-1-a**, según la metodología de clasificación AASHTO.
- El material (RAP con adición de Calamina), corresponde al Grupo **GW-GM**, según la metodología de clasificación USCS.
- CBR del material (RAP con adición de Calamina), referido al 100% de la densidad seca máxima según ensayo INV E-142-07 (AASHTO T 180), método D, después de 4 días de inmersión: 114.5%

Teniendo en cuenta los datos mencionados, se procede a determinar el módulo resiliente del material con el que se propone realizar el lleno de las unidades de confinamiento celular o geocelda. Se tienen las siguientes consideraciones:

- Dado que el suelo compuesto de 85% RAP y 15% Calamina, se clasifica dentro del grupo A-1-a, se puede inferir que según la tabla 46 el material granular presenta un Módulo resiliente comprendido entre los 70.37 y 140.74 MPa, (10200 psi y 20400 psi respectivamente). Lo anterior aplica para un CBR o Valor Relativo de Soporte *VRS*, que oscila entre el 60 y 80%.

Sin embargo es vital tener en cuenta que el CBR de nuestro material es de 114.5%, por tanto se infiere que, en teoría el módulo resiliente es superior al ya mencionado.

- Como segunda medida, si se tiene en cuenta lo establecido en la tabla 47, para el grupo de suelo (A-1-a) el módulo resiliente está comprendido entre un intervalo de 38500 y 42000 psi, presentando valores típicos de 40000 psi.
- Por otro lado, teniendo en cuenta la clasificación por el método USCS la cual arrojó un resultado de GW-GM; se puede decir que el rango de módulo resiliente comprende valores entre los 35500 y 40500 psi, presentando a su vez valores típicos de 38500 psi.

Ahora bien, según lo mencionado en la nueva metodología de diseño mecánico empírica MEPDG (2004) (la cual reemplaza la guía AASTHO - 1993); el Mr debe ser obtenido de tres formas con base en tres niveles de diseño: en laboratorio, correlacionándolo con otras propiedades del suelo y determinado a partir de valores típicos basados en la clasificación del suelo (Hossain, 2008, 2009).⁸¹

Dicho lo anterior, para fines de este documento se asumirán los valores establecidos en la tabla 47, tomando como referencia módulo resiliente de menor valor ya mencionados. Siendo así el valor es:

$$Mr_{Geocelda+Calamina} = 38500 \text{ psi}$$

$$Mr_{Geocelda+Calamina} = 266 \text{ MPa}$$

$$Mr_{Geocelda+Calamina} = 2707 \text{ Kg/cm}^2$$

En cuanto al coeficiente de Poisson a emplear en la modelación, se tendrán en cuenta los valores típicos presentados en la Tabla 49, basados en la caracterización del material propuesto realizada en el capítulo 8.4; en donde se demostró que el mismo cumple los requisitos establecidos por el IDU para materiales granulares de tipo BG.

⁸¹ Hugo Alexander Rondón Quintana y Fredy Alberto Reyes Lizcano. Pavimentos - Materiales, construcción y diseño. Primera edición. 2015. Bogotá ECOE Ediciones, pág. 355.

Tabla 49. Valores típicos de la relación de Poisson

Material	Rango	Típico
Concreto hidráulico	0.10 – 0.20	0.15
Concreto asfáltico	0.15 – 0.45	0.35
Base tratada con asfalto	0.15 – 0.45	0.35
Base tratada con cemento	0.15 – 0.45	0.35
Suelo granular	0.10 – 0.20	0.15
Suelo fino	0.15 – 0.35	0.25
Concreto pobre	0.10 – 0.20	0.15
Base y subbase granular	0.30 – 0.40	0.40
Suelo de subrasante	0.30 – 0.50	0.40

Fuente: Caracterización de materiales de base y subbase granular con fines de diseño de pavimento – Fernando Sánchez Sabogal

12.3.2. Cálculo del módulo elástico del nuevo sistema de mejoramiento: Por medio de la ecuación de IVANOV empleada en el numeral 12.1.9, se procede a calcular el módulo elástico equivalente (E_{eq}), de la interacción subrasante mejoramiento (Geocelda – RAP – Calamina), dado que éste valor es el requerido como dato de entrada para la ejecución del modelo.

A continuación se describe el proceso realizado para obtener el valor del E_{eq}

Para estimar el CBR a considerar en la alternativa de mejoramiento planteada, se deben tener en cuenta los valores del módulo resiliente del conjunto (RAP, Calamina) el cual es de 266 MPa.

Al igual que en la alternativa No. 2, debe estimarse el módulo de la capa con base debido a la interacción del material granular con la geocelda. Para dicho fin debe calcularse el Factor de Mejoramiento de Módulos (MIF) presentados en el Manual de Diseño con geosintéticos de PAVCO, los cuales se muestran en la tabla 50 o pueden ser calculados por medio de la expresión:

Ecuación 10. Ecuación para el cálculo del Factor de mejoramiento de módulos en sistemas con geocelda.

$$MIF = \frac{E_{reforzada}}{E_{sin\ refuerzo}}$$

Tabla 50. Valores Típicos de MIF (Modulus Improvement Factor)

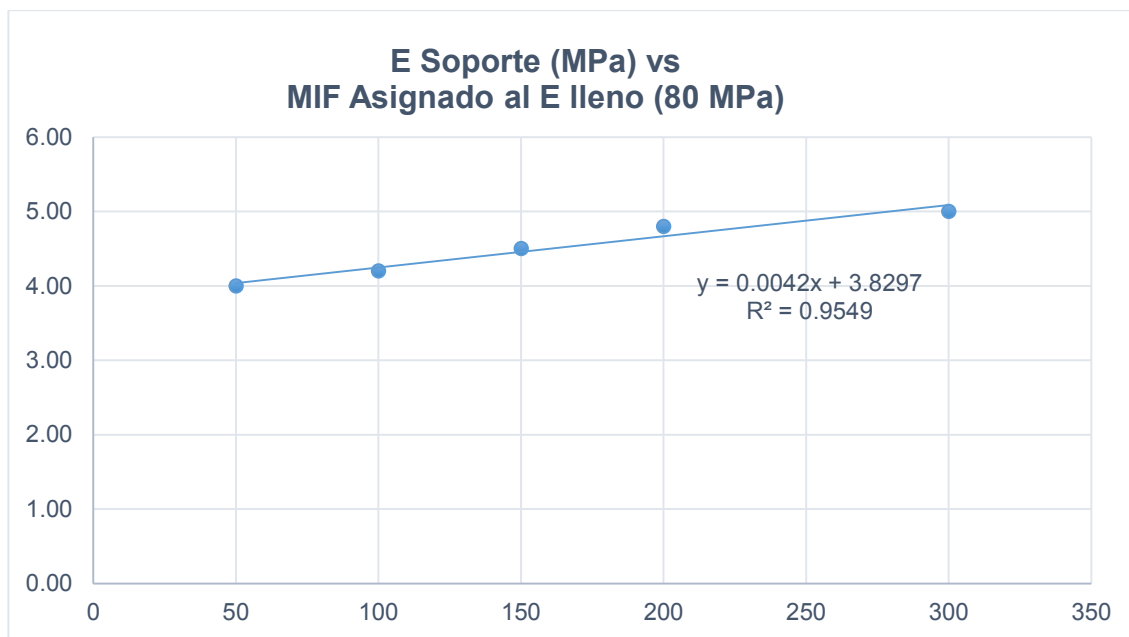
Capa de Soporte	Módulo del material de lleno				
E Soporte (MPa)	80	110	150	200	300
50	4.00	3.60	3.00	2.50	1.80
100	4.20	3.80	3.20	2.80	2.00
150	4.50	4.00	3.40	2.90	2.10
200	4.80	4.20	3.60	3.10	2.20
300	5.00	4.40	3.80	3.30	2.30

Fuente: Manual de Diseño con geosintéticos de PAVCO

Dado que el valor de $E_{reforzada}$, se obtiene tras realizar pruebas de campo, es necesario calcular el MIF respectivo de acuerdo a la Tabla 50. Para ello basta con leer en la columna izquierda el módulo de elasticidad de soporte o de la subrasante y en la fila 2, el valor del módulo de elasticidad del material de lleno. Teniendo así que para un E de soporte de 50 MPa y un E de lleno de 300 MPa, se tiene un valor de MIF de 1.80.

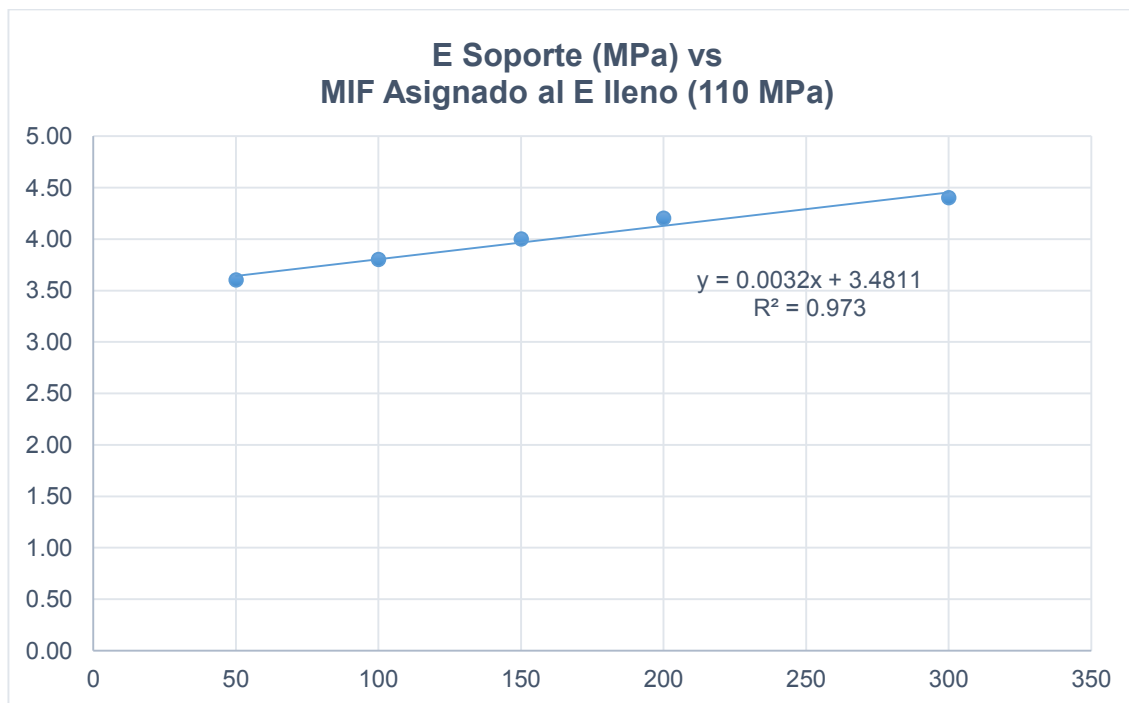
Sin embargo nuestro valor de MIF debe ser calculado para un E de soporte de 12.75 MPa y un E de lleno de 266 MPa. Para dicho fin, aplicaremos una extrapolación lineal, debido al comportamiento de los datos presentados en la tabla 50, el cual fue analizado en las siguientes gráficas.

Gráfica 10. Variación del MIF para un E de lleno de 80 MPa



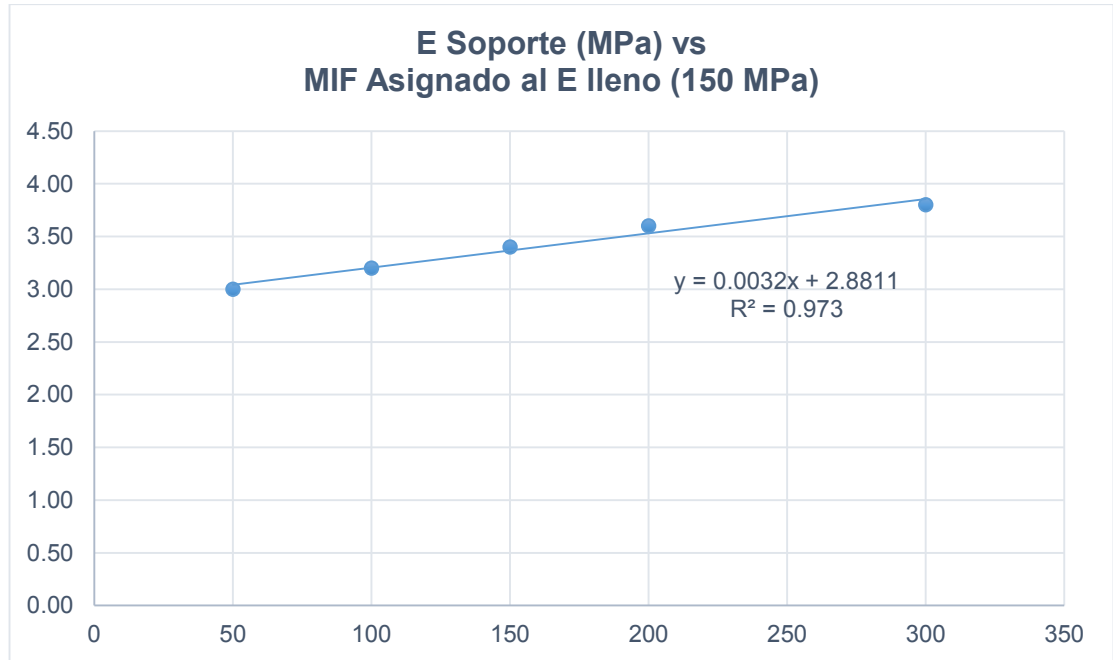
Fuente: Propia

Gráfica 11. Variación del MIF para un E de lleno de 110 MPa



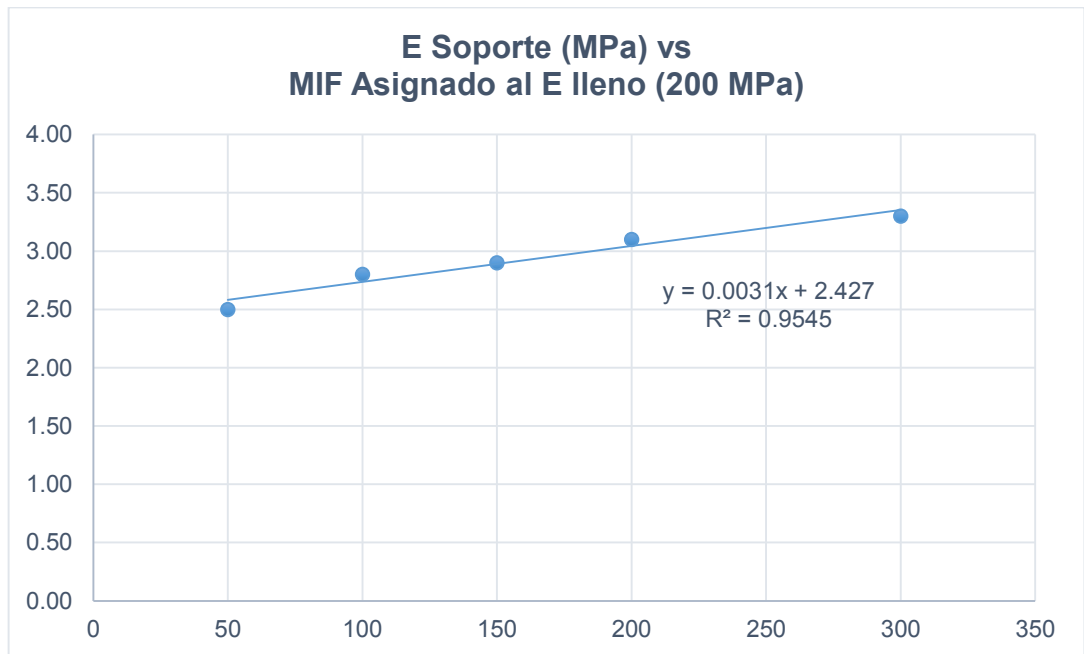
Fuente: Propia

Gráfica 12. Variación del MIF para un E de lleno de 150 MPa.



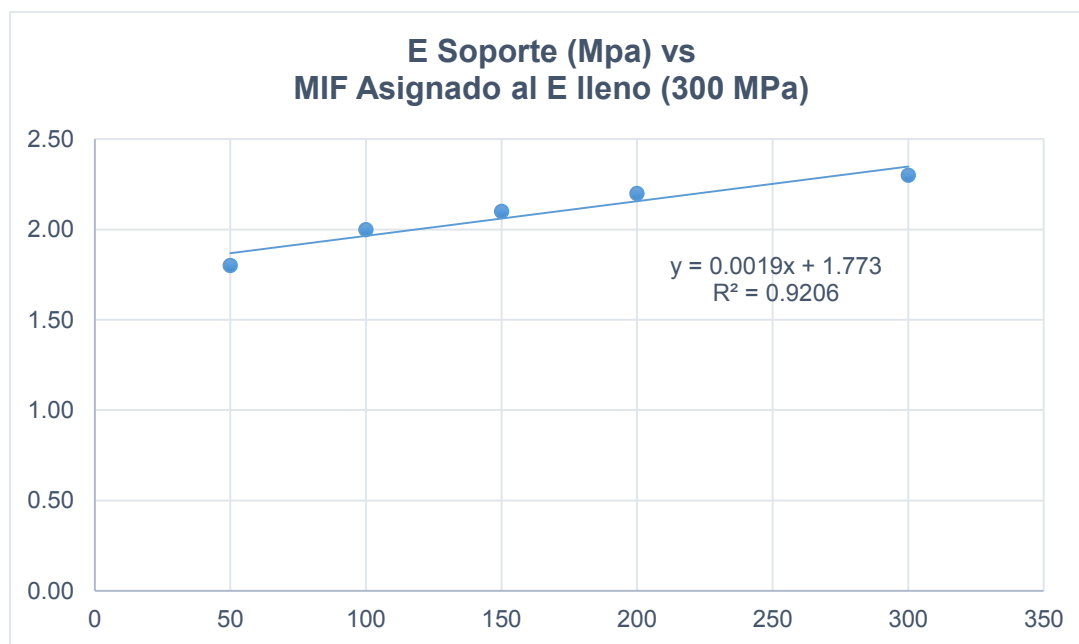
Fuente: Propia

Gráfica 13. Variación del MIF para un E de lleno de 200 MPa.



Fuente: Propia

Gráfica 14. Variación del MIF para un E de lleno de 300 MPa.



Fuente: Propia

Como se observa en las gráficas 10 a 14, los valores de MIF presentan un comportamiento lineal, por tanto se procede a realizar la respectiva regresión lineal obteniendo así las siguientes ecuaciones de la recta y valores respectivos de R^2 , los cuales se presentan en la tabla 51 y en cada una de las gráficas respectivas.

Dichos valores se emplearán en la construcción de una tabla de valores ampliada, con el fin de facilitar el cálculo del MIF correspondiente al sistema de mejoramiento Geocelda – RAP – Calamina propuesta en la investigación.

Tabla 51. Ecuación que representa el comportamiento aproximado del MIF, respecto al módulo de elasticidad del material de Lleno

E lleno (MPa)	Ecuación con variables reales	Valor de R^2
80	$MIF = 0.0042E_{sbr} + 3.8297$	0.9549
110	$MIF = 0.0032E_{sbr} + 3.4811$	0.9730
150	$MIF = 0.0032E_{sbr} + 2.8111$	0.9730
200	$MIF = 0.0031E_{sbr} + 2.427$	0.9545
300	$MIF = 0.0019E_{sbr} + 1.773$	0.9206

Fuente: Propia

Una vez obtenidas las respectivas ecuaciones, se procede a tabular el MIF para módulos de elasticidad de soporte, comprendidos entre 1 y 20 MPa, tal y como se muestra en la Tabla 52.

Tabla 52. Valores ampliados del MIF

Valores Ampliados del MIF - Determinados por regresión lineal					
E Soporte (MPa)	80.0	110.0	150.0	200.0	300.0
1.00	3.834	3.484	2.814	2.430	1.775
2.00	3.838	3.488	2.818	2.433	1.777
3.00	3.842	3.491	2.821	2.436	1.779
4.00	3.847	3.494	2.824	2.439	1.781
5.00	3.851	3.497	2.827	2.443	1.783
6.00	3.855	3.500	2.830	2.446	1.784
7.00	3.859	3.504	2.834	2.449	1.786
8.00	3.863	3.507	2.837	2.452	1.788
9.00	3.868	3.510	2.840	2.455	1.790
10.00	3.872	3.513	2.843	2.458	1.792
11.00	3.876	3.516	2.846	2.461	1.794
12.00	3.880	3.520	2.850	2.464	1.796
13.00	3.884	3.523	2.853	2.467	1.798
14.00	3.889	3.526	2.856	2.470	1.800
15.00	3.893	3.529	2.859	2.474	1.802
16.00	3.897	3.532	2.862	2.477	1.803
17.00	3.901	3.536	2.866	2.480	1.805
18.00	3.905	3.539	2.869	2.483	1.807
19.00	3.910	3.542	2.872	2.486	1.809
20.00	3.914	3.545	2.875	2.489	1.811

Fuente: Propia

En nuestro caso, el valor del Módulo de elasticidad de la subrasante del tramo objeto de estudio corresponde a 12.75 MPa, para el cual corresponde un valor de MIF comprendido entre 1.796 y 1.798. Para el caso tomaremos el promedio de los límites como valor de referencia.

$$MIF_{conjunto} = 1.797$$

Teniendo el valor del MIF, procedemos a calcular el valor correspondiente al E reforzado por medio de la ecuación:

$$MIF = \frac{E_{reforzada}}{E_{sin\ refuerzo}}$$

Ecuación 11. Cálculo del módulo de elasticidad del sistema reforzado con geocelda.

$$E_{reforzada} = MIF(E_{sin\ refuerzo})$$

$$E_{reforzada} = 1.797(266MPa)$$

$$E_{reforzada} = 478MPa$$

Este valor indica que la geocelda aporta una capacidad de refuerzo al material granular de aproximadamente el 80%. Valor que probablemente se verá reflejado en la reducción de esfuerzos transmitidos a la subrasante y a su vez en las deformaciones y deflexiones que serán generados. El CBR equivalente para dicho valor será de 47.8% aproximadamente.

Una vez obtenido el módulo de elasticidad del conjunto geocelda, RAP, calamina; procedemos a calcular el módulo de elasticidad equivalente de la interacción subrasante – mejoramiento, aplicando la ecuación de IVANOV. Los resultados se presentan en la tabla 53.

Tabla 53. CBR y Módulo Equivalente Subrasante Mejorada por medio de geocelda y lleno RAP + Calamina.

CÁLCULO CBR EQUIVALENTE – ECUACIÓN DE IVANOV								
CBR		MODULO		n	h ₁	a (área del radio de carga)	E equivalente	CBR
Subrasante	Mejoramiento	E inferior (subrasante)	E superior (Rajón)					
%	%	Kg/cm ²	Kg/cm ²					
1.70	47.80	127.50	4780.00	4.26	20.00	15.27	569.38	5.69

Fuente: Propia

Como se observa, se obtiene un módulo de elasticidad equivalente de la interacción de 569.28 kg/cm² (8097 psi o 55.83 MPa). Además se observa una mejora de aproximadamente 330%, respecto al CBR de diseño.

13. MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

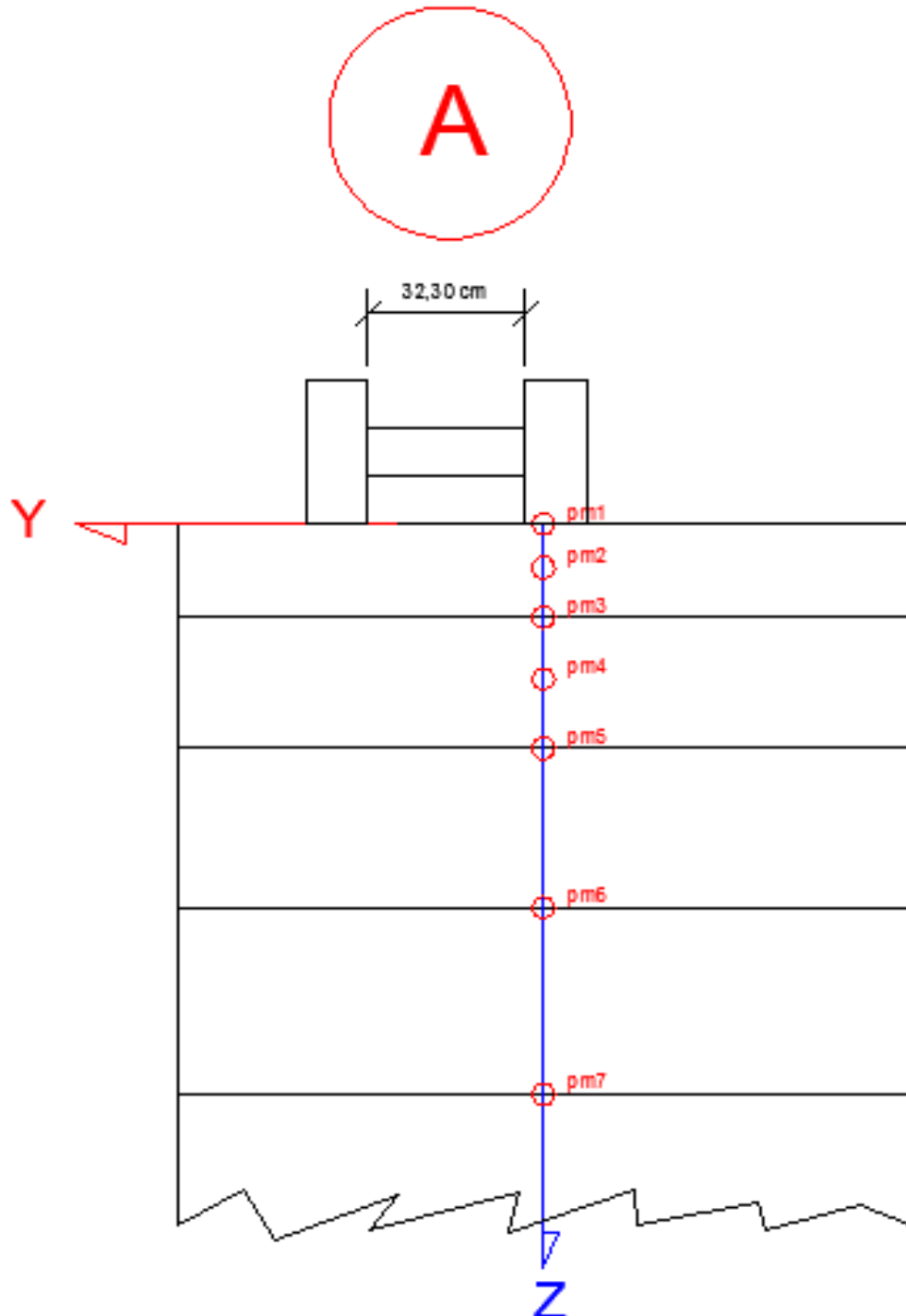
Para la verificación mecanicista de las estructuras de pavimento presentadas en el capítulo 12, se tomarán los valores de los módulos y espesores entregados por medio del diseño. Con ayuda del software PITRA PAVE, se determinan directamente las tensiones, deformaciones y desplazamientos que sufren las estructuras proyectadas y, al comparar los resultados obtenidos con los valores máximos admisibles.

A continuación, se enuncian los parámetros de entrada para el modelo de diseño

- **Carga de diseño:** Teniendo en cuenta lo definido en la metodología de diseño AASHTO de 1993, se tendrá una carga de 8.2 Toneladas (80000 Newton) por eje, dado que el cálculo del TPD de diseño se correlaciona hasta llegar al número conocido como (NEE – Número de ejes equivalentes). En resumen, se asignará una carga de 20000 N por llanta, en los modelos.
- **Radio de carga:** 10.8 cm o 0.108 m
- **Presión de contacto = Presión de inflado:** 5.6 Kg/cm² o 549172 Pascales
- **Distancia entre eje de llantas:** 32.3 cm

El esquema que muestra la distancia entre las llantas del vehículo de diseño y los puntos principales para el cálculo de esfuerzos, deformaciones y deflexiones, se presenta en la figura 41.

Figura 41. Separación entre llantas del eje tándem posterior.



Fuente: Propia

En cuanto a los módulos de los materiales empleados en la estructura, se tiene:

Tabla 54. Módulos de elasticidad y coeficientes de Poisson, de materiales a modelar.

Material o Capa	Módulo Resiliente Kg/cm ²	Módulo Resiliente MPa	Coefficiente de Poisson μ
Carpeta Asfáltica	22500	2207	0.35
MGEA-B	22500	2207	0.38
BG	2100	206	0.40
SBGR	1050	103	0.40
Subrasante mejorada (Rajón)	413	41	0.45
Subrasante mejorada (Geocelda + MGR)	475	47	0.45
Subrasante mejorada (Geocelda y lleno en 85% RAP + 15% Calamina)	569	56	0.40

Fuente: Propia

Una vez definidos los parámetros anteriores, se procede a realizar la modelación en el software PITRE PAVE. El proceso de la misma se describe a continuación.

13.1. CREACIÓN DEL ARCHIVO

Se procede a realizar la creación del archivo individual. Es decir para cada alternativa de estructura de pavimento planteada en el capítulo 12, se creará un modelo. Dichos archivos son nombrados como se muestra en la figura 42.

Figura 42. Creación de modelos Paso 1.

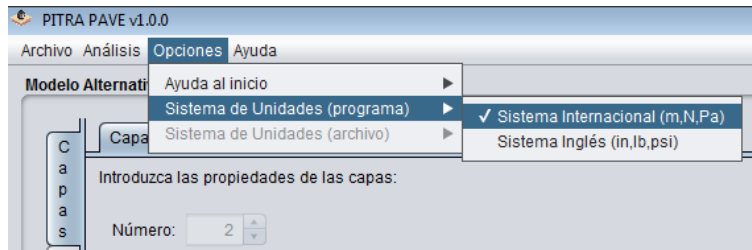


Fuente: Propia

13.2. SISTEMA DE UNIDADES DE TRABAJO

Para el caso de estudio, se realizarán las modelaciones en el sistema internacional de unidades, tal y como puede observarse en la siguiente figura.

Figura 43. Configuración del sistema de unidades.



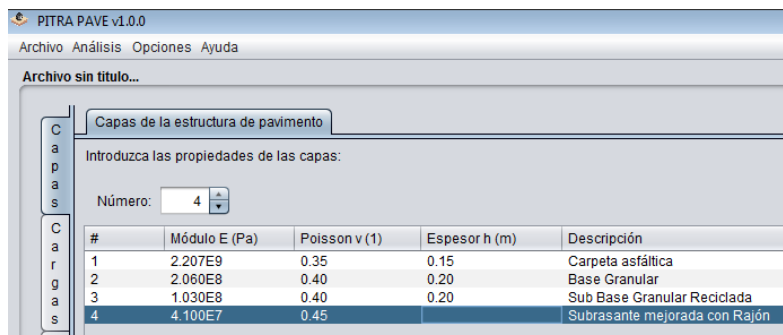
Fuente: Propia

13.3. DEFINICIÓN DE CAPAS DE LA ESTRUCTURA

El siguiente paso, consiste en asignar al modelo las características propias de cada una de las capas de las estructuras de pavimento. El software solicita los valores del módulo de elasticidad (E) en Pascales, el coeficiente de Poisson (ν), el espesor de las capas en metros y la respectiva descripción del material a emplear.

A continuación se presentan las capas definidas para cada alternativa propuesta.

Figura 44. Definición de las propiedades para las capas (Alternativa 1)



Fuente: Propia

Figura 45. Definición de las propiedades para las capas (Alternativa 2)

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	2.207E9	0.35	0.10	Carpeta asfáltica
2	2.207E9	0.38	0.14	Base granular estabilizada con asfalto en caliente
3	1.030E8	0.40	0.17	Sub Base Granular Reciclada
4	4.700E7	0.45		Subrasante mejorada con Geocelda + MGR

Fuente: Propia

Figura 46. Definición de las propiedades para las capas (Alternativa 3)

#	Módulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor h (m)	Descripción
1	2.207E9	0.35	0.10	Carpeta asfáltica
2	2.207E9	0.38	0.14	Base granular estabilizada con asfalto en caliente
3	1.030E8	0.40	0.17	Sub Base Granular Reciclada
4	5.600E7	0.45		Subrasante mejorada con Geocelda + (85%RAP - 15% CALAMINA)

Fuente: Propia

Es importante aclarar, que el espesor de la capa de mejoramiento se debe poner como infinita en el software, lo anterior se ve sustentado en el cálculo del módulo de elasticidad equivalente para la interacción subrasante – mejoramiento, realizado por la metodología de IVANOV en los apartados 12.2 y 12.3.

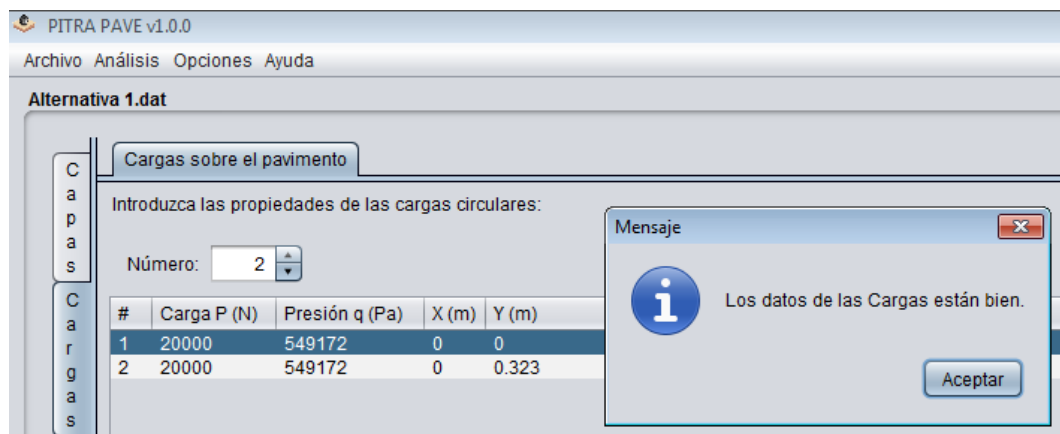
13.4. DEFINICIÓN DE LAS CARGAS ACTUANTES

Como se mencionó al inicio de éste capítulo, se tendrá en cuenta características de carga como el caso de la presión de inflado o de contacto (q) en Pascales, la carga P en Newton y las coordenadas de aplicación de la carga (X, Y) en metros. Los casos de carga que se aplicaran al modelo de la alternativa 1, corresponden a las del modelo 2 y 3. Se tomará como base los esquemas de las figuras 40 y 41.

En resumen, para esta estructura se desea incluir las cargas asociadas a un eje de 8.2 Toneladas o eje equivalente para diseño, con separación entre llantas de 0.323 m, una presión de inflado de 549172 Pa y 80000 N (20000 N en cada llanta). Solo se analizaran 2 de 4 llantas por simetría del problema.

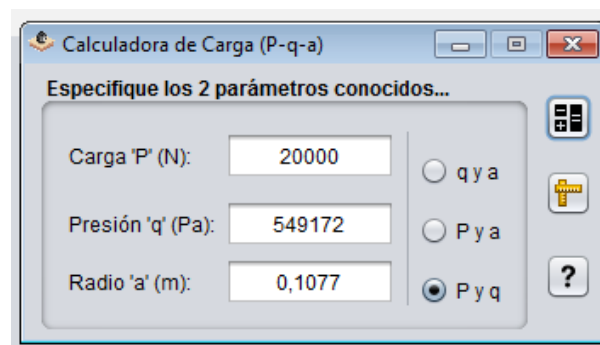
Por la orientación según la Figura 41, ambas cargas se ubicaran en $X=0$ m, una en $Y = 0.323$ m. Se puede utilizar la 'Calculadora de carga' para verificar el radio, el cual en este caso da $a = 0.125$ m, de acuerdo a lo mostrado en la figura 48.

Figura 47. Definición de las cargas (Alternativas 1,2 y 3)



Fuente: Propia

Figura 48. Verificación del Radio de carga.



Fuente: Propia

13.5. DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE ANÁLISIS

Los puntos fueron definidos gráficamente en la Figura 41. Como se desean obtener los puntos debajo de la primera carga todos los puntos deberían ubicarse en $X=0$ m y $Y=0$ m, variando únicamente el valor z para identificar la capa a la que se encuentran.

Se realizará el análisis de la estructura cada 0.02 m (2 cm) hasta completar 1 metro en sentido z . Lo anterior con el fin de obtener la gráfica de esfuerzo, deformación y deflexión vs profundidad. Sin embargo para evaluar los parámetros de cumplimiento, se debe prestar especial cuidado en las fibras superior e inferior de cada capa de la estructura de pavimento.

En las siguientes figuras, se presenta el ingreso de puntos en el software.

Figura 49. Asignación de puntos a analizar (Alternativa 1)

Alternativa 1.dat

Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número: 54

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
1	0	0	0.00	1
2	0	0	0.02	1
3	0	0	0.04	1
4	0	0	0.06	1
5	0	0	0.08	1
6	0	0	0.10	1
7	0	0	0.12	1
8	0	0	0.14	1
9	0	0	0.15	1
10	0	0	0.16	2
11	0	0	0.18	2
12	0	0	0.20	2
13	0	0	0.22	2
14	0	0	0.24	2
15	0	0	0.26	2
16	0	0	0.28	2
17	0	0	0.30	2
18	0	0	0.32	2
19	0	0	0.34	2
20	0	0	0.35	2
21	0	0	0.36	3
22	0	0	0.38	3
23	0	0	0.40	3
24	0	0	0.42	3
25	0	0	0.44	3
26	0	0	0.46	3
27	0	0	0.48	3

Mensaje

Los datos de los Puntos están bien.

Aceptar

P u n t o s	R e s u l t a d o s		0.50	3
	0	0		
28	0	0	0.50	3
29	0	0	0.52	3
30	0	0	0.54	3
31	0	0	0.56	4
32	0	0	0.58	4
33	0	0	0.60	4
34	0	0	0.62	4
35	0	0	0.64	4
36	0	0	0.66	4
37	0	0	0.68	4
38	0	0	0.70	4
39	0	0	0.72	4
40	0	0	0.74	4
41	0	0	0.76	4
42	0	0	0.78	4
43	0	0	0.80	4
44	0	0	0.82	4
45	0	0	0.84	4
46	0	0	0.85	4
47	0	0	0.86	4
48	0	0	0.88	4
49	0	0	0.90	4
50	0	0	0.92	4
51	0	0	0.94	4
52	0	0	0.96	4
53	0	0	0.98	4
54	0	0	1.00	4

Aceptar

Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 49, se obtuvo un total de 54 puntos de análisis. No obstante, si se desea tener mayor detalle, se pueden adicionar puntos hasta el nivel deseado.

De manera homologa, se ingresan los puntos de análisis deseados para las alternativas 2 y 3 (53 puntos). La profundidad escogida en estos casos será la misma, ya que se desea comparar la influencia del sistema de mejoramiento conformado por Geocelda, RAP y Calamina; respecto a las alternativas 1 y 2. Sin embargo para términos de diseño, basta con calcular las 3 variables (Esfuerzos, deformaciones y deflexiones) a nivel de la fibra inferior del sistema de mejoramiento.

Figura 50. Asignación de puntos a analizar (Alternativas 2 y 3)

PITRA PAVE v1.0.0
 Archivo Análisis Opciones Ayuda

Alternativa 2.dat


Puntos de medición en el pavimento

Introduzca las propiedades de los puntos:

Número:

#	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #
5	0	0	0.08	1
6	0	0	0.10	1
7	0	0	0.12	2
8	0	0	0.14	2
9	0	0	0.16	2
10	0	0	0.18	2
11	0	0	0.20	2
12	0	0	0.22	2
13	0	0	0.24	2
14	0	0	0.26	3
15	0	0	0.28	3
16	0	0	0.30	3
17	0	0	0.32	3
18	0	0	0.34	3
19	0	0	0.36	3
20	0	0	0.38	3
21	0	0	0.40	3
22	0	0	0.41	3
23	0	0	0.42	4
24	0	0	0.44	4
25	0	0	0.46	4
26	0	0	0.48	4
27	0	0	0.50	4
28	0	0	0.52	4
29	0	0	0.54	4
30	0	0	0.56	4
31	0	0	0.58	4
32	0	0	0.60	4
33	0	0	0.61	4
34	0	0	0.62	4
35	0	0	0.64	4
36	0	0	0.66	4
37	0	0	0.68	4
38	0	0	0.70	4
39	0	0	0.72	4
40	0	0	0.74	4
41	0	0	0.76	4
42	0	0	0.78	4
43	0	0	0.80	4
44	0	0	0.82	4
45	0	0	0.84	4
46	0	0	0.86	4
47	0	0	0.88	4
48	0	0	0.90	4
49	0	0	0.92	4
50	0	0	0.94	4
51	0	0	0.96	4
52	0	0	0.98	4
53	0	0	1.00	4

Mensaje

 Los datos de los Puntos están bien.

Aceptar

Fuente: Propia

Una vez definidos cada uno de los parámetros para la ejecución de los modelos, se procede a calcular las variables solicitadas (Esfuerzos, deformaciones y deflexiones). En las figura 51, 52 y 53, se presenta una captura de pantalla de los resultados arrojados por el software.

Figura 51. Captura de pantalla (Esfuerzos calculados por PITRE PAVE)

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos						
#	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxy (Pa)	Sxz (Pa)	Syz (Pa)
1	1,0751e+06	9,5124e+05	5,4911e+05	-2,2759e-11	-2,1298e-27	-1,1594e-11
2	7,6601e+05	6,8193e+05	5,3865e+05	-1,5446e-11	-2,8623e-12	-1,5582e+04
3	4,9577e+05	4,4688e+05	4,9396e+05	-8,9823e-12	-5,1680e-12	-2,8133e+04
4	2,6440e+05	2,4745e+05	4,2279e+05	-3,1132e-12	-6,6280e-12	-3,6081e+04
5	6,1298e+04	7,4500e+04	3,3585e+05	2,4252e-12	-7,2838e-12	-3,9651e+04
6	-1,2947e+05	-8,6399e+04	2,4747e+05	7,9119e-12	-7,1251e-12	-3,8787e+04
7	-3,2538e+05	-2,5115e+05	1,7068e+05	1,3637e-11	-6,1608e-12	-3,3538e+04
8	-5,4507e+05	-4,3681e+05	1,1817e+05	1,9888e-11	-4,4304e-12	-2,4118e+04
9	-6,7038e+05	-5,4356e+05	1,0567e+05	2,3297e-11	-3,2997e-12	-1,7963e+04
10	-4,3354e+03	6,8199e+03	9,9154e+04	2,0492e-12	-3,2805e-12	-1,7858e+04

Fuente: Propia

Figura 52. Captura de pantalla (Deformaciones calculadas por PITRE PAVE)

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Deformaciones						
#	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)
1	2,4921e-04	1,7343e-04	-7,2552e-05	-2,7843e-20	-2,6055e-36	-1,4184e-20
2	1,5352e-04	1,0208e-04	1,4441e-05	-1,8897e-20	-3,5017e-21	-1,9062e-05
3	7,5434e-05	4,5524e-05	7,4322e-05	-1,0989e-20	-6,3224e-21	-3,4418e-05
4	1,3509e-05	3,1424e-06	1,1039e-04	-3,8086e-21	-8,1086e-21	-4,4141e-05
5	-3,7302e-05	-2,9227e-05	1,3064e-04	2,9669e-21	-8,9108e-21	-4,8508e-05
6	-8,4207e-05	-5,7861e-05	1,4636e-04	9,6793e-21	-8,7167e-21	-4,7452e-05
7	-1,3467e-04	-8,9261e-05	1,6876e-04	1,6683e-20	-7,5369e-21	-4,1029e-05
8	-1,9644e-04	-1,3022e-04	2,0925e-04	2,4331e-20	-5,4200e-21	-2,9505e-05
9	-2,3431e-04	-1,5673e-04	2,4040e-04	2,8501e-20	-4,0367e-21	-2,1975e-05
10	-2,2682e-04	-1,5101e-04	4,7651e-04	2,7853e-20	-4,4590e-20	-2,4273e-04

Fuente: Propia

Figura 53. Captura de pantalla (Deflexiones calculadas por PITRE PAVE)

Resultados del modelo en los puntos especificados:

Esfuerzos				Deformaciones				Deflexiones			
#	dx (m)		dy (m)		dz (m)						
1	3,9592e-21	2,1553e-05	6,2267e-04								
2	2,9351e-21	1,5978e-05	6,2321e-04								
3	1,9619e-21	1,0680e-05	6,2228e-04								
4	1,0266e-21	5,5885e-06	6,2040e-04								
5	1,1339e-22	6,1729e-07	6,1797e-04								
6	-7,9346e-22	-4,3194e-06	6,1520e-04								
7	-1,7098e-21	-9,3076e-06	6,1207e-04								
8	-2,6510e-21	-1,4431e-05	6,0833e-04								
9	-3,1356e-21	-1,7069e-05	6,0609e-04								
10	-3,2150e-21	-1,7502e-05	6,0121e-04								

Fuente: Propia

14. ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA MODELACIÓN.

Para la verificación mecanicista de las estructuras de pavimento (Alternativas 1, 2 y 3) modeladas en el capítulo 13, se determinaron directamente las tensiones, deformaciones y desplazamientos que sufren las mismas. En el presente capítulo se procederá a comparar los resultados obtenidos con los valores máximos admisibles, con el objeto de concluir si dichas estructuras son adecuadas o deben modificarse.

Adicionalmente, se realizará la comparación entre los resultados obtenidos tras la modelación, con el fin de determinar la viabilidad de implementar alternativas de mejoramiento como el caso del sistema de unidades de confinamiento celular y materiales de lleno reciclados (Geocelda – RAP – Calamina)

14.1. ADMISIBILIDAD DE LOS MATERIALES

Uno de los objetivos principales del análisis estructural de los pavimentos, es predecir el comportamiento de los materiales empleados en su construcción; bajo la acción de las cargas de tránsito; es por esa razón que se deben comparar los resultados obtenidos tras realizar una modelación estructural, con parámetros máximos o admisibles; estos parámetros principales son las deformaciones en carpetas asfálticas, deformaciones en la subrasante y esfuerzos admisibles transmitidos al suelo de soporte.

14.1.1. Máxima deformación tangencial en capas asfálticas: Para encontrar el valor de la deformación tangencial que pueden sufrir las capas asfálticas, se emplearán las ecuaciones de elongación de Shell.

Ecuación 12. Ecuación de Shell para determinar deformación Máxima en capas asfálticas.

$$\varepsilon_t = (0.856V_b + 1.08)E_1^{-0.36}(N_{8.2}/K)^{-0.20}$$

En donde:

E_1 = Módulo de la carpeta asfáltica en N/m^2

V_b = Volumen de asfalto en la mezcla = 10%

$N_{8,2}$ = Número de ejes equivalentes empleadas en el diseño

$K = K1(K2)(K3)$, los cuales son determinados por medio de la tabla

Tabla 55. Coeficientes de Calaje, Método Shell.

Método Shell Coeficientes calaje			
Auto reparación de pequeñas fisuras Diferentes estados de tensiones	K1	Mezclas abiertas % Bajo de asfalto	Mezclas densas Ricas en asfalto
		2	10
Distribución lateral de cargas	K2	Cualquiera 2.5	
Diferentes temperaturas de trabajo de la mezcla a lo largo del día y del año	K3	Espesores pequeños Temperaturas bajas	Espesores altos Temperaturas altas
		1	0.33

Fuente: Universidad del Cauca. Curso de maestría en vías terrestres. Popayán 1990.

Aplicando la ecuación de Shell y los coeficientes de Calaje, se tiene que la deformación tangencial admisible es:

$$K = 10 (2.5)(0.33)$$

$$K = 8.25$$

$$\varepsilon_t = (0.856(10) + 1.08)(2.2065 \times 10^9)^{-0.36} \left(\frac{1.99 \times 10^6}{3.25} \right)^{-0.20}$$

$$\varepsilon_t = 3.5309 \times 10^{-4} m/m$$

14.1.2. Máxima deformación admisible de la subrasante: En cuanto a la deformación máxima admisible de la subrasante, se emplea la expresión de Shell considerando un nivel de confianza del 85%, se tiene que:

Ecuación 13. Ecuación de Shell para el cálculo de deformaciones admisibles en subrasantes.

$$\varepsilon_z = 2.1 \times 10^{-2} (N^{-0.25})$$

$$\varepsilon_z = 2.1 \times 10^{-2} (1.99 \times 10^6)^{-0.25}$$

$$\varepsilon_z = 5.6563 \times 10^{-4} \text{ m/m}$$

14.1.3. Máximo esfuerzo vertical admisible de la subrasante: Finalmente, para encontrar el esfuerzo vertical admisible en la subrasante, se emplea la ecuación de Dormon y Kerhoven:

Ecuación 14. Ecuación de Dormon y Kerhoven para el cálculo de esfuerzo máximos admisibles en subrasantes. (Método Shell)

$$\sigma_z = \frac{(0.007 E_{sbr})}{(1 + 0.7 \log_{10} N)} \quad (Pa)$$

$$\sigma_z = \frac{0.007(4.05 \times 10^7)}{(1 + 0.7 \log_{10}(1.99 \times 10^6))} = 52604.46 \text{ Pa}$$

$$\sigma_z = 0.5364 \text{ Kg/cm}^2$$

Los valores presentados, corresponden a los cálculos para la alternativa 1 (Mejoramiento con rajón y sello). Los resultados de las otras dos alternativas de mejoramiento, se encuentran en las tablas 56 y 57.

Tabla 56. Datos de entrada para el cálculo de esfuerzos y deformaciones admisibles.

Parámetros de entrada para verificación de esfuerzos y deformaciones admisibles - Método Shell									
Alt.	Sistema de Mejoramiento	E (Kg/cm ²)	E (N/m ²)	N (NEE)	K1	K2	K3	K	Vb (%)
CA	Carpeta asfáltica	22500	2,2065E+09	1,90E+06	10	2,5	0,33	8,25	10
1	Rajón + sello	413,43	4,0544E+07	1,90E+06	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
2	Geocelda + MGR	475,13	4,6594E+07	1,90E+06	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
3	Geocelda, RAP, calamina	569,38	5,5837E+07	1,90E+06	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A

Fuente: Propia

Tabla 57. Deformaciones y esfuerzos admisibles.

CIV	Deformación por tracción capas asfálticas (m/m)	Deformación vertical Subrasante ϵ_z (m/m)	Esfuerzo vertical Subrasante σ_z (Kg/cm ²)
8006661 Rajón	3,5309E-04	5,6563E-04	0,5364
8006661 Geocelda + MGR	3,5309E-04	5,6563E-04	0,6165
8006661 Geocelda + RAP y Calamina	3,5309E-04	5,6563E-04	0,7387

Fuente: Propia

14.2. COMPROBACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES MÍNIMAS

Al comparar los esfuerzos y deformaciones arrojados por el software, respecto de las admisibilidades calculadas, se tiene lo siguiente:

14.2.1. Verificación de deformaciones a tracción en carpetas asfálticas: Como se observa en la tabla 57, las tres alternativas estructurales cumplen con el parámetro de cumplimiento. Sin embargo, se presenta la menor deformación en la alternativa No. 1 (Mejoramiento con rajón y sello). No obstante, se debe tener en cuenta que el espesor de la carpeta asfáltica para dicha alternativa es mayor a la que implementa geocelda en su base (14 cm respecto a 10 cm).

Ahora bien, comparando los dos sistemas que implementan las unidades de confinamiento celular o geoceldas (Alternativas 2 y 3); se presenta menor deformación a nivel de la fibra inferior de la carpeta asfáltica en la estructura que emplea geocelda con lleno en MGR (Material granular remanente). Dichas deformaciones menores en razón del 3% y se presentan debido a la relación de módulos o interacción de módulos entre la capa de subbase granular y mejoramiento. (A mayor resultado de la relación de módulos entre dos capas, el esfuerzo vertical decrece y a su vez las deformaciones verticales y laterales).

Tabla 58. Verificación de deformaciones a tracción en Capas asfálticas.

Verificación de cumplimiento de esfuerzos y deformaciones	Deformación por tracción capas asfálticas (m/m) Medida a nivel de fibra inferior de la carpeta asfáltica				
	CIV	ϵ_t (m/m) admisible	ϵ_{txx} (m/m)	Verificación	ϵ_{tyy} (m/m)
8006661 Rajón	3.5309E-04	-2.3431E-04	Cumple	-1.5673E-04	Cumple
8006661 Geocelda + MGR	3.5309E-04	-2.5019E-05	Cumple	-2.2678E-05	Cumple
8006661 Geocelda + RAP y Calamina	3.5309E-04	-2.5873E-05	Cumple	-2.3410E-05	Cumple

Fuente: Propia

14.2.2. Verificación de la deformación vertical de la subrasante:

En segunda medida, se cumple para cada una de las alternativas con el criterio de deformación admisible de la subrasante (Tabla 57). Se puede acotar que, la menor deformación vertical a nivel de subrasante se obtiene en la alternativa 1, sin embargo al igual que en el Numeral 14.2.1., esto se debe a la profundidad en la que se encuentra la fibra inferior de la capa de mejoramiento.

Por otro lado, comparando las deformaciones presentadas para las alternativas 2 y 3 se tiene que; se presenta menor deformación vertical en la alternativa 3 (Geocelda, RAP, Calamina). Lo anterior debido a la rigidez aportada por la calamina a la combinación de materiales propuesta en el presente documento, lo cual se ve reflejada en el CBR de la muestra compuesta de un 85% de pavimento asfáltico reciclado y 15% calamina (114.50% Ver Tabla 22).

Tabla 59. Verificación de las deformaciones verticales en la subrasante.

Verificación de cumplimiento de esfuerzos y deformaciones	Deformación vertical Subrasante (m/m) Medida a nivel de la fibra inferior del mejoramiento		
	CIV	ϵ_z (m/m) admisible	ϵ_{zz} (m/m)
8006661 Rajón	5.6563E-04	2.5394E-04	Cumple
8006661 Geocelda + MGR	5.6563E-04	2.6798E-04	Cumple
8006661 Geocelda + RAP y Calamina	5.6563E-04	2.5786E-04	Cumple

Fuente: Propia

14.2.3. Verificación de los esfuerzos máximos verticales en la subrasante: En materia de esfuerzos verticales máximos generados en la fibra inferior de la capa de mejoramiento, se tiene lo siguiente:

- Se transmite una mayor cantidad de esfuerzos para la alternativa 3 (6% más que en la alternativa 2); sin embargo está dentro del rango admisible para esfuerzos verticales en la subrasante, calculados en el capítulo 14.1.
- La alternativa que menor esfuerzo transmite a la subrasante es la Alternativa 1 (Rajón y sello). Sin embargo; al igual que en los dos criterios anteriores, esto es debido a que dicha estructura es más robusta que las estructuras propuestas en las alternativas 1 y 2. Si se desea verificar el porcentaje de disipación del esfuerzo vertical, basta con revisarlos a nivel de 0.61 metros (Profundidad alcanzada por la fibra inferior del mejoramiento con geocelda. Ver memorias de cálculo de la modelación – Anexo 7).
- La transmisión de esfuerzos es levemente mayor en la alternativa 3, debido a lo ya mencionado en el numeral 14.2.1.

$$\frac{E_{\text{Mejoramiento Alternativa 3}}}{E_{SBG}} > \frac{E_{\text{Mejoramiento Alternativa 2}}}{E_{SBG}}$$

$$\frac{h}{a1} = \frac{h}{a1}$$

Tabla 60. Verificación de los esfuerzos verticales en la subrasante

Verificación de cumplimiento de esfuerzos y deformaciones	Esfuerzo vertical Subrasante (Kg/cm ²) Medida a nivel de la fibra inferior del mejoramiento		
	CIV	σ_z (Kg/cm ²) admisible	S _{zz} (Kg/cm ²)
8006661 Rajón	0.5364	0.1103	Cumple
8006661 Geocelda + MGR	0.6165	0.1464	Cumple
8006661 Geocelda + RAP y Calamina	0.7387	0.1557	Cumple

Fuente: Propia

14.3. EVALUACIÓN INDIVIDUAL DE LAS ALTERNATIVAS

A continuación se presenta el análisis individual, del comportamiento mecánico de cada alternativa de estructura de pavimento propuesta en el desarrollo del proyecto. Se analizarán factores de incidencia como el caso de la disipación del esfuerzo vertical en función de la profundidad, la variación de los esfuerzos laterales en sentido transversal y longitudinal del tránsito y por último la variación de la deflexión en función de la profundidad.

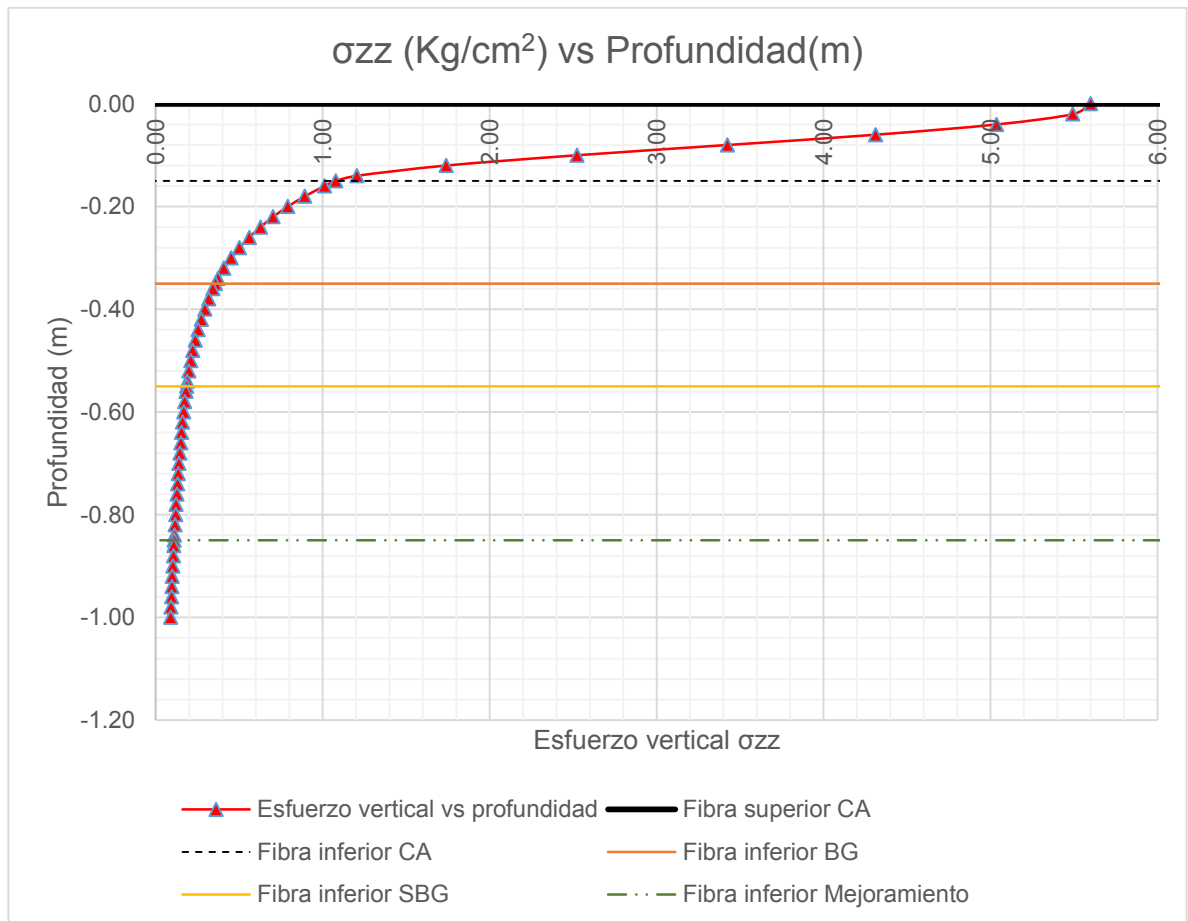
14.3.1. Alternativa 1 (Estructura convencional con mejoramiento en rajón y sello): A continuación se presentan las gráficas obtenidas, tras tabular los resultados obtenidos en el software PITREPAVE del Anexo 7.

14.3.1.1. Variación del esfuerzo vertical (σ_{zz}) en función de la profundidad: De acuerdo al fundamento teórico expuesto en el capítulo 4.6.3., los esfuerzos generados por las cargas de tránsito son transmitidos desde la superficie de rodadura hasta la capa de rodadura.

La magnitud de dichos esfuerzos y a su vez la razón de cambio de la variación, dependen de las características mecánicas de los suelos, en este caso de las capas que componen la estructura del pavimento. Estas variables son el Módulo de elasticidad del material (E), la relación de Poisson (μ), la profundidad (Z) y la

magnitud de la carga aplicada. En el caso de la alternativa 1 se presenta en la gráfica 15, la variación del esfuerzo vertical a medida que se gana profundidad en la estructura del pavimento.

Gráfica 15. Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad. Alternativa 1



Fuente: Propia

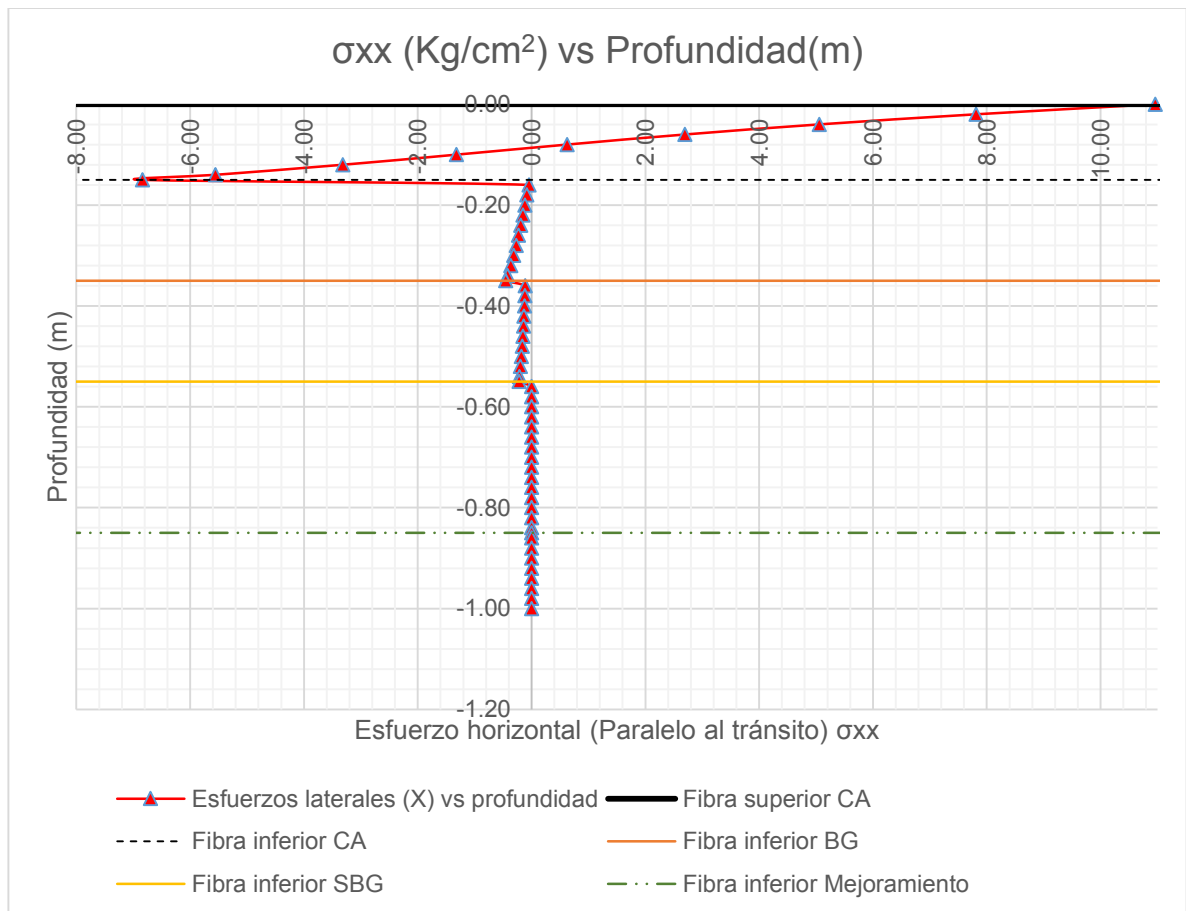
De la curva, se puede deducir que la magnitud del esfuerzo vertical total generado por la carga de tránsito es de 5.6 Kg/cm^2 ; además la carpeta asfáltica absorbe 80.76% de dicho esfuerzo, quedando un remanente de 19.24% que será disipado por las capas de BG, SBG y mejoramiento, antes de llegar a la subrasante.

Por otro lado, como se demostró en el capítulo 14.2, el esfuerzo vertical proyectado a la subrasante, no supera al esfuerzo vertical admisible; por tanto se garantiza que la capa de apoyo natural soporta las imposiciones del tránsito.

Por último; a nivel de la fibra inferior del mejoramiento, se transfiere un esfuerzo de 0.11 Kg/cm^2 , equivalente al 1.97% del esfuerzo total. De acuerdo al principio de Boussinesq, el esfuerzo obtenido se encuentra fuera del valor que representa la isobara límite, en donde el bulbo de presiones genera mayores afectaciones ($0.1q$).

14.3.1.2. Variación de los esfuerzos laterales impuestos (σ_{xx}, σ_{yy}) en función de la profundidad: En las gráficas 16 y 17, se presenta la forma en que varían los esfuerzos laterales generados en la estructura del pavimento, medidos en sentido paralelo y perpendicular a la carga del tránsito. Es de aclarar que el software tiene por convención asignar valores negativos a los esfuerzos generados por tensión y positivo para los generados por compresión.

Gráfica 16. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección longitudinal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 1

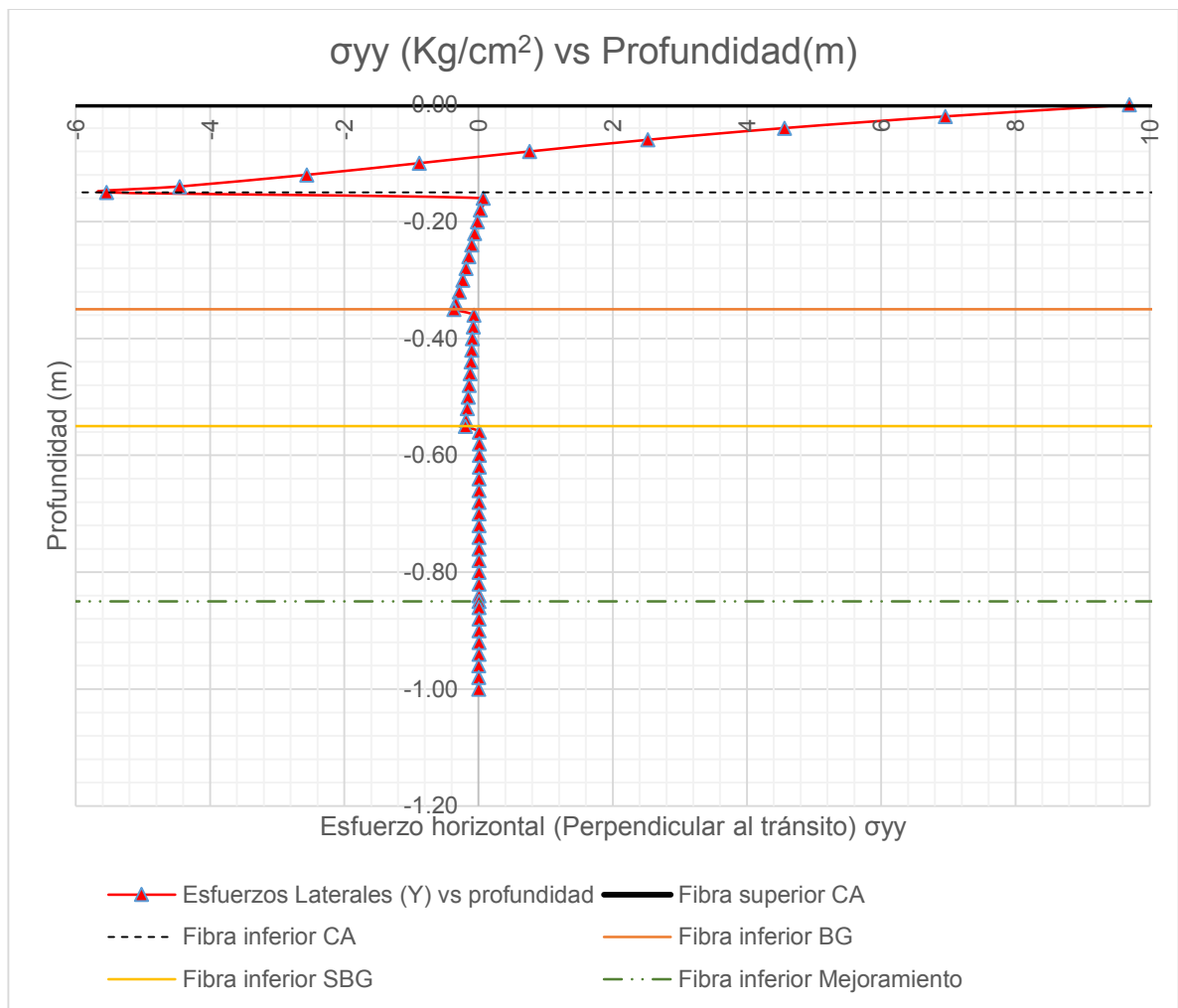


Fuente: Propia

Como se evidencia, los 8 cm superiores de la carpeta asfáltica trabajan a compresión y los 7 cm restantes trabajan bajo esfuerzos de tensión. En cuanto a las capas de BG y SBG se deduce que ambas trabajan a tensión. La capa de mejoramiento actúa bajo esfuerzos de compresión; absorbiendo así el porcentaje restante del esfuerzo lateral en sentido x.

El esfuerzo lateral máximo a tensión en sentido del tránsito es de 10.96 Kg/cm^2 y el esfuerzo lateral máximo a compresión tiene una magnitud de $6.84\% \text{ Kg/cm}^2$. El esfuerzo lateral que llega a la fibra inferior de la capa de mejoramiento es de $2.88 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^2$.

Gráfica 17. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 1



Fuente: Propia

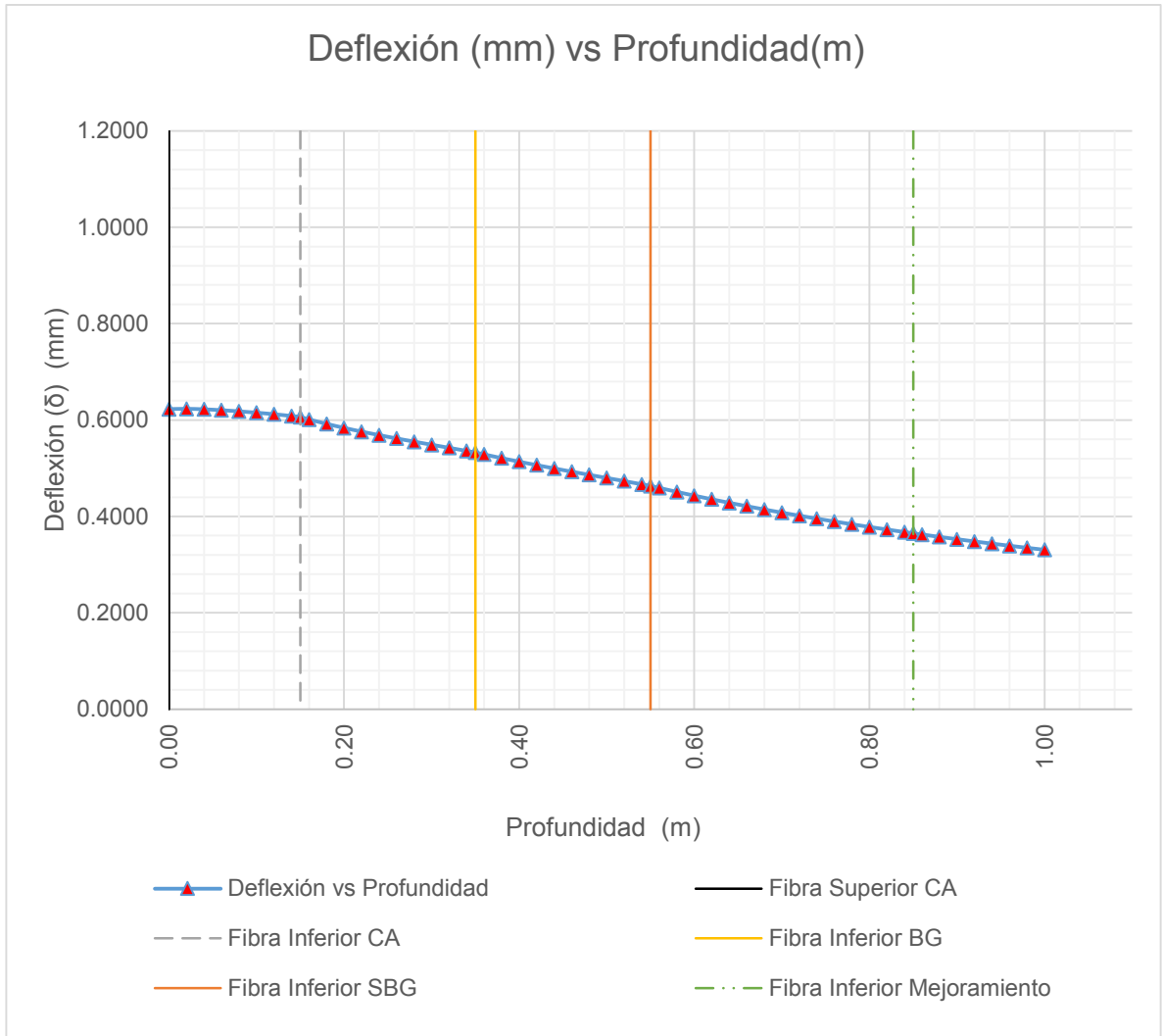
En cuanto al comportamiento de las capas granulares en sentido perpendicular al tránsito, se puede decir lo siguiente:

- La carpeta asfáltica presenta un comportamiento similar al descrito anteriormente (8 cm trabajan a compresión y 7 cm a tensión).
- A diferencia del comportamiento en sentido longitudinal, los dos (2) primeros centímetros de BG actúan bajo esfuerzos de compresión. A partir de esa cota, hasta la fibra superior del mejoramiento; las capas granulares (BG y SBG) reciben esfuerzos de tensión, menores a los generados en sentido longitudinal.
- La capa de mejoramiento también trabaja bajo esfuerzos de compresión, de mayor magnitud a los esfuerzos laterales en sentido del tránsito.

Dicho lo anterior, se puede inferir que la estructura de pavimento, en cuestión de esfuerzos laterales; recibe mayores esfuerzos en sentido perpendicular del flujo vehicular. Por tanto es vital, que en una estructura vial se analice el efecto generado por dichos esfuerzos, dado que pueden surgir patologías por fatiga o desconfinamiento.

14.3.1.3. Deflexión en función de la profundidad (δ_z): En la gráfica 18, se presenta la forma en que varía la deformación en función de la profundidad. Tal como ocurre con el decremento de esfuerzos verticales, la deflexión disminuye en sentido de la transmisión de la carga. Como se calculó en el apartado 14.2, la deflexión presentada en la subrasante tiene un valor de 3.307×10^{-4} metros y no supera a la deflexión máxima admisible en sentido vertical. Dicho parámetro es determinante para garantizar el correcto funcionamiento de la estructura de pavimento, evitando así la aparición de ahuellamientos.

Gráfica 18. Comportamiento de la deflexión en función de la profundidad. Alternativa 1

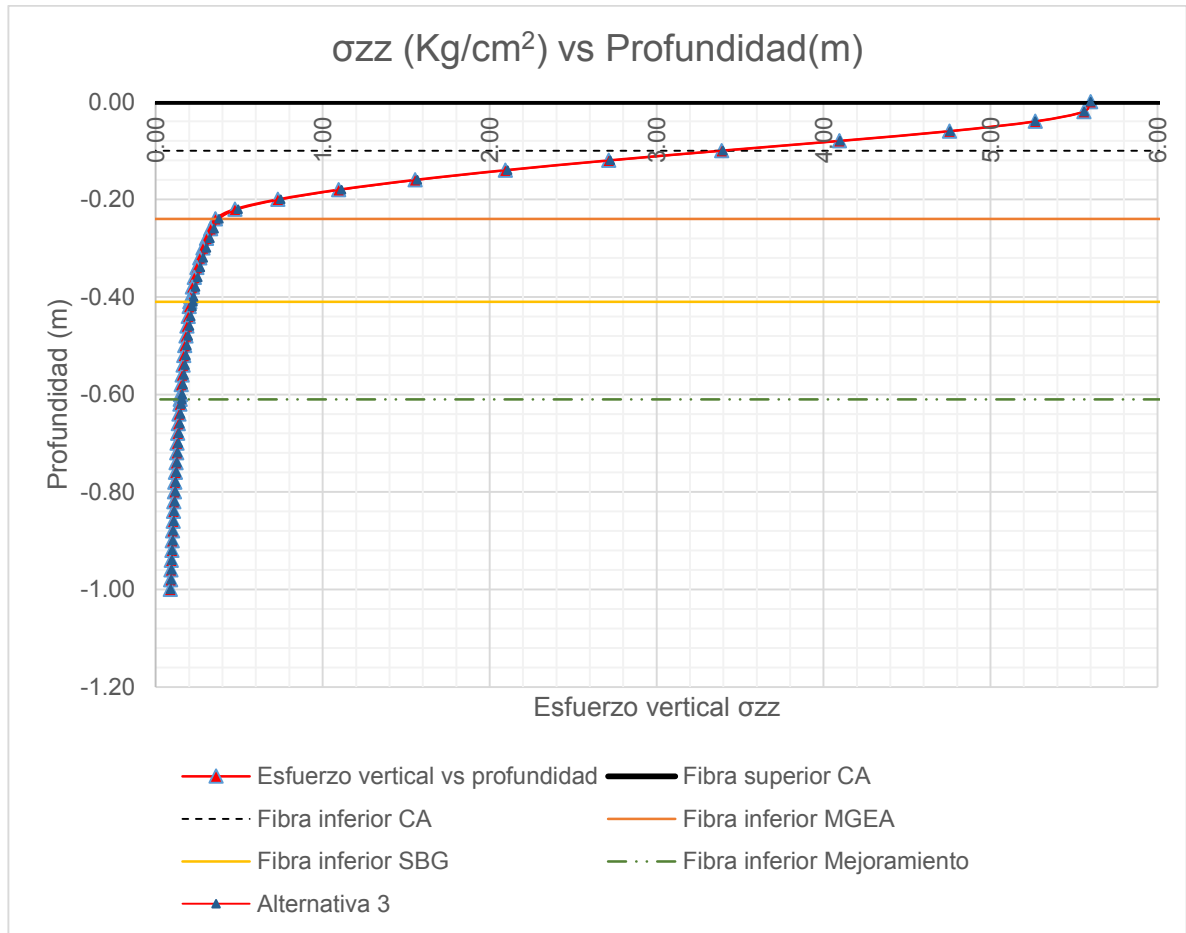


Fuente: Propia

14.3.2. Alternativa 2 (Variante estructural con mejoramiento en geocelda y lleno en material granular remanente): De manera homologa a lo realizado en la alternativa 1, de la sección 14.3.1., se analiza el comportamiento de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento. A continuación se presentan los resultados asociados a cada parámetro evaluado.

14.3.2.1. Variación del esfuerzo vertical (σ_{zz}) en función de la profundidad: A continuación se presentan los respectivos resultados obtenidos en cuanto a la manera en que varían los esfuerzos verticales en función de la profundidad.

Gráfica 19. Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad. Alternativa 2



Fuente: Propia

Para la alternativa No. 2, al igual que en la anterior se presenta esfuerzo vertical total generado por la carga de tránsito es de 5.6 Kg/cm^2 ; es de aclarar que la carga impuesta al modelo no varía, dado que ha sido calculada en función de los ejes equivalentes obtenidos tras el estudio de tránsito realizado en el corredor vial y sus vías colindantes. Por otra parte, la carpeta asfáltica absorbe 39.45% de dicho esfuerzo, quedando un remanente de 60.55% que será disipado por las capas de MGEA, SBG y mejoramiento, antes de llegar a la subrasante.

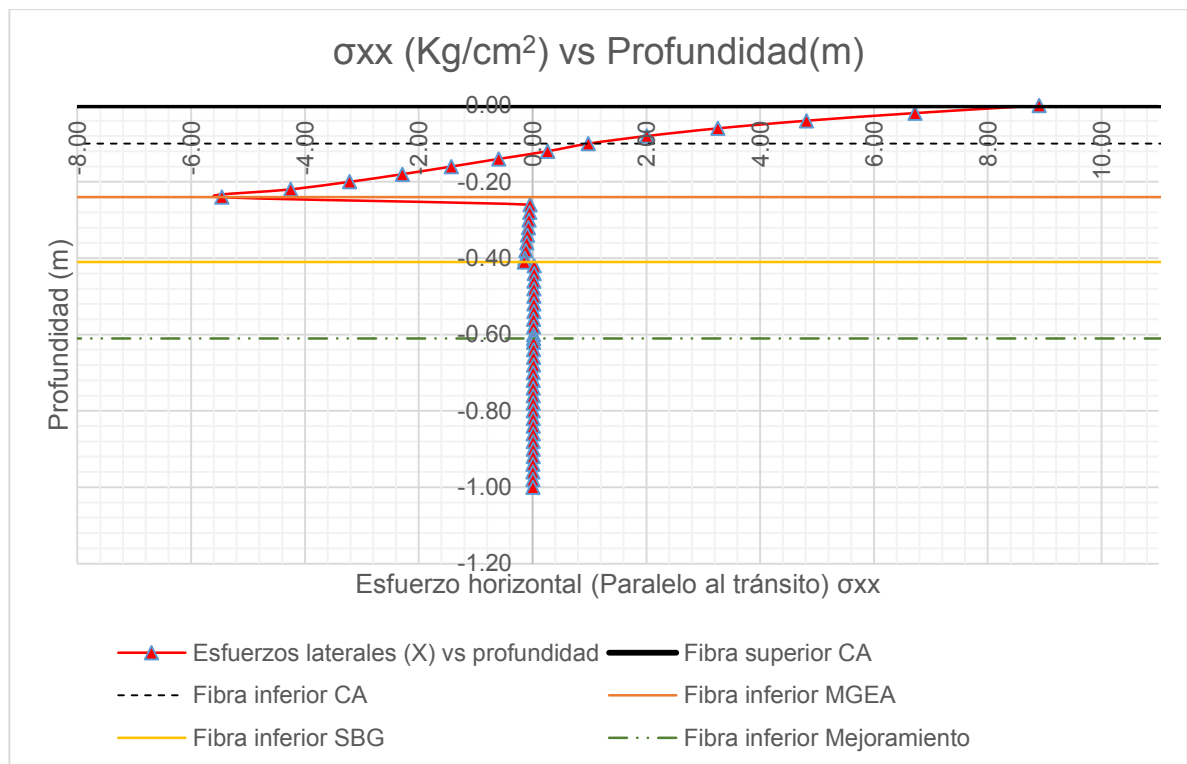
En éste caso, el esfuerzo absorbido por la carpeta asfáltica es menor, dado que en el desarrollo de esta alternativa constructiva, se cuenta con un espesor de capa de 10 cm (4 cm menos que en la alternativa 1). Sin embargo, en vista de lo comentado; el especialista contempló en para la alternativa 2, la implementación

de una capa de material granular (BG), estabilizada con asfalto denominada MGEA. Lo cual tiene el objeto de aumentar el módulo resiliente de la capa y asimismo proyectar la disminución de los esfuerzos antes de llegar a la capa de mejoramiento.

El esfuerzo máximo admisible es ($\sigma_{z_{adm}} = 0,6165 \text{ Kg/cm}^2$) y el obtenido es ($\sigma_{z_{sbrA2}} = 0,1464 \text{ Kg/cm}^2$). Conocidos los datos anteriores, se cumple con lo proyectado; por tanto se garantiza que la capa de apoyo natural soporta las imposiciones del tránsito. El esfuerzo transmitido a la subrasante es mayor respecto al transmitido en la alternativa 1; no obstante, es de tener en cuenta que mientras en la alternativa 1 la fibra inferior del mejoramiento se encuentra a 83 cm bajo el nivel de la rasante; en éste caso la cota de apoyo natural es de 61 cm.

14.3.2.2. Variación de los esfuerzos laterales impuestos (σ_{xx}, σ_{yy}) en función de la profundidad: En las gráficas 20 y 21, se presenta la forma en que varían los esfuerzos laterales generados en la estructura.

Gráfica 20. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 2



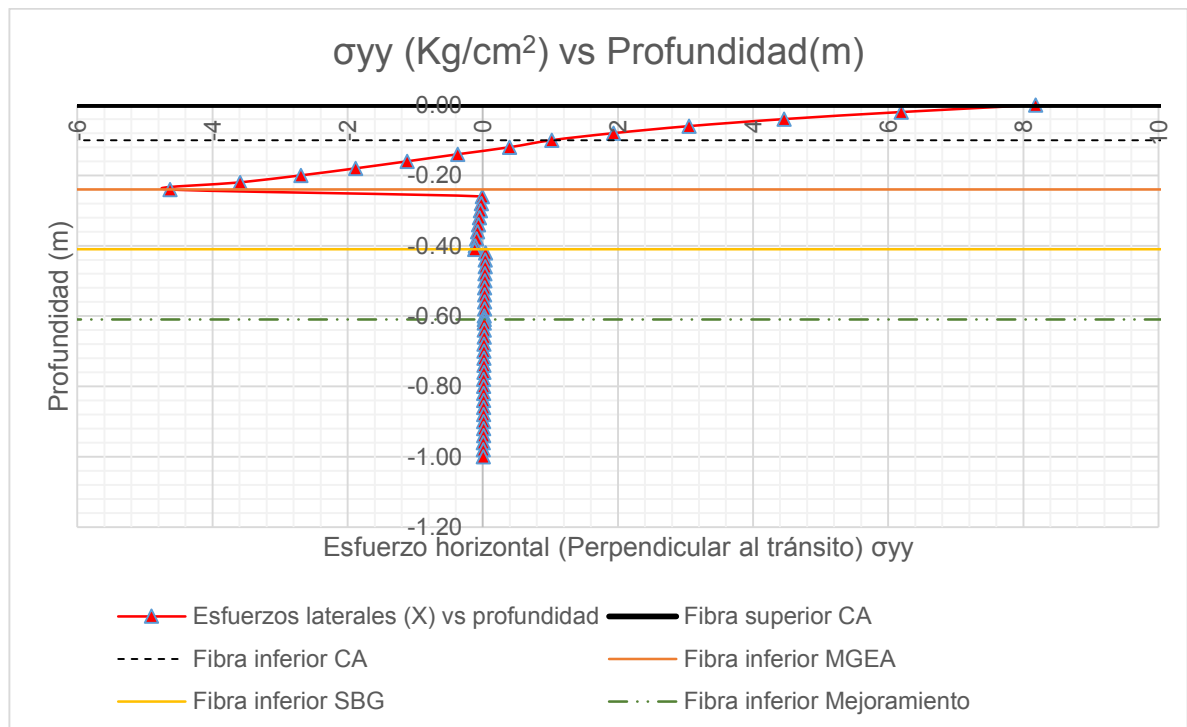
Fuente: Propia

En la gráfica 20 se aprecia que en éste caso la totalidad de la carpeta asfáltica trabaja a compresión, dicho comportamiento se proyecta hasta los dos primeros centímetros de MGEA. Luego de los 12 cm de profundidad, la capa de MGEA trabaja bajo esfuerzos de tensión. Por último la capa de mejoramiento al igual que en la alternativa 1, trabaja netamente bajo esfuerzos de compresión en sentido paralelo a la dirección de circulación de los vehículos.

El esfuerzo lateral máximo a tensión en sentido del tránsito es de 8.91 Kg/cm^2 y el esfuerzo lateral máximo a compresión tiene una magnitud de $5.46\% \text{ Kg/cm}^2$. El esfuerzo lateral que llega a la fibra inferior de la capa de mejoramiento es de $1.73 \times 10^{-2} \text{ Kg/cm}^2$.

En éste caso, el esfuerzo lateral que llega a la subrasante, es mayor que para la alternativa 1. Sin embargo, debido a las propiedades de confinamiento lateral que aporta la geocelda, los movimientos laterales del suelo se reducen; evitando así fallas por fatiga en las capas superiores de la estructura de pavimento.

Gráfica 21. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 2



Fuente: Propia

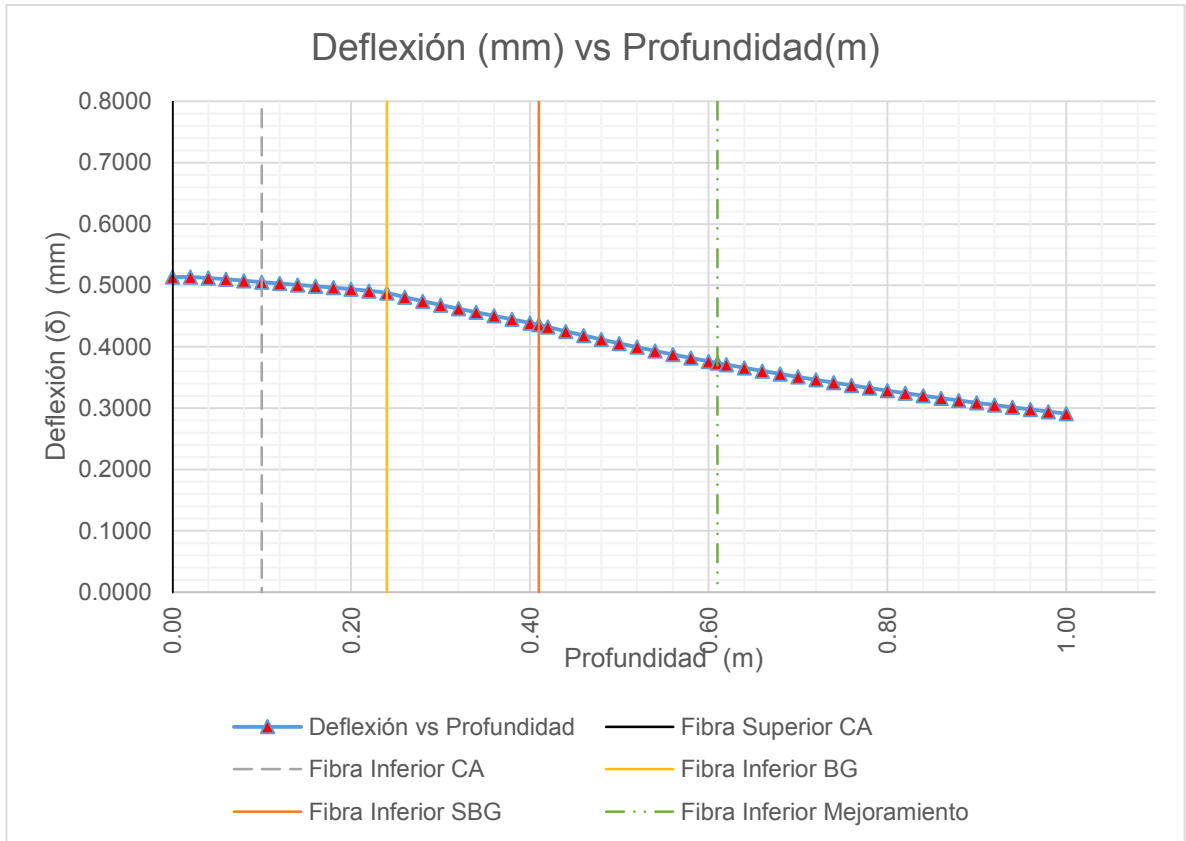
En cuanto al comportamiento de las capas granulares en sentido perpendicular al tránsito, se puede decir lo siguiente:

- La carpeta asfáltica trabaja únicamente a compresión.
- Al igual que en el sentido longitudinal, los dos (2) primeros centímetros de MGEA actúan bajo esfuerzos de compresión. A partir de esa cota, hasta la fibra superior del mejoramiento; las capas granulares (MGEA y SBG) reciben esfuerzos de tensión, menores a los esfuerzos en sentido longitudinal.
- La capa de mejoramiento también trabaja bajo esfuerzos de compresión, de mayor magnitud a los esfuerzos laterales en sentido del tránsito.
- El esfuerzo lateral máximo a tensión en sentido del tránsito es de 8.18 Kg/cm^2 y el esfuerzo lateral máximo a compresión tiene una magnitud de $4.16\% \text{ Kg/cm}^2$. El esfuerzo lateral que llega a la fibra inferior de la capa de mejoramiento es de $2.26 \times 10^{-2} \text{ Kg/cm}^2$.

14.3.2.3. Deflexión en función de la profundidad (δ_z): En la gráfica 22, se muestra la variación las deflexiones en función de la profundidad. Tal como ocurre con el decremento de esfuerzos verticales, la deflexión disminuye en sentido de la transmisión de la carga.

Para el caso de la alternativa No. 2., la deflexión presentada en la subrasante tiene un valor de 3.74×10^{-4} metros y no supera a la deflexión máxima admisible en sentido vertical. Por otra parte, la deflexión presentada en la alternativa 2 es menor a la que se genera en la alternativa 1 $\delta_z(A1) > \delta_z(A2)$. Por tanto se puede inferir que la posibilidad de surgimiento de ahuellamientos es menor.

Gráfica 22. Comportamiento de la deflexión en función de la profundidad. Alternativa 2

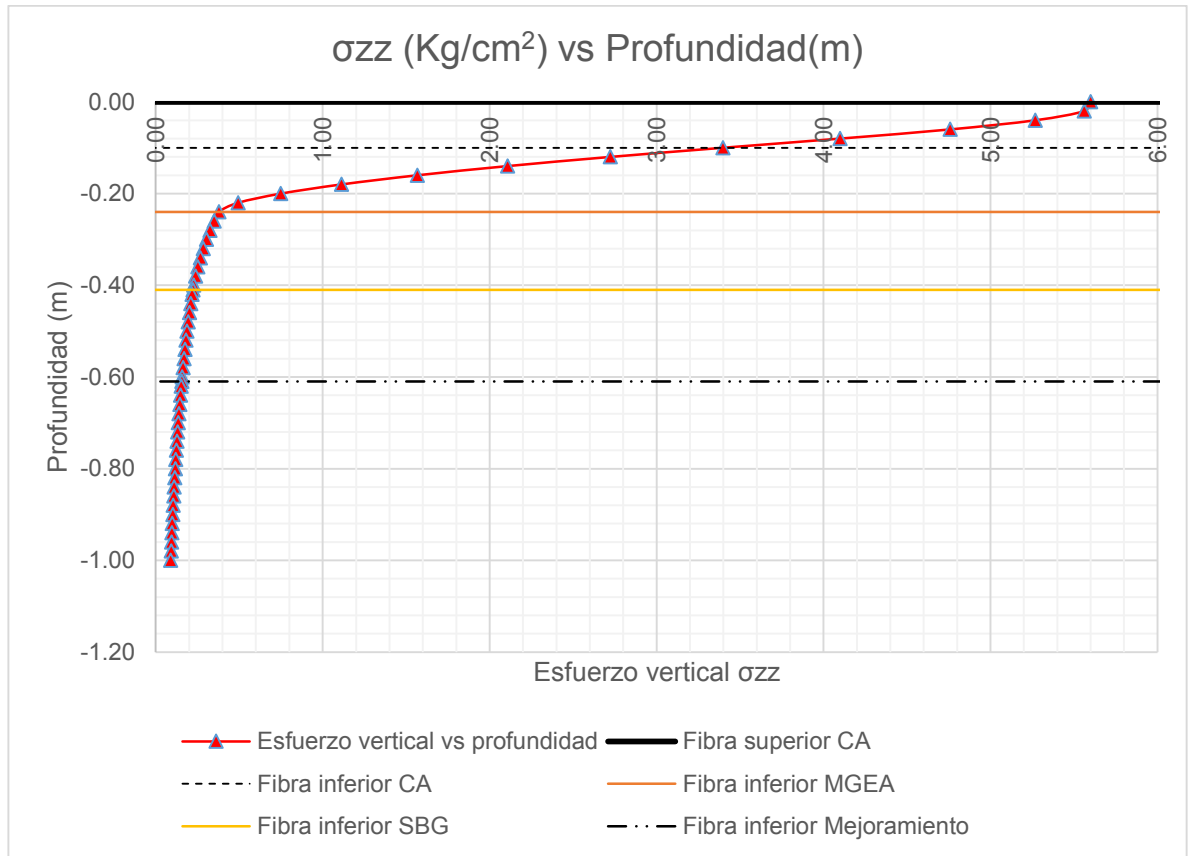


Fuente: Propia

14.3.3. Alternativa 3 (Variante estructural con mejoramiento en geocelda y lleno propuesto RAP y Calamina): Al igual que en las dos alternativas anteriores se analiza el comportamiento de cada una de las capas que conforman la estructura del pavimento.

14.3.3.1. Variación del esfuerzo vertical (σ_{zz}) en función de la profundidad: A continuación se presentan los respectivos resultados obtenidos en cuanto a la manera en que varían los esfuerzos verticales en función de la profundidad.

Gráfica 23. Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad. Alternativa 3



Fuente: Propia

En la alternativa No. 3, al igual que en las anteriores se presenta esfuerzo vertical total generado por la carga de tránsito es de 5.6 Kg/cm^2 . El porcentaje de esfuerzo vertical disipado por la carpeta asfáltica es de 39.32% (Lo que representa un aumento del 0.63 % de disipación de esfuerzo adicional), Las capas de MGEA, SBG y mejoramiento se encargan de disipar el 60.68% del esfuerzo vertical restante, antes de llegar a la subrasante.

Al igual que en la alternativa con sistema de mejoramiento en rajón, el esfuerzo vertical recibido por la carpeta asfáltica es mayor, debido a la diferencia de espesores de la misma.

En cuanto al esfuerzo vertical que se proyecta a la subrasante, se puede decir que para el caso de la alternativa 3, el esfuerzo máximo admisible a generarse es

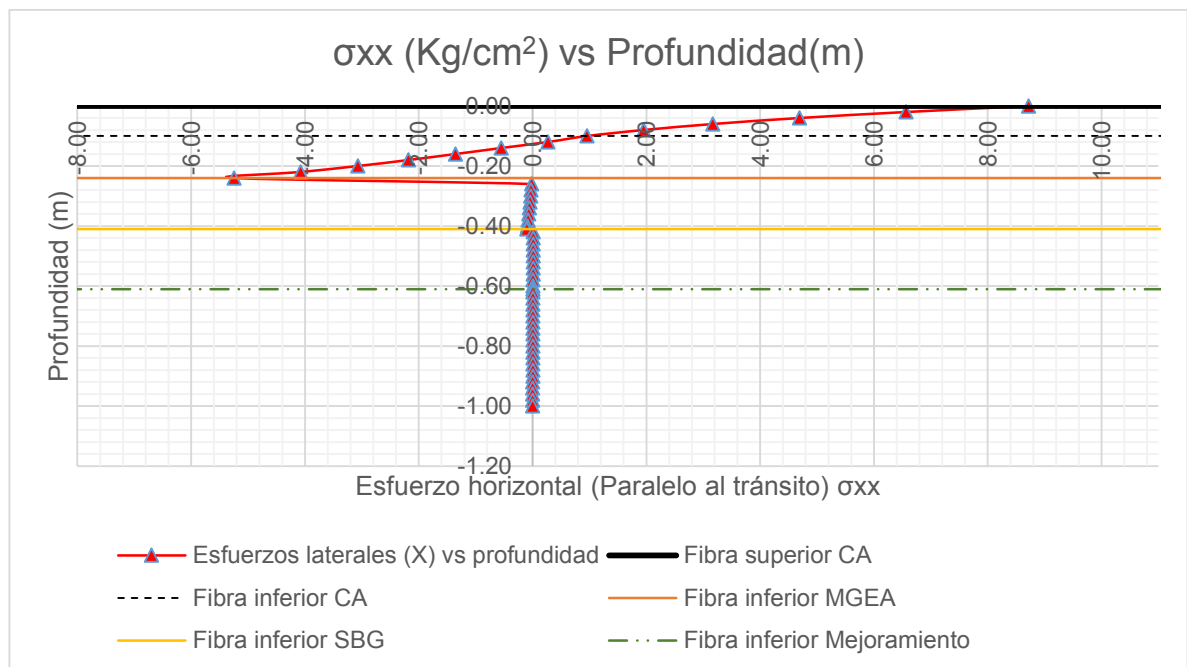
($\sigma_{z_{adm}} = 0,7387 \text{ Kg/cm}^2$) y el obtenido es ($\sigma_{z_{sbrA2}} = 0,1557 \text{ Kg/cm}^2$), siendo así que, se cumple con los requisitos a nivel de esfuerzos verticales; por tanto el sistema de mejoramiento planteado en la alternativa 3, presenta un comportamiento mecánico óptimo ya que se garantiza que la capa de apoyo natural soporta las imposiciones del tránsito.

El esfuerzo transmitido a la subrasante es mayor respecto al transmitido en las alternativas 1 y 2. Sin embargo, para determinar si el desempeño del mejoramiento de la alternativa 3 es mayor; es necesario evaluar el parámetro de deflexiones generadas a nivel de la fibra superior de la subrasante natural.

Lo anterior debido a que la magnitud de las deflexiones, son el segundo criterio para determinar la calidad de una estructura de pavimentos.

14.3.3.2. Variación de los esfuerzos laterales impuestos (σ_{xx}, σ_{yy}) en función de la profundidad: En las gráficas 24 y 25, se presenta la forma en que varían los esfuerzos laterales generados en la estructura.

Gráfica 24. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 3

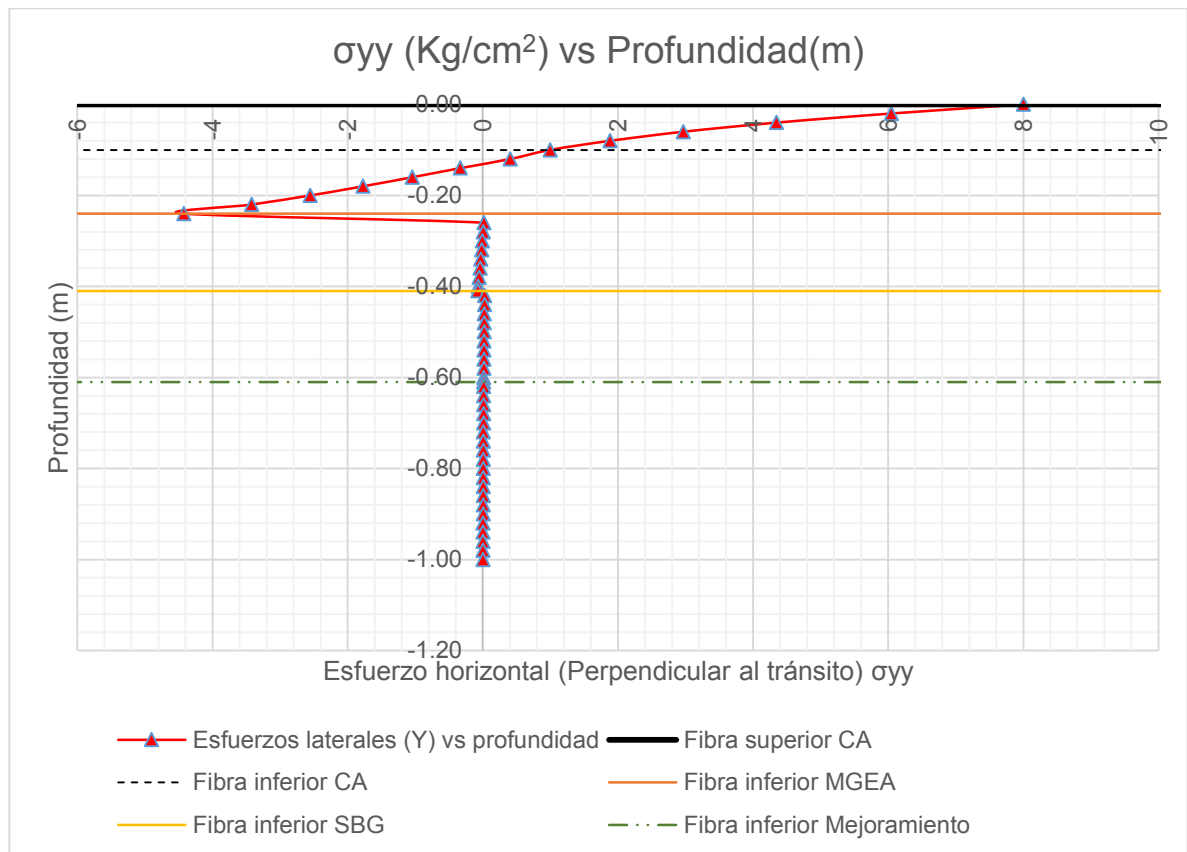


Fuente: Propia

En la gráfica 24 se aprecia que la carpeta asfáltica trabaja a compresión, dicho comportamiento se proyecta hasta los dos primeros centímetros de MGEA (Comportamiento similar al generado en la alternativa 2. Luego de los 12 cm de profundidad, la capa de MGEA trabaja bajo esfuerzos de tensión. Por último la capa de mejoramiento al igual que en las alternativas 1 y 2, trabaja netamente bajo esfuerzos de compresión en sentido paralelo a la dirección de circulación de los vehículos.

El esfuerzo lateral máximo a tensión en sentido del tránsito es de 8.72 Kg/cm^2 y el esfuerzo lateral máximo a compresión tiene una magnitud de $5.25\% \text{ Kg/cm}^2$. El esfuerzo lateral que llega a la fibra inferior de la capa de mejoramiento es de $7.62 \times 10^{-3} \text{ Kg/cm}^2$. Es importante resaltar que las magnitudes de los esfuerzos laterales en dirección del tránsito, son menores en la alternativa 3, respecto a las alternativa 1 y 2.

Gráfica 25. Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad. Alternativa 3



Fuente: Propia

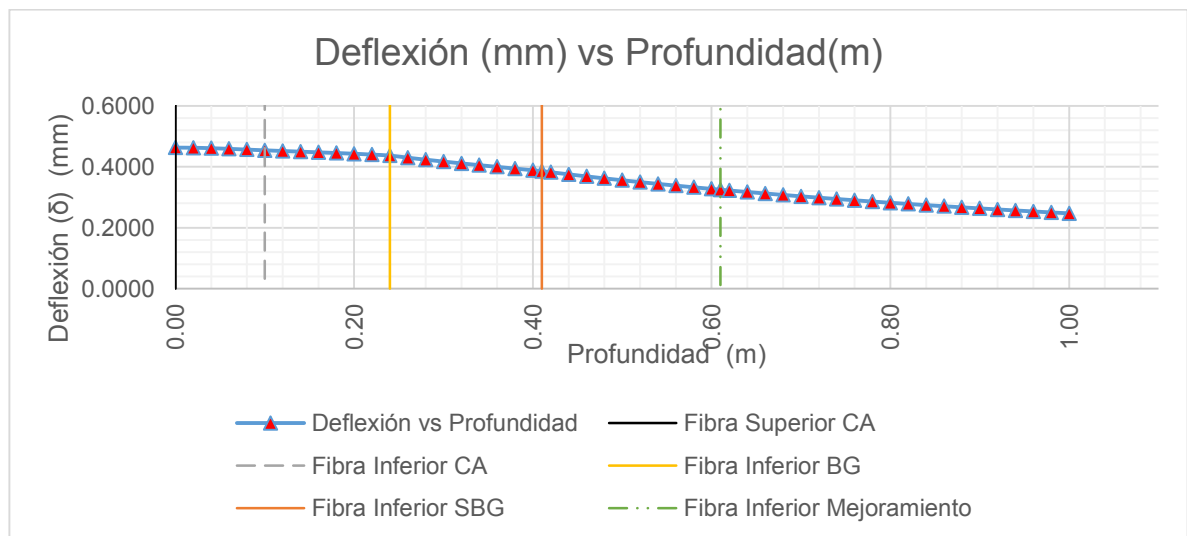
En cuanto al comportamiento de las capas granulares en sentido perpendicular al tránsito, se puede decir lo siguiente:

- El comportamiento de las capas granulares de la alternativa 3, es idéntico al de la Alternativa 2.
- El esfuerzo lateral máximo a tensión en sentido del tránsito es de 8.00 Kg/cm^2 y el esfuerzo lateral máximo a compresión tiene una magnitud de $4.142\% \text{ Kg/cm}^2$. El esfuerzo lateral que llega a la fibra inferior de la capa de mejoramiento es de $1.36 \times 10^{-2} \text{ Kg/cm}^2$, siendo así menor a los transmitidos en las otras alternativas.

14.3.3.3. Deflexión en función de la profundidad (δ_z): En la gráfica 26, se muestra la variación las deflexiones en función de la profundidad.

Para el caso de la alternativa No. 3., la deflexión presentada en la subrasante tiene un valor de 2.47×10^{-4} metros y no supera a la deflexión máxima admisible en sentido vertical. Por otra parte, la deflexión presentada en la alternativa 3 es menor a la que se genera en las alternativas 1 y 2 ($\delta_3(A1) > \delta_z(A1) > \delta_z(A2)$); por tanto se puede inferir que la posibilidad de surgimiento de ahuellamientos es menor.

Gráfica 26. Comportamiento de la deflexión en función de la profundidad. Alternativa 3



Fuente: Propia

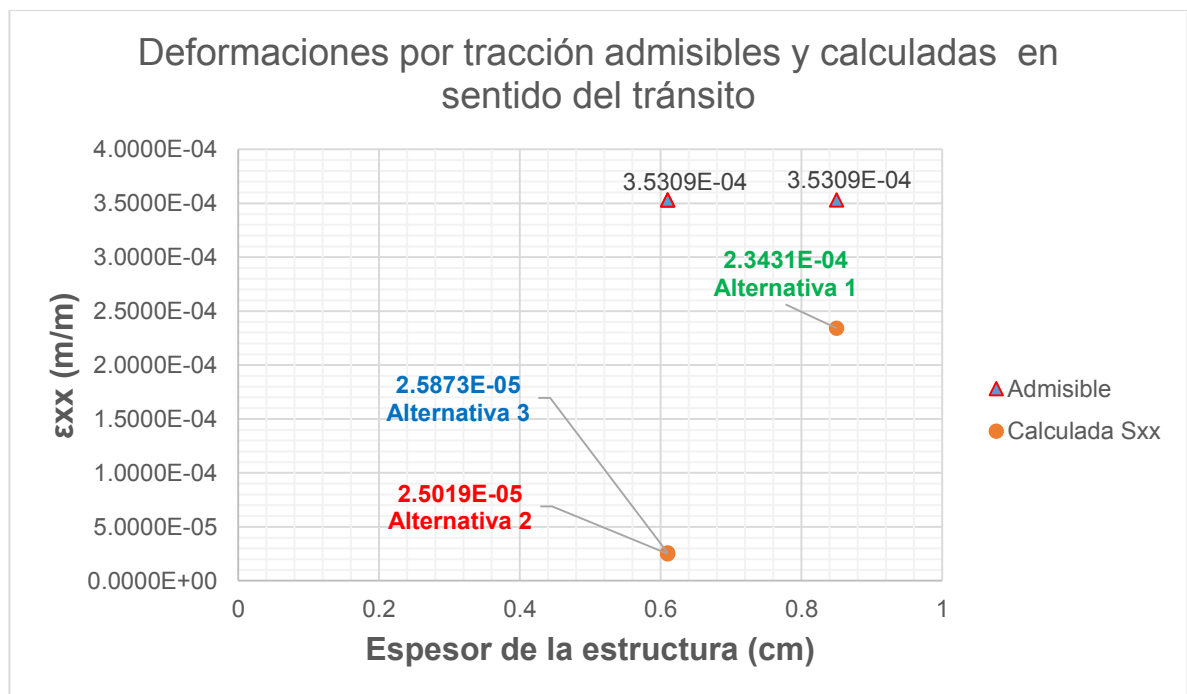
14.4. COMPARACIÓN ENTRE PARÁMETROS DE CUMPLIMIENTO POR ALTERNATIVA

En el presente apartado, se realizará una comparación entre los parámetros calculados en el capítulo 14.1. Dicha evaluación es necesario realizarla, dado que en función de ellos se determinara cual sistema de mejoramiento presenta mejor rendimiento mecánico.

Ahora bien, teniendo en cuenta los datos consignados en las Tablas 57, 58 y 59 en la sección 14.2. Se observa que cada una de las alternativas cumple con los criterios de admisibilidad calculados al comienzo del capítulo 13.

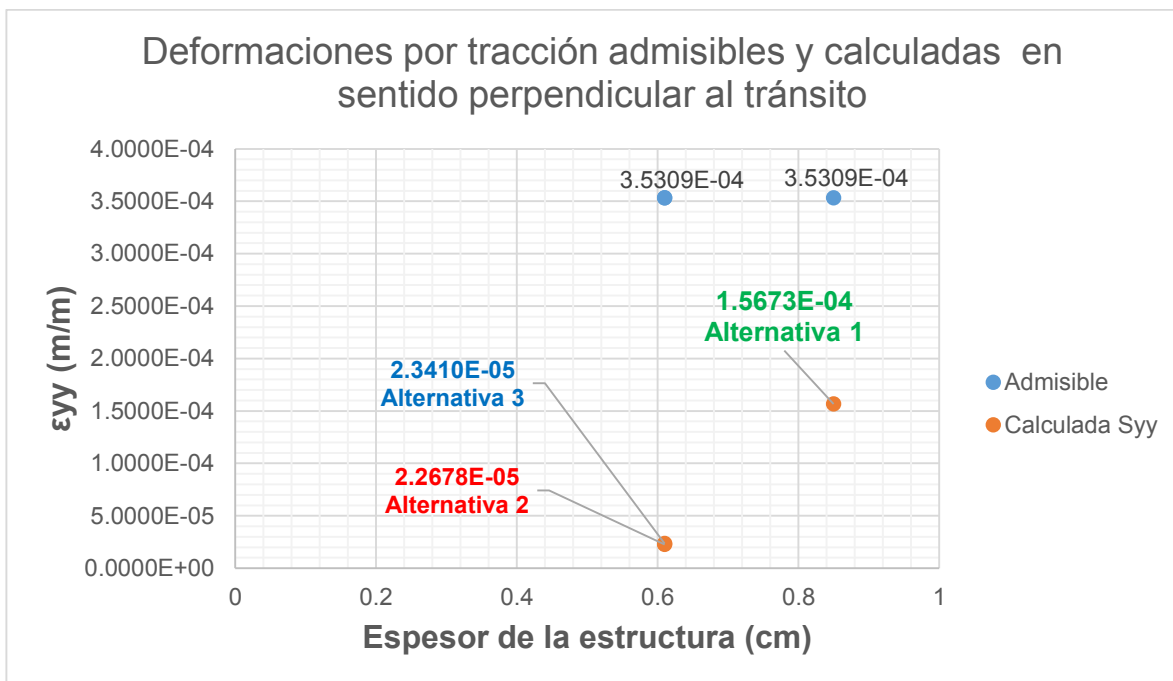
Así, para el segmento de estudio se presentan las gráficas comparativas de deformaciones y esfuerzos calculados, respecto a los criterios de admisibilidad ya establecidos. En las mismas, se puede apreciar el margen de seguridad de las estructuras analizadas y adicionalmente de ellas se puede concluir que alternativa de sistema de mejoramiento presenta un mejor desempeño mecánico.

Gráfica 27. Comparación entre deformaciones por tracción admisibles y calculada en sentido del tránsito. Alternativas 1, 2 y 3)



Fuente: Propia

Gráfica 28. Comparación entre deformaciones por tracción admisible y calculada en sentido perpendicular del tránsito. Alternativas 1, 2 y 3)



Fuente: Propia

De acuerdo a la gráficas 27 y 28, las tres alternativas cumplen con el criterio de las deformaciones por tracción en sentido de la aplicación de las cargas vehiculares y a su vez en sentido perpendicular a la misma. Siendo menores las deformaciones presentadas para el sistema de mejoramiento de la alternativa 2, ($\delta_{xx} = 2.5519 \times 10^{-5}$) metros y ($\delta_{yy} = 2.2678 \times 10^{-5}$) metros.

Además se puede observar lo siguiente:

- La deformación δ_{xx} calculada en la alternativa 1 (Mejoramiento con rajón y sello), es del orden del 66.36% de la admisible.
- La deformación δ_{yy} calculada en la alternativa 1 (Mejoramiento con rajón y sello), es del orden del 44.39% de la admisible.

- La deformación δ_{xx} calculada en la alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en material granular remanente MGR), es del orden del 7.09% de la admisible.
- La deformación δ_{yy} calculada en la alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en material granular remanente MGR), es del orden del 6.42% de la admisible.
- La deformación δ_{xx} calculada en la alternativa 3 (Mejoramiento con geocelda y lleno en 85% RAP con adición del 15% de Calamina), es del orden del 7.33% de la admisible.
- La deformación δ_{yy} calculada en la alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en 85% RAP con adición del 15% de Calamina), es del orden del 6.63% de la admisible.

Los valores expresados anteriormente indican que la alternativa 2 es la que mejor satisface al criterio de las deformaciones por tracción admisible, presentadas en la carpeta asfáltica. Sin embargo si desea implementarse la alternativa 3, es viable dado que las deformaciones son en promedio 93% menores que la admisible.

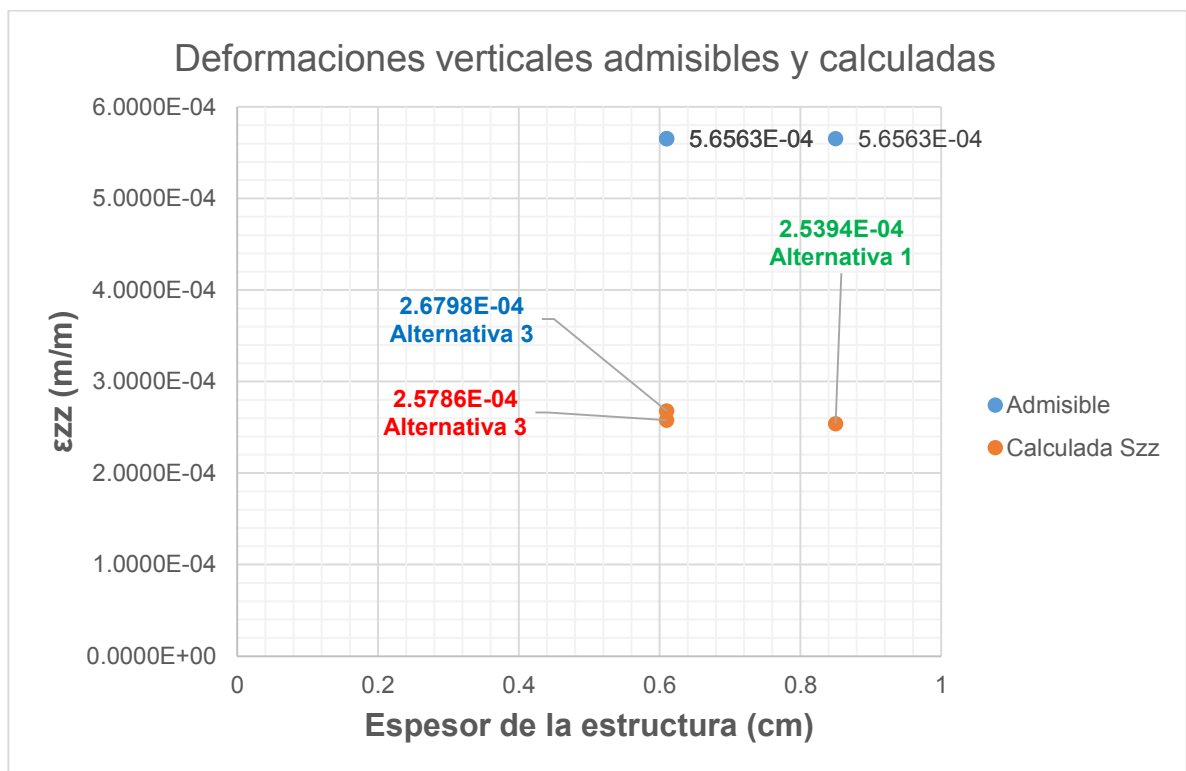
En cuanto a las deformaciones verticales (Ver gráfica 29), las cuales van en sentido de la carga aplicada para el análisis, se tienen las siguientes consideraciones:

- La deformación vertical δ_{zz} calculada en la alternativa 1 (Mejoramiento con rajón y sello), es del orden del 44.90% de la admisible. Sin embargo esta se presenta a una profundidad de 85 cm.
- La deformación vertical δ_{zz} calculada en la alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en material granular remanente MGR), es del orden del 47.38% de la admisible y se presenta a 61 cm de profundidad.

- La deformación vertical δ_{zz} calculada en la alternativa 3 (Mejoramiento con geocelda y lleno en 85% RAP con adición del 15% de Calamina), es del orden del 45.59% de la admisible y se presenta a 61 cm de profundidad.

Las consideraciones realizadas anteriormente, indican que la alternativa de mejoramiento que mejor se desempeña es la Alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en MGR), ya que presenta un desempeño aproximado al 1% por encima del mejoramiento número 3.

Gráfica 29. Comparación entre deformaciones verticales admisibles y calculadas. (Alternativas 1, 2 y 3)



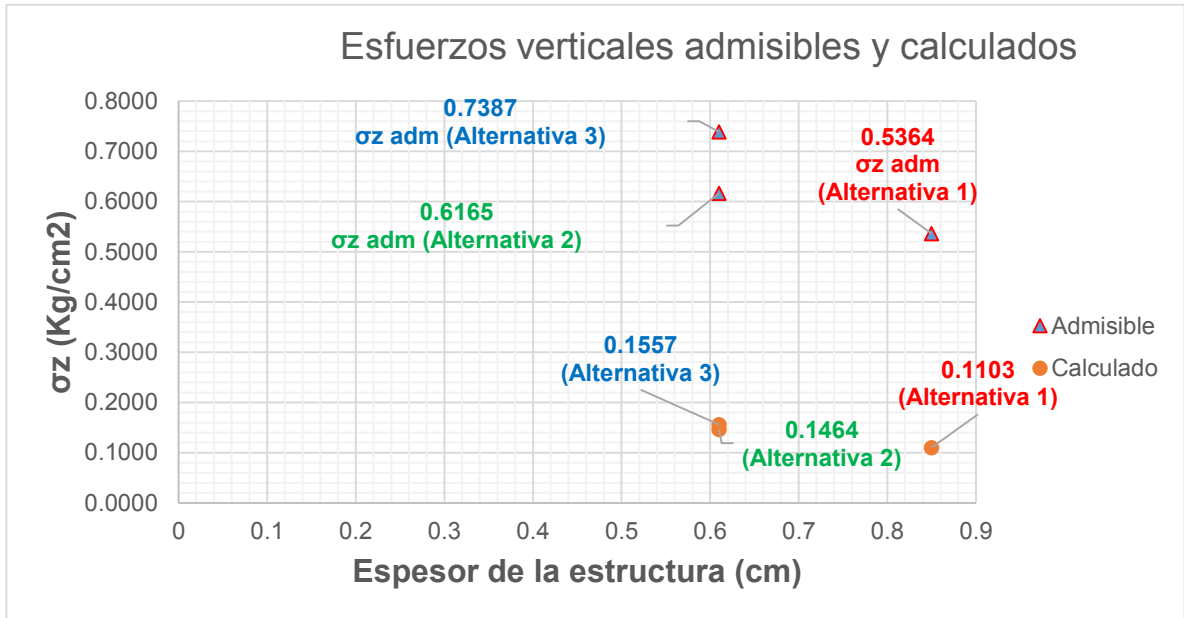
Fuente: Propia

Por último, comparando el parámetro de deflexiones permitidas y obtenidas; los cuales están representados en la gráfica 30, se tiene lo siguiente:

- La alternativa de mejoramiento, que presenta mayor capacidad de carga es la alternativa No. 3; dado que el esfuerzo vertical que admite ésta es 16.54% mayor que el de la alternativa 2 y 27.39% mayor que el de la alternativa 1.

- El esfuerzo vertical σ_z calculado en la alternativa 1 (Mejoramiento con rajón y sello), es del orden del 20.57% del admisible. Sin embargo éste se presenta a una profundidad de 85 cm.

Gráfica 30. Comparación entre esfuerzos verticales admisibles y calculados. (Alternativas 1, 2 y 3)



Fuente: Propia

- El esfuerzo vertical σ_z calculado en la alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en material granular remanente MGR), es del orden del 23.75% del admisible y se presenta a 61 cm de profundidad.
- El esfuerzo vertical σ_z calculado en la alternativa 3 (Mejoramiento con geocelda y lleno en 85% RAP con adición del 15% de Calamina), es del orden del 21.08% del admisible y se presenta a 61 cm de profundidad.

De acuerdo a lo mencionado, se infiere que la alternativa de mejoramiento que mejor se desempeña ante la disipación de esfuerzos verticales es la Alternativa 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en MGR), ya que presenta el mayor porcentaje de funcionalidad a una profundidad de 61 cm. Sin embargo la alternativa propuesta con material de lleno (RAP y Calamina), también cumple con las comprobaciones de admisibilidad.

15. ANÁLISIS PRESUPUESTAL DE LOS SISTEMAS DE MEJORAMIENTO PLANTEADOS.

Uno de los factores a tener en cuenta, en el momento de realizar la implementación de un sistema constructivo o de nuevos materiales de construcción; es su impacto económico. Por tal motivo, se presenta un análisis detallado, en donde se exponen las diversas afectaciones presupuestales al momento de realizar intervenciones viales con estructuras de pavimento convencionales y modificadas con la inclusión de sistemas de confinamiento celular con llenos de materiales convencionales típicos y con los llenos propuestos en el presente documento (RAP con adición de calamina).

Ahora bien; dado que luego de realizar el análisis del comportamiento mecánico de cada uno de los sistemas de mejoramiento planteado (Capítulo 14); y en vista de que la alternativa de mejoramiento propuesta por medio del presente documento (Geocelda – RAP – Calamina), cumple con los requisitos establecidos por la normatividad técnica de la Ciudad de Bogotá para la construcción de vías. Se procede a realizar la evaluación económica comparativa de cada una de las alternativas trabajadas, con el fin de determinar su viabilidad técnica.

15.1. DEFINICIÓN DE LAS ACTIVIDADES CONSTRUCTIVAS

Como es sabido; la ejecución de todo tipo de proyecto tiene por criterio fundamental, el establecer una línea base o la definición de una hoja de ruta a seguir; con el fin de alcanzar los objetivos establecidos. Por tal motivo, es de vital importancia delimitar el alcance de las actividades a desarrollar según los diseños de las estructuras de pavimento a analizar.

Por tal razón, en la Tabla 18 se relacionan brevemente las actividades a realizar en el tramo de prueba; teniendo en cuenta cada una de las alternativas sugeridas para la estructura de pavimento.

Tabla 61. Ítems o actividades típicas a desarrollar en la Rehabilitación de una estructura de pavimento flexible.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
3007	Replanteo general	m ²
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	m ²
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	m ³
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	m ³
3800	Nivelación y compactación de subrasante	m ²
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo mecánico)	m ³
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²
4159	Subbase granular clase c (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³
4746	Subbase granular clase a (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³
4744	Base granular clase a (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³
3864	Imprimación con emulsión asfáltica crl-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²
3867	Riego de liga con Emulsión asfáltica crr-2 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²
4568	Mezcla densa en caliente md-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	m ³
7900	Geocelda HDPE perforada, altura 15 cm (suministro e instalación).	m ²
7462	Transporte de pétreos (material de fresado - rap)	m ³ /Km
7462	Transporte de Pétreos (calamina)	m ³
	Suministro de calamina (cascarilla de laminación)	m ³
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	m ³

Fuente: Propia

Es de mencionar que en cuanto a los precios o valores unitarios de cada una de estas actividades, se tendrá en cuenta los precios vigentes establecidos por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, en el documento denominado “Sistema de precios de referencia”⁸², desarrollado por la entidad y que a su vez es generado semestralmente con sus respectivas actualizaciones de precios, insumos y mano de obra.

Para el caso se tendrá en cuenta el documento publicado por el IDU el día 31 de Diciembre de 2019 y el cual puede encontrarse en el apartado de componente económico, sección productos. Lo anterior con el fin de definir los precios unitarios por actividad.

15.2. ELABORACIÓN DEL PRESUPUESTO

En el presente apartado, se presenta el análisis económico realizado de cada una de las alternativas de estructura de pavimento planteadas. La metodología que se empleó para realizar dicho análisis se fundamenta en calcular un factor o valor multiplicador por 1 metro cuadrado de intervención, teniendo en cuenta el Listado de precios de referencia en su versión del 31 de Diciembre de 2019 mencionado.

Del mismo se determinó, cada uno de los precios unitarios de trabajo. En las Tablas 61 a 63, se presenta el análisis individual realizado.

Tabla 62. Evaluación presupuestal de alternativa 1.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SISTEMAS DE GEOCELDA Y MATERIALES RECICLADOS (RAP Y CALAMINA) INTEGRANTE 1: Silvia Estefany Puentes Zuñiga INTEGRANTE 2: Edwin Rodríguez Gutiérrez INGENIERIA CIVIL	DIMENSIONES DEL TRAMO		ALTERNATIVA 1 - ESTRUCTURA TÍPICA DE PAVIMENTO FLÉXIBLE (Dimensiones en m)	
	LARGO (m)	1.00	MD 12	0.15
	ANCHO (m)	1.00	BG	0.20
	PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN		SBG	0.20
			Rajón	0.30

⁸² INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO IDU [sitio web]. Bogotá, Colombia. IDU. Componente económico. Productos [consultado el 14 de enero de 2019]. Disponible en <https://www.idu.gov.co/page/siipviales/economico/portafolio>

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 1A	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 1
3007	Replanteo general	m ²	\$ 573,00	1,00	\$ 573,00
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	m ²	\$ 5.340,00	1,00	\$ 5.340,00
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	m ³	\$ 4.486,00	0,95	\$ 4.262,00
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	m ³	\$ 44.347,00	1,24	\$ 54.769,00
3800	Nivelación y compactación de subrasante	m ²	\$ 1.014,00	1,00	\$ 1.014,00
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo mecánico)	m ³	\$ 99.305,00	0,30	\$ 29.792,00
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²	\$ 8.656,00	1,05	\$ 9.089,00
4159	Subbase granular clase C (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 128.500,00	0,12	\$ 15.420,00
4746	Subbase granular clase A (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 128.500,00	0,20	\$ 25.700,00
4744	Base granular clase A (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 139.329,00	0,20	\$ 27.866,00
3864	Imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	\$ 1.931,00	1,00	\$ 1.931,00

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 1A	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 1
3867	Riego de liga con emulsión asfáltica CRR-2 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	\$ 1.505,00	1,00	\$ 1.505,00
4568	Mezcla densa en caliente MD-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	m ³	\$ 887.025,00	0,15	\$ 133.054,00
7900	Suministro e instalación de geocelda (no incluye material de relleno)	m ²	\$ 49.247,00	-	-
INS 7462	Transporte de pétreos (material de fresado - RAP)	m ³	\$ 8.380,00	-	-
INS 7462	Transporte de pétreos (calamina)	m ³	\$ 8.380,00	-	-
	Suministro de calamina (cascarilla de laminación)	m ³	\$ 56.345,00	-	-
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	m ³	\$ 12.196,00	-	-

Fuente: Propia

Tabla 63. Evaluación presupuestal de alternativa 2.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SISTEMAS DE GEOCELDA Y MATERIALES RECICLADOS (RAP Y CALAMINA) INTEGRANTE 1: Silvia Estefany Puentes Zuñiga INTEGRANTE 2: Edwin Rodríguez Gutiérrez INGENIERIA CIVIL	DIMENSIONES DEL TRAMO		ALTERNATIVA 2 – ESTRUCTURA MODIFICADA CON GEOCELDA LLENO CON MATERIALES (Dimensiones en m)	
	LARGO (m)	1.00	MD 12	0.10
	ANCHO (m)	1.00	MGEA	0.14
	PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN		SBG	0.17
			Geocelda + lleno con MGR	0.20

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 2	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 1B
3007	Replanteo general	m ²	\$ 573,00	1,00	\$ 573,00
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	m ²	\$ 5.340,00	1,00	\$ 5.340,00

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 2	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 1B
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	m ³	\$ 4.486,00	0,61	\$ 2.736,00
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	m ³	\$ 44.347,00	0,79	\$ 35.167,00
3800	Nivelación y compactación de subrasante	m ²	\$ 1.014,00	1,00	\$ 1.014,00
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo mecánico)	m ³	\$ 99.305,00	-	-
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²	\$ 8.656,00	1,05	\$ 9.089,00
4159	Subbase granular clase C (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 128.500,00	0,20	\$ 25.700,00
4746	Subbase granular clase A (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 128.500,00	0,17	\$ 21.845,00
4744	Base granular clase A (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 139.329,00		-
3864	Imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	\$ 1.931,00	1,00	\$ 1.931,00
3867	Riego de liga con emulsión asfáltica CRR-2 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	\$ 1.505,00	1,00	\$ 1.505,00
4568	Mezcla densa en caliente MD-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	m ³	\$ 887.025,00	0,10	\$ 88.703,00

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 2	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 1B
6860	Base granular clase A (BG-A) estabilizada con cemento asfáltico convencional tipo MGEA_A (incluye suministro, transporte, colocación y compactación)	m ³	\$ 409.608,00	0,14	\$ 57.345,00
7900	Suministro e instalación de geocelda (no incluye material de relleno)	m ²	\$ 49.247,00	1,00	\$ 49.247,00
INS 7462	Transporte de pétreos (material de fresado - RAP)	m ³	\$ 8.380,00	-	-
INS 7462	Transporte de pétreos (calamina)	m ³	\$ 8.380,00	-	-
	Suministro de calamina (casquilla de laminación)	m ³	\$ 56.345,00	-	-
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	m ³	\$ 12.196,00	-	-

Fuente: Propia

Tabla 64. Evaluación presupuestal de alternativa 3.

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SISTEMAS DE GEOCELDA Y MATERIALES RECICLADOS (RAP Y CALAMINA) INTEGRANTE 1: Silvia Estefany Puentes Zuñiga INTEGRANTE 2: Edwin Rodríguez Gutiérrez INGENIERIA CIVIL	DIMENSIONES DEL TRAMO		ALTERNATIVA 3 - ESTRUCTURA MODIFICADA CON GEOCELDA LLENO CON MATERIALES (Dimensiones en m)	
	LARGO (m)	1.00	MD 12	0.10
	ANCHO (m)	1.00	MGEA	0.14
	PROFUNDIDAD DE EXCAVACIÓN		SBG	0.17
			Geocelda + lleno en calamina y RAP	0.20

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 2	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 3
3007	Replanteo general	m ²	\$ 573,00	1,00	\$ 573,00
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	m ²	\$ 5.340,00	1,00	\$ 5.340,00

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 2	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 3
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	m ³	\$ 4.486,00	0,61	\$ 2.736,00
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	m ³	\$ 44.347,00	0,79	\$ 35.167,00
3800	Nivelación y compactación de subrasante	m ²	\$ 1.014,00	1,00	\$ 1.014,00
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo mecánico)	m ³	\$ 99.305,00		-
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	m ²	\$ 8.656,00	1,05	\$ 9.089,00
4159	Subbase granular clase C (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 128.500,00		-
4746	Subbase granular clase A (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 128.500,00	0,17	\$ 21.845,00
4744	Base granular clase A (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	m ³	\$ 139.329,00		-
3864	Imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	\$ 1.931,00	1,00	\$ 1.931,00
3867	Riego de liga con emulsión asfáltica CRR-2 (suministro, barrido superficie y riego)	m ²	\$ 1.505,00	1,00	\$ 1.505,00
4568	Mezcla densa en caliente MD-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	m ³	\$ 887.025,00	0,10	\$ 88.703,00

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD ALTERNATIVA 2	VR. PARCIAL ALTERNATIVA 3
6860	Base granular clase A (BG-A) estabilizada con cemento asfáltico convencional tipo MGEA_A (incluye suministro, transporte, colocación y compactación)	m ³	\$ 409.608,00	0,14	\$ 57.345,00
7900	Suministro e instalación de geocelda (no incluye material de relleno)	m ²	\$ 49.247,00	1,00	\$ 49.247,00
INS 7462	Transporte de pétreos (material de fresado - RAP)	m ³	\$ 8.380,00	0,17	\$ 1.425,00
INS 7462	Transporte de pétreos (calamina)	m ³	\$ 8.380,00	0,03	\$ 251,00
	Suministro de calamina (cascarilla de laminación)	m ³	\$ 56.345,00	0,03	\$ 1.690,00
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	m ³	\$ 12.196,00	0,17	\$ 2.073,00

Fuente: Propia

15.3. ANÁLISIS DE LOS PRESUPUESTOS DESARROLLADOS

En el numeral 15.2, se realizó el estimativo presupuestal, adoptando la metodología del valor unitario, para realizar un análisis presupuestal más detallado; es necesario implementar el respectivo cálculo del AIU asociado, dado que en él, se contemplan los valores o rubros referidos a la gestión administrativa de los proyectos. Para dicho fin se adoptará un AIU correspondiente al 29.7950% sobre el costo directo.

A su vez el costo directo se verá afectado por rubros que usualmente son generados en la etapa de construcción de los contratos de obra pública a nivel de la Ciudad de Bogotá. Dichos factores o rubros corresponden a la gestión ambiental, la gestión social y la gestión del manejo de tráfico y señalización de obra (PMT). Los porcentajes de afectación son 3%, 1% y 2% respectivamente.

En la Tabla 65, se presenta el resultado del análisis presupuestal incluyendo las variables ya mencionadas.

Tabla 65. Análisis presupuestal detallado por alternativa de estructura de pavimento.

ANÁLISIS PRESUPUESTAL DETALLADO POR ALTERNATIVA DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO	ALTERNATIVA 1 ESTRUCTURA TÍPICA DE PAVIMENTO FLÉXIBLE (Mejoramiento con rajón y sello)	ALTERNATIVA 2 ESTRUCTURA FLEXIBLE MODIFICADA CON GEOCELDA LLENO CON MGR	ALTERNATIVA 3 ESTRUCTURA FLEXIBLE MODIFICADA CON GEOCELDA LLENO CON MATERIALES RECICLADOS (85% RAP + 15% CALAMINA)
COSTO DIRECTO OBRA	\$ 310,315.00	\$ 300,195.00	\$ 279,934.00
COSTO DIRECTO GESTIÓN AMBIENTAL (3%)	\$ 9,309.00	\$ 9,006.00	\$ 8,398.00
COSTO DIRECTO GESTIÓN SOCIAL (1%)	\$ 3,103.00	\$ 3,002.00	\$ 2,779.00
COSTO DIRECTO MANEJO DE TRÁFICO Y SEÑALIZACIÓN (2%)	\$ 6,206.00	\$ 6,004.00	\$ 5,559.00
TOTAL COSTO DIRECTO	\$ 328,933.00	\$ 318,207.00	\$ 296,730.00
ADMINISTRACIÓN (23.7950%)	\$ 78,270.00	\$ 75,717.00	\$ 70,607.00
IMPREVISTOS (1.0000%)	\$ 3,289.00	\$ 3,182.00	\$ 2,967.00
UTILIDADES (5.0000%)	\$ 16,447.00	\$ 15,910.00	\$ 14,837.00
SUB TOTAL AIU (29.79500%)	\$ 98,006.00	\$ 94,809.00	\$ 88,411.00
IVA SOBRE UTILIDAD (19%)	\$ 3,125.00	\$ 3,023.00	\$ 2,819.00
VR. PARCIAL INTERVENCIÓN	\$ 430,064.00	\$ 416,039.00	\$ 387,960.00

Fuente: Propia

De acuerdo a la Tabla 65, se puede decir que:

- La estructura de pavimento, que presenta el menor valor por metro cuadrado de intervención, es la presentada en la alternativa 3, la cual a su vez implementa el sistema de mejoramiento compuesto por unidades de confinamiento celular y lleno en materiales reciclados (RAP y calamina).
- Respecto a la alternativa No. 2, la alternativa 3 presenta una reducción del valor por metro cuadrado del orden 7.44%, esto puede presentarse debido a que el material de lleno de la geocelda es 100% reciclado y aprovechable, acarreando así únicamente el valor del trasiego o transporte del mismo. Dicho porcentaje de economía puede aumentar, en el caso de que el RAP o fresado, sea generado en el punto donde se realizaran las intervenciones.

Por otra parte, es de resaltar que la implementación de la geocelda en una estructura de pavimento, no representa ahorro si se compara con una estructura

de tipo convencional. Esto se debe a que las unidades presentan un valor elevado en el mercado y a que a diferencia del material pétreo (rajón); la instalación de los sistemas de confinamiento celular o geocelda, demanda de la contratación de mano de obra calificada y de insumos adicionales como el caso de grapas y soportes verticales que evitan el desplazamiento lateral de las mismas al momento de ejecutar sus respectivos llenos.

No obstante, la implementación de dicho sistema de mejoramiento trae consigo beneficios que a su vez se traducen en la reducción global de los costos de implementación. Estos beneficios se ven principalmente reflejados en actividades como el caso del movimiento de tierras (Excavación, disposición de escombros), los volúmenes de materiales de lleno (Bases y subbases granulares) o en los espesores de las capas de bases estabilizadas y carpetas asfálticas.

Ahora bien; uno de los beneficios principales de la implementación de los sistemas de mejoramiento de las alternativas 2 y 3 en materia de costos y presupuestos; es la posibilidad que existe de evitar la intervención de redes de servicios públicos. Lo anterior basados en la profundidad a la que se encuentran las mismas.

Con el fin de establecer un valor aproximado de ahorro asociado a la intervención de redes en un proyecto típico de obra pública tipo construcción de vías; se toma como base la información suministrada por la empresa Concretos Asfálticos de Colombia – CONCRESCOL S.A.

En dicha información se encuentran los documentos denominados “Acta de liquidación del contrato”, de 7 contratos de obra pública ejecutados por la empresa entre los años 2015 y 2017. En la Tabla 66 se presentan los valores del costo directo ejecutado de cada contrato y los valores del costo directo de la intervención de redes realizadas junto a su respectivo porcentaje de incidencia en el proyecto.

Tabla 66. Histórico de costos de intervención de redes, en contratos ejecutados por CONCRESCOL S.A.

Histórico de porcentaje de incidencia asociado a la intervención de redes de servicios públicos respecto al Costo Directo total de las obras ejecutadas por CONCRETOS ASFÁLTICOS DE COLOMBIA					
Contrato de Obra	Entidad	Contratista	Costo directo ejecutado	Costo directo de redes intervenidas	% de afectación presupuestal
COP 215 DE 2017	Fondo de Desarrollo Local de Kennedy	CONSORCIO KODA	\$ 8,490,192,935.00	\$ 683,346,986.00	8.05%
COP 170 DE 2016	Fondo de Desarrollo Local de San Cristóbal	CONSORCIO BANDERAS	\$ 3,892,922,735.00	\$ 580,465,107.00	14.91%
COP 164 DE 2015	Fondo de Desarrollo Local de San Cristóbal	CONSORCIO CBG	\$ 3,237,628,386.00	\$ 615,565,992.00	19.01%
COP 166 DE 2015	Fondo de Desarrollo Local de Vías Uribe	CONSORCIO VIAS URIBE	\$ 9,129,104,423.00	\$ 989,435,373.00	10.84%
COP 213 DE 2015	Fondo de Desarrollo Local de Kennedy	CONSORCIO BANDERAS	\$ 8,539,367,788.00	\$ 512,075,265.00	6.00%
COP 148 DE 2015	Fondo de Desarrollo Local de San Cristóbal	CONCRESCOL S.A.	\$ 2,176,677,744.00	\$ 326,980,268.00	15.02%
COP 147 DE 2015	Fondo de Desarrollo Local de San Cristóbal	CONCRESCOL S.A.	\$ 2,195,830,600.00	\$ 189,187,964.00	8.62%
			\$ 37,661,724,611.00	\$ 3,897,056,955.00	10.35%

Fuente: CONCRESCOL S.A.

Como se observa, las actividades de intervención de redes de servicios públicos asociadas a las vías ejecutadas; presenta un porcentaje de incidencia promedio del 10.35%.

Dicho lo anterior, se puede inferir que al implementar los sistemas de mejoramiento con geocelda; se pueden reducir en gran parte los costos generados por la posible intervención de redes. Incrementando así la posibilidad de intervenir más km/carril de infraestructura vial.

15.4. ANÁLISIS EN TIEMPOS DE EJECUCIÓN POR ALTERNATIVA

Una vez realizado el análisis presupuestal, el siguiente factor a evaluar es el tiempo de ejecución que conlleva la implementación de un sistema constructivo.

Lo anterior se ejecuta, en aras de determinar la viabilidad de cada alternativa propuesta; partiendo del hecho, de que para ejecutar un contrato de obra pública o privada, la entidad contratante asigna un tiempo consumible o tiempo para realizar la entrega de los proyectos.

Al igual que en el presupuesto; la metodología a implementar en el análisis de tiempos de ejecución, consiste en asumir los históricos de rendimientos de mano de obra y maquinaria definidos por el Instituto de Desarrollo Urbano en sus bases de datos de referencia.

Posterior a la obtención de los rendimientos mencionados por unidad de actividad, se procede a realizar la determinación de los tiempos proyectados de ejecución para el tramo descrito en el numeral 12.1.3. “*Características geométricas del tramo de prueba*”; en el que se establece una longitud de 47.10 m y un ancho de 6.10 m, para un área estimada de construcción de 290.36 m².

Por último se presenta el respectivo modelo de programación de obra, realizado en el software Microsoft Project 2013, empleando el modelo denominado diagrama de Gantt.

En las Tablas 67, 68 y 69, se presentan los rendimientos determinados para cada alternativa y por cada actividad de obra, junto al respectivo cálculo de tiempos de ejecución.

Tabla 67. Rendimientos de obra (Alternativa 1)

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 1		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
3007	Replanteo general	34,8254	m ² /h	287,31	8,25	1,03
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	12,9871	m ² /h	287,31	22,12	2,77
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	20,9883	m ³ /h	272,94	13,00	1,63
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	33,8045	m ³ /h	354,83	10,50	1,31

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 1		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
3800	Nivelación y compactación de subrasante	71,8131	m ² /h	287,31	4,00	0,50
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo mecánico)	6,6303	m ³ /h	86,19	13,00	1,63
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	100,5358	m ² /h	301,68	3,00	0,38
4159	Subbase granular clase C (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	34,48	23,00	2,88
4746	Subbase granular clase A (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	57,46	38,34	4,79
4744	Base granular clase A (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	57,46	38,34	4,79
3864	Imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 (suministro, barrido superficie y riego)	71,7475	m ² /h	287,31	4,00	0,50
3867	Riego de liga con emulsión asfáltica CRR-2 (suministro, barrido superficie y riego)	71,7475	m ² /h	287,31	4,00	0,50
4568	Mezcla densa en caliente MD-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	7,1799	m ³ /h	43,10	6,00	0,75

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 1		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
6860	Base granular clase A (BG-A) estabilizada con cemento asfáltico convencional tipo MGEA_A (incluye suministro, transporte, colocación y compactación)	7,1799	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
7900	Suministro e instalación de geocelda (no incluye material de relleno)	14,6583	m ² /h	0,00	0,00	0,00
INS 7462	Transporte de pétreos (material de fresado - RAP)	16,2776	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
INS 7462	Transporte de pétreos (calamina)	16,2776	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
	Suministro de calamina (cascarilla de laminación)	7,1799	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	7,1799	m ³ /h	0,00	0,00	0,00

Fuente: Propia

Tabla 68. Rendimientos de obra (Alternativa 2)

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 2		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
3007	Replanteo general	34,8254	m ² /h	287,31	8,25	1,03
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	12,9871	m ² /h	287,31	22,12	2,77
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	20,9883	m ³ /h	175,26	8,35	1,04
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	33,8045	m ³ /h	227,84	6,74	0,84

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 2		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
3800	Nivelación y compactación de subrasante	71,8131	m ² /h	287,31	4,00	0,50
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo mecánico)	6,6303	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	100,5358	m ² /h	301,68	3,00	0,38
4159	Subbase granular clase C (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	57,46	38,34	4,79
4746	Subbase granular clase A (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	48,84	32,59	4,07
4744	Base granular clase A (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
3864	Imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 (suministro, barrido superficie y riego)	71,7475	m ² /h	287,31	4,00	0,50
3867	Riego de liga con emulsión asfáltica CRR-2 (suministro, barrido superficie y riego)	71,7475	m ² /h	287,31		0,50
4568	Mezcla densa en caliente MD-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	7,1799	m ³ /h	28,73	4,00	0,50
6860	Base granular clase A (BG-A) estabilizada con cemento asfáltico convencional tipo MGEA_A (incluye	7,1799	m ³ /h	40,22	5,60	0,70

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 2		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
	suministro, transporte, colocación y compactación)					
7900	Suministro e instalación de geocelda (no incluye material de relleno)	14,6583	m ² /h	287,31	19,60	2,45
INS 7462	Transporte de pétreos (material de fresado - RAP)	16,2776	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
INS 7462	Transporte de pétreos (calamina)	16,2776	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
	Suministro de calamina (casquilla de laminación)	7,1799	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	7,1799	m ³ /h	0,00	0,00	0,00

Fuente: Propia

Tabla 69. Rendimientos de obra (Alternativa 3)

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 3		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
3007	Replanteo general	34,8254	m ² /h	287,31	8,25	1,03
3021	Demolición pavimento asfáltico (espesor variable. incluye cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores máx. 0.15m	12,9871	m ² /h	287,31	22,12	2,77
3710	Excavación mecánica en material común (incluye cargue)	20,9883	m ³ /h	175,26	8,35	1,04
4613	Transporte y disposición final de escombros en sitio autorizado (distancia de transporte 28 km)	33,8045	m ³ /h	227,84	6,74	0,84
3800	Nivelación y compactación de subrasante	71,8131	m ² /h	287,31	4,00	0,50
6016	Estabilización de subrasante con rajón, incluye equipo de compactación (suministro, extendido, nivelación y compactación con equipo	6,6303	m ³ /h	0,00	0,00	0,00

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 3		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
	mecánico)					
4015	Geotextil NT 4000 para separación subrasante/capas granulares (incluye suministro e instalación)	100,5358	m ² /h	301,68	3,00	0,38
4159	Subbase granular clase C (SBG_C) (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
4746	Subbase granular clase A (SBG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	48,84	32,59	4,07
4744	Base granular clase A (BG_A) con reciclado de concreto hidráulico (suministro, extendido, nivelación, humedecimiento y compactación con vibro compactador)	1,4988	m ³ /h	0,00	0,00	0,00
3864	Imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 (suministro, barrido superficie y riego)	71,7475	m ² /h	287,31	4,00	0,50
3867	Riego de liga con emulsión asfáltica CRR-2 (suministro, barrido superficie y riego)	71,7475	m ² /h	287,31	4,00	0,50
4568	Mezcla densa en caliente MD-12 asfalto 80-100 (suministro, extendido y nivelación manual y compactación)	7,1799	m ³ /h	28,73	4,00	0,50
6860	Base granular clase A (BG-A) estabilizada con cemento asfáltico convencional tipo MGEA_A (incluye suministro, transporte, colocación y compactación)	7,1799	m ³ /h	40,22	5,60	0,70
7900	Suministro e instalación de geocelda (no incluye material de relleno)	14,6583	m ² /h	287,31	19,60	2,45

ITEM	DESCRIPCIÓN	ANÁLISIS DE TIEMPOS DE EJECUCIÓN - TRAMO MODELO				
		RENDIMIENTO	UNIDAD	ALTERNATIVA 3		
				CANTIDAD A INSTALAR	TIEMPO DE INSTALACIÓN	TIEMPO DE EJECUCIÓN (Jornal - 8h)
INS 7462	Transporte de pétreos (material de fresado - RAP)	16,2776	m ³ /h	48,84	3,00	0,38
INS 7462	Transporte de pétreos (calamina)	16,2776	m ³ /h	8,62	0,53	0,07
	Suministro de calamina (casquilla de laminación)	7,1799	m ³ /h	8,62	1,20	0,15
7972	Instalación de material de fresado. (Extendido y compactación con vibro compactador).	7,1799	m ³ /h	48,84	6,80	0,85

Fuente: Propia

Una vez definidos los rendimientos de obra, se presentan las programaciones realizadas en el software Microsoft Project 2013, con el fin de estimar el tiempo de ejecución proyectado del tramo modelo. Dicha programación se presenta en las capturas de pantalla de las figuras 52, 53 y 54. Además dichas programaciones pueden ser verificadas a detalle en el Anexo No. 8.

Figura 54. Cálculo de la duración del proyecto implementando la alternativa 1.

Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1.1 Alternativa 1 (Rajón + Sello)	20.52 días	mié 27/05/20	mié 24/06/20
1.1.1 REPLANTEO GENERAL	1.03 días	mié 27/05/20	jue 28/05/20
1.1.2 DEMOLICION PAVIMENTO ASFALTICO (Espesor Variable. Incluye Cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores max. 0.15m	2.77 días	jue 28/05/20	lun 01/06/20
1.1.3 EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	1.63 días	lun 01/06/20	mié 03/06/20
1.1.4 TRANSPORTE Y DISPOSICION FINAL DE ESCOMBROS EN SITIO AUTORIZADO (distancia de transporte 28 Km)	1.31 días	lun 01/06/20	mar 02/06/20
1.1.5 NIVELACION Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE	0.5 días	mié 03/06/20	mié 03/06/20
1.1.6 ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTE CON RAJÓN, INCLUYE EQUIPO DE COMPACTACIÓN (SUMINISTRO, EXTENDIDO, NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN CON EQUIPO MECÁNICO)	1.63 días	mié 03/06/20	vie 05/06/20
1.1.7 SUBBASE GRANULAR CLASE C (SBG_C) (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	2.88 días	jue 04/06/20	lun 08/06/20
1.1.8 GEOTEXTIL NT 4000 PARA SEPARACION SUBRASANTE/CAPAS GRANULARES (Incluye Suministro e Instalación)	0.38 días	lun 08/06/20	lun 08/06/20
1.1.9 SUBBASE GRANULAR CLASE A (SBG_A) CON RECICLADO DE CONCRETO HIDRAULICO (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	4.79 días	lun 08/06/20	mar 16/06/20
1.1.10 BASE GRANULAR CLASE A (BG_A) CON RECICLADO DE CONCRETO HIDRAULICO (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	4.79 días	mar 16/06/20	mar 23/06/20
1.1.11 IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-0 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	mar 23/06/20	mar 23/06/20
1.1.12 RIEGO DE LIGA CON EMULSION ASFALTICA CRR-2 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	mar 16/06/20	mar 16/06/20
1.1.13 MEZCLA DENSA EN CALIENTE MD-12 Asfalto 80-100 (Suministro, Extendido y Nivelación Manual y Compactación)	0.75 días	mar 23/06/20	mié 24/06/20
1.1.14 Terminación proyectada del tramo modelo con alternativa 1	0 días	mié 24/06/20	mié 24/06/20

Fuente: Propia

Se observa que la duración aproximada, para la ejecución de una estructura vial que implementa la alternativa de mejoramiento convencional es de 20.52 días.

Figura 55. Cálculo de la duración del proyecto implementando la alternativa 2.

▲ 1.2 Alternativa 2 (Geocelda + MGR)	19.85 días	mié 27/05/20	mar 23/06/20
1.2.1 REPLANTEO GENERAL	1.03 días	mié 27/05/20	jue 28/05/20
1.2.2 DEMOLICION PAVIMENTO ASFALTICO (Espesor Variable. Incluye Cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores max. 0.15m	2.77 días	jue 28/05/20	lun 01/06/20
1.2.3 EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	1.04 días	lun 01/06/20	mar 02/06/20
1.2.4 TRANSPORTE Y DISPOSICION FINAL DE ESCOMBROS EN SITIO AUTORIZADO (distancia de transporte 28 Km)	0.84 días	lun 01/06/20	mar 02/06/20
1.2.5 NIVELACION Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE	0.5 días	mar 02/06/20	mié 03/06/20
1.2.6 SUMINISTRO E INSTALACION DE GEOCELDA (No incluye material de relleno)	2.45 días	mié 03/06/20	vie 05/06/20
1.2.7 SUBBASE GRANULAR CLASE C (SBG_C) (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	1 día	vie 05/06/20	sáb 06/06/20
1.2.8 GEOTEXTIL NT 4000 PARA SEPARACION SUBRASANTE/CAPAS GRANULARES (Incluye Suministro e Instalación)	4.79 días	sáb 06/06/20	vie 12/06/20
1.2.9 SUBBASE GRANULAR CLASE A (SBG_A) CON RECICLADO DE CONCRETO HIDRAULICO (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	4.07 días	vie 12/06/20	vie 19/06/20
1.2.10 IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-0 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	vie 19/06/20	vie 19/06/20
1.2.11 BASE GRANULAR CLASE A (BG-A) ESTABILIZADA CON CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL TIPO MGEA_A (Incluye suministro, transporte, colocación y compactación).	0.7 días	vie 19/06/20	sáb 20/06/20
1.2.12 IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-0 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	sáb 20/06/20	mar 23/06/20
1.2.13 RIEGO DE LIGA CON EMULSION ASFALTICA CRR-2 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	sáb 20/06/20	sáb 20/06/20
1.2.14 MEZCLA DENSA EN CALIENTE MD-12 Asfalto 80-100 (Suministro, Extendido y Nivelación Manual y Compactación)	0.5 días	mar 23/06/20	mar 23/06/20

Fuente: Propia

En cuanto a la segunda alternativa, la duración calculada aproximada es de 19.85 días. Es de tener en cuenta que se reducen los tiempos de excavaciones mecánicas y manuales, asimismo se presenta una reducción en los tiempos de instalación de las capas granulares. Sin embargo, dicha reducción de tiempos se ve afectada por el aumento en el tiempo de la instalación del mejoramiento, dado que a diferencia de la colocación del rajón; el proceso de instalación de las geoceldas es más complejo y netamente manual.

Figura 56, Cálculo de la duración del proyecto implementando la alternativa 3.

1.3 Alternativa 3 (Geocelda + RAP + Calamina)	20.85 días	mié 27/05/20	mié 24/06/20
1.3.1 REPLANTEO GENERAL	1.03 días	mié 27/05/20	jue 28/05/20
1.3.2 DEMOLICION PAVIMENTO ASFALTICO (Espesor Variable. Incluye Cargue). No incluye transporte y disposición final de sobrantes. Rendimiento estimado para espesores max. 0.15m	2.77 días	jue 28/05/20	lun 01/06/20
1.3.3 EXCAVACION MECANICA EN MATERIAL COMUN (Incluye Cargue)	1.04 días	lun 01/06/20	mar 02/06/20
1.3.4 TRANSPORTE Y DISPOSICION FINAL DE ESCOMBROS EN SITIO AUTORIZADO (distancia de transporte 28 Km)	0.84 días	lun 01/06/20	mar 02/06/20
1.3.5 NIVELACION Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE	0.5 días	mar 02/06/20	mié 03/06/20
1.3.6 SUMINISTRO E INSTALACION DE GEOCELDA (No incluye material de relleno)	2.45 días	mié 03/06/20	vie 05/06/20
1.3.7 TRANSPORTE DE PETREOS (MATERIAL DE FRESADO - RAP)	0.38 días	mié 03/06/20	mié 03/06/20
1.3.8 TRANSPORTE DE PETREOS (CALAMINA)	0.07 días	mié 03/06/20	mié 03/06/20
1.3.9 INSTALACIÓN DE CALAMINA (Casquilla de Laminación)	0.15 días	vie 05/06/20	vie 05/06/20
1.3.10 INSTALACIÓN DE MATERIAL DE FRESADO. (Extendido y compactación con vibrocompactador).	0.85 días	vie 05/06/20	sáb 06/06/20
1.3.11 SUBBASE GRANULAR CLASE C (SBG_C) (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	1 día	sáb 06/06/20	lun 08/06/20
1.3.12 GEOTEXTIL NT 4000 PARA SEPARACION SUBRASANTE/CAPAS GRANULARES (Incluye Suministro e Instalación)	4.79 días	lun 08/06/20	mar 16/06/20
1.3.13 SUBBASE GRANULAR CLASE A (SBG_A) CON RECICLADO DE CONCRETO HIDRAULICO (Suministro, Extendido, Nivelación, Humedecimiento y Compactación con vibrocompactador)	4.07 días	mar 16/06/20	sáb 20/06/20
1.3.14 IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-0 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	sáb 20/06/20	mar 23/06/20
1.3.15 BASE GRANULAR CLASE A (BG-A) ESTABILIZADA CON CEMENTO ASFALTICO CONVENCIONAL TIPO MGEA_A (Incluye suministro, transporte, colocación y compactación).	0.7 días	mar 23/06/20	mar 23/06/20
1.3.16 IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-0 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	mar 23/06/20	mié 24/06/20
1.3.17 RIEGO DE LIGA CON EMULSION ASFALTICA CRR-2 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	0.5 días	mar 23/06/20	mar 23/06/20
1.3.18 MEZCLA DENSA EN CALIENTE MD-12 Asfalto 80-100 (Suministro, Extendido y Nivelación Manual y Compactación)	0.5 días	mié 24/06/20	mié 24/06/20
1.3.19 Terminación proyectada del tramo modelo con alternativa 1	0 días	mié 24/06/20	mié 24/06/20

Fuente: Propia

En cuanto a la alternativa 3, se estima un tiempo de ejecución de 20.85 días. El cual es mayor al de la alternativa 2, pero menor al de la alternativa 1. Esto se debe a la actividad referente al suministro de los materiales de lleno de la geocelda.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que al ser un material dosificado teóricamente, se debe realizar el proceso de combinación física en obra o en los puntos de acopio. Viéndose afectado por ese factor el rendimiento de obra.

Es importante comentar, que el cálculo de tiempos estimados en cada una de las alternativas constructivas; se realizó bajo parámetros o condiciones ideales. Lo que quiere decir que no se tuvieron en cuenta factores que afectan la ejecución de actividades como el caso de la condición climática, acceso a las obras, topografía del terreno, la zona de trabajo, la cadena de suministro de los insumos requeridos, la ejecución de renovación de redes, entre otros.

16. COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS DE OTRAS INVESTIGACIONES Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS TRAS LA IMPLEMENTACIÓN DE GEOCELDAS Y MATERIALES RECICLADOS

Se relacionan a continuación algunas investigaciones en las que se hizo uso de las geoceldas con un lleno de materiales reciclados:

Tabla 70. Conclusiones reportadas en otras investigaciones del comportamiento de la geoceldas y un lleno de material reciclado

INVESTIGACIÓN	CONCLUSIONES
<p><i>Experimental Study on Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases under Static and Cyclic Loading</i>⁸³: en este proyecto de investigación realizaron pruebas de placa con carga estática y cíclica a mediana y gran escala sobre capas de geoceldas con un lleno de RAP.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Aumento significativo de la resistencia y la rigidez de la muestra de RAP. •Reducción de la deformación inicial y la tasa de fluencia del RAP. •Mejoramiento del rendimiento de la capa de RAP. •El refuerzo de geoceldas NPA redujo las deformaciones permanentes y aumentó porcentaje de deformaciones elásticas de la capa de RAP. •El refuerzo de geoceldas redujo las tensiones verticales transferidas a la subrasante y aumentó el ángulo de distribución de tensiones
<p><i>A Large Test Box Study on Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases over Weak Subgrade under Cyclic Loading.</i>⁸⁴: se utilizó geocelda para confinar bases de RAP no reforzadas y reforzadas sobre una subrasante débil (CBR objetivo del 2%) y se probaron bajo carga cíclica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Reducción de la deformación permanente y la distribución de la tensión vertical en la interfaz entre la base y la subrasante •Aumento en el porcentaje de deformación elástica en comparación con la base no reforzada.
<p><i>Experimental Study On Resilient Behavior Of Geocell-Reinforced Recycled Asphalt Pavement Base Layer: Model Development</i>⁸⁵: se realizaron pruebas de placa con cargas cíclicas sobre una configuración de prueba de laboratorio a gran escala para analizar el comportamiento resiliente de las bases de RAP reforzadas con geoceldas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Mejoramiento del rendimiento de las bases RAP. •El confinamiento resultado del uso de la geocelda ofreció resistencia adicional contra el movimiento lateral de la base RAP. •El refuerzo de la geocelda redujo significativamente las deformaciones permanentes y elásticas de la base RAP en comparación con la de las bases RAP no reforzadas, aumentando así el módulo elástico de la capa base reforzada. •La capa base RAP reforzada con geoceldas actuó como una base rígida del colchón y resultó en una

⁸³ Geo Congress, March 25 a 29 / 2012 - ASCE – American Society Civil Engineers. Oakland California.

⁸⁴ Geo Congress, March 25 a 29 / 2012 - ASCE – American Society Civil Engineers. Oakland California.

⁸⁵ Manikanta, Saladhi. University of Texas at Arligton. Tesis para optar por el título de Magister en Ingeniería Civil.

INVESTIGACIÓN	CONCLUSIONES
	menor compresión de la base RAP y la subrasante. •El refuerzo de geocelda redujo significativamente las deformaciones permanentes de la base RAP aproximadamente en un 50% en comparación con la de la base RAP no reforzada.
Experimental Study on Geocell-reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Over Weak Subgrade Under Static Loading ⁸⁶ : En esta investigación se realizaron pruebas de carga estática con incrementos, sobre una capa de RAP reforzado con geoceldas, para medir la carga transferida a la zapata a través de un anillo de prueba pre-calibrado, con el fin de medir los asentamientos.	•Aumento de la capacidad de carga de la Geocelda y Las bases RAP reforzadas con geomalla son aportadas por tres mecanismos principales, a saber, efecto de resistencia lateral, efecto de dispersión de tensión vertical y efecto de membrana •Excelente distribución de la carga, gracias al uso de la geocelda •Mejora de la capacidad de carga y rigidez en comparación con la base RAP no reforzadas

Fuente: Autores

Con respecto a la investigación desarrollada en este documento y de manera general al usar geoceldas con un lleno compuesto por una mezcla de RAP y calamina, se puede afirmar que:

- Mejora en el aporte estructural comparado con un sistema de mejoramiento con geocelda y lleno en materiales granulares convencionales ó con el sistema de mejoramiento convencional (Rajón y sello en material granular de cantera).
- Disminución en las deformaciones.
- Mayor transmisibilidad de esfuerzos al suelo de apoyo.
- Mayor rentabilidad al momento de ser implementado en obras de infraestructura vial, dicha ventaja económica se da debido al uso del material reciclado, ya que su obtención reduce costos de explotación.
- Disminución en los espesores de capas granulares y carpetas asfálticas.

Las ventajas ambientales del uso de estos sistemas son:

- Reducción en la cantidad de material de cantera, el que es un recurso no renovable
- Aprovechamiento de materiales sobrantes en otras etapas constructivas
- Reducción de horas/maquina, lo que significa una disminución de emisión de gases.

⁸⁶ Parmar, Rahul & Gandhi, Abhay & Shah, Manish. (2016). Experimental Study on Geocell-reinforced Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Over Weak Subgrade Under Static Loading.

17. CONCLUSIONES

- Al igual que en estudios anteriores realizados, se confirma que el pavimentos asfáltico reciclado RAP es un material idóneo para el empleo como agregado en mezclas o dosificación de nuevos materiales por contar con un buen desempeño y propiedades mecánicas, al provenir de capas asfálticas en donde el principio fundamental de la selección de sus componentes es la calidad de cada uno de ellos.
- El RAP, presenta una distribución de tamaños de sus partículas discontinua. Lo que quiere decir que, no cumple con los parámetros establecidos por la normatividad IDU e INVIAS en cuanto a granulometría se refiere. Lo anterior se debe a que el proceso de recuperación de dicho material durante los procesos constructivos no se realiza de manera estándar, se emplean diferentes tipos de equipos o las condiciones en las que se encuentran dichos materiales no son las mismas en todos los casos.
- Teniendo en cuenta que el RAP no presenta una adecuada composición para considerarse dentro del grupo de agregados. Sin embargo; es pertinente decir que, mediante la implementación de tratamientos o técnicas que permitan mejorar las características generales del mismo, se puede garantizar que se realice un correcto aprovechamiento del material. Una de las técnicas alternativas a emplearse, es la dosificación o combinación con otros materiales que aporten propiedades y a su vez garanticen el cumplimiento de los requisitos establecidos por la normatividad colombiana en cuanto a materiales para la construcción de vías urbanas y carreteras.
- La implementación de materiales reciclados en la industria de la construcción es de vital importancia, dado que permiten reducir el impacto ambiental asociado a la explotación de la materia prima, a la disposición de residuos de construcción y reducción de los tiempos de intervención. Por tal motivo, el Gobierno de Colombia exige a partir de la legislación (Decretos, Leyes y Resoluciones), la utilización de los mismos.
- La cadena de producción de insumos para la construcción, como el caso de la industria minera y la siderúrgica generan anualmente millones de toneladas de materia prima. A su vez durante la producción de dichos insumos, se generan residuos con alto potencial de aprovechamiento. Algunos de ellos conocidos comercialmente como calamina o cascarilla de laminación y el RAP, que al ser

usados en la industria de la construcción, generan impactos positivos a nivel general. Uno de ellos es la combinación de los mismos para la generación de agregados funcionales.

- Por medio de la aplicación de los protocolos generados por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU y el Instituto Nacional de Vías INVIAS, para la evaluación de materiales de construcción, se logró determinar que el RAP presenta una distribución de tamaños con tendencia gruesa y a su vez baja cantidad de partículas finas. Por otro lado la calamina presenta tendencia hacia la fracción fina de tamices, factor que demuestra la posibilidad de combinar los dos materiales con el fin de obtener una fórmula de trabajo que permita su uso en la construcción de estructuras de pavimento.
- Se determinó experimentalmente que al combinar materiales de tipo granular reciclados como el caso del pavimento asfáltico reciclado RAP y la calamina, en una proporción del 85% y 15% respectivamente; se logra obtener un nuevo material de construcción, que satisface los requisitos establecidos por las normas técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano IDU, garantizando así la calidad y el empleo seguro de dichos materiales en capas de base y subbase granular para la construcción de vías en la ciudad de Bogotá.
- Por medio de la caracterización del material compuesto por 85% RAP y 15% calamina, se determinó que combinación satisface los requisitos de calidad establecidos en las especificaciones IDU ET-2011, artículo 400: Capas granulares de base y subbase. En términos de granulometría el material se encuentra dentro de la categoría de Base granular tipo 1; adicionalmente presenta un comportamiento mecánico óptimo, presenta buenas características de dureza por tener un porcentaje de desgaste en la máquina de los Ángeles de 27.6%, el porcentaje de desgaste en el aparato micro Deval es del 17,3% y el porcentaje de pérdida del 10% de finos es generado bajo la aplicación de una carga de 20.50 kN con una relación húmedo seco del 86.7%.
- Se demostró experimentalmente que ante la acción de factores químicos la combinación de material presenta un porcentaje de desgaste del 6.22% frente a la acción del sulfato de magnesio.
- La fracción fina de la mezcla no presenta plasticidad, el valor de equivalente de arena se obtuvo un total de 31% superando así en 6 unidades porcentuales a

lo establecido en el artículo 400 de 2011 y se determinó que el valor de azul de metileno es de 4.5.

- El porcentaje de angularidad del agregado fino, de partículas alargadas y de partículas planas, se encuentra dentro del rango máximo permitido y que la capacidad de soporte del material o CBR es del 114,5%, superando así en un 14.5% el mínimo requerido por el IDU.
- Lo mencionado en términos de caracterización del material propuesto, es indicativo de que la combinación 85% RAP y 15% calamina, puede ser empleado en la construcción de capas de material granular de base y sub base granular; sin embargo también puede ser empleado como complemento de sistemas de mejoramiento de subrasante empleando nuevas tecnologías como el caso del uso de materiales geosintéticos.
- El mejoramiento de subrasantes con material pétreo como el caso del rajón, constituye una de las técnicas predilectas por el gremio de la construcción de vías en el país, no obstante se ha demostrado por medio de este documento que es recomendable adoptar nuevas técnicas de mejoramiento. Entre ellas se destaca el uso de las geoceldas o unidades de confinamiento celular, las cuales interactúan favorablemente con materiales de tipo granular de bajas cualidades; ya que aportan capacidad portante y propiedades de confinamiento lateral; lo cual garantiza la estabilidad y crecimiento de la vida útil de la infraestructura.
- Se logró demostrar que empleando sistemas de mejoramiento compuesto por la combinación de materiales geocelda, RAP y calamina; se obtiene una mejora en el aporte estructural del orden del 19.8% respecto a un sistema de mejoramiento con geocelda y lleno en materiales granulares convencionales y de un 37.8% comparado con el sistema de mejoramiento convencional (Rajón y sello en material granular de cantera). Lo anterior debido a que los CBR calculados de la interacción mejoramiento subrasante natural son de 5.69%, 4.75% y 4.13% respectivamente.

Este aumento sustancial de capacidad se da gracias al valor individual del CBR del conjunto RAP y Calamina (114,5%), en combinación con las propiedades de confinamiento lateral y redistribución de esfuerzos que aporta la geocelda.

- Cada una de las tres alternativas de estructura de pavimento planteadas, cumplen con el valor de las deformaciones por tracción en las carpetas asfálticas, generadas en sentido de la aplicación de las cargas vehiculares y a su vez en sentido perpendicular a la misma. Siendo menores las deformaciones presentadas para el sistema de mejoramiento de la alternativa que emplea geocelda con lleno en materiales convencionales con un valor $\delta_{xx} = 2.5519 \times 10^{-5}$ metros y $\delta_{yy} = 2.2678 \times 10^{-5}$ metros.

No obstante, el sistema que emplea el material de lleno compuesto de un 85% RAP y 15% también cumple con dicho parámetro de cumplimiento de diseño; dado que se obtienen deformaciones por tracción en ambos sentidos del orden del 7% de la admisible.

- El valor de la deformación vertical máxima generada en las subrasantes se da en este caso, en la alternativa que emplea rajón como mejoramiento. Sin embargo; debido a que es requerido ejecutar mayor profundidad de excavación para la instalación del mismo, no se tiene en cuenta al momento de compararlo respecto de las dos alternativas que implementan geocelda. Siendo así, menor la deformación vertical presentada en subrasantes mejoradas con el sistema de geocelda y llenos convencionales; ya que se obtiene un valor para el caso de estudio, del 47.38% de la deformación admisible.

A pesar de lo anterior se recomienda el reemplazo del material de lleno de las unidades de confinamiento; por la mezcla de 85% RAP y 15% calamina, dado que presenta una confiabilidad del 45.59% en el valor obtenido de deformaciones verticales; siendo menor a la requerida por el método de evaluación de pavimentos de la Shell.

- En cuanto al parámetro de esfuerzos transmitidos a la subrasante, la mejor alternativa es la implementación del sistema No. 2 (Mejoramiento con geocelda y lleno en materiales convencionales), dado que el esfuerzo que se transfiere a la subrasante es de 0.1464 Kg/cm^2 , respecto a los 0.1557 Kg/cm^2 calculados para la alternativa con RAP y calamina. No obstante, el sistema geocelda - RAP calamina permite mayor transmisibilidad de esfuerzos al suelo de apoyo (0.7387 Kg/cm^2 respecto a 0.6115 Kg/cm^2 de la alternativa 2). Por tanto se concluye que mecánicamente, presenta mejor comportamiento el sistema propuesto por medio de la investigación realizada.

- En términos de presupuesto; el sistema de mejoramiento de subrasantes Geocelda – RAP – Calamina, presenta mayor rentabilidad al momento de ser implementado en obras de infraestructura vial. Lo anterior se sustenta en el hecho de que una estructura de pavimento convencional, empleando un mejoramiento con material pétreo o rajón tiene un costo aproximado de \$430.064 COP por metro cuadrado de intervención, por otro lado el sistema con geoceldas y llenos en materiales de cantera convencionales cuesta alrededor de \$416.039 COP por metro cuadrado y el sistema propuesto presenta un valor calculado por unidad de área de \$387.960 COP. Dicha ventaja económica se da debido al uso del material reciclado, ya que su obtención reduce costos de explotación.

Adicionalmente, el uso de las geoceldas garantiza que las profundidades de excavación y los espesores de capas granulares y capas asfálticas sean menores, trayendo consigo ahorros de hasta el 40%. Por último se puede evitar la intervención de redes de infraestructura de servicios públicos, lo cual representa en promedio un 10.35% del valor ejecutado en obras según los datos suministrados por las empresas que facilitaron la ejecución del presente documento.

- Los beneficios en tiempos de ejecución de estructuras con mejoramiento que emplean geocelda, no representan un cambio sustancial respecto a los sistemas de construcción convencionales. Esto debido a que el proceso de instalación de las geoceldas requiere de personal capacitado y supervisión constante, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del sistema, por otra parte la ejecución de dichas actividades en su mayoría es manual ya que requiere extender y amarrar individualmente cada unidad (tacos y grapas).
- Una vez determinado el excelente comportamiento mecánico, el factor presupuestal y el factor tiempo; se recomienda y se concluye la viabilidad de la implementación del sistema de mejoramiento Geocelda – RAP – Calamina.

Además, se aporta a la reducción o mitigación del impacto ambiental causado por las obras de ingeniería; debido a que se reduce la explotación de fuentes naturales, las emisiones de gases nocivos por explotaciones en minas a cielo abierto y operación de maquinaria minera, la disposición de escombros y el deterioro del entorno en donde son depositados; trayendo consigo un desarrollo sostenible y socialmente eficiente.

- En cada una de las investigaciones realizadas sobre el comportamiento de los sistemas de geoceldas y materiales reciclados, se obtuvieron resultados positivos en cuanto a disminución de deformaciones y mejora de la capacidad portante de la subrasante. Por lo tanto se puede afirmar que el material de relleno de las geoceldas no debe ser necesariamente un material granular de cantera, ya que se observa un buen comportamiento del sistema al usar RCI, RAP y otros materiales reciclados. Es importante tener en cuenta que el lleno que se use para las geoceldas sea un material que permita su compactación y cumpla con una caracterización mínima donde se evalúen plasticidad, resistencia, forma y limpieza.

18. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar los estudios sobre técnicas de mejoramiento de subrasantes implementando unidades de confinamiento celular o; lo anterior basado en los resultados que se obtuvieron con el desarrollo del presente documento. Entre ellos se destacan, el aporte que estas conllevan en términos del aumento de las propiedades mecánicas de los suelos de soporte, la reducción de costos de producción y operación, la optimización de los tiempos de ejecución. Adicionalmente se logró demostrar que estos sistemas combinados con materiales de menor calidad a los comúnmente empleados, presentan un comportamiento adecuado para generar nuevos conjuntos.
- Si se desea implementar el contenido del presente documento en algún caso técnico especial, es necesario tener en cuenta factores como el suministro de material. Lo anterior, debido a que el material conocido como calamina empieza a presentar restricciones de suministro por parte de las fabricas figuradoras de acero, ya que en diversos estudios se ha demostrado la utilidad de dicho subproducto al ser combinado con otros materiales como adiciones en la preparación de cementos, concretos, mezclas asfálticas y el ya demostrado en esta investigación.
- El RAP puede complementarse con otros materiales de menor calidad como el caso de recibos o suelo granular remanente proveniente de los procesos de excavación. Sin embargo se recomienda, realizar el respectivo proceso de caracterización y dosificación con el fin de determinar la calidad de la combinación y así poder delimitar el alcance o uso de la misma en los procesos constructivos.
- El presente estudio puede ser tomado como base, para la ejecución de investigaciones adicionales. Una de ellas puede ser aplicar el procedimiento definido en el desarrollo del trabajo y verificar en campo mediante la aplicación de un tramo de prueba si las condiciones teóricas determinadas efectivamente se cumplen. Un método es la ejecución de las actividades constructivas y la posterior verificación de las deflexiones por ensayos de deflectometría FWD.
- Dado que la determinación del módulo resiliente del material propuesto para el lleno de las unidades de confinamiento celular (RAP 85% y calamina 15%), se realizó por medio de la aplicación de correlaciones empíricas y Tablas generadas en diversas investigaciones a nivel mundial; se recomienda en

futuras investigaciones gestionar el apoyo técnico y logístico con el fin de determinar dicho parámetro en laboratorio mediante la ejecución del ensayo triaxial dinámico. Lo anterior se fundamenta en que los métodos aplicados pueden generar múltiples incertidumbres, en vista de que se omiten factores como el caso de que el CBR es una medida empírica indirecta en donde se aplican niveles de esfuerzos mayores a los que realmente se generan en un pavimento, trayendo consigo el sobredimensionamiento de las capas granulares de una estructura de pavimento.

- Puede ser un excelente ejercicio académico, la implementación de software de análisis estructural de pavimentos como lo son PITRA PAVE, WINDEPAV, BISAR 3.0, 3D MOVE, CEDEM, entre otros; en las cátedras de diseño y construcción de pavimentos. Dado que por medio de la aplicación de los mismos se llega a entender con más detalle el proceso de interacción que se genera entre las cargas del tránsito, las capas granulares diseñadas y la subrasante natural encontrada.
- El análisis de costos, presupuestos y rendimientos; se realizó partiendo de condiciones ideales dadas en la ciudad de Bogotá. Por tal razón si se desea implementar la propuesta realizada, es necesario ejecutar un análisis detallado teniendo en cuenta las condiciones reales de las zonas a intervenir. Entre ellas se destacan las condiciones geotécnicas, meteorológicas, morfométricas, de acceso a las zonas a intervenir, seguridad, orden público, cadenas de suministro de materiales y rendimientos de la mano de obra en el sector.

Adicionalmente, se recomienda realizar una evaluación exhaustiva de las redes de servicios públicos, dado que en la mayoría de casos lo establecido en la documentación técnica entregada por las ESP (Empresas de servicios públicos), no coincide con lo plasmado en el terreno; trayendo consigo consecuencias en materia de daños e intervenciones de las mismas. Lo que se traduce a su vez en aumento significativo de los costos y tiempos de ejecución.

BIBLIOGRAFIA

ALBA BURGOS, Paula Alejandra. Diagnóstico sobre el empleo de material Asfáltico reciclado (RAP) en Bogotá. 2015. Trabajo de grado (ingeniería Civil). Universidad de Los Andes. Repositorio.

AMÉZQUITA ANDRADE, Jesús David y GANTIVA QUINTERO, Cristhian David. Modificación de un concreto asfáltico MDC-19 mediante la sustitución del llenante mineral natural por calamina. 2017. Trabajo de grado (Ingeniería Topográfica). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

ARQUYS ARQUITECTURA [sitio web]. Bogotá. ARQUYS. Construcción – confinamiento celular [consultado el 09 de Diciembre de 2019]. Disponible en <https://www.arqhys.com/arquitectura/confinamiento-celular.html>

BRAN SANCHEZ, José Guillermo; GONZALEZ CRUZ, Rafael Antonio y ORTIZ LANDAVERDE, Hugo Alejandro. Métodos de ensayo para la determinación de las principales propiedades dinámicas de los suelos de El Salvador. 2009. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad de El Salvador. 106 p.

BUITRAGO ZARABANDA, Juan Felipe y GONZÁLEZ MÉNDEZ, Ashley Nataly. Caracterización de RAP e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente. 2016. Trabajo de grado (ingeniería civil). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD

CAÑÓN LEGUIZAMÓN, Sandra Milena. Beneficios técnicos y económicos en el uso de geoceldas en estructuras de pavimentos frente a los sistemas tradicionales. 2018. Trabajo de grado (especialización en seguridad de la información). Universidad Católica de Colombia. Repositorio.

CASTRO CABEZA, Andrea Paola. Investigación sobre mezclas asfálticas en frío 100% recicladas con adición de residuos sólidos. 2018. Trabajo de grado (magister en ingeniería civil). Fundación Universidad del Norte. Repositorio.

CHAPARRO QUEVEDO, Ana María y HERNÁNDEZ RUBIO, Maira Alejandra. Estudio de caso (Parte B): utilización de fresado estabilizado con emulsión catiónica de rompimiento lento como capa de base en la localidad de suba, calle

134 entre kr 151a y kr 152 en el barrio Lisboa, Bogotá D.C. 2018. Trabajo de grado (especialización en ingeniería de pavimentos). Universidad Militar Nueva Granada. Repositorio.

CHÁVEZ AVILÉS, Carlos Mauricio. ECHEVARRÍA CHÁVEZ, José Orlando. IRIONDO TOBAR, Víctor Hugo. Modelación multicapa elástica de pavimentos flexibles en El Salvador mediante la aplicación de Software. 2018. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad de El Salvador. Repositorio.

COBARRUVIAS LIMÓN, Pedro. Presentación fundamentos del reciclado de mezclas asfálticas. 2015. Grupo Surfax México

DUARTE DUARTE, María Camila y SIERRA PARRA, Valeria. 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. 2011. Trabajo de grado (pregrado ingeniería civil). Pontificia Universidad Javeriana. Repositorio.

GEOCELDAS S.A. TECNOLOGÍA DE CONFINAMIENTO CELULAR [sitio web]. Argentina. GEOCELDAS. Historia. [consultado el 09 de Diciembre de 2019]. Disponible en <https://www.geoceldas.com/historia>

Guía para el buen uso de los geosintéticos, GU-GE-007 V_01. Instituto de Desarrollo Urbano IDU. Gestión Documental

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Norma Técnica Colombiana, Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Santafé de Bogotá.: ICONTEC, 2008. NTC 1486.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Capítulo 3 – Afirmados, Subbases y bases. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. ART. 300.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Capítulo 3 – Afirmados, Subbases y bases. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. ART. 330

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 100 – Suelos: CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-148

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 100 – Suelos: Determinación del límite líquido de los suelos. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-125

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 100 – Suelos: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-126

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-238

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Determinación del valor de 10% de finos. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-224

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Equivalente de arena de suelos y agregados finos. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-133

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Valor de azul de metileno en agregados finos. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-235

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-211

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-230

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-227

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría). Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-239

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los Ángeles. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-218

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Sección 200 – Agregados pétreos: Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. Bogotá D.C.: INVIAS 2013. I.N.V. E-220

LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES. MANUAL DE OPERACIÓN Software PITRA-PAVE 1.0.0. Universidad de Costa Rica.

MARTÍN GARZÓN, Laura Mercedes. Evaluación del desempeño estructural de un sistema de confinamiento celular como alternativa de mejoramiento de suelos. 2017. Trabajo de grado (Maestría). Pontificia Universidad Javeriana de Colombia. Repositorio

ORTIZ HURTADO, Camilo Andrés y BAUTISTA PRIETO, Pedro Alejandro. Trabajo de Grado Ingeniería Civil. Universidad Católica de Colombia. Repositorio.

PAVIMENTOS VERDES, Lamanuel UCR. Laboratorio Nacional de materiales y modelos estructurales, Ficha técnica Pavimento Asfáltico Reciclado. Universidad de Costa Rica.

Presentación Primer Foro Internacional para el Manejo Integral de RCD en el Programa Basura Cero - Escombros Cero”. Instituto de Desarrollo Urbano IDU, Bogotá 2012.

REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Diseño racional de pavimentos. Primera edición. Bogotá D.C. CEJA – Centro Editorial Javeriano. 2003.

RINCÓN VILLAMIL, Jesenia María Solange y SANABRIA REINA, Yudith Lorena. Modificación del concreto asfáltico (MDC-19) con la sustitución del llenante mineral por calamina y la incorporación del aditivo “HUSIL”. 2017. Trabajo de grado (ingeniería topográfica). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Repositorio RIUD.

RIVERA LOPEZ, Gerardo Antonio. Concreto Simple. Popayán, Cauca. Universidad del Cauca, Facultad de ingeniería. 1992. 486 P.

ROJAS HENAO, Lina María y SIERRA RESTREPO, Simón. Evaluación del uso de cascarilla de laminación como agregado fino en la elaboración de concreto convencional. 2016. Trabajo de grado (ingeniería de procesos). Universidad EAFI, Escuela de Ingeniería. Repositorio.

RONDÓN QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO Fredy Alberto. Pavimentos - Materiales, construcción y diseño. Primera edición. 2015.

SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE SDA. Decreto 2397 de Abril 15 de 2011. Publicado en el Registro Distrital 4646 de mayo 3 de 2011

SUSPES PAÉZ, Angie Catalinda; CARPIO PATIÑO, Jefferson y MALDONADO TINJACÁ, Héctor Giovanni. Tramo de prueba con estructura convencional y la implementación de geoceldas en la cl 128a entre Tv 60 y Ak 72 Bogotá. 2018. Trabajo de grado (especialización en ingeniería de pavimentos). Universidad Católica de Colombia. Repositorio.

TEXDELTA NONWOVENS TEJIDOS TÉCNICOS [sitio web]. Cocentaina España. TEXDELTA. Geosintéticos. Geoceldas. Funciones y aplicaciones principales [consultado el 10 de diciembre de 2019]. Disponible en texdelta.com/blog/geoceldas-funciones-y-aplicaciones-principales/



UNIDAD DE GESTIÓN MUNICIPAL PITRA – LANAMME UCR LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. Documento técnico denominado Presión de inflado de los neumáticos y la forma en que afecta a la estructura del pavimento. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San José de Costa Rica. Febrero de 2013.

URRESTA MELO, Yinna Marcela. Análisis de alternativas de diseño con geoceldas, en estructuras de pavimento, estudio de caso carrera 12, Funza – Cundinamarca. 2014. Trabajo de grado (especialización en ingeniería de pavimentos). Universidad Militar Nueva Granada. Repositorio.

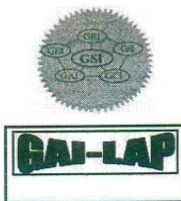
E. J. Yoder; M. W. Witczak. Principles of Pavement Desing. 2nd Edición. Universidad de Maryland. John Wiley & Sons, Incorporated. 1991.

ANEXOS

Anexo 1. Caracterización de la geocelda.

		Certificado De Geocelda LOTE: 15001618
Modelo: GEOCELDA PERF TW306 15 CM 4.16X9.76 M	Cliente: TDM Colombia	
Código: 200100	Cantidad: 11530.85 m ²	

PROPIEDAD	METODO	UNIDAD	VALOR	FRECUENCIA	TDM Geosintéticos
Espesor nominal de pared (-10%)	GRI-GS14	mm	1.25 (-10%)	Por Lote	1.21
Espesor Incluyendo Texturado	ASTM D5199	mm	1.50 (-5%+10%)	Por Lote	1.61
Densidad / Density	ASTM D792	g/cm ³	0.935 a 0.955	90,000 kg	0.942
Eficiencia de la Soldadura	GRI-GS13	%	100	9,000 kg	135
Resistencia al Pelado	USCOE GL-86-19 Apéndice A / ISO 13426-1 Método A	N	2130	Por Lote	3136
Textura - Indentaciones romboidales	Medido	indentaciones por cm ²	22-31	Por Lote	23
Diámetro de perforaciones	Medido	mm	10	Por Lote	11
Resistencia a la Fluencia	ASTM D6693 - Tipo IV	kN/m	18	9000 kg	20.1
Elongación a la Fluencia	ASTM D6693 Tipo IV	%	12		21.2
Resistencia a la Ruptura	ASTM D6693 - Tipo IV	kN/m	13		16.7
Elongación a la Ruptura	ASTM D6693 Tipo IV	%	100		304.9
Resistencia al desgarro	ASTM D1004		155	20,000 kg	182.7
Resistencia al Punzonado	ASTM D 4833	N	330	20,000 kg	472.3
Contenido negro de humo	ASTM D4218	%	2% - 3%	9,000 kg	2.55
Dispersión de negro de humo	ASTM D5596	—	Nota 1	20,000 kg	1
Standard OIT	ASTM D3895	min	100	90,000 kg	158







Roberto Díaz Palacios

Calle D Mz. A Lt. 17 las Praderas De Lurín – Lima

Jefe Laboratorio y Control Calidad

rdiaz@tdmgeosinteticos.com.pe

T. (511) 6300330 | ANX 3007



Certificado De Geocelda

LOTE: 15001559

Modelo: GEOCELDA PERF TW306 15 CM 4.16X9.76 M

Cliente: TDM Colombia

Código: 200100

Cantidad: 11530.85m²

PROPIEDAD	METODO	UNIDAD	VALOR	FRECUENCIA	TDM Geosintéticos
Espesor nominal de pared (-10%)	GRI-GS14	mm	1.25 (-10%)	Por Lote	1.21
Espesor Incluyendo Texturado	ASTM D5199	mm	1.50 (-5%+10%)	Por Lote	1.61
Densidad / Density	ASTM D792	g/cm3	0.935 a 0.955	90,000 kg	0.942
Eficiencia de la Soldadura	GRI-GS13	%	100	9,000 kg	135
Resistencia al Pelado	USCOE GL-86-19 Apéndice A / ISO 13426-1 Método A	N	2130	Por Lote	3136
Textura - Indentaciones romboidales	Medido	indentaciones por cm2	22-31	Por Lote	23
Diámetro de perforaciones	Medido	mm	10	Por Lote	11
Resistencia a la Fluencia	ASTM D6693 - Tipo IV	kN/m	18	9000 kg	20.1
Elongación a la Fluencia	ASTM D6693 Tipo IV	%	12		21.2
Resistencia a la Ruptura	ASTM D6693 - Tipo IV	kN/m	13		16.7
Elongación a la Ruptura	ASTM D6693 Tipo IV	%	100		304.9
Resistencia al desgarro	ASTM D1004		155	20,000 kg	182.7
Resistencia al Punzonado	ASTM D 4833	N	330	20,000 kg	472.3
Contenido negro de humo	ASTM D4218	%	2% - 3%	9,000 kg	2.55
Dispersión de negro de humo	ASTM D5596	—	Nota 1	20,000 kg	1
Standard OIT	ASTM D3895	min	100	90,000 kg	158



Roberto Díaz Palacios

Jefe Laboratorio y Control Calidad




Calle D Mz. A Lt. 17 las Praderas De Lurín – Lima


T. (511) 6300330 | ANX 3007

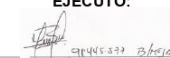

rdiaz@tdmgeosinteticos.com.pe

Anexo 2. Ensayos de laboratorio muestra: Pavimento asfáltico reciclado.

	ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS				Código: HC-LAB-001		
	INV E - 213 - 13				Versión: 00		
					Fecha: 08/01/2018		
					Pág 1 de 1		
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)			CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez		
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra			TIPO:	Pavimento asfáltico recuperado (RAP)		
DESCRIPCIÓN	Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.			FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019		
ESPECIFICACIÓN:	Ninguna						
Peso de material seco antes de lavado (g):		5823,3		Peso de material despues de lavado (g):		5548,90	
						ESPECIFICACIÓN: Ninguna	
						RESULTADOS	
TAMIZ	PESO	%	RETENIDO	%	LIMITES	CUMPLE	
ALTERNO	NORMAL	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	PASA	SI - NO	
	(mm)						
3"	76,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---	
2 1/2"	63,500	0,0	0,00	0,00	100,00	---	
2"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00	---	
1 1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---	
1"	25,400	356,3	6,12	6,12	93,88	---	
3/4"	19,050	536,3	9,21	15,33	84,67	---	
3/8"	9,500	1652,4	28,38	43,70	56,30	---	
No. 4	4,750	984,5	16,91	60,61	39,39	---	
No. 10	2,000	1162,3	19,96	80,57	19,43	---	
No. 40	0,425	754,8	12,96	93,53	6,47	---	
No. 200	0,075	102,3	1,76	95,29	4,71	---	
FONDO		274,40	4,71	100,00	0,00		
						TAMAÑO MÁXIMO :	
						D10	0,075
						D30	0,150
						D60	0,350
						Cc	0,857
						Cu	4,667

CURVA GRANULOMÉTRICA



OBSERVACIONES	EJECUTÓ:  Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ:  Ing. Luis Rincon Gerente
----------------------	---	---



RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENOS DE 37,5 mm (1 1/2") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES INV E-218-13

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geoceltda y materiales reciclados (RAP y calamina)
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra
DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edmín Rodríguez Universidad Distrital Francisco José de Caldas
TIPO: Pavimento asfáltico recuperado (RAP)
FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019

GRANULOMETRIA		NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA (g)			
A		12	5000±25			
B		11	4584±25			
C		8	3330±20			
D		6	2500±15			

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37,5 (1 1/2")	25,0 (1")				
25,0 (1")	19,0 (3/4")	1250±25			
19,0 (3/4")	12,5 (1/2")	1250±25			
12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	1250±10	2500±10		
9,5 (3/8")	6,3 (1/4")	1250±10	2500±10	2500±10	
6,3 (1/4")	4,75 (No. 4)			2500±10	
4,75 (No. 4)	2,36 (No. 8)				5000±10
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

DESGASTE MATERIAL SECO

Peso seco inicial (g)	5003
Peso seco 100 revoluciones (g)	4685
Peso seco 500 revoluciones (g)	3320

RESULTADOS		ESPECIFICACIÓN
Desgaste 100 revoluciones (%)	6,4	No especifica
Desgaste 500 revoluciones (%)	33,6	No especifica

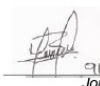
DESGASTE MATERIAL HÚMEDO

Peso inicial SSS*** (g)	No aplica
Peso final 500 revoluciones (g)	No aplica

RESULTADOS		ESPECIFICACIÓN
Desgaste despues de 48 horas, 500 revoluciones (%)	No aplica	No especifica
Relación húmedo / seco 500 revoluciones	No aplica	No especifica

*** Saturado superficialmente seco

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

911445577 B.A.S.
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



**DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN,
UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL
INV E - 238 - 13**

Código: HC-LAB-003

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra **TIPO:** Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gns oscuro de matriz arenosa **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

TABLA No. 1: MUESTRA SECA AL HORNO DE 19 mm		
TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
19,1	16	375
16	12,5	375
12,5	9,5	750

TABLA No. 2: MUESTRA SECA AL HORNO DE TAMAÑO MENOR DE 16 mm		
TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
12,5	9,5	750
9,5	6,3	375
6,3	4,75	375

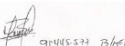
TABLA No. 3: MUESTRA SECA AL HORNO DE TAMAÑO MENOR DE 12,5 mm		
TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
9,5	6,3	750
6,3	4,75	750

Tabla utilizada	1
Peso seco inicial (g)	1502,2
Peso seco final (g)	1033,5
Carga abrasiva (g)	5000
Cantidad de agua (Lt)	2
Tiempo de rotación (min)	120
Tamaño máximo	19,1 mm

DETERMINACIÓN	RESULTADO	ESPECIFICADO
Perdida por abrasión en Micro-Deval	31,2%	No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:



Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:



Ing. Luis Rincón
Gerente



**DETERMINACIÓN DEL VALOR DEL 10% DE FINOS
INVE - 224 - 13**

Código: HC-LAB-003

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cil. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra
DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
TIPO: Pavimento asfáltico recuperado (RAP)
FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019

MATERIAL SECO

ENSAYO	No 1	No 2	No 3	PROMEDIO	RESULTADO	ESPECIFICACION
Penetración	20 mm					
Masa del agregado	2641,8	2701,6	2675,4		Porcentaje de finos producidos f1%	
Carga aplicada (N)	144400	147100	148200	146567		
Masa del material retenido en tamiz No 8	2400,3	2410,6	2442,1		Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN)	No especifica
Porcentaje de finos producidos (%)	9,1	10,8	8,7	9,5		

MATERIAL HUMEDO

ENSAYO	No 1	No 2	No 3	PROMEDIO	RESULTADO	
Penetración	20 mm					
Masa del agregado	2621,5	2612,3	2638,4		Porcentaje de finos producidos f1%	11,4%
Carga aplicada (N)	134800	130600	132700	132700		
Masa del material retenido en tamiz No 8	2344,4	2327,6	2300,6		Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN)	120,4
Porcentaje de finos producidos (%)	10,6	10,9	12,8	11,4		

RELACIÓN HÚMEDO/SECO

Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN) Muestra húmeda	120,45	RESULTADO	ESPECIFICACION
Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN) muestra seca	151,50		
Relación húmedo/seco (%)	79,5%		No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO

Código: HC-LAB-005
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

INV E-220-13

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FECHA: 2019-12-02
PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra
MATERIAL: Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

Solución utilizada

Sulfato de magnesio.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE AGREGADOS

TAMAÑO DEL TAMIZ		GRADACIÓN MUESTRA ORIGINAL (%)	PESO DE FRACCIONES (g)		% PÉRDIDA	% PÉRDIDA CORREGIDA
			ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO		
PASA	RETIENE					
FRACCION GRUESA						
1 1/2"	1"	---	---	---	---	---
1"	3/4"	6,12	1500,40	1325,30	11,67	0,71
3/4"	1/2"	12,28	660,90	554,80	16,05	1,97
1/2"	3/8"	25,31	330,10	284,50	13,81	3,50
3/8"	No. 4	16,91	300,30	260,10	13,39	2,26
FRACCION FINA						
No. 4	No. 8	---	---	---		
No. 8	No. 16	---	---	---		
No. 16	No. 30	---	---	---		
No. 30	No. 50	---	---	---		

*Pérdida por acción de la solidez = 8,44%
Valor especificado = No especifica*

EXAMEN CUALITATIVO DE LAS PARTÍCULAS GRUESAS

TAMAÑO TAMIZ		PARTÍCULAS QUE EXHIBEN ALTERACIÓN								No. Total de partículas antes del ensayo
		ROTURA		DESINTEGRACIÓN		AGRIETAMIENTO		EXFOLIACIÓN		
		No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
2 1/2"	1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2"	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	-

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

REVISÓ Y APROBÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

Ing. Luis Rincon
Gerente



LÍMITES DE ATTERBERG: LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO
NTC-4630-99 / INV E-125-126

Código: HC-LAB-002
 Versión: 00
 Fecha: 08/01/2018
 Pág 1 de 1

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Sivia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cl. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra	TIPO:	Pavimento asfáltico recuperado (RAP)
DESCRIPCIÓN:	Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019
ESPECIFICACIÓN:	Ninguna		

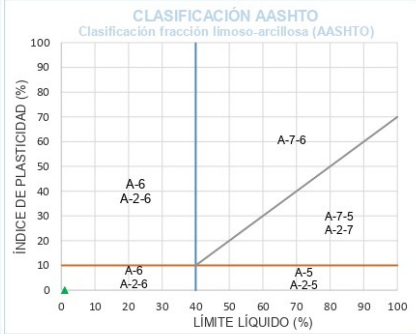
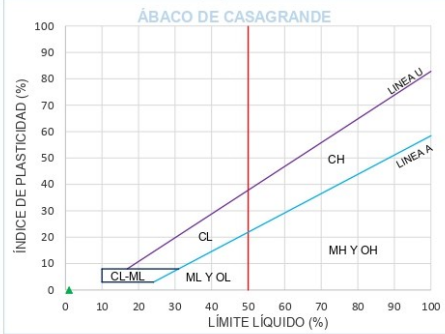
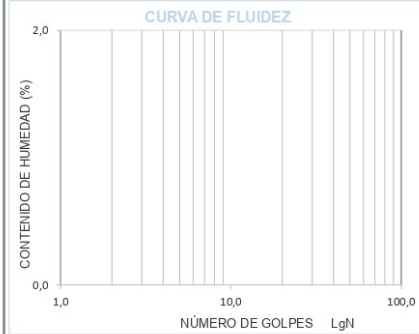
LIMITES DE ATTERBERG

HUMEDAD NATURAL

LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO				Wn (%)	
No. De Golpes				Recipiente No.					
Recipiente No.				P1: Pr+Masa húmeda (g)					
P1: Pr+Masa húmeda (g)				P2: Pr+Masa seca (g)					
P2: Pr+Masa seca (g)				P3: Pr+Masa recipiente (g)					
P3: Pr+Masa recipiente (g)				Masa seca (g)					
Masa seca (g)				HUMEDAD (%)					
HUMEDAD (%)									

Se hizo el ensayo y no presenta límite líquido: N.L.

Se hizo el ensayo y no presenta límite plástico: N.P.



RESULTADOS			
LÍMITE LÍQUIDO (%):	NO LÍQUIDO	% GRAVA:	60,61
LÍMITE PLÁSTICO (%):	NO PLÁSTICO	% ARENA:	34,68
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%):	N.L. - N.P.	% FINOS:	4,71
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.:	---	CLASIFICACIÓN AASHTO:	---

OBSERVACIONES	EJECUTÓ: Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ: Ing. Luis Rincon Gerente
----------------------	--	--



EQUIVALENTE DE ARENA

INV E-133-13

Código: HC-LAB-004
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra
DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
TIPO: Pavimento asfáltico recuperado (RAP)
FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019

Probetas No	A	B	C
Constante tornillo (mm)	254,0	254,0	254,0
Lectura de la Arena + Cte Tornillo	341,0	339,0	340,0
Lectura de la Arena	87,0	85,0	86,0
Lectura de la Arcilla	277,0	278,0	279,0
Equivalente de Arena %	31,4	30,6	30,8
	32	31	31
	31,3%		

RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Promedio equivalente de Arena (%)	No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

REVISÓ Y APROBÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

Ing. Luis Rincon
Gerente



VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS Y LLENANTES MINERALES

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas

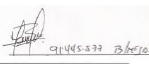
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra **TIPO:** Pavimento asfáltico recuperado (RAP)


DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa. **FECHA:** 2019/dic/02

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

Concentración utilizada de Azul de Metileno en mg/ml de solución		5
Cantidad utilizada de gramos de material seco pasa tamiz de 75µm (No 200)		10
Adición de solución de azul de metileno No	Mililitros de solución de Azul de Metileno adicionados	Mililitros de solución de Azul de Metileno acumulados
1	1,0	1,0
2	1,0	2,0
3	1,0	3,0
4	1,0	4,0
5	1,0	5,0
6	1,0	6,0
7	0,5	6,5
8	0,5	7,0
9	0,5	7,5
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
		RESULTADO
Valor de Azul de Metileno en agregados finos y llenante mineral (mg/g)		3,8
		ESPECIFICACIÓN
		No especifica

OBSERVACIONES:

EJECUTÓ:

911445-277 20/12/19
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



DETERMINACION DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS INV E-211-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **FECHA:** 2019/dic/02

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra **MATERIAL:** Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.

ESPECIFICACIÓN: Ninguna


TAMAÑO DE PARTÍCULAS ENTRE LOS TAMICES				MASA FRACCIÓN PARA ENSAYO (g)
Tamiz				
Retiene		Pasa		
(mm)	Pulg.	(mm)	Pulg.	
4,75	No. 4	9,5	3/8"	1000
9,5	3/8"	19	3/4"	2000
19	3/4"	37,5	1 1/2"	3000
Mayores de 37,5 (1 1/2")				5000

Tamices		% Gradacion original	Peso de fracciones antes del ensayo (g)	Peso retenido tamiz inferior (g)	% pérdida en peso	% pérdida corregido
Pasa	Retiene					
Mayores a 37,5 mm		---	---	---	---	---
1 1/2"	3/4"	6,12	3002,5	3002,5	0,0%	0,00
3/4"	3/8"	37,59	2001,1	2001,1	0,0%	0,00
3/8"	No. 4	16,91	1000,8	1000,8	0,0%	0,00
No. 4	No. 16	19,21	25,0	25,0	0,0%	0,00
SUMA		79,8				0,00

	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Porcentaje Pérdida	0,00	No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:


Jorge Peña

Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:


Ing. Luis Rincon

Gerente



PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO

INV E-227-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	FECHA:	2019/dic/02
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
MATERIAL:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra	FUENTE:	Pavimento asfáltico recuperado (RAP)
DESCRIPCIÓN:	Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.		
ESPECIFICACIÓN:	Ninguna		

Criterio de aceptación de partículas fracturadas	1 Cara	N.E.	Masa total de la muestra de material grueso evaluada (g)	1.500,0
	2 Caras	N.E.		
Tamaño máximo nominal de la muestra (mm)		19,5	Tamiz sobre el cual se retuvo la muestra al principio del ensayo (mm)	19,5

Criterio caras fracturadas : 1 cara

TAMICES				Que cumple con criterio	Que no cumple con criterio	Que se encuentra en frontera del criterio	Porcentaje de caras fracturadas : 1 cara
Pasa		Retiene					
Pulg	mm	Pulg	mm				
3 1/2"	90,0	3"	75,0	-	-	-	100%
3"	75,0	2 1/2"	63,0	-	-	-	
2 1/2"	63,0	2"	50,0	-	-	-	
2"	50,0	1 1/2"	37,5	-	-	-	
1 1/2"	37,5	1"	25,0	-	-	-	
1"	25,0	3/4"	19,0	400,2	0,0	0,0	
3/4"	19,0	1/2"	12,5	1.326,3	0,0	0,0	
1/2"	12,5	3/8"	9,5	840,6	0,0	0,0	
SUMA				2567,1	0,0	0,0	

CRITERIO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Porcentaje de partículas que cumplen con criterio: 1 cara	100%	No especifica

Criterio caras fracturadas : 2 o más caras

TAMICES				Que cumple con criterio	Que no cumple con criterio	Que se encuentra en frontera del criterio	Porcentaje de caras fracturadas : 2 o más caras
Pasa		Retiene					
Pulg	mm	Pulg	mm				
3 1/2"	90,0	3"	75,0	-	-	-	100%
3"	75,0	2 1/2"	63,0	-	-	-	
2 1/2"	63,0	2"	50,0	-	-	-	
2"	50,0	1 1/2"	37,5	-	-	-	
1 1/2"	37,5	1"	25,0	-	-	-	
1"	25,0	3/4"	19,0	400,2	0,0	0,0	
3/4"	19,0	1/2"	12,5	1.326,3	0,0	0,0	
1/2"	12,5	3/8"	9,5	840,6	0,0	0,0	
SUMA				2567,1	0,0	0,0	

CRITERIO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Porcentaje de partículas que cumplen con criterio: 2 o más caras	100%	No especifica

OBSERVACIONES	EJECUTÓ:	REVISÓ Y APROBÓ:
Partículas fracturadas calculado por masa de partículas	 9145533 B/PEÑA Jorge Peña Laboratorista	 Ing. Luis Rincon Gerente



**ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS
AGREGADOS PARA CARRETERAS**

INV E-230-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	FECHA:	2019/dic/02
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
MATERIAL:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra	FUENTE:	Pavimento asfáltico recuperado (RAP)
DESCRIPCIÓN:	Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.		
ESPECIFICACIÓN:	Ninguna		

ÍNDICE DE APLANAMIENTO									
MASA DE LA MUESTRA DE ENSAYO (g)					5002,6				
Tamices				Masa inicial de cada fracción	Granulometría (fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos del 5% del total)	Masa de las partículas planas (mi)	Índice de aplanamiento por fracción	
Pasa		Retiene		(Ri)				(mi/Ri)x100	
Pulg	mm	Pulg	mm	g	%	%	g	%	
2 1/2"	63	2"	50	0,0	0,0	-	-	-	
2"	50	1 1/2"	37,5	0,0	0,0	-	-	-	
1 1/2"	37,5	1"	25	0,0	0,0	-	-	-	
1"	25	3/4"	19	140,1	5,8	-	22,5	16,1	
3/4"	19	1/2"	12,5	1100,6	45,5	-	181,0	16,4	
1/2"	12,5	3/8"	9,5	700,4	29,0	-	130,1	18,6	
3/8"	9,5	1/4"	6,3	475,2	19,7	-	102,0	21,5	
TOTALES				M1 = 2416,3	100,0	--	M3 = 435,6	-	

% ÍNDICE APLANAMIENTO

18

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO									
MASA DE LA MUESTRA DE ENSAYO (g)					2001,1				
Tamices				Masa inicial de cada fracción	Granulometría (fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos del 5% del total)	Masa de las partículas alargadas (ni)	Índice de alargamiento por fracción	
Pasa		Retiene		(Ri)				(ni/Ri)x100	
Pulg	mm	Pulg	mm	g	%	%	g	%	
2 1/2"	63	2"	50	0,0	0,0	-	-	-	
2"	50	1 1/2"	37,5	0,0	0,0	-	-	-	
1 1/2"	37,5	1"	25	0,0	0,0	-	-	-	
1"	25	3/4"	19	125,1	5,1	-	28,8	23,0	
3/4"	19	1/2"	12,5	1111,3	45,1	-	151,5	13,6	
1/2"	12,5	3/8"	9,5	715,8	29,1	-	108,0	15,1	
3/8"	9,5	1/4"	6,3	510,6	20,7	-	112,2	22,0	
TOTALES				M1 = 2462,8	100,0	--	M3 = 400,5	-	

% ÍNDICE ALARGAMIENTO

16

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS EN AGREGADOS FINOS NO COMPACTADOS (INFLUENCIADO POR LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS, LA TEXTURA SUPERFICIAL Y LA GRANULOMETRÍA).

INV E-239-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019					
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)							
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Muestra tomada en acopio de obra	MATERIAL:	Pavimento asfáltico recuperado (RAP)					
DESCRIPCIÓN:	Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.							
ESPECIFICACIÓN:	Ninguna							
Método utilizado:	A	G: Densidad específica del agregado fino (pasa tamiz No. 4)	2,610					
Masa del recipiente vacío (g)	25,30							
VOLUMEN DEL MEDIDOR CILINDRICO								
M: masa neta del recipiente + agua (g)	25,43	Temperatura del agua (° C)	25,0					
M: masa neta del agua (g)	0,13	D: Densidad del agua, kg/cm³	0,997075					
	V: Volumen del cilindro, ml		90,26					
FRACCIÓN DE TAMAÑO INDIVIDUAL								
FRACCIÓN DE TAMAÑO INDIVIDUAL				MASA (g)	Densidad específica del agregado (Tamiz No. 8 - Tamiz No. 100)	Masa del recipiente + muestra (g)		
Pasa		Retiene				Prueba No. 1	Prueba No. 2	Promedio
Pulg	mm	Pulg	mm					
No. 8	2,36	No. 16	1,18	44,0	2,611	180,0	182,3	181,2
No. 16	1,18	No. 30	600 µm	57,0				
No. 30	600 µm	No. 50	300 µm	72,0				
No. 50	300 µm	No. 100	150 µm	17,0				
TOTALES				190,0				
Us: vacíos del agregado fino sin compactar (%)					$U_s = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} * 100$	33,9		
OBSERVACIONES				EJECUTÓ:		REVISÓ Y APROBÓ:		
				Jorge Peña Laboratorista		Ing. Luis Rincon Gerente		



ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PRÓCTOR MODIFICADO

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

INV E-142-13

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 /
Muestra tomada en acopio de obra **MATERIAL:** Pavimento asfáltico recuperado (RAP)

DESCRIPCIÓN: Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

Método:	D	Diámetro del Molde (cm)	15,00	No. Capas	5
Peso del Martillo (Lbs)	10,00	Altura de la Muestra (cm)	12,03	Volumen (cm ³)	2126

PESO UNITARIO

Molde N°	1	2	3	4
Peso de Molde + Suelo compacto (g):	10039	10323	10628	10594
Peso del molde (g):	6057	6057	6057	6057
Peso del Molde del suelo Compacto (g):	3982	4266	4571	4537
Volumen Del Suelo Compacto (cm ³):	2126	2126	2126	2126
Densidad del suelo Húmedo (g/cm ³):	1,873	2,007	2,150	2,134
Contenido de Humedad (%):	2,3	4,3	6,4	8,2
Densidad del suelo seco (g/cm ³):	1,831	1,924	2,021	1,973

CONTENIDO DE HUMEDAD

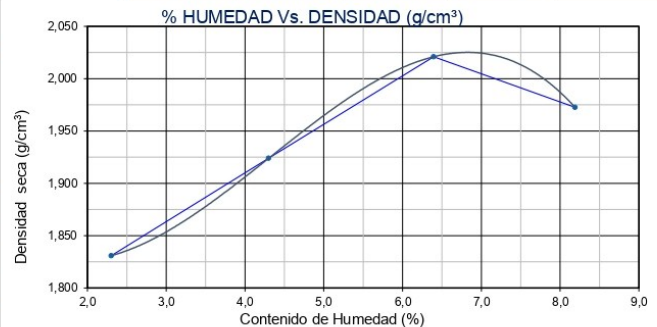
Recipiente N°	12	14	4	10
P1- Peso Recipiente + Suelo Húmedo (g):	527,6	584,9	569,0	506,1
P2- Peso Recipiente + Suelo Seco (g):	516,7	562,9	539,1	471,5
Peso Del Agua (g):	10,9	22,0	29,9	34,6
P3- Peso del recipiente (g):	43,6	51,4	71,5	49,0
Peso del suelo Seco (g):	473,1	511,5	467,6	422,5
Contenido de Humedad (%):	2,3	4,3	6,4	8,2

LIMITES DE ATTERBERG

LÍMITE LIQUIDO (%):	N.L.
LÍMITE PLASTICO (%):	N.P.
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%):	N.L. - N.P.

RESULTADOS

DENSIDAD MÁXIMA (g/cm ³):	2,025
HUMEDAD ÓPTIMA (%):	6,8




OBSERVACIONES

EJECUTÓ:



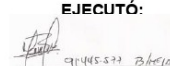

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente

		ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE (CBR) MÉTODO I NTC 2122 - ASMT D1883-99			Código: HC-LAB-006			
					Versión: 00			
					Fecha: 08/01/2018			
Cliente:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas				Fecha:	2019/dic/03		
Proyecto:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)							
Descripción del material:	Muestra de pavimento asfáltico recuperado de color gris oscuro de matriz arenosa.							
Numero de Golpes por Capa	56		25		10			
Numero de Molde	46		24		69			
Sobrecarga (kg)	1,3		2,9		3,5			
Diámetro de la muestra (cm)	15,02		15,04		15,01			
Área de la muestra (cm²)	177,19		177,66		176,95			
Altura de la muestra (cm)	12,21		12,27		12,38			
Volumen de la muestra (cm³)	2163		2180		2191			
EXPANSION								
Lectura Inicial (mm)	0,4100		0,5600		0,9100			
Lectura Final (mm)	0,4300		0,5900		0,9500			
% De Expansión	0,1638		0,2445		0,3231			
Penetración (in)	Penetración (mm)	Esfuerzo Estándar (lbf/in²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in²)
0,000	0,000	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,025	0,635	-	287,5	211,4	225,3	165,7	149,7	110,1
0,050	1,270	-	566,1	416,2	443,9	326,3	294,8	216,7
0,075	1,905	-	850,6	625,4	661,4	486,3	441,1	324,3
0,100	2,540	1000	1131,6	832,0	881,9	648,4	586,8	431,4
0,125	3,175	-	1325,7	974,7	1031,4	758,3	687,1	505,1
0,150	3,810	-	1523,5	1120,2	1187,1	872,8	789,2	580,3
0,175	4,445	-	1709,8	1257,1	1329,9	977,8	884,4	650,3
0,200	5,080	1500	1915,5	1408,3	1488,4	1094,3	979,5	720,1
0,300	7,620	1900	2771,6	2037,8	2158,7	1587,1	1432,7	1053,3
0,400	10,160	2300	3487,0	2563,7	2704,1	1988,1	1804,6	1326,8
0,500	12,700	2600	4257,6	3130,3	3305,3	2430,2	2202,7	1619,5
% CBR a 0.100 [in]			83,20		64,84		43,14	
% CBR a 0.200 [in]			93,89		72,96		48,01	
% CBR Corregido a 0.100 [in]			83,20		64,84		43,14	
% CBR Corregido a 0.200 [in]			93,89		72,96		48,01	
CONTENIDO DE HUMEDAD								
	Compactación	Después de inmersión	Compactación	Después de inmersión	Compactación	Después de inmersión		
Numero del recipiente	12	25	1	47	51	61		
Peso suelo humedo+rec. (g)	353,01	402,37	336,81	382,44	422,45	333,37		
Peso suelo seco+rec. (g)	336,20	381,70	321,70	362,90	402,50	316,50		
Peso del recipiente (g)	30,52	42,85	51,96	75,62	46,20	82,20		
Humedad (%)	5,5	6,1	5,6	6,8	5,6	7,2		
PESO UNITARIO								
Peso suelo+ Molde (g)	11072	11095	10953	10994	10421	10480		
Peso molde (g)	6085	6085	6321	6321	6194	6194		
Peso unitario Húmedo (g/cm³)	2,305	2,315	2,124	2,143	1,929	1,956		
Peso unitario Seco (g/cm³)	2,185	2,182	2,012	2,007	1,827	1,825		

Anexo 3. Ensayos de laboratorio muestra: Calamina.

	ANALISIS GRANULOMETRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS INV E - 213 - 13				Código: HC-LAB-001 Versión: 00 Fecha: 08/01/2018 Pág 1 de 1																																																																																																																				
	PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)			CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez																																																																																																																					
	FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta			TIPO: Calamina																																																																																																																					
	DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.			FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019																																																																																																																					
ESPECIFICACIÓN: Ninguna																																																																																																																									
Peso de material seco antes de lavado (g):		3328,5		Peso de material despues de lavado (g):		2989,80																																																																																																																			
ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares																																																																																																																									
RESULTADOS																																																																																																																									
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <thead> <tr> <th>TAMIZ</th> <th>PESO</th> <th>%</th> <th>RETENIDO</th> <th>%</th> <th>LIMITES</th> <th>CUMPLE</th> </tr> <tr> <th>ALTERNO</th> <th>NORMAL (mm)</th> <th>RETENIDO</th> <th>RETENIDO</th> <th>ACUMULADO</th> <th>PASA</th> <th>(% PASA)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>3"</td><td>76,100</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>---</td></tr> <tr><td>2 1/2"</td><td>63,500</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>---</td></tr> <tr><td>2"</td><td>50,800</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>---</td></tr> <tr><td>1 1/2"</td><td>38,100</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>---</td></tr> <tr><td>1"</td><td>25,400</td><td>0,0</td><td>0,00</td><td>0,00</td><td>100,00</td><td>---</td></tr> <tr><td>3/4"</td><td>19,050</td><td>13,2</td><td>0,40</td><td>0,40</td><td>99,60</td><td>---</td></tr> <tr><td>3/8"</td><td>9,500</td><td>91,5</td><td>2,75</td><td>3,15</td><td>96,85</td><td>---</td></tr> <tr><td>No. 4</td><td>4,750</td><td>87,3</td><td>2,62</td><td>5,77</td><td>94,23</td><td>---</td></tr> <tr><td>No. 10</td><td>2,000</td><td>314,4</td><td>9,45</td><td>15,21</td><td>84,79</td><td>---</td></tr> <tr><td>No. 40</td><td>0,425</td><td>659,4</td><td>19,81</td><td>35,02</td><td>64,98</td><td>---</td></tr> <tr><td>No. 200</td><td>0,075</td><td>1824,0</td><td>54,80</td><td>89,82</td><td>10,18</td><td>---</td></tr> <tr><td>FONDO</td><td></td><td>338,70</td><td>10,18</td><td>100,00</td><td>0,00</td><td>---</td></tr> </tbody> </table>		TAMIZ	PESO	%	RETENIDO	%	LIMITES	CUMPLE	ALTERNO	NORMAL (mm)	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	PASA	(% PASA)	3"	76,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---	2 1/2"	63,500	0,0	0,00	0,00	100,00	---	2"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00	---	1 1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---	1"	25,400	0,0	0,00	0,00	100,00	---	3/4"	19,050	13,2	0,40	0,40	99,60	---	3/8"	9,500	91,5	2,75	3,15	96,85	---	No. 4	4,750	87,3	2,62	5,77	94,23	---	No. 10	2,000	314,4	9,45	15,21	84,79	---	No. 40	0,425	659,4	19,81	35,02	64,98	---	No. 200	0,075	1824,0	54,80	89,82	10,18	---	FONDO		338,70	10,18	100,00	0,00	---	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; font-size: x-small;"> <tbody> <tr><td>% GRAVA :</td><td style="text-align: right;">5,77</td></tr> <tr><td>% ARENA :</td><td style="text-align: right;">84,06</td></tr> <tr><td>% FINOS :</td><td style="text-align: right;">10,18</td></tr> <tr><td colspan="2"> </td></tr> <tr><td>TAMANO MAXIMO :</td><td style="text-align: right;">1"</td></tr> <tr><td>D10</td><td style="text-align: right;">0,075</td></tr> <tr><td>D30</td><td style="text-align: right;">0,150</td></tr> <tr><td>D60</td><td style="text-align: right;">0,350</td></tr> <tr><td>Cc</td><td style="text-align: right;">0,857</td></tr> <tr><td>Cu</td><td style="text-align: right;">4,667</td></tr> </tbody> </table>		% GRAVA :	5,77	% ARENA :	84,06	% FINOS :	10,18			TAMANO MAXIMO :	1"	D10	0,075	D30	0,150	D60	0,350	Cc	0,857	Cu	4,667
TAMIZ	PESO	%	RETENIDO	%	LIMITES	CUMPLE																																																																																																																			
ALTERNO	NORMAL (mm)	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	PASA	(% PASA)																																																																																																																			
3"	76,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---																																																																																																																			
2 1/2"	63,500	0,0	0,00	0,00	100,00	---																																																																																																																			
2"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00	---																																																																																																																			
1 1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---																																																																																																																			
1"	25,400	0,0	0,00	0,00	100,00	---																																																																																																																			
3/4"	19,050	13,2	0,40	0,40	99,60	---																																																																																																																			
3/8"	9,500	91,5	2,75	3,15	96,85	---																																																																																																																			
No. 4	4,750	87,3	2,62	5,77	94,23	---																																																																																																																			
No. 10	2,000	314,4	9,45	15,21	84,79	---																																																																																																																			
No. 40	0,425	659,4	19,81	35,02	64,98	---																																																																																																																			
No. 200	0,075	1824,0	54,80	89,82	10,18	---																																																																																																																			
FONDO		338,70	10,18	100,00	0,00	---																																																																																																																			
% GRAVA :	5,77																																																																																																																								
% ARENA :	84,06																																																																																																																								
% FINOS :	10,18																																																																																																																								
TAMANO MAXIMO :	1"																																																																																																																								
D10	0,075																																																																																																																								
D30	0,150																																																																																																																								
D60	0,350																																																																																																																								
Cc	0,857																																																																																																																								
Cu	4,667																																																																																																																								
CURVA GRANULOMÉTRICA																																																																																																																									
																																																																																																																									
OBSERVACIONES 				EJECUTÓ:  Jorge Peña Laboratorista		REVISÓ Y APROBÓ:  Ing. Luis Rincon Gerente																																																																																																																			



RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENOS DE 37,5 mm (1 1/2") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES INV E-218-13

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)
FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta
DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
TIPO: Calamina
FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019

GRANULOMETRIA	NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA (g)
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37,5 (1 1/2")	25,0 (1")				
25,0 (1")	19,0 (3/4")	1250±25			
19,0 (3/4")	12,5 (1/2")	1250±25			
12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	1250±10	2500±10		
9,5 (3/8")	6,3 (1/4")	1250±10	2500±10	2500±10	
6,3 (1/4")	4,75 (No. 4)			2500±10	
4,75 (No. 4)	2,36 (No. 8)				5000±10
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

DESGASTE MATERIAL SECO	
Peso seco inicial (g)	5001
Peso seco 100 revoluciones (g)	4840
Peso seco 500 revoluciones (g)	4187

RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	
Desgaste 100 revoluciones (%)	3,2	No especifica
Desgaste 500 revoluciones (%)	16,3	No especifica

DESGASTE MATERIAL HÚMEDO	
Peso inicial SSS** (g)	No aplica
Peso final 500 revoluciones (g)	No aplica

RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	
Desgaste despues de 48 horas, 500 revoluciones (%)	No aplica	No especifica
Relación húmedo / seco 500 revoluciones	No aplica	No especifica

*** Saturado superficialmente seco

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN,
UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL
INV E - 238 - 13

Código: HC-LAB-003

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas

FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta **TIPO:** Calamina

DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro. **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

TABLA No. 1: MUESTRA SECA AL HORNO DE 19 mm		
TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
19,1	16	375
16	12,5	375
12,5	9,5	750

TABLA No. 2: MUESTRA SECA AL HORNO DE TAMAÑO MENOR DE 16 mm		
TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
12,5	9,5	750
9,5	6,3	375
6,3	4,75	375

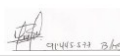
TABLA No. 3: MUESTRA SECA AL HORNO DE TAMAÑO MENOR DE 12,5 mm		
TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
9,5	6,3	750
6,3	4,75	750

Tabla utilizada	3
Peso seco inicial (g)	1500,9
Peso seco final (g)	1355,8
Carga abrasiva (g)	5000
Cantidad de agua (Lt)	2
Tiempo de rotación (min)	105
Tamaño máximo	12,5 mm

DETERMINACIÓN	RESULTADO	ESPECIFICADO
<i>Perdida por abrasión en Micro-Deval</i>	9,7%	No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:



Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:



Ing. Luis Rincon
Gerente



SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO

Código: HC-LAB-005
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

INV E-220-13

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FECHA: 2019-12-02
PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta
MATERIAL: Calamina
DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

Solución utilizada

Sulfato de magnesio.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE AGREGADOS

TAMAÑO DEL TAMIZ		GRADACIÓN MUESTRA ORIGINAL (%)	PESO DE FRACCIONES (g)		% PÉRDIDA	% PÉRDIDA CORREGIDA
PASA	RETIENE		ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO		
FRACCION GRUESA						
1 1/2"	1"	---	---	---	---	---
1"	3/4"	---	---	---	---	---
3/4"	1/2"	---	---	---	---	---
1/2"	3/8"	2,75	330,10	249,90	24,30	0,67
3/8"	No. 4	2,62	300,30	240,00	20,08	0,53
FRACCION FINA						
No. 4	No. 8	---	---	---		
No. 8	No. 16	---	---	---		
No. 16	No. 30	---	---	---		
No. 30	No. 50	---	---	---		

Pérdida por acción de la solidez = 1,19%
Valor especificado = No especifica

EXAMEN CUALITATIVO DE LAS PARTÍCULAS GRUESAS

TAMAÑO TAMIZ		PARTÍCULAS QUE EXHIBEN ALTERACIÓN								No. Total de partículas antes del ensayo
		ROTURA		DESINTEGRACIÓN		AGRIETAMIENTO		EXFOLIACIÓN		
		No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
2 1/2"	1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2"	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	-

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

REVISÓ Y APROBÓ:

59445533 Diaco

Jorge Peña
Laboratorista

Ing. Luis Rincon
Gerente



LÍMITES DE ATTERBERG: LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO
NTC-4630-99 / INV E-125-126

Código: HC-LAB-002
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

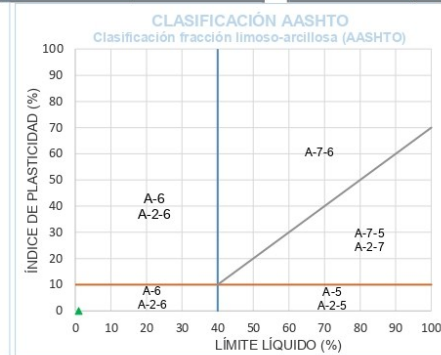
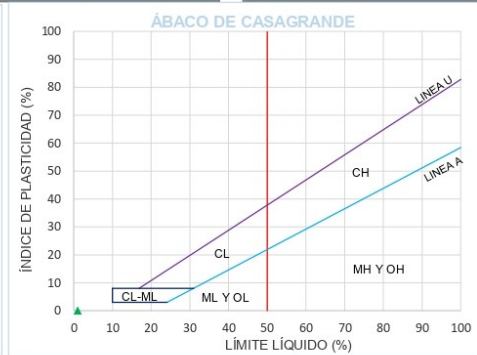
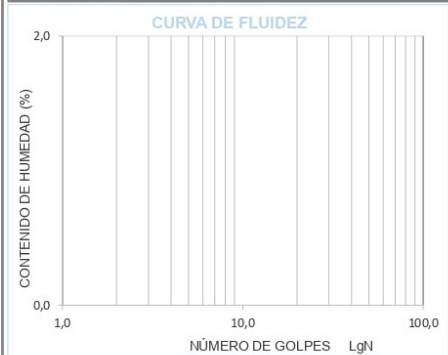
PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)
FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta
DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
TIPO: Calamina
FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019

LIMITES DE ATTERBERG

HUMEDAD NATURAL

LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO				Wn (%)	
No. De Golpes				Recipiente No.					
Recipiente No.				P1: Pr+Masa húmeda (g)					
P1: Pr+Masa húmeda (g)				P2: Pr+Masa seca (g)					
P2: Pr+Masa seca (g)				P3: Pr+Masa recipiente (g)					
P3: Pr+Masa recipiente (g)				Masa seca (g)					
Masa seca (g)				HUMEDAD (%)					
HUMEDAD (%)									



RESULTADOS			
LÍMITE LÍQUIDO (%):	NO LÍQUIDO	% GRAVA:	5,77
LÍMITE PLÁSTICO (%):	NO PLÁSTICO	% ARENA:	84,06
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%):	N.L. - N.P.	% FINOS:	10,18
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.:	---	CLASIFICACIÓN AASHTO:	---

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



EQUIVALENTE DE ARENA

INV E-133-13

Código: HC-LAB-004

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)
FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta
DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.
ESPECIFICACIÓN: Ninguna

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
TIPO: Calamina
FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019


Probetas No	A	B	C
Constante tornillo (mm)	254,0	254,0	254,0
Lectura de la Arena + Cte Tornillo	333,0	336,0	331,0
Lectura de la Arena	79,0	82,0	77,0
Lectura de la Arcilla	295,0	300,0	298,0
Equivalente de Arena %	26,8	27,3	25,8
	27	28	26
	27,0%		

RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Promedio equivalente de Arena (%)	27% No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

REVISÓ Y APROBÓ:


91445.577 B/H/10.
Jorge Peña
Laboratorista


Ing. Luis Rincon
Gerente

**SECOPIN**
SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIERIA PROFESIONAL**UL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS Y LLENANTES MINERALES**

Código: HC-LAB-003

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas

FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta **TIPO:** Calamina

DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro. **FECHA:** 2-12-2019

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

Concentración utilizada de Azul de Metileno en mg/ml de solución	5
Cantidad utilizada de gramos de material seco pasa tamiz de 75µm (No 200)	10

Adición de solución de azul de metileno No	Mililitros de solución de Azul de Metileno adicionados	Mililitros de solución de Azul de Metileno acumulados
1	1,0	1,0
2	1,0	2,0
3	1,0	3,0
4	1,0	4,0
5	1,0	5,0
6	1,0	6,0
7	1,0	7,0
8	1,0	8,0
9	1,0	9,0
10	1,0	10,0
11	1,0	11,0
12	1,0	12,0
13	1,0	13,0
14	1,0	14,0
15	1,0	15,0
16	1,0	16,0
17	0,5	14,5
18	0,5	15,5
19	0,5	16,5
20		

	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Valor de Azul de Metileno en agregados finos y llenante mineral (mg/g)	8,8	No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



**DETERMINACION DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS
INV E-211-13**

Código: HC-LAB-005
 Versión: 00
 Fecha: 08/01/2018
 Pág 1 de 1

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
 Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **FECHA:** 2019-12-02

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta **MATERIAL:** Calamina

DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

TAMAÑO DE PARTÍCULAS ENTRE LOS TAMICES				MASA FRACCIÓN PARA ENSAYO (g)
Tamiz				
Retiene		Pasa		
(mm)	Pulg.	(mm)	Pulg.	
4,75	No. 4	9,5	3/8"	1000
9,5	3/8"	19	3/4"	2000
19	3/4"	37,5	1 1/2"	3000
Mayores de 37,5 (1 1/2")				5000

Tamices		% Gradacion original	Peso de fracciones antes del ensayo (g)	Peso retenido tamiz inferior (g)	% pérdida en peso	% pérdida corregido
Pasa	Retiene					
Mayores a 37,5 mm		---	---	---	---	---
1 1/2"	3/4"	---	---	---	---	---
3/4"	3/8"	2,75	2002,3	2002,3	0,0%	0,00
3/8"	No. 4	2,62	1000,3	1000,3	0,0%	0,00
No. 4	No. 16	10,60	25,0	25	0,0%	0,00
SUMA		16,0				0,00

	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Porcentaje Pérdida	0,00	No especifica

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

 91445573 B/64510
 Jorge Peña
 Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

 Ing. Luis Rincon
 Gerente



DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS EN AGREGADOS FINOS NO COMPACTADOS (INFLUENCIADO POR LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS, LA TEXTURA SUPERFICIAL Y LA GRANULOMETRÍA).

INV E-239-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas

FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta

MATERIAL: Calamina

DESCRIPCIÓN: Cascarilla de laminación de color negro.

ESPECIFICACIÓN: Ninguna

Método utilizado: A

Masa del recipiente vacío (g) 25,30

G: Densidad específica del agregado fino (pasa tamiz No. 4) 2,613

VOLUMEN DEL MEDIDOR CILINDRICO

M: masa neta del recipiente + agua (g) 25,39

M: masa neta del agua (g) 0,09

V: Volumen del cilindro, ml 90,26

Temperatura del agua (° C) 25,0

D: Densidad del agua, kg/cm³ 0,997075

FRACCIÓN DE TAMAÑO INDIVIDUAL				MASA (g)	Densidad específica del agregado (Tamiz No. 8 - Tamiz No. 100)	Masa del recipiente + muestra (g)		
Pasa		Retiene				Prueba No. 1	Prueba No. 2	Promedio
Pulg	mm	Pulg	mm					
No. 8	2,36	No. 16	1,18	44,0				
No. 16	1,18	No. 30	600 µm	57,0				
No. 30	600 µm	No. 50	300 µm	72,0	2,877	191,2	192,2	
No. 50	300 µm	No. 100	150 µm	17,0			191,7	
TOTALES				190,0				


Us: vacíos del agregado fino sin compactar (%)

$$U_s = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right) * 100}{V}$$

35,9

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:


Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:


Ing. Luis Rincon
Gerente

**ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PRÓCTOR MODIFICADO**

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

INV E-142-13

CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
FUENTE:	Planta Diaco, Siberia / Tomada en acopio de planta	MATERIAL:	Calamina
DESCRIPCIÓN:	Cascarilla de laminación de color negro.		
ESPECIFICACIÓN:	Ninguna		

Método:	D	Diámetro del Molde (cm)	15,00	No. Capas	5
Peso del Martillo (Lbs)	10,00	Altura de la Muestra (cm)	12,03	Volumen (cm ³)	2126

PESO UNITARIO

Molde N°	1	2	3	4
Peso de Molde + Suelo compacto (g):	10721	10901	11110	11097
Peso del molde (g):	6057	6057	6057	6057
Peso del Molde del suelo Compacto (g):	4664	4844	5053	5040
Volumen Del Suelo Compacto (cm ³):	2126	2126	2126	2126
Densidad del suelo Húmedo (g/cm ³):	2,194	2,279	2,377	2,371
Contenido de Humedad (%):	1,8	2,9	3,8	5,0
Densidad del suelo seco (g/cm ³):	2,155	2,214	2,290	2,258

CONTENIDO DE HUMEDAD

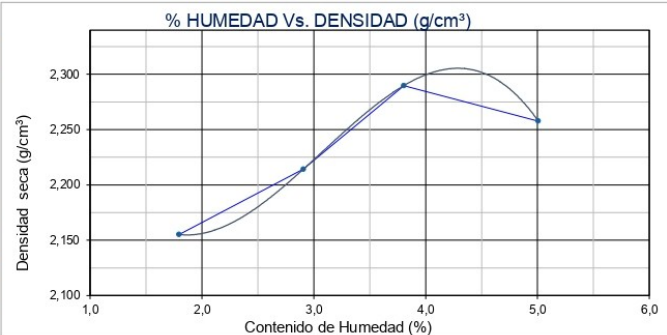
Recipiente N°	24	17	39	86
P1- Peso Recipiente + Suelo Húmedo (g):	636,8	642,6	599,1	680,2
P2- Peso Recipiente + Suelo Seco (g):	626,5	625,9	579,0	650,1
Peso Del Agua (g):	10,3	16,7	20,1	30,1
P3- Peso del recipiente (g):	52,6	51,4	50,7	48,9
Peso del suelo Seco (g):	573,9	574,5	528,3	601,2
Contenido de Humedad (%):	1,8	2,9	3,8	5,0


LIMITES DE ATTERBERG

LÍMITE LIQUIDO (%):	N.L.
LÍMITE PLASTICO (%):	N.P.
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%):	N.L. - N.P.

RESULTADOS

DENSIDAD MÁXIMA (g/cm ³):	2,310
HUMEDAD ÓPTIMA (%):	4,2

**OBSERVACIONES****EJECUTÓ:**Jorge Peña
Laboratorista**REVISÓ Y APROBÓ:**Ing. Luis Rincon
Gerente

		ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE (CBR) MÉTODO I				Código: HC-LAB-006				
		NTC 2122 - ASMT D1883-99				Versión: 00				
						Fecha: 08/01/2018				
Cliente:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas				Fecha:	3-12-2019				
Proyecto:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)									
Descripción del material:	Cascarilla de laminación de color negro.									
Numero de Golpes por Capa			56			25			10	
Numero de Molde			2			10			33	
Sobrecarga (kg)			2,3			1,5			3,4	
Diámetro de la muestra (cm)			15,00			15,01			15,03	
Área de la muestra (cm ²)			176,71			176,95			177,42	
Altura de la muestra (cm)			12,18			12,25			12,30	
Volumen de la muestra (cm ³)			2152			2168			2182	
EXPANSION										
Lectura Inicial	mm			0,2200			0,6600			0,8100
Lectura Final	mm			0,2300			0,6700			0,8300
% De Expansión			0,0821				0,0816		0,1626	
Penetración (in)	Penetración (mm)	Esfuerzo Estándar (lbf/in ²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in ²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in ²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in ²)		
0,000	0,000	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
0,025	0,635	-	801,1	589,0	658,1	483,8	458,0	336,7		
0,050	1,270	-	1144,3	841,3	936,4	688,5	653,0	480,1		
0,075	1,905	-	1430,1	1051,5	1171,6	861,4	828,4	609,0		
0,100	2,540	1000	1740,3	1279,5	1427,8	1049,8	1007,8	740,9		
0,125	3,175	-	2034,6	1495,9	1665,6	1224,6	1176,8	865,2		
0,150	3,810	-	2327,9	1711,5	1910,0	1404,3	1342,4	987,0		
0,175	4,445	-	2626,3	1930,9	2148,0	1579,3	1524,0	1120,5		
0,200	5,080	1500	2923,4	2149,4	2392,3	1758,9	1690,3	1242,7		
0,300	7,620	1900	4097,3	3012,5	3354,4	2466,2	2370,3	1742,7		
0,400	10,160	2300	5289,4	3889,0	4332,0	3185,0	3056,6	2247,3		
0,500	12,700	2600	6461,8	4750,9	5291,3	3890,3	3744,3	2752,9		
% CBR a 0.100 [in]			127,95		104,98		74,09			
% CBR a 0.200 [in]			143,29		117,26		82,85			
% CBR Corregido a 0.100 [in]			127,95		104,98		74,09			
% CBR Corregido a 0.200 [in]			143,29		117,26		82,85			
CONTENIDO DE HUMEDAD										
			Compactación	Después de inmersión	Compactación	Después de inmersión	Compactación	Después de inmersión		
Numero del recipiente			15	23	60	11	8	33		
Peso suelo humedo+rec.	(g)		1099,50	1000,20	1077,60	1033,20	1100,70	999,60		
Peso suelo seco+rec.	(g)		1060,10	961,80	1040,00	991,30	1061,00	955,80		
Peso del recipiente	(g)		98,10	88,60	92,20	100,20	88,60	80,20		
Humedad (%)			4,1	4,4	4,0	4,7	4,1	5,0		
PESO UNITARIO										
Peso suelo+ Molde	(g)		11348	11360	11262	11293	11109	11151		
Peso molde	(g)		6184	6184	6216	6216	6203	6203		
Peso unitario Húmedo	(g/cm ³)		2,399	2,405	2,328	2,342	2,248	2,267		
Peso unitario Seco	(g/cm ³)		2,305	2,303	2,239	2,237	2,160	2,159		



**ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE
(CBR) MÉTODO I
NTC 2122 - ASMT D1883-99**

Código: HC-LAB-006

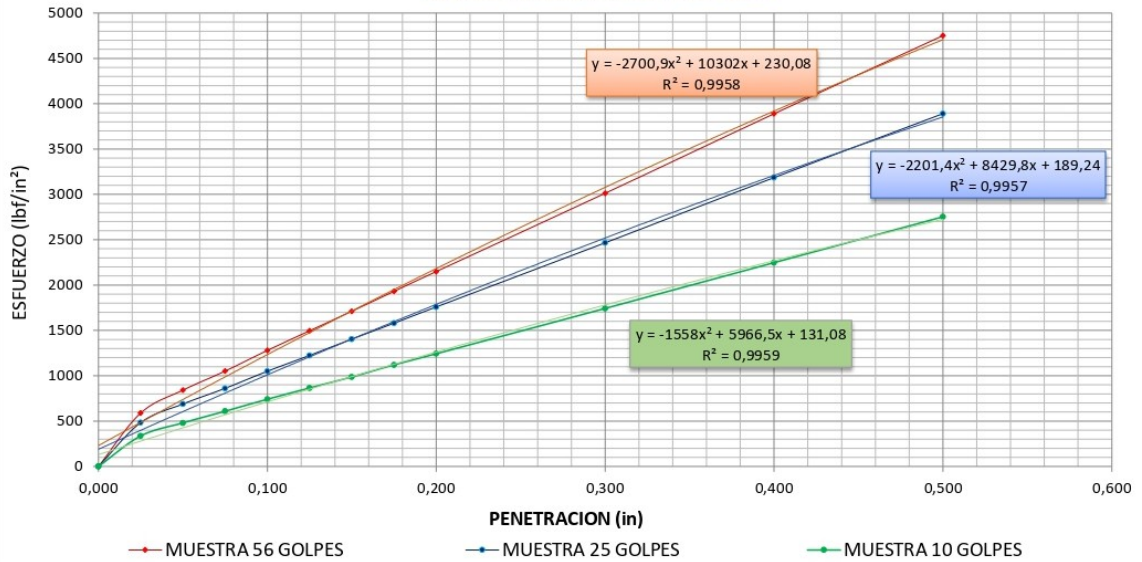
Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

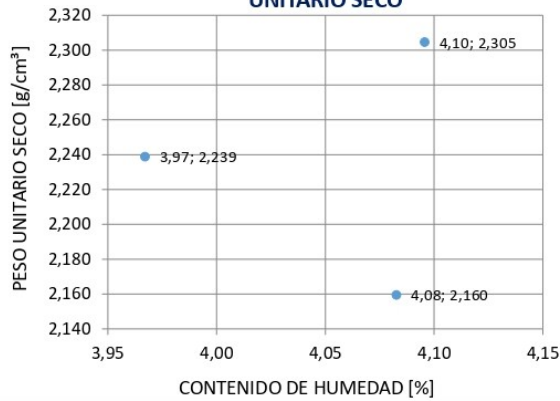
Cliente:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	Fecha:	3-12-2019
Proyecto:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
Descripción del material:	Cascarilla de laminación de color negro.		

GRAFICOS ENSAYO CBR METODO I

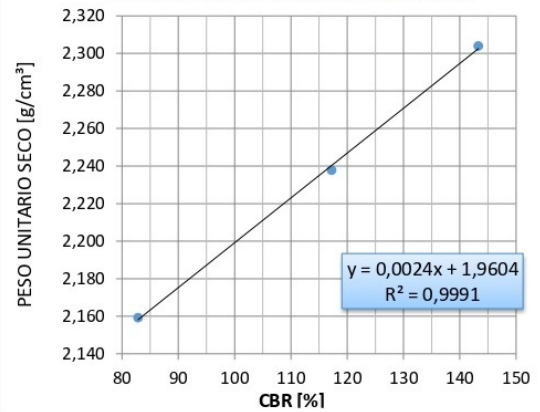
RELACIÓN PENETRACIÓN-ESFUERZO



RELACION CONTENIDO DE HUMEDAD-PESO UNITARIO SECO



RELACION CBR-PESO UNITARIO SECO



CBR 143,1% con el 100% de la densidad seca máxima, después de cuatro días de inmersión

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

91445377 B. Peña
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

SECOIN
Luis Rincon
Ing. Luis Rincon
Gerente

Anexo 4. Fórmula de trabajo

SECOIN		COMBINACION IDEAL DE AGREGADOS		Codigo:	FLAB-008
				Fecha de edicion:	18-9-2013
				Version:	O
				Copia controlada:	NO
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)			CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cil. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco			TIPO:	BG_Gr1
DESCRIPCIÓN:	90% RAP + 10% calamina			FECHA:	2-12-2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.3: Requisitos de agregados para sub bases granulares				

TAMIZ			ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	COMBINACIÓN	
Pulg.	mm				% pasa Calamina	% pasa RAP
					10%	90%
3"	76,10					100,0
2 1/2"	63,50					100,0
2"	50,80					100,0
1 1/2"	38,10		100			100,0
1"	25,40		95 - 75	(±) 7%		94,5
3/4"	19,05		90 - 60			86,2
3/8"	9,500		70 - 40			60,4
No. 4	4,750		50 - 28	(±) 6%		44,9
No. 10	2,000		35 - 15			26,0
No. 40	0,425		20 - 6			12,3
No. 200	0,075		10 - 2	(±) 3%		5,3

GRANULOMETRIA COMBINADA

GRAVA (G)		ARENA (S)		ARCILLA (C)
GRUESA	FINA	GRUESA	FINA	Pasa T. 200. Propiedades plasticas dentro de una amplia gama de humedades y posee resistencia seco
Tamiz. 3" a 3/4"	Tamiz 3/4" a No.4	Tamiz No.4 a 10	Tamiz No.40 a 200	



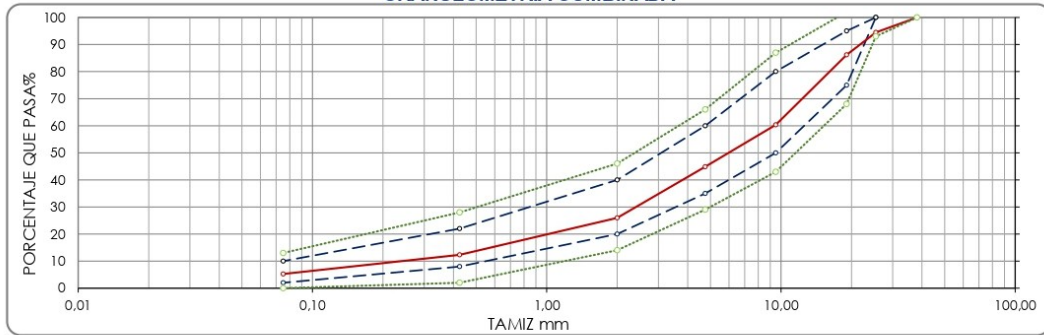
COMBINACION IDEAL DE AGREGADOS

Codigo:	FLAB-008
Fecha de edicion:	18-9-2013
Version:	O
Copia controlada:	NO

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_Gr2
DESCRIPCIÓN:	90% RAP + 10% calamina	FECHA:	2-12-2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.3: Requisitos de agregados para sub bases granulares		

Tamiz		ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	COMBINACIÓN	
				% pasa Calamina	% pasa RAP
Pulg.	mm			10%	90%
3"	76,10				100,0
2 1/2"	63,50				100,0
2"	50,80				100,0
1 1/2"	38,10				100,0
1"	25,40	100 -	(±) 7%		94,5
3/4"	19,05	95 - 75			86,2
3/8"	9,500	80 - 50			60,4
No. 4	4,750	60 - 35	(±) 6%		44,9
No. 10	2,000	40 - 20			26,0
No. 40	0,425	22 - 8			12,3
No. 200	0,075	10 - 2	(±) 3%		5,3

GRANULOMETRIA COMBINADA



GRAVA (G)		ARENA (S)		ARCILLA (C)
GRUESA	FINA	GRUESA	FINA	
Tamiz. 3" a 3/4"	Tamiz 3/4" a No.4	Tamiz No.4 a 10	Tamiz No.40 a 200	



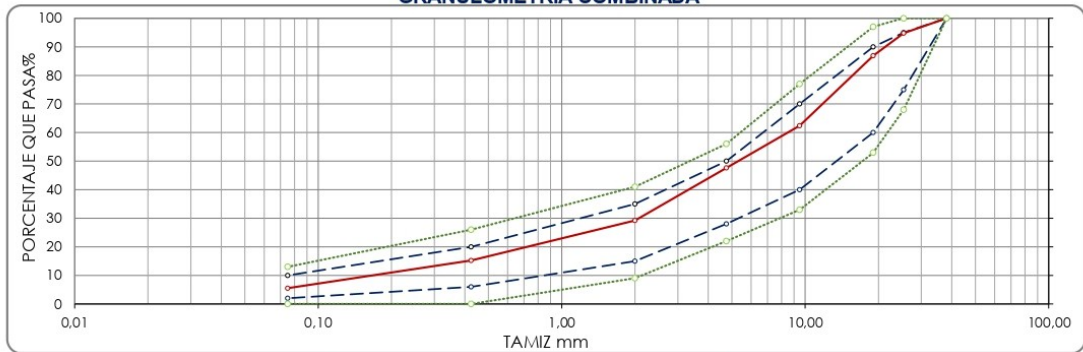
COMBINACION IDEAL DE AGREGADOS

Codigo:	FLAB-008
Fecha de edicion:	18-9-2013
Version:	O
Copia controlada:	NO

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_Gr1
DESCRIPCIÓN:	85% RAP + 15% calamina	FECHA:	2-12-2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.3: Requisitos de agregados para sub bases granulares		

Tamiz		ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	COMBINACIÓN	
Pulg.	mm			% pasa Calamina	% pasa RAP
				15%	85%
3"	76,10				100,0
2 1/2"	63,50				100,0
2"	50,80				100,0
1 1/2"	38,10	100			100,0
1"	25,40	95 - 75	(±) 7%		94,8
3/4"	19,05	90 - 60			86,9
3/8"	9,500	70 - 40			62,4
No. 4	4,750	50 - 28			47,6
No. 10	2,000	35 - 15	(±) 6%		29,2
No. 40	0,425	20 - 6			15,2
No. 200	0,075	10 - 2	(±) 3%		5,5

GRANULOMETRIA COMBINADA



GRAVA (G)		ARENA (S)		ARCILLA (C)
GRUESA	FINA	GRUESA	FINA	
Tamiz. 3" a 3/4"	Tamiz 3/4" a No.4	Tamiz No.4 a. 10	Tamiz No.40 a 200	



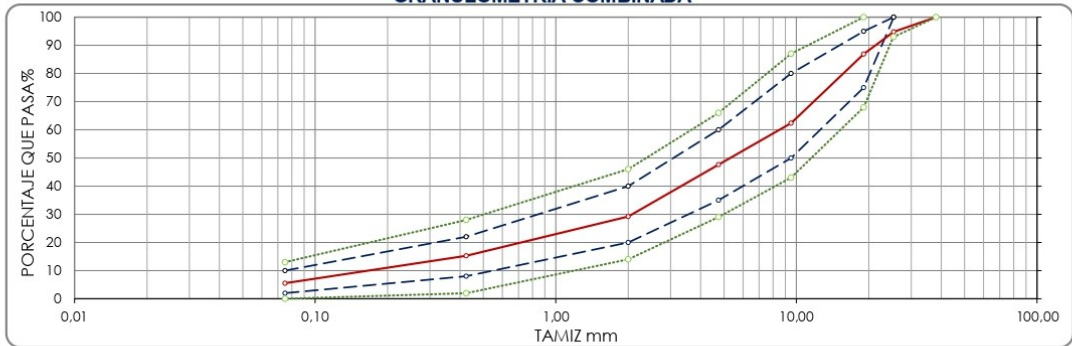
COMBINACION IDEAL DE AGREGADOS

Codigo:	FLAB-008
Fecha de edicion:	18-9-2013
Version:	O
Copia controlada:	NO

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_Gr2
DESCRIPCIÓN:	85% RAP + 15% calamina	FECHA:	2-12-2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.3: Requisitos de agregados para sub bases granulares		

Tamiz		ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	COMBINACIÓN	
Pulg.	mm			% pasa Calamina	% pasa RAP
				15%	85%
3"	76,10				100,0
2 1/2"	63,50				100,0
2"	50,80				100,0
1 1/2"	38,10				100,0
1"	25,40	100 -	(±) 7%		94,8
3/4"	19,05	95 - 75			86,9
3/8"	9,500	80 - 50			62,4
No. 4	4,750	60 - 35	(±) 6%		47,6
No. 10	2,000	40 - 20			29,2
No. 40	0,425	22 - 8			15,2
No. 200	0,075	10 - 2	(±) 3%		5,5

GRANULOMETRIA COMBINADA



GRAVA (G)		ARENA (S)		ARCILLA (C)
GRUESA	FINA	GRUESA	FINA	
Tamiz. 3" a 3/4"	Tamiz 3/4" a No.4	Tamiz No.4 a .10	Tamiz No.40 a 200	



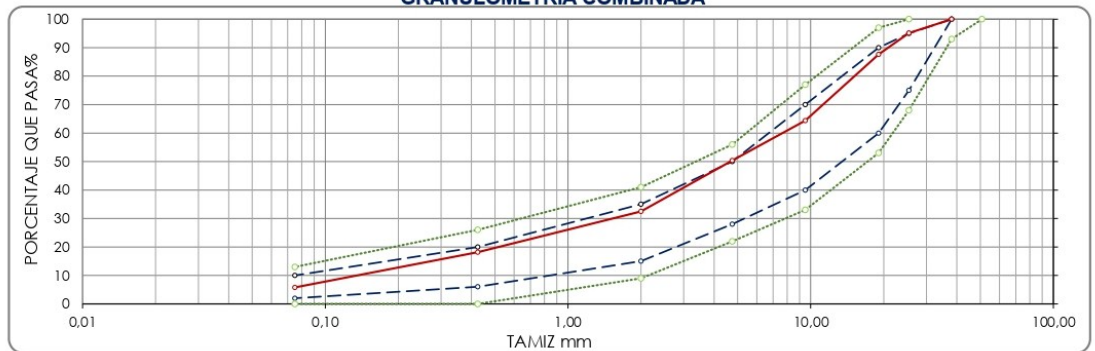
COMBINACION IDEAL DE AGREGADOS

Codigo:	FLAB-008
Fecha de edicion:	18-9-2013
Version:	O
Copia controlada:	NO

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_Gr1
DESCRIPCIÓN:	80% RAP + 20% calamina	FECHA:	2-12-2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.3: Requisitos de agregados para sub bases granulares		

				COMBINACIÓN	
Tamiz		ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	% pasa Calamina	% pasa RAP
Pulg.	mm			20%	80%
3"	76,10			100,0	
2 1/2"	63,50			100,0	
2"	50,80			100,0	
1 1/2"	38,10	100		100,0	
1"	25,40	95 - 75	(±) 7%	95,1	
3/4"	19,05	90 - 60		87,7	
3/8"	9,500	70 - 40		64,4	
No. 4	4,750	50 - 28		50,4	
No. 10	2,000	35 - 15	(±) 6%	32,5	
No. 40	0,425	20 - 6		18,2	
No. 200	0,075	10 - 2	(±) 3%	5,8	

GRANULOMETRIA COMBINADA



GRAVA (G)		ARENA (S)		ARCILLA (C)
GRUESA	FINA	GRUESA	FINA	
Tamiz. 3" a 3/4"	Tamiz 3/4" a No.4	Tamiz No.4 a.10	Tamiz No.40 a 200	



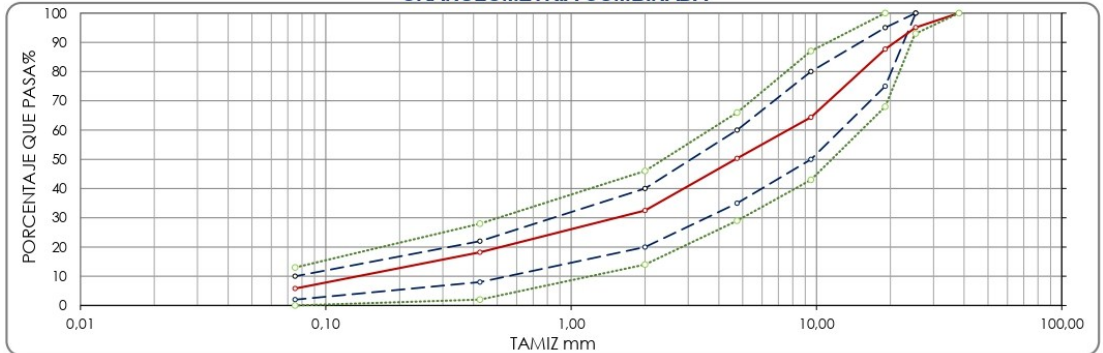
COMBINACION IDEAL DE AGREGADOS

Codigo:	FLAB-008
Fecha de edicion:	18-9-2013
Version:	O
Copia controlada:	NO

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cl. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_Gr2
DESCRIPCIÓN:	80% RAP + 20% calamina	FECHA:	2-12-2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.3: Requisitos de agregados para sub bases granulares		


Tamiz		ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	COMBINACIÓN	
Pulg.	mm			% pasa Calamina	% pasa RAP
				20%	80%
3"	76,10				100,0
2 1/2"	63,50				100,0
2"	50,80				100,0
1 1/2"	38,10				100,0
1"	25,40	100 -	(±) 7%		95,1
3/4"	19,05	95 - 75			87,7
3/8"	9,500	80 - 50			64,4
No. 4	4,750	60 - 35	(±) 6%		50,4
No. 10	2,000	40 - 20			32,5
No. 40	0,425	22 - 8			18,2
No. 200	0,075	10 - 2	(±) 3%		5,8

GRANULOMETRIA COMBINADA

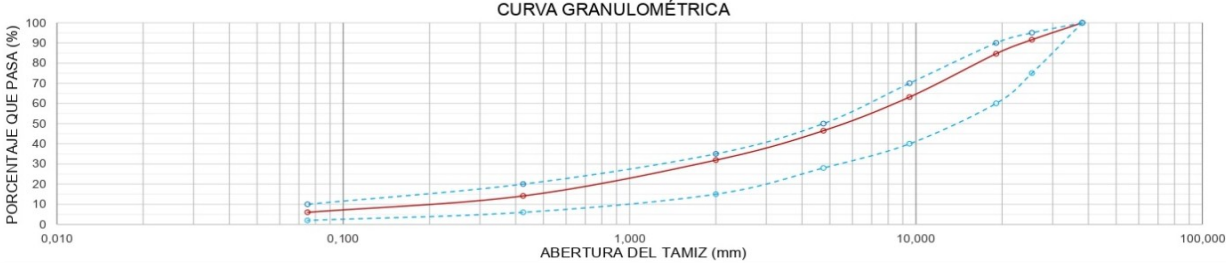




GRAVA (G)		ARENA (S)		ARCILLA (C) Pasa T. 200. Propiedades plasticas dentro de una amplia gama de humedades y posee resistencia seco
GRUESA	FINA	GRUESA	FINA	
Tamiz. 3" a 3/4"	Tamiz 3/4" a No.4	Tamiz No.4 a 10	Tamiz No.40 a 200	

Anexo 5. Ensayos de laboratorio muestra: Mezcla.

 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS INV E - 213 - 13		Código: HC-LAB-001 Versión: 00 Fecha: 08/01/2018 Pág 1 de 1				
PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco José de Caldas				
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco		TIPO: BG_Gr1				
DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina		FECHA: lunes, 2 de diciembre de 2019				
ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares						
Peso de material seco antes de lavado (g): 3512,0		Peso de material después de lavado (g): 3301,40				
ESPECIFICACIÓN: Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares						
RESULTADOS						
% GRAVA :		53,52				
% ARENA :		40,49				
% FINOS :		6,00				
TAMAÑO MÁXIMO :		1"				
D10		0,247				
D30		1,832				
D60		8,596				
Cc		1,581				
Cu		34,818				
TAMIZ	PESO	%	RETENIDO	%	LIMITES	CUMPLE
ALTERNO	NORMAL (mm)	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	(% PASA)	SI - NO
3"	76,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---
2 1/2"	63,500	0,0	0,00	0,00	100,00	---
2"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00	---
1 1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	---
1"	25,400	295,0	8,40	8,40	91,60	95 - 75 NO
3/4"	19,050	243,6	6,94	15,34	84,66	90 - 60 SI
3/8"	9,500	754,6	21,49	36,82	63,18	70 - 40 SI
No. 4	4,750	586,3	16,69	53,52	46,48	50 - 28 SI
No. 10	2,000	512,3	14,59	68,10	31,90	35 - 15 ---
No. 40	0,425	623,3	17,75	85,85	14,15	20 - 6 ---
No. 200	0,075	286,3	8,15	94,00	6,00	10 - 2 ---
FONDO		210,60	6,00	100,00	0,00	---

CURVA GRANULOMÉTRICA



OBSERVACIONES	EJECUTÓ:  JORGE PEÑA Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ:  Ing. Luis Rincón Gerente
----------------------	---	---



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS GRUESOS Y FINOS
INV E - 213 - 13

Código: HC-LAB-001

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco **TIPO:** SB_Gr2
DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019
ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

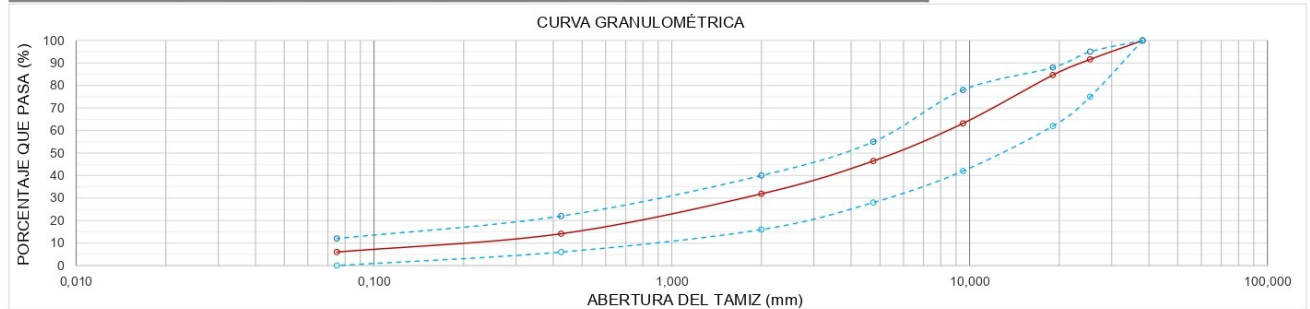
TAMIZ		PESO	%	RETENIDO	%	LIMITES	CUMPLE
ALTERNATIVO	NORMAL (mm)	RETENIDO	RETENIDO	ACUMULADO	PASA	(% PASA)	SI - NO
3"	76,100	0,0	0,00	0,00	100,00		---
2 1/2"	63,500	0,0	0,00	0,00	100,00		---
2"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00		---
1 1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	100	SI
1"	25,400	295,0	8,40	8,40	91,60	95 - 75	SI
3/4"	19,050	243,6	6,94	15,34	84,66	88 - 62	SI
3/8"	9,500	754,6	21,49	36,82	63,18	78 - 42	SI
No. 4	4,750	586,3	16,69	53,52	46,48	55 - 28	SI
No. 10	2,000	512,3	14,59	68,10	31,90	40 - 16	SI
No. 40	0,425	623,3	17,75	85,85	14,15	22 - 6	SI
No. 200	0,075	286,3	8,15	94,00	6,00	12 - 0	SI
FONDO		210,60	6,00	100,00	0,00		

PESO de material seco antes de lavado (g):		PESO de material despues de lavado (g):	
3512,0		3301,40	

ESPECIFICACIÓN:	
Tabla 400.4: Granulometrias admisibles para la construcción de bases y sub bases granulares	

RESULTADOS	
% GRAVA :	53,52
% ARENA :	40,49
% FINOS :	6,00

TAMAÑO MÁXIMO :	
D10	0,247
D30	1,832
D60	8,596
Cc	1,581
Cu	34,818



OBSERVACIONES:

EJECUTÓ:
 C.I. 445397 B/h/m/a.
 Jorge Peña
 Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:
 Ing. Luis Rincon
 Gerente



**RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENOS DE 37,5 mm (1 1/2") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES
INV E-218-13**

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco **TIPO:** BG_A
DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019
ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

GRANULOMETRIA	NÚMERO DE ESFERAS	MASA DE LA CARGA (g)
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3330±20
D	6	2500±15

TAMAÑOS DE TAMIZ		MASAS DE LAS DIFERENTES FRACCIONES, g			
PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ	GRANULOMETRÍAS			
		A	B	C	D
37,5 (1 1/2")	25,0 (1")				
25,0 (1")	19,0 (3/4")	1250±25			
19,0 (3/4")	12,5 (1/2")	1250±25			
12,5 (1/2")	9,5 (3/8")	1250±10	2500±10		
9,5 (3/8")	6,3 (1/4")	1250±10	2500±10	2500±10	
6,3 (1/4")	4,75 (No. 4)			2500±10	
4,75 (No. 4)	2,36 (No. 8)				5000±10
Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

DESGASTE MATERIAL SECO	
Peso seco inicial (g)	5004
Peso seco 100 revoluciones (g)	4727
Peso seco 500 revoluciones (g)	3625

RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	
Desgaste 100 revoluciones (%)	5,5	No especifica
Desgaste 500 revoluciones (%)	27,6	35

DESGASTE MATERIAL HÚMEDO	
Peso inicial SSS*** (g)	No aplica
Peso final 500 revoluciones (g)	No aplica

RESULTADOS	ESPECIFICACIÓN	
Desgaste despues de 48 horas, 500 revoluciones (%)	No aplica	No especifica
Relación húmedo / seco 500 revoluciones	No aplica	No especifica

*** Saturado superficialmente seco

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



**ETERMINACIÓN DE L RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN,
UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL
INV E - 238 - 13**

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco **TIPO:** BG_A

DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019

ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

**TABLA No. 1:
MUESTRA SECA AL HORNO DE 19 mm**

TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
19,1	16	375
16	12,5	375
12,5	9,5	750

**TABLA No. 2:
MUESTRA SECA AL HORNO DE TAMAÑO MENOR
DE 16 mm**

TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
12,5	9,5	750
9,5	6,3	375
6,3	4,75	375

**TABLA No. 3:
MUESTRA SECA AL HORNO DE TAMAÑO MENOR
DE 12,5 mm**

TAMIZ		MASA FRACCION PARA ENSAYO (g)
PASA (mm)	RETIENE (mm)	
9,5	6,3	750
6,3	4,75	750

Tabla utilizada	2
Peso seco inicial (g)	1500,2
Peso seco final (g)	1241,2
Carga abrasiva (g)	5000
Cantidad de agua (Lt)	2
Tiempo de rotación (min)	105
Tamaño máximo	19,1 mm

DETERMINACIÓN	RESULTADO	ESPECIFICADO
<i>Perdida por abrasión en Micro-Deval</i>	17,3%	Máximo = 20%

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



DETERMINACIÓN DEL VALOR DEL 10% DE FINOS
INV E - 224 - 13

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_A
DESCRIPCIÓN	85% RAP + 15% calamina	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares		

MATERIAL SECO

ENSAYO	No 1	No 2	No 3	PROMEDIO	RESULTADO	ESPECIFICACION	CUMPLE
Penetración	20 mm						
Masa del agregado	2784,1	2798,6	2746,2		Porcentaje de finos producidos f1%	8,9%	
Carga aplicada (N)	186100	190400	181400	185967			
Masa del material retenido en tamiz No 8	2541,2	2551,8	2498,3		Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN)	Min 100 kN	Si
Porcentaje de finos producidos (%)	8,7	8,8	9,0	8,9			

MATERIAL HUMEDO

ENSAYO	No 1	No 2	No 3	PROMEDIO	RESULTADO
Penetración	20 mm				
Masa del agregado	2905,0	2921,5	2912,4		Porcentaje de finos producidos f1%
Carga aplicada (N)	176300	175300	179800	177133	
Masa del material retenido en tamiz No 8	2612,8	2615,1	2625,5		Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN)
Porcentaje de finos producidos (%)	10,1	10,5	9,9	10,1	

RELACIÓN HÚMEDO/SECO

Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN) Muestra húmeda	175,47
Carga necesaria para producir un 10% de finos (kN) muestra seca	202,50

RELACIÓN HÚMEDO/SECO (%)	RESULTADO	ESPECIFICACION	CUMPLE
	86,7%	Mínimo: 75%	Si

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

91445577 B/MS/O.
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO

Código: HC-LAB-005
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

INV E-220-13

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FECHA: 2019-12-02

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco
MATERIAL: BG_A

DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina

ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

Solución utilizada

Sulfato de magnesio.

ANÁLISIS CUANTITATIVO DE AGREGADOS

TAMAÑO DEL TAMIZ		GRADACIÓN MUESTRA ORIGINAL (%)	PESO DE FRACCIONES (g)		% PÉRDIDA	% PÉRDIDA CORREGIDA
PASA	RETIENE		ANTES DEL ENSAYO	DESPUES DEL ENSAYO		
FRACCION GRUESA						
1 1/2"	1"	---	---	---	---	---
1"	3/4"	---	---	---	---	---
3/4"	1/2"	6,94	663,20	521,20	21,41	1,49
1/2"	3/8"	21,49	330,40	283,30	14,26	3,06
3/8"	No. 4	16,69	300,20	243,50	18,89	3,15
FRACCION FINA						
No. 4	No. 8	---	---	---		
No. 8	No. 16	---	---	---		
No. 16	No. 30	---	---	---		
No. 30	No. 50	---	---	---		

Pérdida por acción de la solidez = 7,7%
Valor especificado = 18%

EXAMEN CUALITATIVO DE LAS PARTÍCULAS GRUESAS

TAMAÑO TAMIZ		PARTÍCULAS QUE EXHIBEN ALTERACIÓN								No. Total de partículas antes del ensayo
		ROTURA		DESINTEGRACIÓN		AGRIETAMIENTO		EXFOLIACIÓN		
		No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	
2 1/2"	1 1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1 1/2"	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	-

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

REVISÓ Y APROBÓ:

Jorge Peña
Laboratorista

Ing. Luis Rincon
Gerente



LÍMITES DE ATTERBERG: LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO
NTC-4630-99 / INV E-125-126

Código: HC-LAB-002
 Versión: 00
 Fecha: 08/01/2018
 Pág 1 de 1

PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Sivia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cl. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_A
DESCRIPCIÓN	85% RAP + 15% calamina	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares		

LIMITES DE ATTERBERG

HUMEDAD NATURAL

LÍMITE LÍQUIDO				LÍMITE PLÁSTICO				Wn (%)	
No. De Golpes				Recipiente No.					
Recipiente No.				P1: Pr+Masa húmeda (g)					
P1: Pr+Masa húmeda (g)				P2: Pr+Masa seca (g)					
P2: Pr+Masa seca (g)				P3: Pr+Masa recipiente (g)					
P3: Pr+Masa recipiente (g)				Masa seca (g)					
Masa seca (g)				HUMEDAD (%)					
HUMEDAD (%)									

Se hizo el ensayo y no presenta límite líquido: N.L.
 Se hizo el ensayo y no presenta límite plástico: N.P.



RESULTADOS

LÍMITE LIQUIDO (%):	NO LÍQUIDO	% GRAVA:	53,52
LÍMITE PLÁSTICO (%):	NO PLÁSTICO	% ARENA:	40,49
ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%):	N.L. - N.P.	% FINOS:	6,00
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.:	GW-GM	CLASIFICACIÓN AASHTO:	A-1-a

OBSERVACIONES	EJECUTÓ: Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ: Ing. Luis Rincon Gerente
----------------------	--	--



EQUIVALENTE DE ARENA

INV E-133-13

Código: HC-LAB-004

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1


PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)	CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	TIPO:	BG_A
DESCRIPCIÓN	85% RAP + 15% calamina	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares		

Probetas No	A	B	C
Constante tornillo (mm)	254,0	254,0	254,0
Lectura de la Arena + Cte Tornillo	330,0	328,0	336,0
Lectura de la Arena	76,0	74,0	82,0
Lectura de la Arcilla	261,0	263,0	264,0
Equivalente de Arena %	29,1	28,1	31,1
	30	29	32
	30,3%		

RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	
Promedio equivalente de Arena (%)	31%	20%

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:


91445-577 B/1010
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:


SECOIN
INGENIERIA Y CONSULTORIA S.A.S.
CALLE 67 No. 32-10 B. la Floresta, Barrancabermeja
Ing. Luis Rincon
Gerente



VALOR DE AZUL DE METILENO EN AGREGADOS FINOS Y LLENANTES MINERALES

Código: HC-LAB-003
Versión: 00
Fecha: 08/01/2018
Pág 1 de 1

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina) **CLIENTE:** Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodríguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas


FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco **TIPO:** BG_A

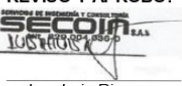
DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina **FECHA:** 2-12-2019

ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

Concentración utilizada de Azul de Metileno en mg/ml de solución		5	
Cantidad utilizada de gramos de material seco pasa tamiz de 75µm (No 200)		10	
Adición de solución de azul de metileno No	Mililitros de solución de Azul de Metileno adicionados	Mililitros de solución de Azul de Metileno acumulados	
1	1,0	1,0	
2	1,0	2,0	
3	1,0	3,0	
4	1,0	4,0	
5	1,0	5,0	
6	1,0	6,0	
7	1,0	7,0	
8	0,5	7,5	
9	0,5	8,0	
10	0,5	8,5	
11	0,5	9,0	
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	CUMPLE
Valor de Azul de Metileno en agregados finos y llenante mineral (mg/g)	4,5	10	Si

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

91445577 B/HE10.
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente



DETERMINACION DE TARRONES DE ARCILLA Y PARTICULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS INV E-211-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE: Estudiantes Ingenieria civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **FECHA:** 2019-12-02

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diagonal **MATERIAL:** BG_A

DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina

ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

TAMAÑO DE PARTÍCULAS ENTRE LOS TAMICES				MASA FRACCIÓN PARA ENSAYO (g)
Tamiz				
Retiene		Pasa		
(mm)	Pulg.	(mm)	Pulg.	
4,75	No. 4	9,5	3/8"	1000
9,5	3/8"	19	3/4"	2000
19	3/4"	37,5	1 1/2"	3000
Mayores de 37,5 (1 1/2")				5000

Tamices		% Gradacion original	Peso de fracciones antes del ensayo (g)	Peso retenido tamiz inferior (g)	% pérdida en peso	% pérdida corregido
Pasa	Retiene					
Mayores a 37,5 mm		---	---	---	---	---
1 1/2"	3/4"	6,94	3001,2	3001,2	0,0%	0,00
3/4"	3/8"	32,62	2000,8	2000,8	0,0%	0,00
3/8"	No. 4	16,69	1004,2	1004,2	0,0%	0,00
No. 4	No. 16	25,62	25,9	25,9	0,0%	0,00
SUMA		81,9				0,00

	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN	CUMPLE
Porcentaje Pérdida	0,00	2%	Sí

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

REVISÓ Y APROBÓ:

98445533 BMS
Jorge Peña
 Laboratorista

Ing. Luis Rincon
 Gerente



PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO

INV E-227-13

Código: HC-LAB-005
 Versión: 00
 Fecha: 08/01/2018
 Pág 1 de 1

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
 Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **FECHA:** 2019/dic/02

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

MATERIAL: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco **FUENTE:** BG_A

DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina

ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

Criterio de aceptación de partículas fracturadas	1 Cara	N.E.	Masa total de la muestra de material grueso evaluada (g)	1.500,0
	2 Caras	N.E.		
Tamaño máximo nominal de la muestra (mm)		19,5	Tamiz sobre el cual se retuvo la muestra al principio del ensayo (mm)	19,5

Criterio caras fracturadas : 1 cara

TAMICES				Que cumple con criterio	Que no cumple con criterio	Que se encuentra en frontera del criterio	Porcentaje de caras fracturadas : 1 cara
Pasa		Retiene					
Pulg	mm	Pulg	mm				
3 1/2"	90,0	3"	75,0	-	-	-	
3"	75,0	2 1/2"	63,0	-	-	-	
2 1/2"	63,0	2"	50,0	-	-	-	
2"	50,0	1 1/2"	37,5	-	-	-	
1 1/2"	37,5	1"	25,0	-	-	-	
1"	25,0	3/4"	19,0	96,0	0,0	0,0	
3/4"	19,0	1/2"	12,5	483,0	0,0	0,0	
1/2"	12,5	3/8"	9,5	388,6	0,0	0,0	
SUMA				967,6	0,0	0,0	100%

CRITERIO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Porcentaje de partículas que cumplen con criterio: 1 cara	100%	85%

Criterio caras fracturadas : 2 o más caras

TAMICES				Que cumple con criterio	Que no cumple con criterio	Que se encuentra en frontera del criterio	Porcentaje de caras fracturadas : 2 o más caras
Pasa		Retiene					
Pulg	mm	Pulg	mm				
3 1/2"	90,0	3"	75,0	-	-	-	
3"	75,0	2 1/2"	63,0	-	-	-	
2 1/2"	63,0	2"	50,0	-	-	-	
2"	50,0	1 1/2"	37,5	-	-	-	
1 1/2"	37,5	1"	25,0	-	-	-	
1"	25,0	3/4"	19,0	96,0	0,0	0,0	
3/4"	19,0	1/2"	12,5	483,0	0,0	0,0	
1/2"	12,5	3/8"	9,5	388,6	0,0	0,0	
SUMA				967,6	0,0	0,0	100%

CRITERIO	RESULTADO	ESPECIFICACIÓN
Porcentaje de partículas que cumplen con criterio: 2 o más caras	100%	60%

OBSERVACIONES Partículas fracturadas calculado por masa de partículas	EJECUTÓ: 91445533 B/HC/A. Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ: Ing. Luis Rincon Gerente
---	--	--



ÍNDICES DE APLANAMIENTO Y DE ALARGAMIENTO DE LOS AGREGADOS PARA CARRETERAS

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

INV E-230-13

CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	FECHA:	2-12-2019
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
MATERIAL:	Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	FUENTE:	BG_A
DESCRIPCIÓN:	85% RAP + 15% calamina		
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares		

ÍNDICE DE APLANAMIENTO								
MASA DE LA MUESTRA DE ENSAYO (g)					2000,8			
Tamices				Masa inicial de cada fracción	Granulometría (fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos del 5% del total)	Masa de las partículas planas (mi)	Índice de aplanamiento por fracción
Pasa		Retiene		(Ri)				(mi/Ri)x100
Pulg	mm	Pulg	mm	g	%	%	g	%
2 1/2"	63	2"	50	0,0	0,0	-	-	-
2"	50	1 1/2"	37,5	0,0	0,0	-	-	-
1 1/2"	37,5	1"	25	0,0	0,0	-	-	-
1"	25	3/4"	19	23,1	13,1	-	8,6	37,2
3/4"	19	1/2"	12,5	39,5	22,5	-	10,2	25,8
1/2"	12,5	3/8"	9,5	45,1	25,6	-	10,5	23,3
3/8"	9,5	1/4"	6,3	68,2	38,8	-	12,3	18,0
TOTALES				M1 = 175,9	100,0	---	M3 = 41,6	-
% ÍNDICE APLANAMIENTO					24			

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO								
MASA DE LA MUESTRA DE ENSAYO (g)					2001,1			
Tamices				Masa inicial de cada fracción	Granulometría (fracción entre tamices)	Granulometría corregida (si hay alguna fracción que represente menos del 5% del total)	Masa de las partículas alargadas (ni)	Índice de alargamiento por fracción
Pasa		Retiene		(Ri)				(ni/Ri)x100
Pulg	mm	Pulg	mm	g	%	%	g	%
2 1/2"	63	2"	50	0,0	0,0	-	-	-
2"	50	1 1/2"	37,5	0,0	0,0	-	-	-
1 1/2"	37,5	1"	25	0,0	0,0	-	-	-
1"	25	3/4"	19	23,0	12,8	-	9,2	40,0
3/4"	19	1/2"	12,5	41,5	23,2	-	11,2	27,0
1/2"	12,5	3/8"	9,5	49,2	27,5	-	12,6	25,6
3/8"	9,5	1/4"	6,3	65,3	36,5	-	13,2	20,2
TOTALES				M1 = 179,0	100,0	---	M3 = 46,2	-
% ÍNDICE ALARGAMIENTO					26			

OBSERVACIONES	EJECUTÓ: Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ: Ing. Luis Rincon Gerente
----------------------	--	--



DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS EN AGREGADOS FINOS NO COMPACTADOS (INFLUENCIADO POR LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS, LA TEXTURA SUPERFICIAL Y LA GRANULOMETRÍA).

INV E-239-13

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

CLIENTE:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	FECHA:	lunes, 2 de diciembre de 2019
PROYECTO:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
FUENTE:	Avenida Guacamayas entre Cil. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco	MATERIAL:	BG_A
DESCRIPCIÓN:	85% RAP + 15% calamina		
ESPECIFICACIÓN:	IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares		
Método utilizado:	A	G: Densidad específica del agregado fino	2,610
Masa del recipiente vacío (g)	25,30	(pasa tamiz No. 4)	

VOLUMEN DEL MEDIDOR CILINDRICO

M: masa neta del recipiente + agua (g)	25,43	Temperatura del agua (° C)	25,0
M: masa neta del agua (g)	0,13	D: Densidad del agua, kg/cm³	0,997075
V: Volumen del cilindro, ml			90,26

FRACCIÓN DE TAMAÑO INDIVIDUAL				MASA (g)	Densidad específica del agregado (Tamiz No. 8 - Tamiz No. 100)	Masa del recipiente + muestra (g)		
Pasa		Retiene				Prueba No. 1	Prueba No. 2	Promedio
Pulg	mm	Pulg	mm					
No. 8	2,36	No. 16	1,18	44,0	2,795	188,2	187,5	187,9
No. 16	1,18	No. 30	600 µm	57,0				
No. 30	600 µm	No. 50	300 µm	72,0				
No. 50	300 µm	No. 100	150 µm	17,0				
TOTALES				190,0				

Us: vacíos del agregado fino sin compactar (%)

$$U_s = \frac{v - \left(\frac{F}{G}\right) * 100}{v}$$

35,5

OBSERVACIONES

EJECUTÓ:

Silvia Puentes
Jorge Peña
Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Ing. Luis Rincon
Gerente

**ENSAYO DE COMPACTACIÓN - PRÓCTOR MODIFICADO**

Código: HC-LAB-005

Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Pág 1 de 1

INV E-142-13

CLIENTE: Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez
 Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas **FECHA:** lunes, 2 de diciembre de 2019

PROYECTO: Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)

FUENTE: Avenida Guacamayas entre Cll. 48 Q Bis y Cra 5 / Planta Diaco **MATERIAL:** BG_A

DESCRIPCIÓN: 85% RAP + 15% calamina

ESPECIFICACIÓN: IDU-ET-2011 / Sección 400-11 / Tabla 400.2: Requisitos de agregados para bases granulares

Método:	D	Diámetro del Molde (cm)	15,00	No. Capas	5
Peso del Martillo (Lbs)	10,00	Altura de la Muestra (cm)	12,03	Volumen (cm ³)	2126

PESO UNITARIO

Molde N°	1	2	3	4
Peso de Molde + Suelo compacto (g):	10421	10762	10965	10923
Peso del molde (g):	6057	6057	6057	6057
Peso del Molde del suelo Compacto (g):	4364	4705	4908	4866
Volumen Del Suelo Compacto (cm ³):	2126	2126	2126	2126
Densidad del suelo Húmedo (g/cm ³):	2,053	2,213	2,309	2,289
Contenido de Humedad (%):	3,1	4,2	5,6	6,8
Densidad del suelo seco (g/cm ³):	1,991	2,124	2,187	2,143

CONTENIDO DE HUMEDAD

Recipiente N°	8	2A	23	17
P1- Peso Recipiente + Suelo Húmedo (g):	335,8	317,1	512,1	471,4
P2- Peso Recipiente + Suelo Seco (g):	326,8	306,3	487,2	443,9
Peso Del Agua (g):	9,0	10,8	24,9	27,5
P3- Peso del recipiente (g):	36,3	49,5	41,3	39,7
Peso del suelo Seco (g):	290,5	256,8	445,9	404,3
Contenido de Humedad (%):	3,1	4,2	5,6	6,8

LIMITES DE ATTERBERG

LÍMITE LIQUIDO (%): **N.L.**

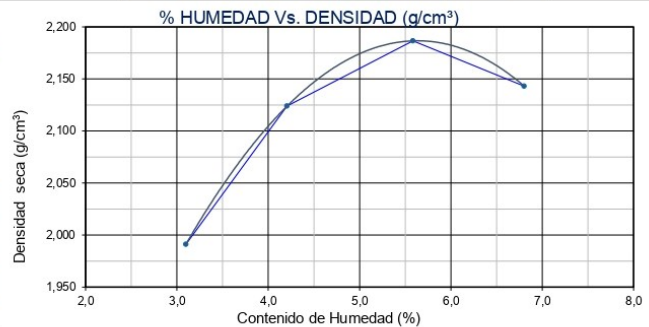
LÍMITE PLASTICO (%): **N.P.**

ÍNDICE DE PLASTICIDAD (%): **N.L. - N.P.**

RESULTADOS

DENSIDAD MÁXIMA (g/cm³): **2,186**


HUMEDAD ÓPTIMA (%): **5,7**

**OBSERVACIONES****EJECUTÓ:**

Jorge Peña
 211445333 B/h/10
Jorge Peña
 Laboratorista

REVISÓ Y APROBÓ:

Luis Rincón
Ing. Luis Rincón
 Gerente

		ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE (CBR) MÉTODO I NTC 2122 - ASMT D1883-99				Código: HC-LAB-006		
						Versión: 00		
						Fecha: 08/01/2018		
Cliente:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas				Fecha:	3-12-2019		
Proyecto:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)							
Descripción del material:	85% RAP + 15% calamina							
Numero de Golpes por Capa	56		25		10			
Numero de Molde	8		5		1			
Sobrecarga (kg)	1,9		2,4		1,7			
Diámetro de la muestra (cm)	15,02		15,06		15,12			
Área de la muestra (cm²)	177,19		178,13		179,55			
Altura de la muestra (cm)	12,20		12,15		12,19			
Volumen de la muestra (cm³)	2162		2164		2189			
EXPANSION								
Lectura Inicial mm	0,1200		0,9500		0,4700			
Lectura Final mm	0,1600		1,0200		0,5600			
% De Expansión	0,3279		0,5761		0,7383			
Penetración (in)	Penetración (mm)	Esfuerzo Estándar (lbf/in²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in²)	Lectura (kgf)	Esfuerzo (lbf/in²)
0,000	0,000	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,025	0,635	-	339,7	249,7	312,3	229,6	282,3	207,5
0,050	1,270	-	749,9	551,3	688,1	505,9	629,8	463,0
0,075	1,905	-	1122,2	825,1	1034,6	760,7	941,6	692,3
0,100	2,540	1000	1495,3	1099,4	1374,4	1010,5	1257,6	924,6
0,125	3,175	-	1706,3	1254,5	1569,7	1154,1	1432,5	1053,2
0,150	3,810	-	1913,3	1406,7	1760,2	1294,1	1606,2	1180,9
0,175	4,445	-	2122,4	1560,4	1951,7	1434,9	1780,8	1309,3
0,200	5,080	1500	2331,2	1714,0	2143,1	1575,7	1955,7	1437,9
0,300	7,620	1900	3071,6	2258,3	2822,2	2074,9	2576,6	1894,4
0,400	10,160	2300	3747,7	2755,4	3443,9	2532,0	3140,6	2309,0
0,500	12,700	2600	4332,4	3185,3	3981,2	2927,1	3622,3	2663,2
% CBR a 0.100 [in]			109,94		101,05		92,46	
% CBR a 0.200 [in]			114,27		105,04		95,86	
% CBR Corregido a 0.100 [in]			109,94		101,05		92,46	
% CBR Corregido a 0.200 [in]			114,27		105,04		95,86	
CONTENIDO DE HUMEDAD								
	Compactación	Después de inmersión	Compactación	Después de inmersión	Compactación	Después de inmersión		
Numero del recipiente	46	99	24	36	69	42		
Peso suelo humedo+rec. (g)	771,70	669,00	766,30	697,50	746,50	642,70		
Peso suelo seco+rec. (g)	725,20	624,80	720,70	650,60	700,60	599,20		
Peso del recipiente (g)	51,60	42,70	49,90	48,90	34,90	68,40		
Humedad (%)	6,9	7,6	6,8	7,8	6,9	8,2		
PESO UNITARIO								
Peso suelo+ Molde (g)	10803	10832	10472	10526	10391	10441		
Peso molde (g)	6123	6123	6003	6003	6087	6087		
Peso unitario Húmedo (g/cm³)	2,164	2,178	2,064	2,089	1,965	1,988		
Peso unitario Seco (g/cm³)	2,025	2,024	1,932	1,938	1,838	1,837		



**ENSAYO DE RELACIÓN DE SOPORTE
(CBR) MÉTODO I
NTC 2122 - ASMT D1883-99**

Código: HC-LAB-006

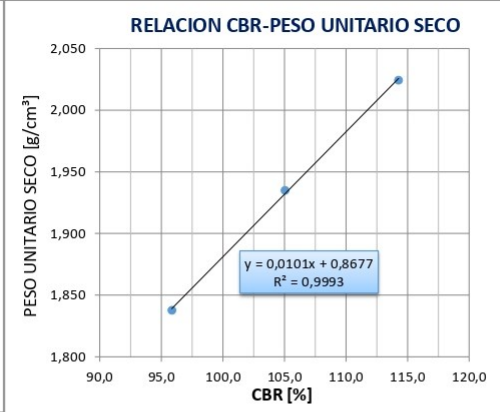
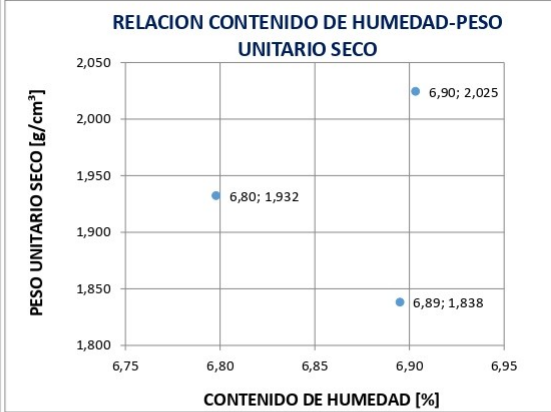
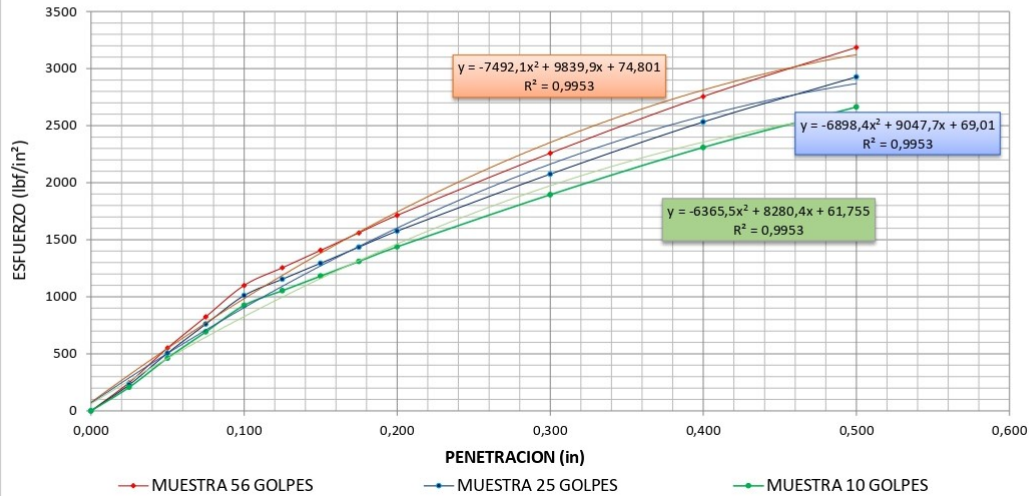
Versión: 00

Fecha: 08/01/2018

Cliente:	Estudiantes Ingeniería civil: Silvia Puentes / Edwin Rodriguez Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	Fecha:	3-12-2019
Proyecto:	Proyecto de grado: Evaluación del comportamiento mecánico de sistemas de geocelda y materiales reciclados (RAP y calamina)		
Descripción del material:	85% RAP + 15% calamina		

GRAFICOS ENSAYO CBR METODO I


RELACIÓN PENETRACIÓN-ESFUERZO



CBR 114,5% con el 100% de la densidad seca máxima, después de cuatro días de inmersión

OBSERVACIONES	EJECUTÓ: Jorge Peña Laboratorista	REVISÓ Y APROBÓ: Ing. Luis Rincon Gerente
----------------------	--	--

Cámara de comercio SECOIN: Servicios de Ingeniería y Consultoría S.A.S.

	CAMARA DE COMERCIO DE BARRANCABERMEJA SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
	Fecha expedición: 2020/04/24 - 10:38:35 **** Recibo No. S000299391 **** Num. Operación. 99-USUPUBXX-20200424-0007 LA MATRÍCULA MERCANTIL PROPORCIONA SEGURIDAD Y CONFIANZA EN LOS NEGOCIOS RENUOVE SU MATRÍCULA A MÁS TARDAR EL 03 DE JULIO DE 2020 Y EVITE SANCIONES DE HASTA 17 S.M.L.M.V CODIGO DE VERIFICACIÓN Pd3utkv2TR

CERTIFICADO DE EXISTENCIA Y REPRESENTACIÓN LEGAL O DE INSCRIPCIÓN DE DOCUMENTOS.

Con fundamento en las matrículas e inscripciones del Registro Mercantil,

CERTIFICA

NOMBRE, SIGLA, IDENTIFICACIÓN Y DOMICILIO

NOMBRE o RAZÓN SOCIAL: SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
ORGANIZACIÓN JURÍDICA: SOCIEDAD POR ACCIONES SIMPLIFICADA
CATEGORÍA : PERSONA JURÍDICA PRINCIPAL
NIT : 829004036-0
ADMINISTRACIÓN DIAN : BARRANCABERMEJA
DOMICILIO : BARRANCABERMEJA

MATRÍCULA - INSCRIPCIÓN

MATRÍCULA NO : 51535
FECHA DE MATRÍCULA : MARZO 01 DE 2004
ULTIMO AÑO RENOVADO : 2019
FECHA DE RENOVACION DE LA MATRÍCULA : MARZO 29 DE 2019
ACTIVO TOTAL : 1,011,386,509.00
GRUPO NIIF : GRUPO III - MICROEMPRESAS

UBICACIÓN Y DATOS GENERALES

DIRECCIÓN DEL DOMICILIO PRINCIPAL : CL 67 32 10 BRR LA FLORESTA
BARRIO : LA FLORESTA
MUNICIPIO / DOMICILIO: 68081 - BARRANCABERMEJA
TELÉFONO COMERCIAL 1 : 6021037
TELÉFONO COMERCIAL 2 : NO REPORTÓ
TELÉFONO COMERCIAL 3 : 3212434735
CORREO ELECTRÓNICO No. 1 : secointda1@gmail.com

DIRECCIÓN PARA NOTIFICACIÓN JUDICIAL : CL 67 32 10 BRR LA FLORESTA
MUNICIPIO : 68081 - BARRANCABERMEJA
TELÉFONO 1 : 6021037
TELÉFONO 3 : 3212434735
CORREO ELECTRÓNICO : secointda1@gmail.com

NOTIFICACIONES A TRAVÉS DE CORREO ELECTRÓNICO

De acuerdo con lo establecido en el artículo 67 del Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo, **NO AUTORIZO** para que me notifiquen personalmente a través del correo electrónico de notificación.

CERTIFICA - ACTIVIDAD ECONÓMICA

ACTIVIDAD PRINCIPAL : F4290 - CONSTRUCCION DE OTRAS OBRAS DE INGENIERIA CIVIL
ACTIVIDAD SECUNDARIA : M7110 - ACTIVIDADES DE ARQUITECTURA E INGENIERIA Y OTRAS ACTIVIDADES CONEXAS DE CONSULTORIA TECNICA
OTRAS ACTIVIDADES : G4752 - COMERCIO AL POR MENOR DE ARTICULOS DE FERRETERIA, PINTURAS Y PRODUCTOS DE VIDRIO EN ESTABLECIMIENTOS ESPECIALIZADOS
OTRAS ACTIVIDADES : M7120 - ENSAYOS Y ANALISIS TECNICOS

CERTIFICA - CONSTITUCIÓN

POR ESCRITURA PUBLICA NÚMERO 288 DEL 19 DE FEBRERO DE 2004 DE LA NOTARIA PRIMERA DE BARRANCABERMEJA, REGISTRADO EN ESTA CÁMARA DE COMERCIO BAJO EL NÚMERO 8972 DEL LIBRO IX DEL REGISTRO MERCANTIL EL 01 DE MARZO DE 2004, SE INSCRIBE : LA CONSTITUCIÓN DE PERSONA JURIDICA DENOMINADA SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA LTDA SECOIN LTDA.



CAMARA DE COMERCIO DE BARRANCABERMEJA
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
Fecha expedición: 2020/04/24 - 10:38:36 **** Recibo No. S000299391 **** Num. Operación. 99-USUPUBXX-20200424-0007
LA MATRÍCULA MERCANTIL PROPORCIONA SEGURIDAD Y CONFIANZA EN LOS NEGOCIOS
RENUEVE SU MATRÍCULA A MÁS TARDAR EL 03 DE JULIO DE 2020 Y EVITE SANCIONES DE HASTA 17 S.M.L.M.V
CODIGO DE VERIFICACIÓN Pd3utkV2TR

CERTIFICA - RELACION DE NOMBRES QUE HA TENIDO

QUE LA PERSONA JURÍDICA HA TENIDO LOS SIGUIENTES NOMBRES O RAZONES SOCIALES

- 1) SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA LTDA SECOIN LTDA
Actual.) SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS

CERTIFICA - CAMBIOS DE NOMBRE O RAZON SOCIAL

POR ACTA NÚMERO 7 DEL 24 DE ENERO DE 2015 SUSCRITO POR LA JUNTA DE SOCIOS REGISTRADO EN ESTA CÁMARA DE COMERCIO BAJO EL NÚMERO 19935 DEL LIBRO IX DEL REGISTRO MERCANTIL EL 27 DE ABRIL DE 2015, LA PERSONA JURIDICA CAMBIO SU NOMBRE DE SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA LTDA SECOIN LTDA POR SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS

CERTIFICA - TRANSFORMACIONES / CONVERSIONES

POR ACTA NÚMERO 7 DEL 24 DE ENERO DE 2015 DE LA JUNTA DE SOCIOS, REGISTRADO EN ESTA CÁMARA DE COMERCIO BAJO EL NÚMERO 19935 DEL LIBRO IX DEL REGISTRO MERCANTIL EL 27 DE ABRIL DE 2015, SE INSCRIBE LA TRANSFORMACION : DE SOCIEDAD LIMITADA A SOCIEDAD POR ACCIONES SIMPLIFICADA.

CERTIFICA - REFORMAS

DOCUMENTO	FECHA	PROCEDENCIA	DOCUMENTO	INSCRIPCION	FECHA
EP-361	20050302	NOTARIA PRIMERA		BARRANCABER RM09-9477 MEJA	20050307
EP-512	20050331	NOTARIA PRIMERA		BARRANCABER RM09-9549 MEJA	20050405
EP-690	20090331	NOTARIA SEGUNDA		BARRANCABER RM09-12493 MEJA	20090402
EP-690	20090331	NOTARIA SEGUNDA		BARRANCABER RM09-12494 MEJA	20090402
EP-690	20090331	NOTARIA SEGUNDA		BARRANCABER RM09-12495 MEJA	20090404
EP-2622	20090924	NOTARIA PRIMERA		BARRANCABER RM09-12898 MEJA	20090928
AC-7	20150124	JUNTA DE SOCIOS		BARRANCABER RM09-19935 MEJA	20150427

CERTIFICA - VIGENCIA

VIGENCIA: QUE EL TERMINO DE DURACION DE LA PERSONA JURIDICA ES INDEFINIDO

CERTIFICA - OBJETO SOCIAL

OBJETO SOCIAL: LA SOCIEDAD TENDRÁ POR OBJETO SOCIAL LO SIGUIENTE: ESTUDIOS GEOTÉCNICOS, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONSULTORÍA DE TODO TIPO DE OBRA CIVIL, SERVICIOS DE LABORATORIO DE INGENIERÍA EN GENERAL , DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE REDES DE ACUEDUCTO Y DE ALCANTARILLADO, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE , DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS BIOLÓGICOS Y NATURALES, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS E INDUSTRIALES, INGENIERÍA AMBIENTAL, CONSULTORÍAS AMBIENTALES EN OBRAS CIVILES, INGENIERÍA QUÍMICA, INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GEOLOGÍA, PROGRAMAS DE SEGURIDAD INDUSTRIAL, ELABORACIÓN DE PLANES DE CONTINGENCIA, POLUCIÓN AMBIENTAL, RECURSOS AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA MUNICIPIOS, MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS, ALQUILER Y COMERCIALIZACIÓN DE ARTÍCULOS, PRODUCTOS MATERIALES Y SERVICIOS RELACIONADOS CON LA INGENIERÍA EN GENERAL, TAMBIÉN ADQUIRIR, POSEER, GRAVAR, ENAJENAR, NEGOCIAR, ETC. TODO TIPO DE INSTRUMENTOS NEGOCIABLES Y DEMÁS DOCUMENTOS CIVILES Y COMERCIALES, QUE PUEDAN SER NECESARIOS PARA EL LOGRO DE SU OBJETIVO Y ADQUIRIR UN INTERÉS YA SEA NO ACCIONISTA O FUNDADOR DE OTRAS COMPAÑÍAS, PRESTAR DINERO CON O SIN GARANTÍAS REALES O PERSONALES Y EN GENERAL REALIZAR TODO TIPO DE ACTO O CONTRATOS RELACIONADOS CON EL OBJETO SOCIAL DE ESTA COMPAÑÍA EN DESARROLLO DE SU OBJETO LA SOCIEDAD PODRÁ: A. CELEBRAR CONTRATOS DE SOCIEDAD O TOMAR INTERÉS O PARTICIPACIÓN EN SOCIEDADES O EMPRESAS QUE TENGAN UN OBJETO SIMILAR, COMPLEMENTARIO O AUXILIAR AL SUYO. B. CELEBRAR CONTRATOS DE REPRESENTACIÓN, AGENCIAMIENTO Y EN GENERAL TODOS LOS QUE TENGAN RELACIÓN CON EL OBJETO PRINCIPAL TAL COMO QUEDE DETERMINADO. C. ADQUIRIR, ENAJENAR, DAR O TOMAR DINERO EN MUTUO, CON O SIN GARANTÍA DE LOS BIENES SOCIALES Y EFECTUAR TODA CLASE DE OPERACIONES CON ENTIDADES BANCARIAS O CRÉDITO, Y EN GENERAL EJECUTAR TODOS LOS ACTOS Y CONTRATOS CIVILES, ADEMÁS DE LLEVAR A CABO LA COMPRA Y VENTA DE



CAMARA DE COMERCIO DE BARRANCABERMEJA
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
Fecha expedición: 2020/04/24 - 10:38:36 **** Recibo No. S000299391 **** Num. Operación. 99-USUPUBXX-20200424-0007
LA MATRÍCULA MERCANTIL PROPORCIONA SEGURIDAD Y CONFIANZA EN LOS NEGOCIOS
RENUENE SU MATRÍCULA A MÁS TARDAR EL 03 DE JULIO DE 2020 Y EVITE SANCIONES DE HASTA 17 S.M.L.M.V
CODIGO DE VERIFICACIÓN Pd3utkv2TR

ELEMENTOS, EQUIPOS, MAQUINARIA, REPUESTOS Y TODO LO RELACIONADO CON LA PARTE AMBIENTAL Y EN GENERAL CUALQUIER ACTIVIDAD LICITA DE COMERCIO, ADEMÁS TODO LO CONCERNIENTE EN REFORESTACIÓN.

CERTIFICA - CAPITAL

TIPO DE CAPITAL	VALOR	ACCIONES	VALOR NOMINAL
CAPITAL AUTORIZADO	100.000.000,00	100,00	1.000.000,00
CAPITAL SUSCRITO	77.000.000,00	77,00	1.000.000,00
CAPITAL PAGADO	77.000.000,00	77,00	1.000.000,00

CERTIFICA - REPRESENTACIÓN LEGAL

REPRESENTACIÓN LEGAL: LA REPRESENTACIÓN LEGAL DE LA SOCIEDAD POR ACCIONES SIMPLIFICADA ESTARÁ A CARGO DE UNA PERSONA NATURAL O JURÍDICA, ACCIONISTA O NO, QUIEN TENDRÁ UN SUPLENTE PARA SUS FALTAS TEMPORALES O ABSOLUTAS, DESIGNADOS PARA UN TÉRMINO DE DOS AÑOS POR LA ASAMBLEA GENERAL DE ACCIONISTAS.

CERTIFICA

REPRESENTANTES LEGALES - PRINCIPALES

POR ESCRITURA PUBLICA NÚMERO 288 DEL 19 DE FEBRERO DE 2004 DE NOTARIA PRIMERA DE BARRANCABERMEJA, REGISTRADO EN ESTA CÁMARA DE COMERCIO BAJO EL NÚMERO 8972 DEL LIBRO IX DEL REGISTRO MERCANTIL EL 01 DE MARZO DE 2004, FUERON NOMBRADOS :

CARGO	NOMBRE	IDENTIFICACION
REPRESENTANTE LEGAL	RINCON TRIANA LUIS DEIVIS	CC 13,743,516

CERTIFICA

REPRESENTANTES LEGALES SUPLENTE

POR ESCRITURA PUBLICA NÚMERO 361 DEL 02 DE MARZO DE 2005 DE NOTARIA PRIMERA DE BARRANCABERMEJA, REGISTRADO EN ESTA CÁMARA DE COMERCIO BAJO EL NÚMERO 9477 DEL LIBRO IX DEL REGISTRO MERCANTIL EL 07 DE MARZO DE 2005, FUERON NOMBRADOS :

CARGO	NOMBRE	IDENTIFICACION
REPRESENTANTE LEGAL SUPLENTE	TRIANA NAVARRO RUBY AMPARO	CC 37,917,276

CERTIFICA - FACULTADES Y LIMITACIONES

FACULTADES DEL REPRESENTANTE LEGAL: LA SOCIEDAD SERÁ GERENCIADA, ADMINISTRADA Y REPRESENTADA LEGALMENTE ANTE TERCEROS POR EL REPRESENTANTE LEGAL (O SU SUPLENTE EN LAS FALTAS TEMPORALES O ABSOLUTAS), QUIEN NO TENDRÁ RESTRICCIONES DE CONTRATACIÓN POR RAZÓN DE LA NATURALEZA NI DE LA CUANTÍA DE LOS ACTOS QUE CELEBRE. POR LO TANTO, SE ENTENDERÁ QUE EL REPRESENTANTE LEGAL PODRÁ CELEBRAR O EJECUTAR TODOS LOS ACTOS Y CONTRATOS COMPRENDIDOS EN EL OBJETO SOCIAL O QUE SE RELACIONEN DIRECTAMENTE CON LA EXISTENCIA Y EL FUNCIONAMIENTO DE LA SOCIEDAD. EL REPRESENTANTE LEGAL SE ENTENDERÁ INVESTIDO DE LOS MÁS AMPLIOS PODERES PARA ACTUAR EN TODAS LAS CIRCUNSTANCIAS EN NOMBRE DE LA SOCIEDAD, CON EXCEPCIÓN DE AQUELLAS FACULTADES QUE, DE ACUERDO CON LOS ESTATUTOS, SE HUBIEREN RESERVADO LOS ACCIONISTAS. EN LAS RELACIONES FRENTE A TERCEROS, LA SOCIEDAD QUEDARÁ OBLIGADA POR LOS ACTOS Y CONTRATOS CELEBRADOS POR EL REPRESENTANTE LEGAL. LE ESTÁ PROHIBIDO AL REPRESENTANTE LEGAL Y A LOS DEMÁS ADMINISTRADORES DE LA SOCIEDAD, POR SÍ O POR INTERPUESTA PERSONA, OBTENER BAJO CUALQUIER FORMA O MODALIDAD JURÍDICA PRÉSTAMOS POR PARTE DE LA SOCIEDAD U OBTENER DE PARTE DE LA SOCIEDAD AVAL, FIANZA O CUALQUIER OTRO TIPO DE GARANTÍA DE SUS OBLIGACIONES PERSONALES.

CERTIFICA

REVISOR FISCAL - PRINCIPALES

POR ACTA NÚMERO 7 DEL 24 DE ENERO DE 2015 DE LA JUNTA DE SOCIOS, REGISTRADO EN ESTA CÁMARA DE COMERCIO BAJO EL NÚMERO 19936 DEL LIBRO IX DEL REGISTRO MERCANTIL EL 27 DE ABRIL DE 2015, FUERON NOMBRADOS :

CARGO	NOMBRE	IDENTIFICACION	T. PROF
REVISOR FISCAL	SERRANO JIMENEZ ELSA LUCIA	CC 63,340,604	72418 T



CAMARA DE COMERCIO DE BARRANCABERMEJA
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
Fecha expedición: 2020/04/24 - 10:38:36 **** Recibo No. S000299391 **** Num. Operación. 99-USUPUBXX-20200424-0007
LA MATRÍCULA MERCANTIL PROPORCIONA SEGURIDAD Y CONFIANZA EN LOS NEGOCIOS
RENUENVE SU MATRÍCULA A MÁS TARDAR EL 03 DE JULIO DE 2020 Y EVITE SANCIONES DE HASTA 17 S.M.L.M.V
CODIGO DE VERIFICACIÓN Pd3utkv2TR

CERTIFICA - ESTABLECIMIENTOS

QUE ES PROPIETARIO DE LOS SIGUIENTES ESTABLECIMIENTOS DE COMERCIO EN LA JURISDICCIÓN DE ESTA CÁMARA DE COMERCIO:

***** NOMBRE ESTABLECIMIENTO** : SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
MATRICULA : 51538
FECHA DE MATRICULA : 20040301
FECHA DE RENOVACION : 20190329
ULTIMO AÑO RENOVADO : 2019
DIRECCION : CL 67 32 10 BRR LA FLORESTA
BARRIO : LA FLORESTA
MUNICIPIO : 68081 - BARRANCABERMEJA
TELEFONO 1 : 6021037
TELEFONO 3 : 3212434735
CORREO ELECTRONICO : secointda1@gmail.com
ACTIVIDAD PRINCIPAL : F4290 - CONSTRUCCION DE OTRAS OBRAS DE INGENIERIA CIVIL
ACTIVIDAD SECUNDARIA : M7110 - ACTIVIDADES DE ARQUITECTURA E INGENIERIA Y OTRAS ACTIVIDADES CONEXAS DE CONSULTORIA TECNICA
OTRAS ACTIVIDADES : G4752 - COMERCIO AL POR MENOR DE ARTICULOS DE FERRETERIA, PINTURAS Y PRODUCTOS DE VIDRIO EN ESTABLECIMIENTOS ESPECIALIZADOS
OTRAS ACTIVIDADES : M7120 - ENSAYOS Y ANALISIS TECNICOS
VALOR DEL ESTABLECIMIENTO : 1,011,386,509

CERTIFICA

LA INFORMACIÓN ANTERIOR HA SIDO TOMADA DIRECTAMENTE DEL FORMULARIO DE MATRÍCULA Y RENOVACIÓN DILIGENCIADO POR EL COMERCIANTE

CERTIFICA

DE CONFORMIDAD CON LO ESTABLECIDO EN EL CÓDIGO DE PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO Y DE LO CONTENCIOSO Y DE LA LEY 962 DE 2005, LOS ACTOS ADMINISTRATIVOS DE REGISTRO AQUÍ CERTIFICADOS QUEDAN EN FIRME DIEZ (10) DÍAS HÁBILES DESPUES DE LA FECHA DE INSCRIPCIÓN, SIEMPRE QUE NO SEAN OBJETO DE RECURSOS. EL DÍA SÁBADO NO SE DEBE CONTAR COMO DÍA HÁBIL.

VALOR DEL CERTIFICADO : \$6,100

CERTIFICADO EXPEDIDO A TRAVES DEL PORTAL DE SERVICIOS VIRTUALES (SII)

IMPORTANTE: La firma digital del secretario de la CAMARA DE COMERCIO DE BARRANCABERMEJA contenida en este certificado electrónico se encuentra emitida por una entidad de certificación abierta autorizada y vigilada por la Superintendencia de Industria y Comercio, de conformidad con las exigencias establecidas en la Ley 527 de 1999 para validez jurídica y probatoria de los documentos electrónicos.

La firma digital no es una firma digitalizada o escaneada, por lo tanto, la firma digital que acompaña este documento la podrá verificar a través de su aplicativo visor de documentos pdf.

No obstante, si usted va a imprimir este certificado, lo puede hacer desde su computador, con la certeza de que el mismo fue expedido a través del canal virtual de la cámara de comercio y que la persona o entidad a la que usted le va a entregar el certificado impreso, puede verificar por una sola vez el contenido del mismo, ingresando al enlace <https://siibarrancabermeja.confecamaras.co/cv.php> seleccionando la cámara de comercio e indicando el código de verificación Pd3utkv2TR

Al realizar la verificación podrá visualizar (y descargar) una imagen exacta del certificado que fue entregado al usuario en el momento que se realizó la transacción.

La firma mecánica que se muestra a continuación es la representación gráfica de la firma del secretario jurídico (o de quien haga sus veces) de la Cámara de Comercio quien avala este certificado. La firma mecánica no reemplaza la firma digital en los documentos electrónicos.



CAMARA DE COMERCIO DE BARRANCABERMEJA
SERVICIOS DE INGENIERIA Y CONSULTORIA SAS SECOIN SAS
Fecha expedición: 2020/04/24 - 10:38:36 **** **Recibo No.** S000299391 **** **Num. Operación.** 99-USUPUBXX-20200424-0007
LA MATRÍCULA MERCANTIL PROPORCIONA SEGURIDAD Y CONFIANZA EN LOS NEGOCIOS
RENUEVE SU MATRÍCULA A MÁS TARDAR EL 03 DE JULIO DE 2020 Y EVITE SANCIONES DE HASTA 17 S.M.L.M.V
CODIGO DE VERIFICACIÓN Pd3utkv2TR

*** FINAL DEL CERTIFICADO ***

Certificados calidad SECOIN: Servicios de Ingeniería y Consultoría S.A.S.

BUREAU VERITAS
Certification



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A.S.- SECOIN S.A.S.

Entidad Contratante: Calle 67 No. 32 - 10 Barrio La Floresta
Barrancabermeja, Santander, Colombia.

BVQI Colombia Ltda. certifica que el Sistema de Gestión de la organización ha sido auditado y se ha encontrado conforme con los requerimientos de las normas de Sistema de Gestión que se detallan a continuación

ISO 9001:2015

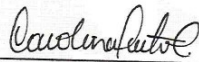
Alcance de la Certificación

ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS, SERVICIOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA (REFRACCIÓN SÍSMICA, MASW, REMI), MEDICIÓN RESISTIVIDAD DEL TERRENO, DISEÑOS DE PAVIMENTOS, LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS, LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS ESPECIALES DRONE - LIDAR, PATOLOGÍA ESTRUCTURAL, ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS CIVILES EN LAS ÁREAS DE: SUELOS, MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, CONCRETOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS, EN EL PRIVADO Y EN LA INDUSTRIA PETROLERA OIL& GAS.

Fecha Original de Inicio de la Certificación:	9 Abril 2013
Fecha de Vencimiento del Ciclo Previo:	8 Abril 2019
Fecha de Auditoría de Recertificación:	5 Abril 2019
Fecha de Inicio del ciclo de Certificación:	29 Mayo 2019

Sujeto a la continua y satisfactoria operación del Sistema de Gestión de la organización, este certificado vence el: 8 Abril 2022

Certificado No. **CO19.01570** Versión: No. 1 Fecha de Revisión: 29 Mayo 2019



Carolina Prieto Carranza
Gerente Técnico



ISO/IEC 17021-1:2015
10-CSG-007

Dirección del Organismo de Certificación: BVQI Colombia Ltda. Calle 72 No 7-82 Piso 3
Edificio Acciones & Valores Bogotá D.C. Colombia.

Cualquier aclaración adicional relativa al alcance de este certificado y a la aplicabilidad de los requerimientos del Sistema de Gestión, puede obtenerse consultando a la organización.

Para comprobar la validez de este certificado por favor llamar al +57 (1) 3129191

BUREAU VERITAS
Certification



SERVICIOS DE INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A.S.- SECOIN S.A.S.

Entidad Contratante: Calle 67 No. 32 - 10 Barrio La Floresta
Barrancabermeja, Santander, Colombia.

BVQI Colombia Ltda. certifica que el Sistema de Gestión de la organización ha sido auditado y se ha encontrado conforme con los requerimientos de las normas de Sistema de Gestión que se detallan a continuación

OHSAS 18001:2007

Alcance de la Certificación

ESTUDIOS GEOLÓGICOS, GEOTÉCNICOS, SERVICIOS DE EXPLORACIÓN GEOFÍSICA (REFRACCIÓN SÍSMICA, MASW, REMI), MEDICIÓN RESISTIVIDAD DEL TERRENO, DISEÑOS DE PAVIMENTOS, LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS, LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS ESPECIALES DRONE - LIDAR, PATOLOGÍA ESTRUCTURAL, ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS Y ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE OBRAS CIVILES EN LAS ÁREAS DE: SUELOS, MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, CONCRETOS Y MEZCLAS ASFÁLTICAS ,EN EL PRIVADO Y EN LA INDUSTRIA PETROLERA OIL& GAS.

Fecha Original de Inicio de la Certificación:	8 Abril 2013
Fecha de Vencimiento del Ciclo Previo:	7 Abril 2019
Fecha de Auditoría de Recertificación:	5 Abril 2019
Fecha de Inicio del ciclo de Certificación:	29 Mayo 2019

Sujeto a la continua y satisfactoria operación del Sistema de Gestión de la organización, este certificado vence el: 11 Marzo 2021

Certificado No. CO19.01571 **Versión: No.** 1 **Fecha de Revisión:** 29 Mayo 2019

Carolina Prieto Carranza
Gerente Técnico



Dirección del Organismo de Certificación: BVQI Colombia Ltda. Calle 72 No 7-82 Piso 3
Edificio Acciones & Valores Bogotá D.C. Colombia.

Cualquier aclaración adicional relativa al alcance de este certificado y a la aplicabilidad de los requerimientos del Sistema de Gestión, puede obtenerse consultando a la organización.

Para comprobar la validez de este certificado por favor llamar al +57 (1) 3129191

Anexo 6. Registro fotográfico.



Fotografía No. 1: Muestra de pavimento asfáltico reciclado



Fotografía No. 2: Serie de tamices utilizada



Fotografía No. 3: Equipo para ensayo de límite líquido.



Fotografía No. 4: Muestra para ensayo de granulometría



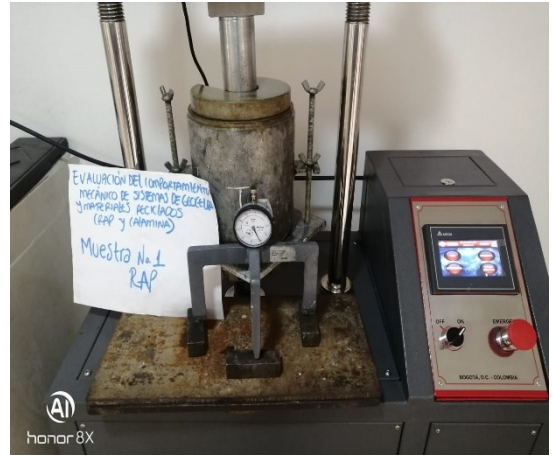
Fotografía No. 5



Fotografía No. 6



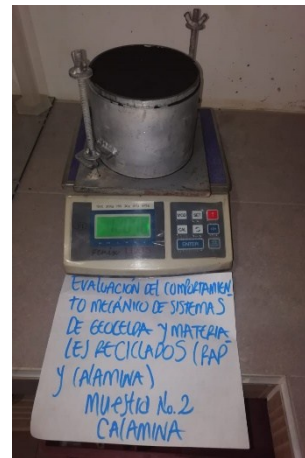
Fotografía No. 7: Molde para ensayo de Próctor modificado y CBR de laboratorio



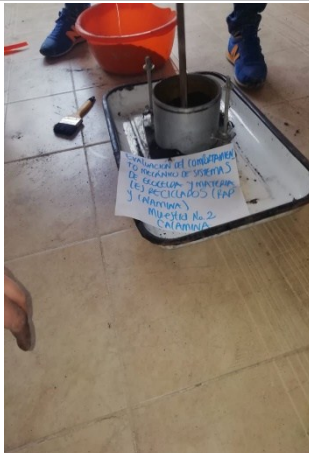
Fotografía No. 8: Ensayo de CBR Método I



Fotografía No. 9: Muestra de calamina



Fotografía No. 10



Fotografía No. 11



Fotografía No. 12: CBR Método I - (inmersión)



Fotografía No. 13



Fotografía No. 14: Muestra fórmula de trabajo: RAP y Calamina
















Fotografía No. 15: Ensayo de Próctor modificado



Fotografía No. 16

Anexo 7. Ensayos de laboratorio apique No. 33

 INGENIOVIN S.A.S. NIT: 901103336-0				PERFIL ESTRATIGRAFICO 1D										
PROYECTO:		INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY												
LOCALIZACIÓN:		CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B S CIV 8006661					FECHA RECEPCIÓN:			10/02/2020				
		TOMADO EN CAMPO APIQUE 33					FECHA ENSAYO:			10/02/2020				
PROFUNDIDAD (m)		ESPESES M.	CLASIF.	DESCRIPCIÓN	MUESTRA	No.	W _n	LL	LP	IP	PASATAMIZ No. 200	CBR INALTERADO	CBR SUMERGIDO	PESO UNITARIO g/cm ³
DESDE	HASTA	(m)	USCS											
0.000	0.140	0.140	N.A	CARPETA ASFALTICA		1	-	-	-	-	-	-	-	-
0.140	0.230	0.090	N.A	PLACA EN CONCRETO HIDRÁULICO		2	-	-	-	-	-	-	-	-
0.230	0.400	0.170	GM	GRAVO ARENOSO DE COLOR GRIS CON PRESENCIA DE DETRITOS DE ASFALTO Y LENTES DE LIMO		3	8.5	20.1	17.4	2.7	4.8	-	-	-
0.400	0.470	0.070	GC	GRAVO ARENOSO DE COLOR CAFÉ CLARO CON PRESENCIA DE DETRITOS DE CONSTRUCCIÓN		4	8.2	32.4	14.1	18.3	23.1	-	-	-
0.470	0.650	0.180	CL	ARCILLA LIMOSA DE COLOR AMARILLO OSCURO CON PRESENCIA DE LENTES DE GRAVA Y ARENA		5	10.1	26.8	16.2	10.7	75.7	-	-	-
0.650	0.800	0.150	CL	ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ CLARO ROJIZO CON PRESENCIA DE VETAS DE OXIDACIÓN		6	17.8	40.7	21.5	19.2	88.5	-	-	-
0.800	1.550	0.750	CL	ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ PÁLIDO		7	15.9	28.9	15.0	14.0	95.0	3.9	1.7	1.7
PROFUNDIDAD DE APIQUE (m)		1.550												
CONVENCIONES														
Muestra de tubo partido (Split Spoon)						Muestra inalterada Tubería de pared delgada -Molde de CBR								
Perforación con corona N _x y B _x						Muestra alterada								
Nivel freático dentro del apique														



LIMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

NIT: 901103336-0

I.N.V. E-125 E-126- V-13

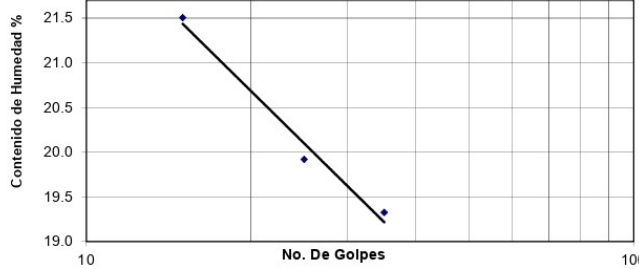
Código a proceso	PCS-01-001	Fecha de edición	10/02/2020	Edición	JCR.R	Copia Controlada	SI
------------------	------------	------------------	------------	---------	-------	------------------	----

CONTRATANTE:	FS PROYECTOS DE INGENIERÍA S.A.S - NIT:900355997-6	VERSIÓN:	1
PROYECTO:	INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY	ORDEN TECNICA:	OT-1321-2020
LOCALIZACIÓN:	CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR	INFORME:	OT-1321-2020
DESCRIPCIÓN:	GRAVO ARENOSO DE COLOR GRIS CON PRESENCIA DE DETRITOS DE ASFALTO Y LENTES DE LIMO	FECHA RECEPCIÓN:	10/02/2020
PROCEDENCIA:	TOMADO EN CAMPO APIQUE 33	FECHA ENSAYO:	10/02/2020

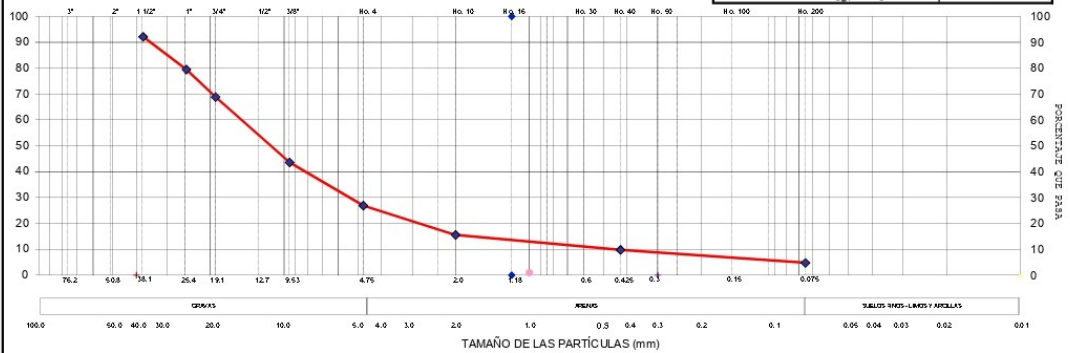
LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
Número de golpes	15	25	35
Vidrio No	45	46	47
W _{mh} (g)	43.54	36.72	42.40
W _{ms} (g)	36.57	31.31	36.21
W _l (g)	4.15	4.16	4.18
Contenido de Humedad, w (%)	21.51%	19.92%	19.33%
LÍMITE PLÁSTICO			HUMEDAD N.
Vidrio No	48	49	49
W _{mh} (g)	18.83	17.94	1011.37
W _{ms} (g)	16.66	15.90	935.20
W _l (g)	4.19	4.21	42.23
Contenido de Humedad (%)	17.38%	17.41%	8.53%

GRANULOMETRÍA				
P1 (q) =	2654.0	P2 (q) =	2526.6	
Tamiz	Tamaño	Peso Retenido (g)	(%) Retenido	
			(%) Pasa	
	1 1/2"	208.9	7.9	92.1
	1"	336.2	12.7	79.5
	3/4"	282.7	10.7	68.8
	3/8"	669.9	25.2	43.6
	No 4	443.2	16.7	26.9
	No 10	300.5	11.3	15.5
	No 40	152.8	5.8	9.8
	No 200	132.4	5.0	4.8
	FONDO	127.4	4.8	

Gravas (%)	73.1
Arenas (%)	22.1
Finos (%)	4.8



RESULTADOS	
Humedad Natural (%):	8.53
Límite Líquido (%):	20.10
Límite Plástico (%):	17.40
Índice Plasticidad (%):	2.7
USC:	GM
Índice de Grupo:	0
AASHTO:	A-1-B
Índice de Liquidez:	-3.28
Índice de Consistencia:	4.28
Peso Unitario Total [g/cm ³]	-
Peso Unitario Seco [g/cm ³]	-



OBSERVACIONES: MUESTRA TOMADA EN CAMPO - SEGÚN LOCALIZACIÓN INDICADA POR EL CONTRATANTE.

EJECUTO - TEC. JUAN CÁMILLO REYES RAMÍREZ
E. ING. CIVIL

REVISÓ Y APROBO - ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ
MAT. PROF. No. 25202-252433 CND

NIT: 90110336-0

I.N.V. E-125 E-126- V-13

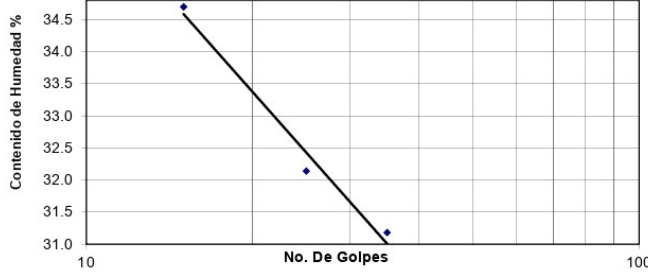
Código proceso	PCS-01-001	Fecha de edición	10/02/2020	Edición	XCR	Copia	Cantidad	SI
----------------	------------	------------------	------------	---------	-----	-------	----------	----

CONTRATANTE:	FS PROYECTOS DE INGENIERÍA S.A.S - NIT:900355997-6	VERSIÓN:	1
PROYECTO:	INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY	ORDEN TECNICA:	OT-1321-2020
LOCALIZACIÓN:	CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR	INFORME:	OT-1321-2020
DESCRIPCIÓN:	GRAVO ARENOSO DE COLOR CAFÉ CLARO CON PRESENCIA DE DETRITOS DE CONSTRUCCIÓN	FECHA RECEPCIÓN:	10/02/2020
PROCEDENCIA:	TOMADO EN CAMPO APIQUE 33	FECHA ENSAYO:	10/02/2020

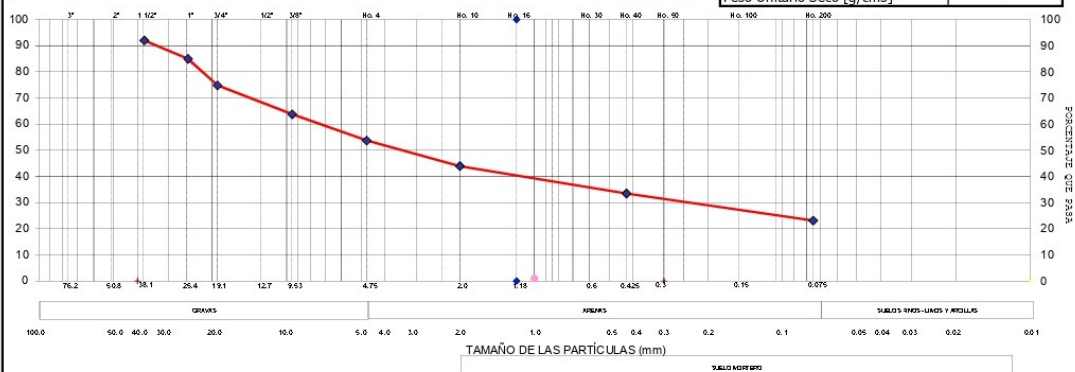
LÍMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
Número de golpes	15	25	35
Vidrio No	50	51	52
W _{mb} (g)	41.75	46.34	46.38
W _{ms} (g)	32.08	36.10	36.37
W _l (g)	4.22	4.24	4.25
Contenido de Humedad, w (%)	34.70%	32.14%	31.18%
LÍMITE PLÁSTICO			HUMEDAD N.
Vidrio No	53	54	55
W _{mb} (g)	17.36	17.25	1067.34
W _{ms} (g)	15.75	15.64	989.55
W _l (g)	4.27	4.28	43.15
Contenido de Humedad (%)	14.02%	14.16%	8.22%

GRANULOMETRÍA			
P1 (g) =	2571.9	P2 (g) =	1977.8
Tamiz	Tamaño	Peso Retenido (g)	(%) Retenido
			(%) Pasa
1 1/2"		206.6	8.0
1"		180.8	7.0
3/4"		260.9	10.1
3/8"		284.1	11.0
No 4		258.3	10.0
No 10		250.6	9.7
No 40		269.7	10.5
No 200		266.8	10.4
FONDO		594.1	23.1

Gravas (%)	46.3
Arenas (%)	30.6
Finos (%)	23.1



RESULTADOS	
Humedad Natural (%):	8.22
Límite Líquido (%):	32.43
Límite Plástico (%):	14.09
Índice Plasticidad (%):	18.3
USC:	GC
Índice de Grupo:	0
AASHTO:	A-2-6
Índice de Liquidez:	-0.32
Índice de Consistencia:	1.32
Peso Unitario Total [g/cm ³]:	-
Peso Unitario Seco [g/cm ³]:	-



OBSERVACIONES: MUESTRA TOMADA EN CAMPO - SEGÚN LOCALIZACIÓN INDICADA POR EL CONTRATANTE.

EJECUTO – TEC. JUAN CÁMILLO REYES RAMÍREZ
E. ING. CIVIL

REVISÓ Y APROBO – ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ
MAT. PROF. No. 25202-252433 CND



LIMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

NIT: 901103336-0

I.N.V. E-125 E-126- V-13

Código proceso	PCS-01-001	Fecha de edición	10/02/2020	Edición	JCR	Copia Controlada	SI
----------------	------------	------------------	------------	---------	-----	------------------	----

CONTRATANTE: FS PROYECTOS DE INGENIERÍA S.A.S - NIT:900355997-6

PROYECTO: INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY

LOCALIZACIÓN: CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR

DESCRIPCIÓN: ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ CLARO ROJIZO CON PRESENCIA DE VETAS DE OXIDACIÓN

PROCEDENCIA: TOMADO EN CAMPO APIQUE 33

VERSIÓN: 1

ORDEN TECNICA: OT-1321-2020

INFORME: OT-1321-2020

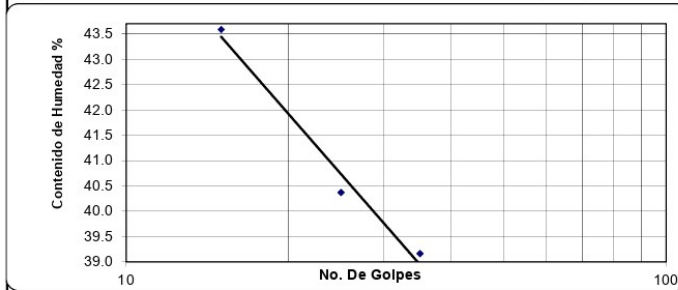
FECHA RECEPCIÓN: 10/02/2020

FECHA ENSAYO: 10/02/2020

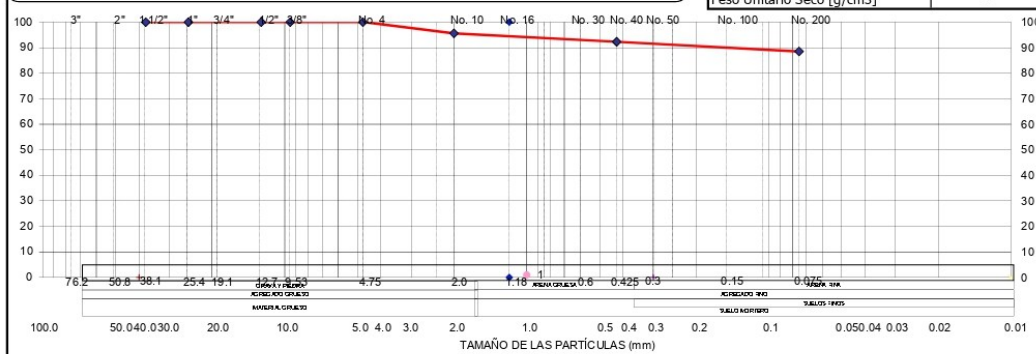
LIMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
Número de golpes	15	25	35
Vidrio No	62	63	64
W_{mh} (g)	38.35	38.79	46.19
W_{ms} (g)	27.99	28.90	34.41
W_{li} (g)	4.22	4.41	4.34
Contenido de Humedad, w (%)	43.58%	40.37%	39.17%
LÍMITE PLÁSTICO			HUMEDAD N.
Vidrio No	65	66	66
W_{mh} (g)	20.54	18.25	1113.25
W_{ms} (g)	17.66	15.81	951.91
W_{li} (g)	4.37	4.38	44.00
Contenido de Humedad (%)	21.67%	21.38%	17.77%

GRANULOMETRÍA			
P1 (g) =	352.4	P2 (g) =	40.6
Tamiz	Tamaño	Peso Retenido (g)	(%) Retenido (%) Pasa
1 1/2"	0.0	0.0	100.0
1"	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.0	0.0	100.0
3/8"	0.0	0.0	100.0
No 4	0.0	0.0	100.0
No 10	15.7	4.5	95.5
No 40	11.5	3.3	92.3
No 200	13.4	3.8	88.5
FONDO	311.8	88.5	

Gravas (%)	0.0
Arenas (%)	11.5
Finos (%)	88.5



RESULTADOS	
Humedad Natural (%):	17.77
Límite Líquido (%):	40.73
Límite Plástico (%):	21.53
Índice Plasticidad (%):	19.2
USC:	CI
Índice de Grupo:	17
AASHTO:	A-7-6
Índice de Liquidez:	-0.20
Índice de Consistencia:	1.20
Peso Unitario Total [g/cm ³]	-
Peso Unitario Seco [g/cm ³]	-



OBSERVACIONES: MUESTRA TOMADA EN CAMPO - SEGÚN LOCALIZACIÓN INDICADA POR EL CONTRATANTE.

EJECUTÓ - TEC. JUAN CAMILO REYES RAMÍREZ
E. ING. CIVIL

REVISÓ Y APROBÓ - ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ
MAT. PROF. No. 25202-262433 CND



LIMITES DE CONSISTENCIA Y GRADACIÓN

NIT: 901103336-0

I.N.V. E-125 E-126- V-13

Código proceso	PCS-01-001	Fecha de edición	10/02/2020	Edición	XRR	Copia Controlada	SI
----------------	------------	------------------	------------	---------	-----	------------------	----

CONTRATANTE: FS PROYECTOS DE INGENIERÍA S.A.S - NIT:900355997-6

PROYECTO: INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY

LOCALIZACIÓN: CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR

DESCRIPCIÓN: ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ PÁLIDO

PROCEDENCIA: TOMADO EN CAMPO APIQUE 33

VERSIÓN: 1

ORDEN TÉCNICA: OT-1321-2020

INFORME: OT-1321-2020

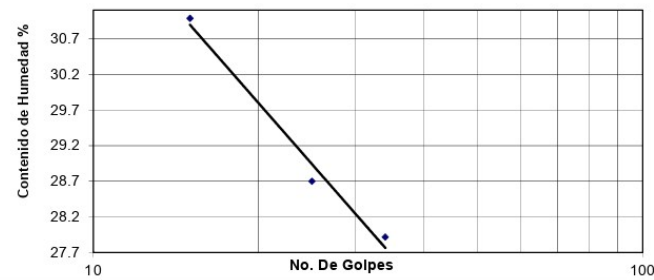
FECHA RECEPCIÓN: 10/02/2020

FECHA ENSAYO: 10/02/2020

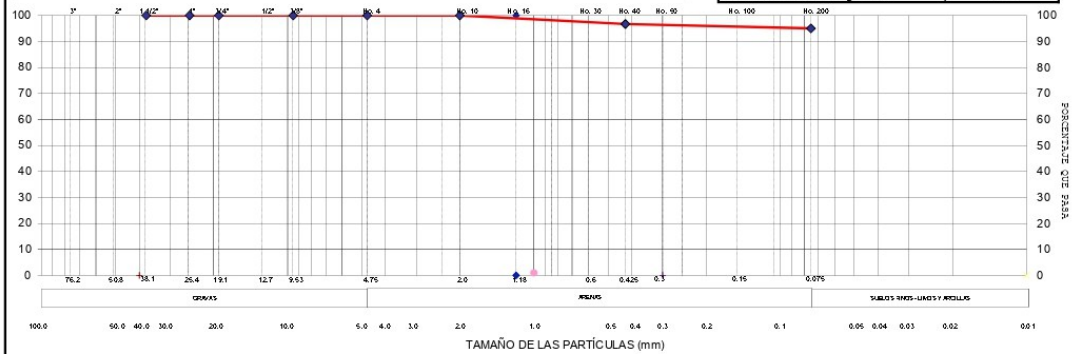
LIMITES DE CONSISTENCIA			
LÍMITE LÍQUIDO			
Número de golpes	15	25	34
Vidrio No	67	68	69
W_{mh} (g)	40.51	42.12	38.85
W_{ms} (g)	31.97	33.71	31.34
W_{li} (g)	4.40	4.42	4.43
Contenido de Humedad, w (%)	30.99%	28.70%	27.92%
LÍMITE PLÁSTICO			HUMEDAD N.
Vidrio No	70	71	72
W_{mp} (g)	16.44	15.53	1004.51
W_{ms} (g)	14.89	14.08	872.66
W_{pl} (g)	4.45	4.46	44.97
Contenido de Humedad (%)	14.86%	15.11%	15.93%

GRANULOMETRÍA				
P1 (g) =	291.9	P2 (g) =	14.5	
Tamiz	Tamaño	Peso Retenido (g)	(%) Retenido	(%) Pasa
1 1/2"		0.0	0.0	100.0
1"		0.0	0.0	100.0
3/4"		0.0	0.0	100.0
3/8"		0.0	0.0	100.0
No 4		0.0	0.0	100.0
No 10		0.0	0.0	100.0
No 40		9.6	3.3	96.7
No 200		4.9	1.7	98.3
FONDO		277.4	95.0	

Gravas (%)	0.0
Arenas (%)	5.0
Finos (%)	95.0



RESULTADOS	
Humedad Natural (%):	15.93
Límite Líquido (%):	28.94
Límite Plástico (%):	14.99
Índice Plasticidad (%):	14.0
USC:	CL
Índice de Grupo:	12
AASHTO:	A-6
Índice de Liquidez:	0.07
Índice de Consistencia:	0.93
Peso Unitario Total [g/cm ³]	1.76
Peso Unitario Seco [g/cm ³]	1.70



OBSERVACIONES: MUESTRA TOMADA EN CAMPO - SEGÚN LOCALIZACIÓN INDICADA POR EL CONTRATANTE.

EJECUTO - TEC. JUAN CAMILO REYES RAMÍREZ
E. ING. CIVIL

REVISÓ Y APROBO - ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ
MAT. PROF. No. 25202-252433 CND

**INGEOVIN S.A.S.****ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO)**

NIT: 901103336-0

I.N.V. E -148 V-13

PROYECTO: INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY**LOCALIZACIÓN:** CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR**INFORME:** OT-1321-2020**DESCRIPCIÓN:** ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ PÁLIDO**FECHA RECEPCIÓN:** 10/02/2020**PROCEDENCIA:** TOMADO EN CAMPO APIQUE 33**FECHA - INICIO ENSAYO:** 10/02/2020**ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO) (I.N.V.E-148)**

CONDICIÓN DE PRUEBA	NATURAL		DESPUES DE 96 HORAS DE INMERSIÓN	
	S. Inglés	S. Internacional	S. Inglés	S. Internacional
UNIDADES				
Cont. Humedad Natural, w (%)	15.9%		18.6%	
Peso muestra, húmeda+molde, W_{mh+m}	15.97 lb	7246 g	16.25 lb	7371 g
Peso molde, W_m	5.80 lb	2631 g	5.80 lb	2631 g
Volumen molde, V	180.49 in ³	2958 cm ³	180.49 in ³	2958 cm ³
Peso Unitario húmedo, g_w	0.056 lb/in ³	1.560 g/cm ³	0.058 lb/in ³	1.602 g/cm ³
Peso Unit. seco compactación, g_c	0.049 lb/in ³	1.346 g/cm ³	0.049 lb/in ³	1.351 g/cm ³
Agua Absorbida (%)			2.7%	
Días de inmersión	4			
Lect. Expansión Inicial (mm)	0.0010			
Lect. Expansión Día 1 (mm)	0.0060			
Lect. Expansión Día 2 (mm)	0.0150			
Lect. Expansión Día 3 (mm)	0.0280			
Lect. Expansión Día 4 (mm)	0.0290			
Expansión Total (%)	0.016			

Penetración [in] [mm]	Carga Total		Esfuerzo		Carga Total		Esfuerzo	
	[kg]	[lb]	kgf/cm2	[psi]	[kg]	[lb]	kgf/cm2	[psi]
0,000 0,000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0,005 0,127	7.4	16.4	0.4	5.2	1.9	4.1	0.1	1.3
0,025 0,630	20.1	44.4	1.0	14.1	7.5	16.5	0.4	5.3
0,050 1,270	38.6	85.2	1.9	27.1	14.2	31.2	0.7	9.9
0,075 1,900	49.0	108.0	2.4	34.4	20.0	44.1	1.0	14.0
0,100 2,540	55.7	122.8	2.7	39.1	24.3	53.5	1.2	17.0
0,125 3,170	58.3	128.5	2.9	40.9	27.6	60.8	1.4	19.4
0,150 3,810	61.2	134.8	3.0	42.9	29.3	64.7	1.4	20.6
0,200 5,080	64.1	141.3	3.2	45.0	32.1	70.8	1.6	22.5
0,300 7,620	66.1	145.7	3.3	46.4	34.1	75.2	1.7	23.9
0,400 10,160	68.3	150.6	3.4	47.9	35.9	79.1	1.8	25.2
0,500 12,700	69.5	153.2	3.4	48.8	36.3	80.0	1.8	25.5

CONDICIÓN DE PRUEBA	NATURAL	DESPUES DE 96 HORAS DE INMERSIÓN
Corrección		
Cont. Hum. Penetración (%)	16%	19%
Sobrecarga Saturación. (lb)	10.0	10.0
Sobrecarga Penetración. (lb)	10.0	10.0
C.B.R. Corregido a 0,1"	3.91	1.70
C.B.R. Corregido a 0,2"	3.00	1.50

EJECUTÓ - TEC. JUAN CAMILO REYES RAMÍREZ

REVISÓ Y APROBO - ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ

BOGOTÁ D.C. - CARRERA 811 No. 58 J - 22 Sur

EMAIL: ingeovint@gmail.com jcreyesr@unal.edu.co

MÓVIL - 3123230703 - 3115363182

Los resultados corresponden únicamente a las muestras ensayadas



INGEOVIN F S.A.S.

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL C.B.R.
(CALIFORNIA BEARING RATIO)

NIT: 901103336-0

I.N.V. E -172 V-13

PROYECTO: INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY

LOCALIZACIÓN: CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR

INFORME: OT-1321-2020

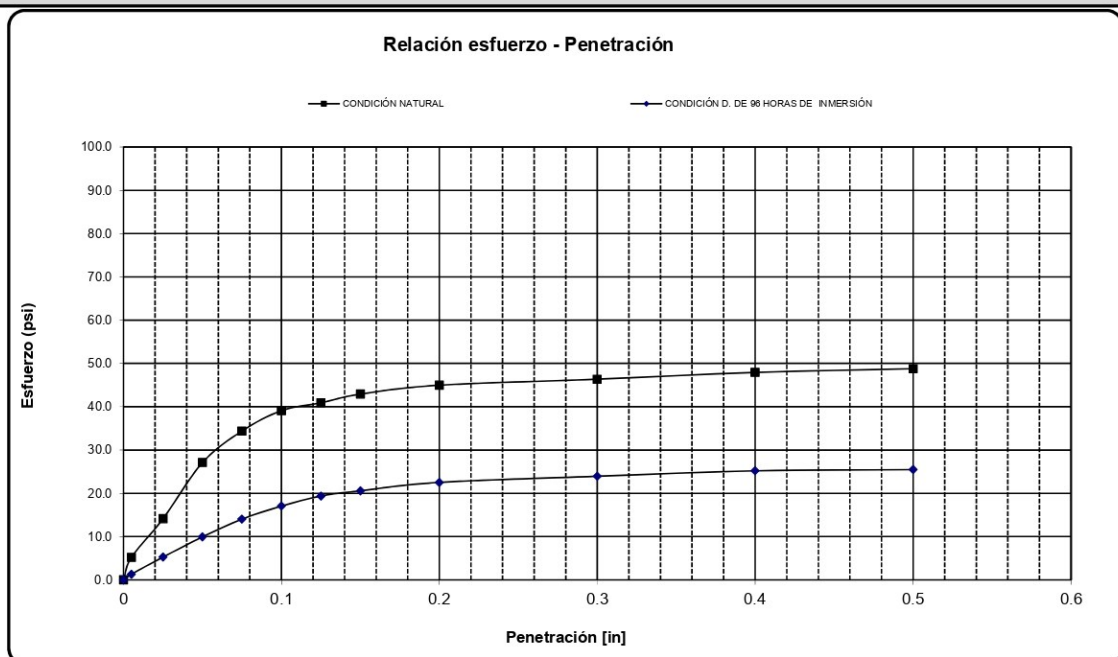
DESCRIPCIÓN: ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ PÁLIDO

FECHA RECEPCIÓN: 10-feb-20

PROCEDENCIA: TOMADO EN CAMPO APIQUE 33

FECHA - INICIO ENSAYO: 10-feb-20

ENSAYO DE DETERMINACIÓN DEL C.B.R. (CALIFORNIA BEARING RATIO) (I.N.V.E-148)



EJECUTÓ - TEC. JUAN CAMILO REYES RAMÍREZ
E. ING. CIVIL

REVISÓ Y APROBO - ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ
MAT. PROF. No. 25202-252433 CND

BOGOTÁ D.C. CARRERA 811 No. 58 J - 22Sur EMAIL ingeovinf@gmail.com jcreyes@unal.edu.co
MÓVIL - 3123230703 - 3115563182

Los resultados corresponden únicamente a las muestras ensayadas



INGEOVIN F S.A.S.

DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE PENETRACIÓN MEDIANTE EL PENETROMETRO DINÁMICO DE CONO

NIT: 901103336-0

I.N.V. E -172 V-13

PROYECTO: INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE VÍAS EN LA LOCALIDAD DE KENNEDY

LOCALIZACIÓN: CARRERA 78 C ENTRE CALLE 38 A SUR Y CALLE 38 B SUR

INFORME: OT-1321-2020

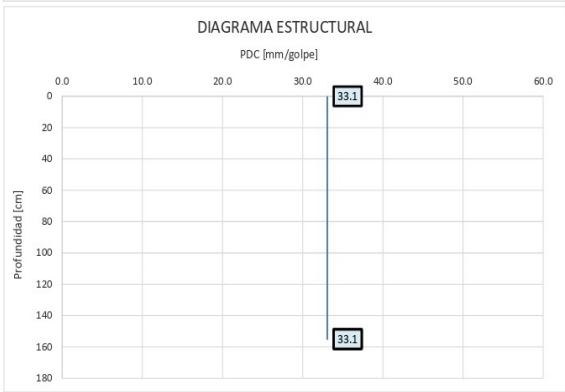
DESCRIPCIÓN: ARCILLA LIMOSA DE COLOR CAFÉ PÁLIDO

FECHA RECEPCIÓN: 10/02/2020

PROCEDENCIA: TOMADO EN CAMPO APIQUE 33

FECHA - INICIO ENSAYO: 10/02/2020

NÚMERO DE GOLPES	LECTURA DE PENETRACIÓN [cm]	PROFUNDIDAD [cm]
0	0.0	80.0
1	5.0	85.0
2	8.0	88.0
3	11.0	91.0
4	13.0	93.0
5	16.0	96.0
6	19.0	99.0
7	21.0	101.0
8	24.0	104.0
9	27.0	107.0
10	30.0	110.0
11	35.0	115.0
12	38.0	118.0
13	41.0	121.0
14	44.0	124.0
15	49.0	129.0
16	52.0	132.0
17	55.0	135.0
18	59.0	139.0
19	62.0	142.0
20	65.0	145.0
21	66.0	146.0
22	69.0	149.0
23	72.0	152.0
24	78.0	158.0
25	81.0	161.0
26	84.0	164.0
27	89.0	169.0
28	92.0	172.0
29	98.0	178.0
30	101.0	181.0
31	105.0	185.0
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49		



CORRELACIONES CBR EN FUNCIÓN DEL PDC

PROPUESTA	PROFUNDIDAD [m]	PDC [mm/golpe]	CBR - 0,1"	GRUPO HOMOGÉNEO
Bateman (Suelos Finos)	1.550	33.1	3.4	1
UPTC (Suelos Finos)	1.550	33.1	3.5	1
Cuerpo de Ingenieros de Usa	1.550	33.1	10.5	1
Bateman (Suelos Finos)				2
UPTC (Suelos Finos)				2
Cuerpo de Ingenieros de Usa				2
Bateman (Suelos Finos)				3
UPTC (Suelos Finos)				3
Cuerpo de Ingenieros de Usa				3

EJECUTO - TEC. JORJI CARLOS REYES RAMÍREZ E. ING. CIVIL

REVISÓ Y APROBÓ - ING. CARLOS ALBERTO REYES RAMÍREZ MAT. PROF. No. 29202-252433 CND

Los resultados corresponden únicamente a las muestras ensayadas

Anexo 8. Memorias de cálculo – Modelación

ALTERNATIVA No. 1

Sistema Multicapa (Alternativa 1)	
Número de capas:	4
Número de cargas:	2
Número de puntos:	54

Preferencias	
Análisis:	General Estático Lineal
Unión entre capas:	Ligadas
Cargas:	General
Puntos:	General

Capas					
ID	Modulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor (m)	Descripcion	Tipo
1	2,21E+09	0,35	0,15	Carpeta asfáltica	Elástica
2	2,06E+08	0,40	0,20	Base Granular	Elástica
3	1,03E+08	0,40	0,20	Sub Base Granular Reciclada	Elástica
4	4,10E+07	0,45	0,30	Subrasante mejorada con Rajón	Elástica

0,85

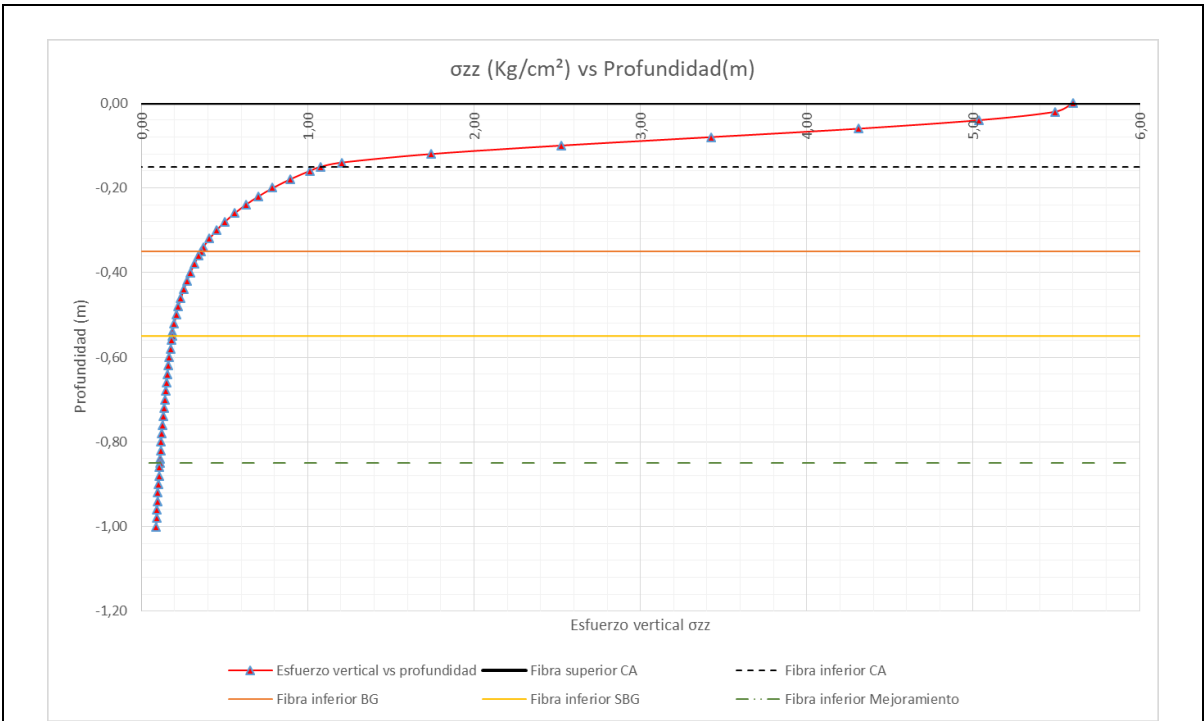
Cargas				
ID	Carga (N)	Presion (Pa)	X (m)	Y (m)
1	2,00E+04	549172,00	0,00	0,0
2	2,00E+04	549172,00	0,00	0,3

MINIMO	-6,836	MINIMO	-5,543	MINIMO	0,089	MINIMO	0,0	MINIMO	0,0	MINIMO	-0,404
MAXIMO	10,963	MAXIMO	9,700	MAXIMO	5,599	MAXIMO	0,0	MAXIMO	0,0	MAXIMO	0,000

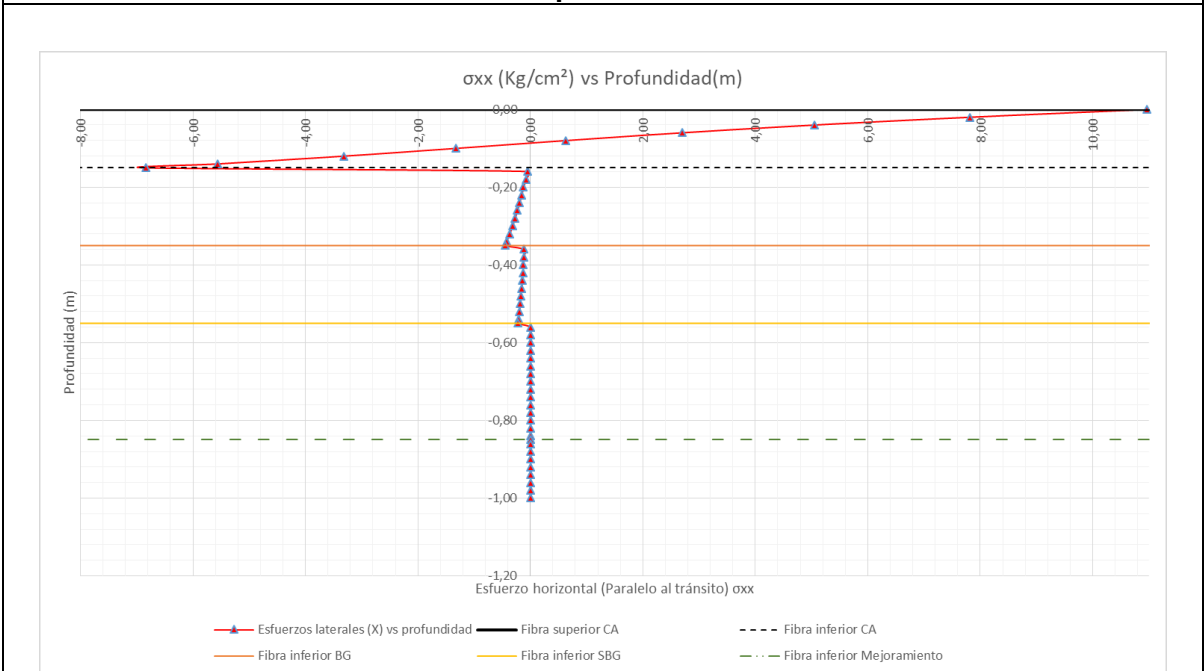
Puntos				Esfuerzos																
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #	Descripción	Sxx (Pa)	Sxx (Kg/cm²)	C o T	Syy (Pa)	Syy (Kg/cm²)	C o T	Szz (Pa)	Szz (Kg/cm²)	% Esfuerzo	Sxy (Pa)	Sxy (Kg/cm²)	Sxz (Pa)	Sxz (Kg/cm²)	Syz (Pa)	Syz (Kg/cm²)
1	0,00	0,00	0,00	1	Carpeta asfáltica	1,08E+06	10,9628	C	9,51E+05	9,700	C	5,49E+05	5,5993	100,00%	-2,28E-11	0,0	-2,13E-27	0,0	-1,16E-11	0,0000
2	0,00	0,00	0,02	1		7,66E+05	7,8110	C	6,82E+05	6,954	C	5,39E+05	5,4926	98,10%	-1,54E-11	0,0	-2,86E-12	0,0	-1,56E+04	-0,1589
3	0,00	0,00	0,04	1		4,96E+05	5,0554	C	4,47E+05	4,557	C	4,94E+05	5,0369	89,96%	-8,98E-12	0,0	-5,17E-12	0,0	-2,81E+04	-0,2869
4	0,00	0,00	0,06	1		2,64E+05	2,6961	C	2,47E+05	2,523	C	4,23E+05	4,3112	77,00%	-3,11E-12	0,0	-6,63E-12	0,0	-3,61E+04	-0,3679
5	0,00	0,00	0,08	1		6,13E+04	0,6251	C	7,45E+04	0,760	C	3,36E+05	3,4247	61,16%	2,43E-12	0,0	-7,28E-12	0,0	-3,97E+04	-0,4043
6	0,00	0,00	0,10	1		-1,29E+05	-1,3202	T	-8,64E+04	-0,881	T	2,47E+05	2,5235	45,07%	7,91E-12	0,0	-7,13E-12	0,0	-3,88E+04	-0,3955
7	0,00	0,00	0,12	1		-3,25E+05	-3,3179	T	-2,51E+05	-2,561	T	1,71E+05	1,7404	31,08%	1,36E-11	0,0	-6,16E-12	0,0	-3,35E+04	-0,3420
8	0,00	0,00	0,14	1		-5,45E+05	-5,5581	T	-4,37E+05	-4,454	T	1,18E+05	1,2050	21,52%	1,99E-11	0,0	-4,43E-12	0,0	-2,41E+04	-0,2459
9	0,00	0,00	0,15	1		-6,70E+05	-6,8359	T	-5,44E+05	-5,543	T	1,06E+05	1,0775	19,24%	2,33E-11	0,0	-3,30E-12	0,0	-1,80E+04	-0,1832
10	0,00	0,00	0,16	2	Base Granular	-4,34E+03	-0,0442	T	6,82E+03	0,070	C	9,92E+04	0,1011	18,06%	2,05E-12	0,0	-3,28E-12	0,0	-1,79E+04	-0,1821
11	0,00	0,00	0,18	2		-8,01E+03	-0,0816	T	2,58E+03	0,026	C	8,76E+04	0,8928	15,94%	1,94E-12	0,0	-3,22E-12	0,0	-1,75E+04	-0,1787
12	0,00	0,00	0,20	2		-1,15E+04	-0,1176	T	-1,54E+03	-0,016	T	7,76E+04	0,7912	14,13%	1,84E-12	0,0	-3,13E-12	0,0	-1,70E+04	-0,1735
13	0,00	0,00	0,22	2		-1,51E+04	-0,1535	T	-5,64E+03	-0,058	T	6,90E+04	0,7034	12,56%	1,73E-12	0,0	-3,01E-12	0,0	-1,64E+04	-0,1669
14	0,00	0,00	0,24	2		-1,87E+04	-0,1905	T	-9,79E+03	-0,100	T	6,15E+04	0,6271	11,20%	1,63E-12	0,0	-2,86E-12	0,0	-1,56E+04	-0,1587
15	0,00	0,00	0,26	2		-2,25E+04	-0,2294	T	-1,40E+04	-0,143	T	5,50E+04	0,5604	10,01%	1,55E-12	0,0	-2,69E-12	0,0	-1,46E+04	-0,1492
16	0,00	0,00	0,28	2		-2,66E+04	-0,2710	T	-1,84E+04	-0,188	T	4,92E+04	0,5021	8,97%	1,50E-12	0,0	-2,49E-12	0,0	-1,36E+04	-0,1383
17	0,00	0,00	0,30	2		-3,10E+04	-0,3165	T	-2,31E+04	-0,235	T	4,43E+04	0,4515	8,06%	1,47E-12	0,0	-2,27E-12	0,0	-1,24E+04	-0,1260
18	0,00	0,00	0,32	2		-3,60E+04	-0,3668	T	-2,80E+04	-0,285	T	4,00E+04	0,4081	7,29%	1,47E-12	0,0	-2,02E-12	0,0	-1,10E+04	-0,1121
19	0,00	0,00	0,34	2		-4,15E+04	-0,4232	T	-3,33E+04	-0,339	T	3,65E+04	0,3721	6,64%	1,51E-12	0,0	-1,74E-12	0,0	-9,48E+03	-0,0966
20	0,00	0,00	0,35	2	-4,45E+04	-0,4542	T	-3,61E+04	-0,368	T	3,50E+04	0,3570	6,38%	1,55E-12	0,0	-1,59E-12	0,0	-8,65E+03	-0,0882	
21	0,00	0,00	0,36	3	Sub Base granular	-1,09E+04	-0,1109	T	-6,85E+03	-0,070	T	3,37E+04	0,3432	6,13%	7,39E-13	0,0	-1,54E-12	0,0	-8,36E+03	-0,0852
22	0,00	0,00	0,38	3		-1,15E+04	-0,1171	T	-7,81E+03	-0,080	T	3,12E+04	0,3177	5,67%	6,74E-13	0,0	-1,43E-12	0,0	-7,79E+03	-0,0794
23	0,00	0,00	0,40	3		-1,22E+04	-0,1243	T	-8,83E+03	-0,090	T	2,89E+04	0,2945	5,26%	6,19E-13	0,0	-1,33E-12	0,0	-7,23E+03	-0,0737
24	0,00	0,00	0,42	3		-1,30E+04	-0,1327	T	-9,90E+03	-0,101	T	2,68E+04	0,2736	4,89%	5,73E-13	0,0	-1,23E-12	0,0	-6,67E+03	-0,0680
25	0,00	0,00	0,44	3		-1,39E+04	-0,1422	T	-1,10E+04	-0,113	T	2,50E+04	0,2546	4,55%	5,35E-13	0,0	-1,12E-12	0,0	-6,11E+03	-0,0623
26	0,00	0,00	0,46	3		-1,50E+04	-0,1530	T	-1,22E+04	-0,125	T	2,33E+04	0,2376	4,24%	5,07E-13	0,0	-1,02E-12	0,0	-5,55E+03	-0,0566
27	0,00	0,00	0,48	3		-1,62E+04	-0,1653	T	-1,35E+04	-0,138	T	2,18E+04	0,2224	3,97%	4,89E-13	0,0	-9,12E-13	0,0	-4,97E+03	-0,0506
28	0,00	0,00	0,50	3		-1,76E+04	-0,1790	T	-1,49E+04	-0,152	T	2,05E+04	0,2091	3,73%	4,80E-13	0,0	-8,02E-13	0,0	-4,36E+03	-0,0445
29	0,00	0,00	0,52	3		-1,91E+04	-0,1946	T	-1,65E+04	-0,168	T	1,94E+04	0,1976	3,53%	4,82E-13	0,0	-6,86E-13	0,0	-3,73E+03	-0,0381
30	0,00	0,00	0,54	3		-2,08E+04	-0,2121	T	-1,81E+04	-0,185	T	1,85E+04	0,1882	3,36%	4,95E-13	0,0	-5,62E-13	0,0	-3,06E+03	-0,0312
31	0,00	0,00	0,55	3	-2,17E+04	-0,2218	T	-1,90E+04	-0,194	T	1,81E+04	0,1842	3,29%	5,07E-13	0,0	-4,97E-13	0,0	-2,70E+03	-0,0276	
32	0,00	0,00	0,56	4	Mejoramiento con rajón y sello en SBG	1,89E+02	0,0019	C	1,20E+03	0,012	C	1,77E+04	0,1806	3,23%	1,86E-13	0,0	-4,83E-13	0,0	-2,63E+03	-0,0268
33	0,00	0,00	0,58	4		2,08E+02	0,0021	C	1,14E+03	0,012	C	1,70E+04	0,1737	3,10%	1,71E-13	0,0	-4,56E-13	0,0	-2,48E+03	-0,0253
34	0,00	0,00	0,60	4		2,25E+02	0,0023	C	1,08E+03	0,011	C	1,64E+04	0,1672	2,99%	1,57E-13	0,0	-4,32E-13	0,0	-2,35E+03	-0,0240
35	0,00	0,00	0,62	4		2,38E+02	0,0024	C	1,03E+03	0,010	C	1,58E+04	0,1611	2,88%	1,45E-13	0,0	-4,09E-13	0,0	-2,23E+03	-0,0227
36	0,00	0,00	0,64	4		2,49E+02	0,0025	C	9,77E+02	0,010	C	1,52E+04	0,1553	2,77%	1,34E-13	0,0	-3,88E-13	0,0	-2,11E+03	-0,0215
37	0,00	0,00	0,66	4		2,58E+02	0,0026	C	9,31E+02	0,009	C	1,47E+04	0,1499	2,68%	1,24E-13	0,0	-3,68E-13	0,0	-2,00E+03	-0,0204
38	0,00	0,00	0,68	4		2,65E+02	0,0027	C	8,88E+02	0,009	C	1,42E+04	0,1448	2,59%	1,14E-13	0,0	-3,49E-13	0,0	-1,90E+03	-0,0194
39	0,00	0,00	0,70	4		2,71E+02	0,0028	C	8,48E+02	0,009	C	1,37E+04	0,1399	2,50%	1,06E-13	0,0	-3,32E-13	0,0	-1,81E+03	-0,0184
40	0,00	0,00	0,72	4		2,75E+02	0,0028	C	8,11E+02	0,008	C	1,33E+04	0,1353	2,42%	9,84E-14	0,0	-3,16E-13	0,0	-1,72E+03	-0,0175
41	0,00	0,00	0,74	4		2,78E+02	0,0028	C	7,76E+02	0,008	C	1,28E+04	0,1309	2,34%	9,14E-14	0,0	-3,01E-13	0,0	-1,64E+03	-0,0167
42	0,00	0,00	0,76	4		2,80E+02	0,0029	C	7,44E+02	0,008	C	1,24E+04	0,1267	2,26%	8,51E-14	0,0	-2,86E-13	0,0	-1,56E+03	-0,0159
43	0,00	0,00	0,78	4		2,82E+02	0,0029	C	7,14E+02	0,007	C	1,20E+04	0,1228	2,19%	7,93E-14	0,0	-2,73E-13	0,0	-1,49E+03	-0,0152
44	0,00	0,00	0,80	4		2,83E+02	0,0029	C	6,86E+02	0,007	C	1,17E+04	0,1190	2,13%	7,40E-14	0,0	-2,61E-13	0,0	-1,42E+03	-0,0145
45	0,00	0,00	0,82	4		2,83E+02	0,0029	C	6,60E+02	0,007	C	1,13E+04	0,1154	2,06%	6,92E-14	0,0	-2,49E-13	0,0	-1,35E+03	-0,0138
46	0,00	0,00	0,84	4		2,83E+02	0,0029	C	6,35E+02	0,006	C	1,10E+04	0,1120	2,00%	6,47E-14	0,0	-2,38E-13	0,0	-1,29E+03	-0,0132
47	0,00	0,00	0,85	4		2,83E+02	2,88E-03	C	6,23E+02	0,006	C	1,08E+04	0,1103	1,97%	6,26E-14	0,0	-2,33E-13	0,0	-1,27E+03	-0,0129
48	0,00	0,00	0,86	4	2,82E+02	0,0029	C	6,12E+02	0,006	C	1,07E+04	0,1087	1,94%	6,06E-14	0,0	-2,28E-13	0,0	-1,24E+03	-0,0126	
49	0,00	0,00	0,88	4	2,81E+02	0,0029	C	5,91E+02	0,006	C	1,04E+04	0,1056	1,89%	5,68E-14	0,0	-2,18E-13	0,0	-1,19E+03	-0,0121	
50	0,00	0,00	0,90	4	2,80E+02	0,0029	C	5,71E+02	0,006	C	1,01E+04	0,1026	1,83%	5,34E-14	0,0	-2,09E-13	0,0	-1,14E+03	-0,0116	
51	0,00	0,00	0,92	4	2,79E+02	0,0028	C	5,52E+02	0,006	C	9,78E+03	0,0997	1,78%	5,01E-14	0,0	-2,00E-13	0,0	-1,09E+03	-0,0111	
52	0,00	0,00	0,94	4	2,78E+02	0,0028	C	5,34E+02	0,005	C	9,51E+03	0,0970	1,73%	4,72E-14	0,0	-1,92E-13	0,0	-1,04E+03	-0,0106	
53	0,00	0,00	0,96	4	2,76E+02	0,0028	C	5,18E+02	0,005	C	9,26E+03	0,0944	1,69%	4,44E-14	0,0	-1,84E-13	0,0	-1,00E+03	-0,0102	
54	0,00	0,00	0,98	4	2,74E+02	0,0028	C	5,02E+02	0,005	C	9,01E+03	0,0919	1,64%	4,19E-14	0,0	-1,77E-13	0,0	-9,63E+02	-0,0098	
55	0,00	0,00	1,00	4	2,72E+02	0,0028	C	4,88E+02	0,005	C	8,77E+03	0,0895	1,60%	3,95E-14	0,0	-1,70E-13	0,0	-9,25E+02	-0,0094	

MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
2,49E-04	1,73E-04	4,77E-04	2,85E-20	-2,61E-36	-1,42E-20	3,96E-21	2,16E-05	6,23E-04	0,0	0,0216	0,6232	
MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	
-2,34E-04	-1,70E-04	-7,26E-05	-2,78E-20	-4,46E-20	-2,43E-04	-5,48E-21	-2,98E-05	3,31E-04	0,0	-0,0298	0,3307	

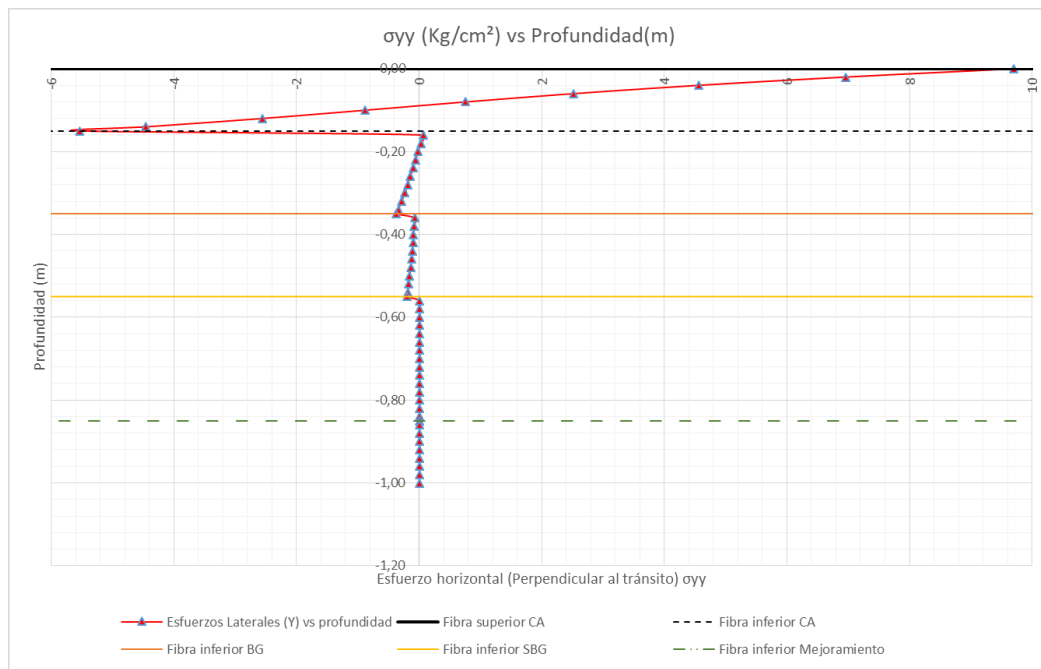
Puntos				Deformaciones unitarias (m/m)							Deflexiones (m)			Deflexiones (mm)			
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #	Descripción	Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)
1	0,00	0,00	0,00	1	Carpeta asfáltica	2,49E-04	1,73E-04	-7,26E-05	-2,78E-20	-2,61E-36	-1,42E-20	3,96E-21	2,16E-05	6,23E-04	0,0	0,0216	0,6227
2	0,00	0,00	0,02	1		1,54E-04	1,02E-04	1,44E-05	-1,89E-20	-3,50E-21	-1,91E-05	2,94E-21	1,60E-05	6,23E-04	0,0	0,0160	0,6232
3	0,00	0,00	0,04	1		7,54E-05	4,55E-05	7,43E-05	-1,10E-20	-6,32E-21	-3,44E-05	1,96E-21	1,07E-05	6,22E-04	0,0	0,0107	0,6223
4	0,00	0,00	0,06	1		1,35E-05	3,14E-06	1,10E-04	-3,81E-21	-8,11E-21	-4,41E-05	1,03E-21	5,59E-06	6,20E-04	0,0	0,0056	0,6204
5	0,00	0,00	0,08	1		-3,73E-05	-2,92E-05	1,31E-04	2,97E-21	-8,91E-21	-4,85E-05	1,13E-22	6,17E-07	6,18E-04	0,0	0,0006	0,6180
6	0,00	0,00	0,10	1		-8,42E-05	-5,79E-05	1,46E-04	9,68E-21	-8,72E-21	-4,75E-05	-7,93E-22	-4,32E-06	6,15E-04	0,0	-0,0043	0,6152
7	0,00	0,00	0,12	1		-1,35E-04	-8,93E-05	1,69E-04	1,67E-20	-7,54E-21	-4,10E-05	-1,71E-21	-9,31E-06	6,12E-04	0,0	-0,0093	0,6121
8	0,00	0,00	0,14	1		-1,96E-04	-1,30E-04	2,09E-04	2,43E-20	-5,42E-21	-2,95E-05	-2,65E-21	-1,44E-05	6,08E-04	0,0	-0,0144	0,6083
9	0,00	0,00	0,15	1		-2,34E-04	-1,57E-04	2,40E-04	2,85E-20	-4,04E-21	-2,20E-05	-3,14E-21	-1,71E-05	6,06E-04	0,0	-0,0171	0,6061
10	0,00	0,00	0,16	2	Base Granular	-2,27E-04	-1,51E-04	4,77E-04	2,79E-20	-4,46E-20	-2,43E-04	-3,22E-21	-1,75E-05	6,01E-04	0,0	-0,0175	0,6012
11	0,00	0,00	0,18	2		-2,14E-04	-1,42E-04	4,36E-04	2,64E-20	-4,37E-20	-2,38E-04	-3,36E-21	-1,83E-05	5,92E-04	0,0	-0,0183	0,5921
12	0,00	0,00	0,20	2		-2,04E-04	-1,36E-04	4,02E-04	2,49E-20	-4,25E-20	-2,31E-04	-3,50E-21	-1,91E-05	5,84E-04	0,0	-0,0191	0,5837
13	0,00	0,00	0,22	2		-1,96E-04	-1,32E-04	3,75E-04	2,35E-20	-4,09E-20	-2,22E-04	-3,64E-21	-1,98E-05	5,76E-04	0,0	-0,0198	0,5760
14	0,00	0,00	0,24	2		-1,91E-04	-1,31E-04	3,54E-04	2,22E-20	-3,89E-20	-2,12E-04	-3,78E-21	-2,06E-05	5,69E-04	0,0	-0,0206	0,5687
15	0,00	0,00	0,26	2		-1,89E-04	-1,31E-04	3,38E-04	2,11E-20	-3,65E-20	-1,99E-04	-3,94E-21	-2,14E-05	5,62E-04	0,0	-0,0214	0,5618
16	0,00	0,00	0,28	2		-1,89E-04	-1,33E-04	3,26E-04	2,03E-20	-3,39E-20	-1,84E-04	-4,12E-21	-2,24E-05	5,55E-04	0,0	-0,0224	0,5552
17	0,00	0,00	0,30	2		-1,92E-04	-1,38E-04	3,20E-04	1,99E-20	-3,20E-20	-1,68E-04	-4,32E-21	-2,35E-05	5,49E-04	0,0	-0,0235	0,5487
18	0,00	0,00	0,32	2		-1,98E-04	-1,44E-04	3,18E-04	2,00E-20	-2,75E-20	-1,49E-04	-4,57E-21	-2,49E-05	5,42E-04	0,0	-0,0249	0,5423
19	0,00	0,00	0,34	2	-2,08E-04	-1,52E-04	3,22E-04	2,06E-20	-2,37E-20	-1,29E-04	-4,85E-21	-2,64E-05	5,36E-04	0,0	-0,0264	0,5359	
20	0,00	0,00	0,35	2	-2,14E-04	-1,57E-04	3,27E-04	2,11E-20	-2,16E-20	-1,18E-04	-5,01E-21	-2,73E-05	5,33E-04	0,0	-0,0273	0,5327	
21	0,00	0,00	0,36	3	Sub Base granular	-2,10E-04	-1,55E-04	3,96E-04	2,01E-20	-4,17E-20	-2,27E-04	-4,97E-21	-2,70E-05	5,29E-04	0,0	-0,0270	0,5287
22	0,00	0,00	0,38	3		-2,02E-04	-1,52E-04	3,77E-04	1,83E-20	-3,89E-20	-2,12E-04	-4,90E-21	-2,67E-05	5,21E-04	0,0	-0,0267	0,5210
23	0,00	0,00	0,40	3		-1,96E-04	-1,51E-04	3,62E-04	1,68E-20	-3,61E-20	-1,96E-04	-4,85E-21	-2,64E-05	5,14E-04	0,0	-0,0264	0,5136
24	0,00	0,00	0,42	3		-1,92E-04	-1,50E-04	3,49E-04	1,56E-20	-3,33E-20	-1,81E-04	-4,83E-21	-2,63E-05	5,06E-04	0,0	-0,0263	0,5065
25	0,00	0,00	0,44	3		-1,90E-04	-1,50E-04	3,39E-04	1,46E-20	-3,05E-20	-1,66E-04	-4,83E-21	-2,63E-05	5,00E-04	0,0	-0,0263	0,4996
26	0,00	0,00	0,46	3		-1,89E-04	-1,51E-04	3,32E-04	1,38E-20	-2,77E-20	-1,51E-04	-4,87E-21	-2,65E-05	4,93E-04	0,0	-0,0265	0,4929
27	0,00	0,00	0,48	3		-1,89E-04	-1,53E-04	3,27E-04	1,33E-20	-2,48E-20	-1,35E-04	-4,94E-21	-2,69E-05	4,86E-04	0,0	-0,0269	0,4863
28	0,00	0,00	0,50	3		-1,92E-04	-1,57E-04	3,25E-04	1,30E-20	-2,18E-20	-1,19E-04	-5,04E-21	-2,74E-05	4,80E-04	0,0	-0,0274	0,4798
29	0,00	0,00	0,52	3		-1,97E-04	-1,61E-04	3,26E-04	1,31E-20	-1,86E-20	-1,01E-04	-5,18E-21	-2,82E-05	4,73E-04	0,0	-0,0282	0,4732
30	0,00	0,00	0,54	3	-2,03E-04	-1,67E-04	3,30E-04	1,35E-20	-1,53E-20	-8,32E-05	-5,37E-21	-2,92E-05	4,67E-04	0,0	-0,0292	0,4667	
31	0,00	0,00	0,55	3	-2,08E-04	-1,70E-04	3,34E-04	1,38E-20	-1,35E-20	-7,35E-05	-5,48E-21	-2,98E-05	4,63E-04	0,0	-0,0298	0,4634	
32	0,00	0,00	0,56	4	Mejoramiento con rajón y sello en SBG	-2,03E-04	-1,67E-04	4,17E-04	1,32E-20	-3,41E-20	-1,86E-04	-5,38E-21	-2,93E-05	4,59E-04	0,0	-0,0293	0,4592
33	0,00	0,00	0,58	4		-1,94E-04	-1,61E-04	4,01E-04	1,21E-20	-3,23E-20	-1,76E-04	-5,19E-21	-2,82E-05	4,51E-04	0,0	-0,0282	0,4510
34	0,00	0,00	0,60	4		-1,86E-04	-1,56E-04	3,86E-04	1,11E-20	-3,05E-20	-1,66E-04	-5,01E-21	-2,73E-05	4,43E-04	0,0	-0,0273	0,4431
35	0,00	0,00	0,62	4		-1,79E-04	-1,51E-04	3,71E-04	1,03E-20	-2,89E-20	-1,57E-04	-4,84E-21	-2,63E-05	4,36E-04	0,0	-0,0263	0,4356
36	0,00	0,00	0,64	4		-1,72E-04	-1,46E-04	3,58E-04	9,46E-21	-2,74E-20	-1,49E-04	-4,68E-21	-2,54E-05	4,28E-04	0,0	-0,0254	0,4283
37	0,00	0,00	0,66	4		-1,65E-04	-1,41E-04	3,45E-04	8,74E-21	-2,60E-20	-1,42E-04	-4,52E-21	-2,46E-05	4,21E-04	0,0	-0,0246	0,4212
38	0,00	0,00	0,68	4		-1,59E-04	-1,37E-04	3,34E-04	8,09E-21	-2,47E-20	-1,34E-04	-4,38E-21	-2,38E-05	4,14E-04	0,0	-0,0238	0,4144
39	0,00	0,00	0,70	4		-1,53E-04	-1,33E-04	3,22E-04	7,50E-21	-2,35E-20	-1,28E-04	-4,24E-21	-2,31E-05	4,08E-04	0,0	-0,0231	0,4079
40	0,00	0,00	0,72	4		-1,48E-04	-1,29E-04	3,12E-04	6,96E-21	-2,23E-20	-1,22E-04	-4,11E-21	-2,24E-05	4,02E-04	0,0	-0,0224	0,4015
41	0,00	0,00	0,74	4		-1,43E-04	-1,25E-04	3,02E-04	6,47E-21	-2,13E-20	-1,16E-04	-3,98E-21	-2,17E-05	3,95E-04	0,0	-0,0217	0,3954
42	0,00	0,00	0,76	4		-1,38E-04	-1,21E-04	2,92E-04	6,02E-21	-2,03E-20	-1,10E-04	-3,86E-21	-2,10E-05	3,89E-04	0,0	-0,0210	0,3895
43	0,00	0,00	0,78	4		-1,33E-04	-1,18E-04	2,83E-04	5,61E-21	-1,93E-20	-1,05E-04	-3,75E-21	-2,04E-05	3,84E-04	0,0	-0,0204	0,3837
44	0,00	0,00	0,80	4		-1,29E-04	-1,14E-04	2,74E-04	5,24E-21	-1,84E-20	-1,00E-04	-3,64E-21	-1,98E-05	3,78E-04	0,0	-0,0198	0,3782
45	0,00	0,00	0,82	4		-1,25E-04	-1,11E-04	2,66E-04	4,89E-21	-1,76E-20	-9,58E-05	-3,54E-21	-1,93E-05	3,73E-04	0,0	-0,0193	0,3728
46	0,00	0,00	0,84	4		-1,21E-04	-1,08E-04	2,58E-04	4,58E-21	-1,68E-20	-9,16E-05	-3,44E-21	-1,87E-05	3,68E-04	0,0	-0,0187	0,3675
47	0,00	0,00	0,85	4		-1,19E-04	-1,07E-04	2,54E-04	4,43E-21	-1,65E-20	-8,96E-05	-3,39E-21	-1,85E-05	3,65E-04	0,0	-0,0185	0,3650
48	0,00	0,00	0,86	4	-1,17E-04	-1,05E-04	2,50E-04	4,29E-21	-1,61E-20	-8,76E-05	-3,34E-21	-1,82E-05	3,62E-04	0,0	-0,0182	0,3625	
49	0,00	0,00	0,88	4	-1,13E-04	-1,02E-04	2,43E-04	4,02E-21	-1,54E-20	-8,39E-05	-3,25E-21	-1,77E-05	3,58E-04	0,0	-0,0177	0,3575	
50	0,00	0,00	0,90	4	-1,10E-04	-9,96E-05	2,36E-04	3,77E-21	-1,48E-20	-8,03E-05	-3,17E-21	-1,72E-05	3,53E-04	0,0	-0,0172	0,3527	
51	0,00	0,00	0,92	4	-1,07E-04	-9,70E-05	2,29E-04	3,55E-21	-1,41E-20	-7,70E-05	-3,08E-21	-1,68E-05	3,48E-04	0,0	-0,0168	0,3481	
52	0,00	0,00	0,94	4	-1,04E-04	-9,44E-05	2,23E-04	3,34E-21	-1,36E-20	-7,38E-05	-3,00E-21	-1,64E-05	3,44E-04	0,0	-0,0164	0,3436	
53	0,00	0,00	0,96	4	-1,01E-04	-9,20E-05	2,17E-04	3,14E-21	-1,30E-20	-7,09E-05	-2,93E-21	-1,59E-05	3,39E-04	0,0	-0,0159	0,3392	
54	0,00	0,00	0,98	4	-9,77E-05	-8,96E-05	2,11E-04	2,96E-21	-1,25E-20	-6,81E-05	-2,86E-21	-1,55E-05	3,35E-04	0,0	-0,0155	0,3349	
55	0,00	0,00	1,00	4	-9,50E-05	-8,74E-05	2,06E-04	2,80E-21	-1,20E-20	-6,54E-05	-2,78E-21	-1,52E-05	3,31E-04	0,0	-0,0152	0,3307	



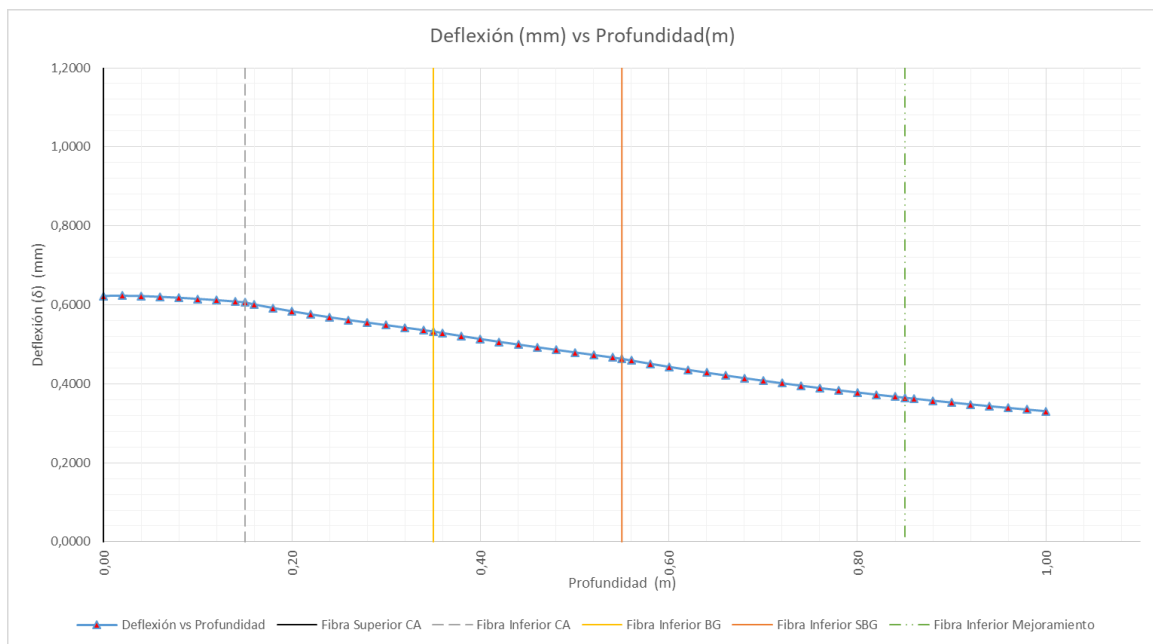
Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad



Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección longitudinal del la estructura de pavimento, en función de la profundidad



Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad



Variación de la deflexión (δ) en función de la profundidad Z

ALTERNATIVA No. 2

Sistema Multicapa (Alternativa 2)	
Número de capas:	4
Número de cargas:	2
Número de puntos:	54

Preferencias	
Análisis:	General Estático Lineal
Unión entre capas:	Ligadas
Cargas:	General
Puntos:	General

Capas					
ID	Modulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor (m)	Descripcion	Tipo
1	2,21E+09	0,35	0,10	Carpeta asfáltica	Elástica
2	2,21E+09	0,38	0,14	Base Granular estabilizada con asfalto en caliente	Elástica
3	1,03E+08	0,40	0,17	Sub Base Granular Reciclada	Elástica
4	4,70E+07	0,45	0,20	Subrasante mejorada con geocelda + MGR	Elástica

0,61

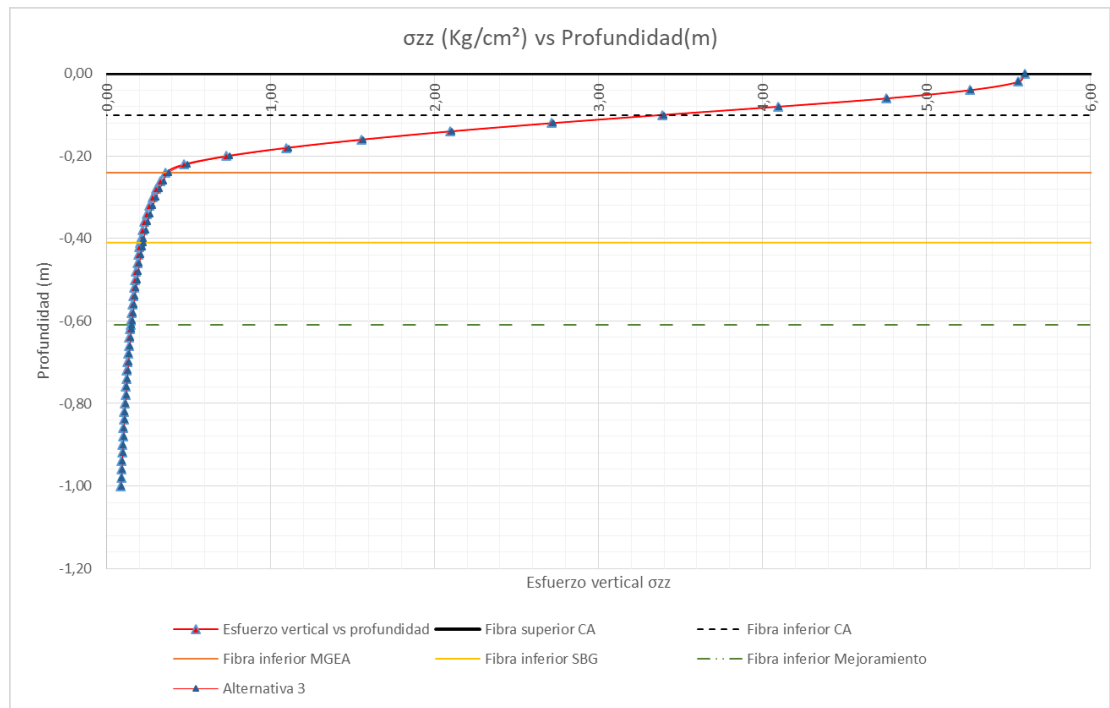
Cargas				
ID	Carga (N)	Presion (Pa)	X (m)	Y (m)
1	2,00E+04	549172,00	0,00	0,0
2	2,00E+04	549172,00	0,00	0,3

MINIMO	-5,462	MINIMO	-4,631	MINIMO	0,087	MINIMO	0,0	MINIMO	0,0	MINIMO	-0,465
MAXIMO	8,906	MAXIMO	8,181	MAXIMO	5,599	MAXIMO	0,0	MAXIMO	0,0	MAXIMO	0,000

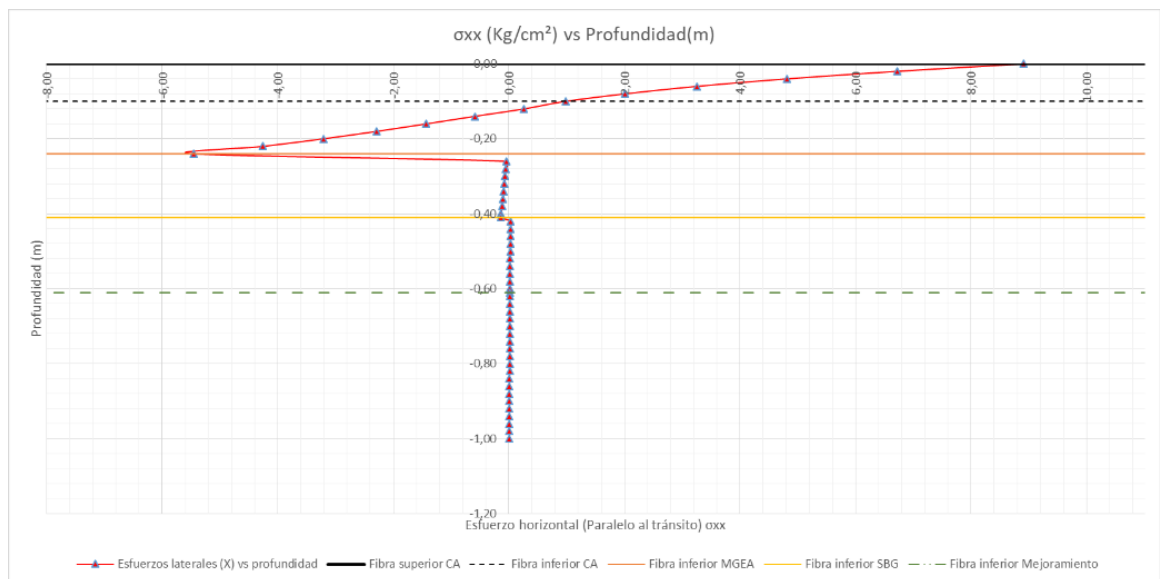
Puntos				Esfuerzos																
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	Capa #	Descripción	Sxx (Pa)	Syy (Pa)	Szz (Pa)	Sxx (Kg/cm²)	Syy (Kg/m²)	Szz (Kg/cm²)	% Esfuerzo	Sxy (Pa)	Sxy (Kg/cm²)	Sxz (Pa)	Sxz (Kg/cm²)	Syz (Pa)	Syz (Kg/cm²)		
1	0,00	0,00	0,00	1	Carpeta asfáltica	8,73E+05	8,9055	C	8,02E+05	8,181	C	5,49E+05	5,5993	100,00%	-1,30E-11	0,0	-2,62E-27	0,0	-1,42E-11	0,0000
2	0,00	0,00	0,02	1		6,59E+05	6,7194	C	6,07E+05	6,194	C	5,45E+05	5,5601	99,30%	-9,46E-12	0,0	-2,16E-12	0,0	-1,18E+04	-0,1199
3	0,00	0,00	0,04	1		4,72E+05	4,8123	C	4,37E+05	4,460	C	5,17E+05	5,2677	94,08%	-6,34E-12	0,0	-4,17E-12	0,0	-2,27E+04	-0,2312
4	0,00	0,00	0,06	1		3,19E+05	3,2559	C	2,99E+05	3,054	C	4,66E+05	4,7552	84,92%	-3,64E-12	0,0	-5,76E-12	0,0	-3,14E+04	-0,3200
5	0,00	0,00	0,08	1		1,97E+05	2,0089	C	1,90E+05	1,936	C	4,02E+05	4,0944	73,12%	-1,32E-12	0,0	-7,01E-12	0,0	-3,82E+04	-0,3891
6	0,00	0,00	0,10	1	9,61E+04	0,9804	C	1,00E+05	1,019	C	3,32E+05	3,3904	60,55%	7,03E-13	0,0	-7,88E-12	0,0	4,29E+04	-0,4373	
7	0,00	0,00	0,12	2	Base Granular estabilizada con asfalto en caliente	2,57E+04	0,2620	C	3,87E+04	0,395	C	2,66E+05	2,7126	48,45%	2,40E-12	0,0	-8,35E-12	0,0	-4,54E+04	-0,4634
8	0,00	0,00	0,14	2		-5,82E+04	-0,5937	T	-3,65E+04	-0,372	T	2,05E+05	2,0943	37,40%	3,99E-12	0,0	-8,37E-12	0,0	-4,56E+04	-0,4645
9	0,00	0,00	0,16	2		-1,40E+05	-1,4290	T	-1,10E+05	-1,118	T	1,52E+05	1,5527	27,73%	5,60E-12	0,0	-7,91E-12	0,0	-4,31E+04	-0,4393
10	0,00	0,00	0,18	2		-2,24E+05	-2,2886	T	-1,84E+05	-1,880	T	1,07E+05	1,0955	19,56%	7,35E-12	0,0	-6,97E-12	0,0	-3,79E+04	-0,3869
11	0,00	0,00	0,20	2		-3,15E+05	-3,2146	T	-2,64E+05	-2,693	T	7,17E+04	0,7306	13,05%	9,40E-12	0,0	-5,52E-12	0,0	-3,01E+04	-0,3067
12	0,00	0,00	0,22	2	-4,17E+05	-4,2533	T	-3,52E+05	-3,594	T	4,65E+04	0,4742	8,47%	1,19E-11	0,0	-3,58E-12	0,0	-1,95E+04	-0,1987	
13	0,00	0,00	0,24	2	-5,36E+05	-5,4622	T	-4,54E+05	-4,631	T	3,51E+04	0,3574	6,38%	1,50E-11	0,0	-1,15E-12	0,0	-6,25E+03	-0,0637	
14	0,00	0,00	0,26	3	Sub Base granular	-4,25E+03	-0,0433	T	-8,10E+02	-0,008	T	3,22E+04	0,3286	5,87%	6,32E-13	0,0	-1,09E-12	0,0	-5,93E+03	-0,0604
15	0,00	0,00	0,28	3		-5,18E+03	-0,0529	T	-2,01E+03	-0,021	T	2,98E+04	0,3037	5,42%	5,82E-13	0,0	-1,02E-12	0,0	-5,58E+03	-0,0569
16	0,00	0,00	0,30	3		-6,22E+03	-0,0634	T	-3,28E+03	-0,033	T	2,77E+04	0,2820	5,04%	5,41E-13	0,0	-9,56E-13	0,0	-5,21E+03	-0,0531
17	0,00	0,00	0,32	3		-7,37E+03	-0,0751	T	-4,60E+03	-0,047	T	2,58E+04	0,2629	4,70%	5,09E-13	0,0	-8,83E-13	0,0	-4,81E+03	-0,0490
18	0,00	0,00	0,34	3		-8,64E+03	-0,0881	T	-5,99E+03	-0,061	T	2,42E+04	0,2463	4,40%	4,86E-13	0,0	-8,05E-13	0,0	-4,38E+03	-0,0447
19	0,00	0,00	0,36	3		-1,00E+04	-0,1024	T	-7,46E+03	-0,076	T	2,27E+04	0,2318	4,14%	4,73E-13	0,0	-7,22E-13	0,0	-3,93E+03	-0,0401
20	0,00	0,00	0,38	3		-1,16E+04	-0,1183	T	-9,03E+03	-0,092	T	2,15E+04	0,2195	3,92%	4,72E-13	0,0	-6,31E-13	0,0	-3,44E+03	-0,0351
21	0,00	0,00	0,40	3		-1,34E+04	-0,1361	T	-1,07E+04	-0,109	T	2,05E+04	0,2093	3,74%	4,83E-13	0,0	-5,34E-13	0,0	-2,91E+03	-0,0296
22	0,00	0,00	0,41	3		-1,43E+04	-0,1459	T	-1,16E+04	-0,118	T	2,01E+04	0,2051	3,66%	4,94E-13	0,0	-4,82E-13	0,0	-2,62E+03	-0,0267
23	0,00	0,00	0,42	4		Subrasante mejorada con geocelda y MGR	2,67E+03	0,0272	C	3,80E+03	0,039	C	1,97E+04	0,2012	3,59%	2,08E-13	0,0	-4,70E-13	0,0	-2,56E+03
24	0,00	0,00	0,44	4	2,55E+03		0,0260	C	3,59E+03	0,037	C	1,90E+04	0,1938	3,46%	1,91E-13	0,0	-4,48E-13	0,0	-2,44E+03	-0,0249
25	0,00	0,00	0,46	4	2,43E+03		0,0248	C	3,38E+03	0,034	C	1,83E+04	0,1869	3,34%	1,75E-13	0,0	-4,27E-13	0,0	-2,33E+03	-0,0237
26	0,00	0,00	0,48	4	2,32E+03		0,0236	C	3,19E+03	0,033	C	1,77E+04	0,1805	3,22%	1,61E-13	0,0	-4,07E-13	0,0	-2,22E+03	-0,0226
27	0,00	0,00	0,50	4	2,21E+03		0,0225	C	3,01E+03	0,031	C	1,71E+04	0,1744	3,11%	1,48E-13	0,0	-3,89E-13	0,0	-2,12E+03	-0,0216
28	0,00	0,00	0,52	4	2,10E+03		0,0214	C	2,84E+03	0,029	C	1,65E+04	0,1687	3,01%	1,36E-13	0,0	-3,71E-13	0,0	-2,02E+03	-0,0206
29	0,00	0,00	0,54	4	2,00E+03		0,0204	C	2,69E+03	0,027	C	1,60E+04	0,1633	2,92%	1,26E-13	0,0	-3,55E-13	0,0	-1,93E+03	-0,0197
30	0,00	0,00	0,56	4	1,91E+03		0,0195	C	2,54E+03	0,026	C	1,55E+04	0,1581	2,82%	1,17E-13	0,0	-3,39E-13	0,0	-1,85E+03	-0,0188
31	0,00	0,00	0,58	4	1,82E+03		0,0185	C	2,41E+03	0,025	C	1,50E+04	0,1533	2,74%	1,08E-13	0,0	-3,24E-13	0,0	-1,77E+03	-0,0180
32	0,00	0,00	0,60	4	1,73E+03		0,0177	C	2,28E+03	0,023	C	1,46E+04	0,1486	2,65%	1,00E-13	0,0	-3,11E-13	0,0	-1,69E+03	-0,0172
33	0,00	0,00	0,61	4	1,69E+03	0,0173	C	2,22E+03	0,023	C	1,44E+04	0,1464	2,61%	9,69E-14	0,0	-3,04E-13	0,0	-1,65E+03	-0,0169	
34	0,00	0,00	0,62	4	Subrasante natural	1,65E+03	0,0169	C	2,16E+03	0,022	C	1,41E+04	0,1442	2,58%	9,35E-14	0,0	-2,97E-13	0,0	-1,62E+03	-0,0165
35	0,00	0,00	0,64	4		1,58E+03	0,0161	C	2,05E+03	0,021	C	1,37E+04	0,1400	2,50%	8,72E-14	0,0	-2,85E-13	0,0	-1,55E+03	-0,0158
36	0,00	0,00	0,66	4		1,50E+03	0,0153	C	1,95E+03	0,020	C	1,33E+04	0,1360	2,43%	8,14E-14	0,0	-2,73E-13	0,0	-1,49E+03	-0,0152
37	0,00	0,00	0,68	4		1,44E+03	0,0146	C	1,85E+03	0,019	C	1,30E+04	0,1321	2,36%	7,61E-14	0,0	-2,62E-13	0,0	-1,43E+03	-0,0146
38	0,00	0,00	0,70	4		1,37E+03	0,0140	C	1,76E+03	0,018	C	1,26E+04	0,1284	2,29%	7,13E-14	0,0	-2,52E-13	0,0	-1,37E+03	-0,0140
39	0,00	0,00	0,72	4		1,31E+03	0,0133	C	1,67E+03	0,017	C	1,22E+04	0,1249	2,23%	6,68E-14	0,0	-2,42E-13	0,0	-1,32E+03	-0,0134
40	0,00	0,00	0,74	4		1,25E+03	0,0128	C	1,59E+03	0,016	C	1,19E+04	0,1215	2,17%	6,28E-14	0,0	-2,33E-13	0,0	-1,27E+03	-0,0129
41	0,00	0,00	0,76	4		1,20E+03	0,0122	C	1,52E+03	0,015	C	1,16E+04	0,1182	2,11%	5,90E-14	0,0	-2,24E-13	0,0	-1,22E+03	-0,0124
42	0,00	0,00	0,78	4		1,14E+03	0,0117	C	1,45E+03	0,015	C	1,13E+04	0,1151	2,06%	5,56E-14	0,0	-2,16E-13	0,0	-1,17E+03	-0,0120
43	0,00	0,00	0,80	4		1,10E+03	0,0112	C	1,38E+03	0,014	C	1,10E+04	0,1121	2,00%	5,24E-14	0,0	-2,08E-13	0,0	-1,13E+03	-0,0115
44	0,00	0,00	0,82	4	1,05E+03	0,0107	C	1,32E+03	0,013	C	1,07E+04	0,1092	1,95%	4,95E-14	0,0	-2,00E-13	0,0	-1,09E+03	-0,0111	
45	0,00	0,00	0,84	4	1,01E+03	0,0102	C	1,26E+03	0,013	C	1,04E+04	0,1064	1,90%	4,67E-14	0,0	-1,93E-13	0,0	-1,05E+03	-0,0107	
46	0,00	0,00	0,86	4	9,64E+02	0,0098	C	1,20E+03	0,012	C	1,02E+04	0,1037	1,85%	4,42E-14	0,0	-1,86E-13	0,0	-1,01E+03	-0,0103	
47	0,00	0,00	0,88	4	9,25E+02	0,0094	C	1,15E+03	0,012	C	9,92E+03	0,1012	1,81%	4,19E-14	0,0	-1,80E-13	0,0	-9,78E+02	-0,0100	
48	0,00	0,00	0,90	4	8,88E+02	0,0091	C	1,10E+03	0,011	C	9,68E+03	0,0987	1,76%	3,97E-14	0,0	-1,74E-13	0,0	-9,45E+02	-0,0096	
49	0,00	0,00	0,92	4	8,53E+02	0,0087	C	1,06E+03	0,011	C	9,44E+03	0,0963	1,72%	3,76E-14	0,0	-1,68E-13	0,0	-9,12E+02	-0,0093	
50	0,00	0,00	0,94	4	8,20E+02	0,0084	C	1,01E+03	0,010	C	9,21E+03	0,0939	1,68%	3,57E-14	0,0	-1,62E-13	0,0	-8,82E+02	-0,0090	
51	0,00	0,00	0,96	4	7,89E+02	0,0080	C	9,74E+02	0,010	C	8,99E+03	0,0917	1,64%	3,40E-14	0,0	-1,57E-13	0,0	-8,53E+02	-0,0087	
52	0,00	0,00	0,98	4	7,60E+02	0,0077	C	9,36E+02	0,010	C	8,78E+03	0,0895	1,60%	3,23E-14	0,0	-1,52E-13	0,0	-8,25E+02	-0,0084	
53	0,00	0,00	1,00	4	7,32E+02	0,0075	C	8,99E+02	0,009	C	8,58E+03	0,0875	1,56%	3,08E-14	0,0	-1,47E-13	0,0	-7,98E+02	-0,0081	

MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
1,81E-04	1,38E-04	3,58E-04	1,87E-20	-3,20E-36	-1,74E-20	3,29E-21	1,79E-05	5,14E-04	0,0	0,0179	0,5138	0,0	0,0179	0,5138
MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
-1,72E-04	-1,35E-04	-1,69E-05	-1,60E-20	-2,96E-20	-1,61E-04	-4,29E-21	-2,33E-05	2,91E-04	0,0	-0,0233	0,2910	0,0	-0,0233	0,2910

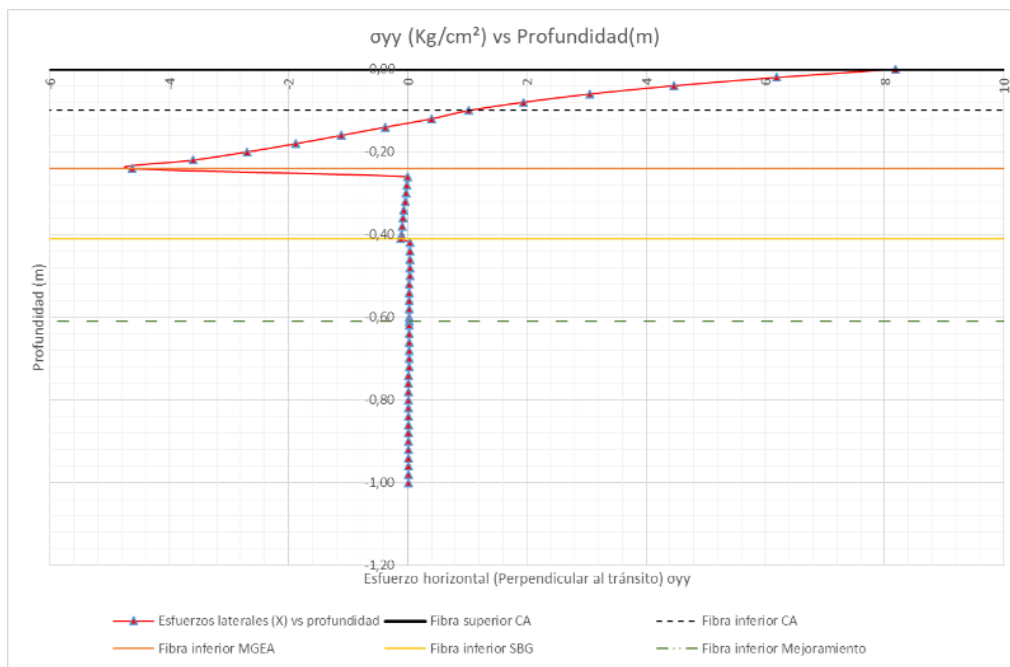
Puntos				Capa #	Descripción	Deformaciones unitarias (m/m)						Deflexiones (m)			Deflexiones (mm)		
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)			Exx (t)	Eyy (t)	Ezz (t)	Exy (t)	Exz (t)	Eyz (t)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)
1	0,00	0,00	0,00	1	Carpeta asfáltica	-1,81E-04	1,38E-04	-1,69E-05	-1,60E-20	-3,20E-36	-1,74E-20	3,29E-21	1,79E-05	5,14E-04	0,0	0,0179	0,5138
2	0,00	0,00	0,02	1		-1,16E-04	8,43E-05	4,62E-05	-1,16E-20	-2,64E-21	-1,44E-05	2,65E-21	1,44E-05	5,14E-04	0,0	0,0144	0,5135
3	0,00	0,00	0,04	1		-6,25E-05	4,14E-05	8,99E-05	-7,76E-21	-5,10E-21	-2,77E-05	2,04E-21	1,11E-05	5,12E-04	0,0	0,0111	0,5121
4	0,00	0,00	0,06	1		-2,32E-05	1,11E-05	1,13E-04	-4,45E-21	-7,05E-21	-3,84E-05	1,47E-21	8,02E-06	5,10E-04	0,0	0,0080	0,5100
5	0,00	0,00	0,08	1		-4,52E-06	-8,90E-06	1,21E-04	-1,61E-21	-8,58E-21	-4,67E-05	9,33E-22	5,08E-06	5,08E-04	0,0	0,0051	0,5077
6	0,00	0,00	0,10	1		-2,50E-05	2,27E-05	1,20E-04	8,60E-22	9,64E-21	-5,25E-05	4,14E-22	2,25E-06	5,05E-04	0,0	0,0023	0,5053
7	0,00	0,00	0,12	2	Base Granular estabilizada con asfalto en caliente	-4,08E-05	-3,27E-05	1,09E-04	3,00E-21	-1,04E-20	-5,68E-05	-8,76E-23	-4,77E-07	5,03E-04	0,0	-0,0005	0,5031
8	0,00	0,00	0,14	2		-5,55E-05	-4,19E-05	1,09E-04	4,99E-21	-1,05E-20	-5,70E-05	-5,84E-22	-3,18E-06	5,01E-04	0,0	-0,0032	0,5009
9	0,00	0,00	0,16	2		-7,08E-05	-5,18E-05	1,12E-04	7,00E-21	-9,90E-21	-5,39E-05	-1,09E-21	-5,91E-06	4,99E-04	0,0	-0,0059	0,4987
10	0,00	0,00	0,18	2		-8,84E-05	-6,34E-05	1,19E-04	9,20E-21	-8,72E-21	-4,74E-05	-1,60E-21	-8,71E-06	4,96E-04	0,0	-0,0087	0,4964
11	0,00	0,00	0,20	2		-1,10E-04	-7,77E-05	1,32E-04	1,18E-20	-6,91E-21	-3,76E-05	-2,14E-21	-1,16E-05	4,94E-04	0,0	-0,0116	0,4939
12	0,00	0,00	0,22	2		-1,36E-04	-9,59E-05	1,54E-04	1,49E-20	-4,48E-21	-2,44E-05	-2,71E-21	-1,48E-05	4,91E-04	0,0	-0,0148	0,4910
13	0,00	0,00	0,24	2	-1,71E-04	-1,20E-04	1,86E-04	1,87E-20	-1,44E-21	-7,82E-06	-3,33E-21	-1,81E-05	4,88E-04	0,0	-0,0181	0,4877	
14	0,00	0,00	0,26	3	Sub Base granular	-1,63E-04	-1,17E-04	3,33E-04	1,72E-20	-2,96E-20	-1,61E-04	-3,37E-21	-1,84E-05	4,81E-04	0,0	-0,0184	0,4808
15	0,00	0,00	0,28	3		-1,58E-04	-1,15E-04	3,17E-04	1,58E-20	-2,79E-20	-1,52E-04	-3,43E-21	-1,87E-05	4,74E-04	0,0	-0,0187	0,4743
16	0,00	0,00	0,30	3		-1,55E-04	-1,15E-04	3,05E-04	1,47E-20	-2,60E-20	-1,42E-04	-3,51E-21	-1,91E-05	4,68E-04	0,0	-0,0191	0,4681
17	0,00	0,00	0,32	3		-1,54E-04	-1,16E-04	2,97E-04	1,38E-20	-2,40E-20	-1,31E-04	-3,59E-21	-1,96E-05	4,62E-04	0,0	-0,0196	0,4621
18	0,00	0,00	0,34	3		-1,54E-04	-1,18E-04	2,91E-04	1,32E-20	-2,19E-20	-1,19E-04	-3,70E-21	-2,02E-05	4,56E-04	0,0	-0,0202	0,4562
19	0,00	0,00	0,36	3		-1,57E-04	-1,22E-04	2,89E-04	1,29E-20	-1,96E-20	-1,07E-04	-3,83E-21	-2,09E-05	4,50E-04	0,0	-0,0209	0,4504
20	0,00	0,00	0,38	3		-1,61E-04	-1,26E-04	2,89E-04	1,28E-20	-1,72E-20	-9,34E-05	-3,99E-21	-2,17E-05	4,45E-04	0,0	-0,0217	0,4447
21	0,00	0,00	0,40	3		-1,68E-04	-1,32E-04	2,93E-04	1,31E-20	-1,45E-20	-7,90E-05	-4,18E-21	-2,28E-05	4,39E-04	0,0	-0,0228	0,4388
22	0,00	0,00	0,41	3		-1,72E-04	-1,35E-04	2,96E-04	1,34E-20	-1,31E-20	-7,13E-05	-4,29E-21	-2,33E-05	4,36E-04	0,0	-0,0233	0,4359
23	0,00	0,00	0,42	4		Subrasante mejorada con geocelda y MGR	-1,68E-04	-1,34E-04	3,58E-04	1,28E-20	-2,90E-20	-1,58E-04	-4,23E-21	-2,30E-05	4,32E-04	0,0	-0,0230
24	0,00	0,00	0,44	4	-1,62E-04		-1,30E-04	3,46E-04	1,18E-20	-2,76E-20	-1,51E-04	-4,13E-21	-2,25E-05	4,25E-04	0,0	-0,0225	0,4253
25	0,00	0,00	0,46	4	-1,56E-04		-1,27E-04	3,34E-04	1,08E-20	-2,64E-20	-1,44E-04	-4,03E-21	-2,19E-05	4,18E-04	0,0	-0,0219	0,4185
26	0,00	0,00	0,48	4	-1,51E-04		-1,24E-04	3,24E-04	9,91E-21	-2,51E-20	-1,37E-04	-3,93E-21	-2,14E-05	4,12E-04	0,0	-0,0214	0,4119
27	0,00	0,00	0,50	4	-1,46E-04		-1,21E-04	3,14E-04	9,12E-21	-2,40E-20	-1,31E-04	-3,83E-21	-2,08E-05	4,06E-04	0,0	-0,0208	0,4055
28	0,00	0,00	0,52	4	-1,41E-04		-1,18E-04	3,05E-04	8,41E-21	-2,29E-20	-1,25E-04	-3,74E-21	-2,03E-05	3,99E-04	0,0	-0,0203	0,3993
29	0,00	0,00	0,54	4	-1,36E-04		-1,15E-04	2,96E-04	7,77E-21	-2,19E-20	-1,19E-04	-3,65E-21	-1,99E-05	3,93E-04	0,0	-0,0199	0,3933
30	0,00	0,00	0,56	4	-1,32E-04		-1,13E-04	2,87E-04	7,19E-21	-2,09E-20	-1,14E-04	-3,56E-21	-1,94E-05	3,87E-04	0,0	-0,0194	0,3875
31	0,00	0,00	0,58	4	-1,28E-04		-1,10E-04	2,79E-04	6,67E-21	-2,00E-20	-1,09E-04	-3,48E-21	-1,89E-05	3,82E-04	0,0	-0,0189	0,3818
32	0,00	0,00	0,60	4	-1,25E-04		-1,08E-04	2,72E-04	6,20E-21	-1,92E-20	-1,04E-04	-3,40E-21	-1,85E-05	3,76E-04	0,0	-0,0185	0,3763
33	0,00	0,00	0,67	4	-1,23E-04		-1,06E-04	2,68E-04	5,98E-21	-1,88E-20	-1,02E-04	-3,36E-21	-1,83E-05	3,74E-04	0,0	-0,0183	0,3736
34	0,00	0,00	0,62	4	Subrasante natural	-1,21E-04	-1,05E-04	2,64E-04	5,77E-21	-1,84E-20	-9,99E-05	-3,32E-21	-1,81E-05	3,71E-04	0,0	-0,0181	0,3710
35	0,00	0,00	0,64	4		-1,18E-04	-1,03E-04	2,57E-04	5,38E-21	-1,76E-20	-9,58E-05	-3,24E-21	-1,77E-05	3,66E-04	0,0	-0,0177	0,3657
36	0,00	0,00	0,66	4		-1,14E-04	-1,01E-04	2,51E-04	5,02E-21	-1,69E-20	-9,18E-05	-3,17E-21	-1,73E-05	3,61E-04	0,0	-0,0173	0,3607
37	0,00	0,00	0,68	4		-1,11E-04	-9,84E-05	2,44E-04	4,70E-21	-1,62E-20	-8,81E-05	-3,10E-21	-1,69E-05	3,56E-04	0,0	-0,0169	0,3557
38	0,00	0,00	0,70	4		-1,08E-04	-9,63E-05	2,38E-04	4,40E-21	-1,55E-20	-8,46E-05	-3,03E-21	-1,65E-05	3,51E-04	0,0	-0,0165	0,3509
39	0,00	0,00	0,72	4		-1,05E-04	-9,42E-05	2,32E-04	4,12E-21	-1,49E-20	-8,13E-05	-2,96E-21	-1,61E-05	3,46E-04	0,0	-0,0161	0,3462
40	0,00	0,00	0,74	4		-1,03E-04	-9,22E-05	2,26E-04	3,87E-21	-1,44E-20	-7,82E-05	-2,90E-21	-1,58E-05	3,42E-04	0,0	-0,0158	0,3416
41	0,00	0,00	0,76	4		-1,00E-04	-9,02E-05	2,21E-04	3,64E-21	-1,38E-20	-7,52E-05	-2,84E-21	-1,55E-05	3,37E-04	0,0	-0,0155	0,3371
42	0,00	0,00	0,78	4		-9,76E-05	-8,83E-05	2,15E-04	3,43E-21	-1,33E-20	-7,24E-05	-2,78E-21	-1,51E-05	3,33E-04	0,0	-0,0151	0,3328
43	0,00	0,00	0,80	4		-9,52E-05	-8,64E-05	2,10E-04	3,23E-21	-1,28E-20	-6,98E-05	-2,72E-21	-1,48E-05	3,29E-04	0,0	-0,0148	0,3285
44	0,00	0,00	0,82	4		-9,29E-05	-8,45E-05	2,05E-04	3,05E-21	-1,23E-20	-6,72E-05	-2,66E-21	-1,45E-05	3,24E-04	0,0	-0,0145	0,3244
45	0,00	0,00	0,84	4	-9,06E-05	-8,28E-05	2,00E-04	2,88E-21	-1,19E-20	-6,48E-05	-2,61E-21	-1,42E-05	3,20E-04	0,0	-0,0142	0,3203	
46	0,00	0,00	0,86	4	-8,84E-05	-8,10E-05	1,96E-04	2,73E-21	-1,15E-20	-6,25E-05	-2,56E-21	-1,39E-05	3,16E-04	0,0	-0,0139	0,3163	
47	0,00	0,00	0,88	4	-8,63E-05	-7,93E-05	1,91E-04	2,58E-21	-1,11E-20	-6,04E-05	-2,51E-21	-1,36E-05	3,12E-04	0,0	-0,0136	0,3125	
48	0,00	0,00	0,90	4	-8,43E-05	-7,77E-05	1,87E-04	2,45E-21	-1,07E-20	-5,83E-05	-2,45E-21	-1,34E-05	3,09E-04	0,0	-0,0134	0,3087	
49	0,00	0,00	0,92	4	-8,24E-05	-7,60E-05	1,83E-04	2,32E-21	-1,03E-20	-5,63E-05	-2,41E-21	-1,31E-05	3,05E-04	0,0	-0,0131	0,3050	
50	0,00	0,00	0,94	4	-8,05E-05	-7,45E-05	1,78E-04	2,21E-21	-1,00E-20	-5,44E-05	-2,36E-21	-1,28E-05	3,01E-04	0,0	-0,0128	0,3014	
51	0,00	0,00	0,96	4	-7,86E-05	-7,29E-05	1,74E-04	2,10E-21	-9,67E-21	-5,26E-05	-2,31E-21	-1,26E-05	2,98E-04	0,0	-0,0126	0,2979	
52	0,00	0,00	0,98	4	-7,69E-05	-7,14E-05	1,71E-04	1,99E-21	-9,35E-21	-5,09E-05	-2,27E-21	-1,23E-05	2,94E-04	0,0	-0,0123	0,2944	
53	0,00	0,00	1,00	4	-7,52E-05	-7,00E-05	1,67E-04	1,90E-21	-9,05E-21	-4,93E-05	-2,23E-21	-1,21E-05	2,91E-04	0,0	-0,0121	0,2910	



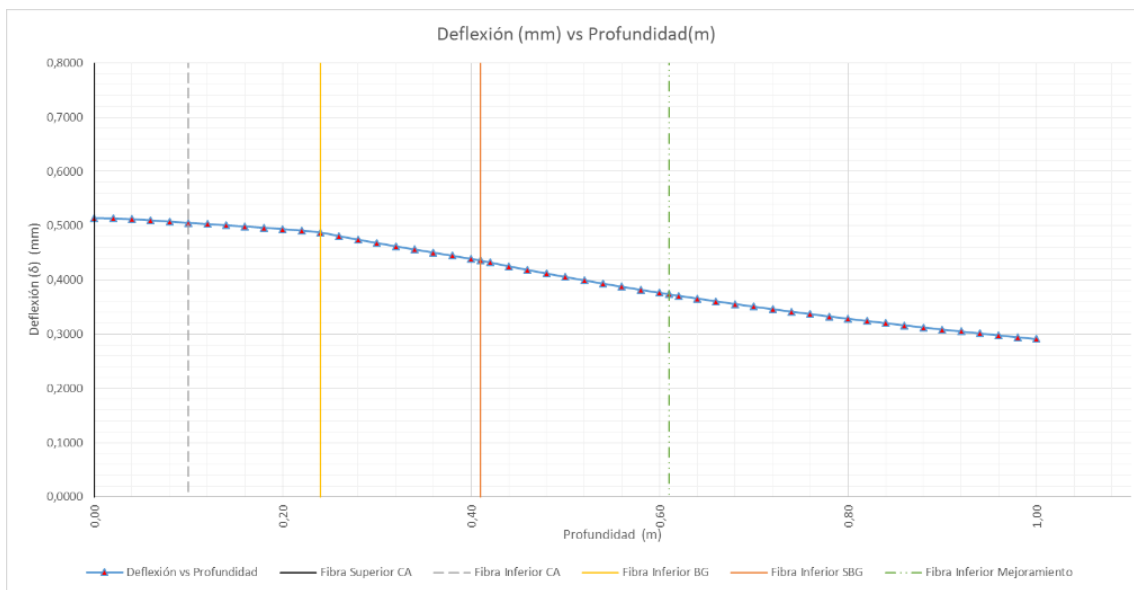
Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad



Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección longitudinal del la estructura de pavimento, en función de la profundidad



Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal de la estructura de pavimento, en función de la profundidad



Variación de la deflexión (δ) en función de la profundidad Z

ALTERNATIVA No. 3

Sistema Multicapa (Alternativa 3)	
Número de capas:	4
Número de cargas:	2
Número de puntos:	54

Preferencias	
Análisis:	General Estático Lineal
Unión entre capas:	Ligadas
Cargas:	General
Puntos:	General

Capas					
ID	Modulo E (Pa)	Poisson v (1)	Espesor (m)	Descripcion	Tipo
1	2,21E+09	0,35	0,10	Carpeta asfáltica	Elástica
2	2,21E+09	0,38	0,14	Base Granular estabilizada con asfalto en caliente	Elástica
3	1,03E+08	0,40	0,17	Sub Base Granular Reciclada	Elástica
4	5,60E+07	0,40	0,20	Subrasante mejorada con geocelda + RAP + Calamina	Elástica

0,61

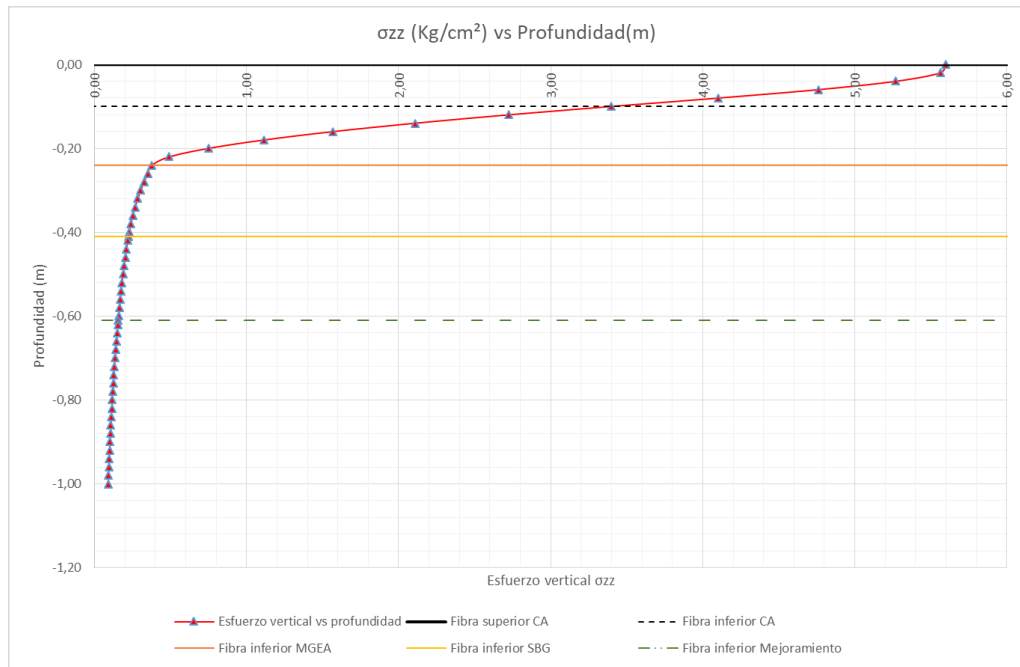
Cargas				
ID	Carga (N)	Presion (Pa)	X (m)	Y (m)
1	2,00E+04	549172,00	0,00	0,0
2	2,00E+04	549172,00	0,00	0,3

MINIMO	-5,248	MINIMO	-4,424	MINIMO	0,090	MINIMO	0,0	MINIMO	0,0	MINIMO	-0,455
MAXIMO	8,716	MAXIMO	8,001	MAXIMO	5,599	MAXIMO	0,0	MAXIMO	0,0	MAXIMO	0,000

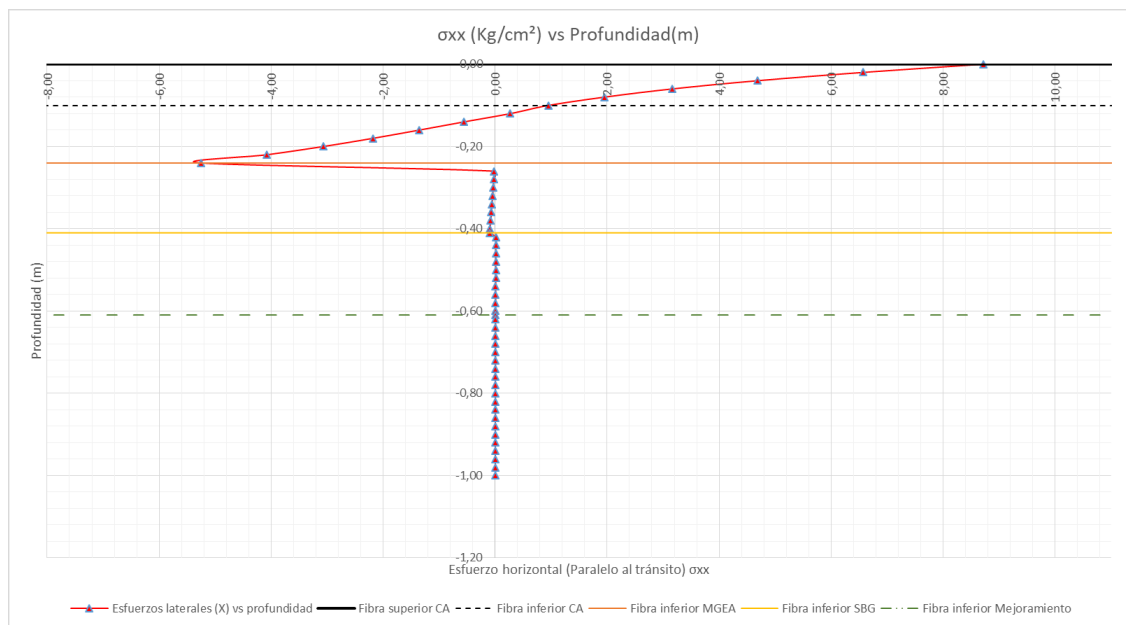
Puntos				Capa #	Descripción	Esfuerzos													
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)			Sxx (Pa)	Sxx (Kg/cm²)	C o T	Syy (Pa)	Syy (Kg/cm²)	C o T	Szz (Pa)	Szz (Kg/cm²)	% Esfuerzo	Sxy (Pa)	Sxy (Kg/cm²)	Sxz (Pa)	Sxz (Kg/cm²)	Syz (Pa)
1	0,00	0,00	0,00	1	8,55E+05	8,7164	C	7,85E+05	8,001	C	5,49E+05	5,5993	100,00%	-1,29E-11	0,0	8,87E-27	0,0	4,83E-11	0,0000
2	0,00	0,00	0,02	1	6,44E+05	6,5646	C	5,93E+05	6,047	C	5,45E+05	5,5605	99,31%	-9,33E-12	0,0	-2,11E-12	0,0	-1,15E+04	-0,1171
3	0,00	0,00	0,04	1	4,60E+05	4,6908	C	4,26E+05	4,345	C	5,17E+05	5,2691	94,10%	-6,23E-12	0,0	-4,07E-12	0,0	-2,22E+04	-0,2261
4	0,00	0,00	0,06	1	3,11E+05	3,1673	C	2,91E+05	2,970	C	4,67E+05	4,7582	84,98%	-3,56E-12	0,0	-5,64E-12	0,0	-3,07E+04	-0,3131
5	0,00	0,00	0,08	1	1,91E+05	1,9525	C	1,85E+05	1,883	C	4,02E+05	4,0995	73,21%	-1,26E-12	0,0	-6,86E-12	0,0	-3,74E+04	-0,3809
6	0,00	0,00	0,10	1	9,37E+04	0,9559	C	9,78E+04	0,997	C	3,33E+05	3,3978	60,68%	7,40E-13	0,0	-7,72E-12	0,0	-4,20E+04	-0,4283
7	0,00	0,00	0,12	2	2,65E+04	0,2700	C	3,96E+04	0,404	C	2,67E+05	2,7224	48,62%	2,41E-12	0,0	-8,18E-12	0,0	-4,45E+04	-0,4540
8	0,00	0,00	0,14	2	-5,42E+04	-0,5525	T	-3,25E+04	-0,331	T	2,07E+05	2,1066	37,62%	3,99E-12	0,0	-8,20E-12	0,0	-4,47E+04	-0,4553
9	0,00	0,00	0,16	2	-1,33E+05	-1,3543	T	-1,02E+05	-1,045	T	1,54E+05	1,5674	27,99%	5,57E-12	0,0	-7,76E-12	0,0	-4,22E+04	-0,4307
10	0,00	0,00	0,18	2	-2,14E+05	-2,1801	T	-1,74E+05	-1,775	T	1,09E+05	1,1123	19,86%	7,30E-12	0,0	-6,84E-12	0,0	-3,72E+04	-0,3794
11	0,00	0,00	0,20	2	-3,01E+05	-3,0718	T	-2,50E+05	-2,554	T	7,35E+04	0,7493	13,38%	9,32E-12	0,0	-5,42E-12	0,0	-2,95E+04	-0,3008
12	0,00	0,00	0,22	2	-4,00E+05	-4,0754	T	-3,36E+05	-3,421	T	4,85E+04	0,4943	8,83%	1,18E-11	0,0	-3,51E-12	0,0	-1,91E+04	-0,1950
13	0,00	0,00	0,24	2	-5,15E+05	-5,2484	T	-4,34E+05	-4,424	T	3,71E+04	0,3782	6,75%	1,48E-11	0,0	-1,13E-12	0,0	-6,15E+03	-0,0627
14	0,00	0,00	0,26	3	-1,82E+03	-0,0185	T	1,60E+03	0,016	C	3,43E+04	0,3497	6,25%	6,27E-13	0,0	-1,08E-12	0,0	-5,87E+03	-0,0599
15	0,00	0,00	0,28	3	-2,60E+03	-0,0265	T	5,50E+02	0,006	C	3,19E+04	0,3249	5,80%	5,78E-13	0,0	-1,02E-12	0,0	-5,57E+03	-0,0568
16	0,00	0,00	0,30	3	-3,45E+03	-0,0352	T	-5,30E+02	-0,005	T	2,97E+04	0,3032	5,41%	5,36E-13	0,0	-9,64E-13	0,0	-5,25E+03	-0,0535
17	0,00	0,00	0,32	3	-4,37E+03	-0,0446	T	-1,64E+03	-0,017	T	2,79E+04	0,2840	5,07%	5,01E-13	0,0	-9,01E-13	0,0	-4,90E+03	-0,0500
18	0,00	0,00	0,34	3	-5,38E+03	-0,0549	T	-2,80E+03	-0,029	T	2,62E+04	0,2671	4,77%	4,74E-13	0,0	-8,34E-13	0,0	-4,54E+03	-0,0463
19	0,00	0,00	0,36	3	-6,49E+03	-0,0662	T	-4,01E+03	-0,041	T	2,47E+04	0,2522	4,50%	4,56E-13	0,0	-7,62E-13	0,0	-4,15E+03	-0,0423
20	0,00	0,00	0,38	3	-7,71E+03	-0,0787	T	-5,28E+03	-0,054	T	2,35E+04	0,2391	4,27%	4,47E-13	0,0	-6,86E-13	0,0	-3,73E+03	-0,0381
21	0,00	0,00	0,40	3	-9,07E+03	-0,0925	T	-6,64E+03	-0,068	T	2,24E+04	0,2280	4,07%	4,48E-13	0,0	-6,04E-13	0,0	-3,29E+03	-0,0335
22	0,00	0,00	0,41	3	-9,81E+03	-0,1001	T	-7,35E+03	-0,075	T	2,19E+04	0,2232	3,99%	4,53E-13	0,0	-5,61E-13	0,0	-3,05E+03	-0,0311
23	0,00	0,00	0,42	4	1,29E+03	0,0132	C	2,57E+03	0,026	C	2,14E+04	0,2187	3,91%	2,35E-13	0,0	-5,47E-13	0,0	-2,98E+03	-0,0303
24	0,00	0,00	0,44	4	1,23E+03	0,0125	C	2,40E+03	0,024	C	2,06E+04	0,2101	3,75%	2,15E-13	0,0	-5,20E-13	0,0	-2,83E+03	-0,0288
25	0,00	0,00	0,46	4	1,16E+03	0,0118	C	2,23E+03	0,023	C	1,98E+04	0,2022	3,61%	1,97E-13	0,0	-4,94E-13	0,0	-2,69E+03	-0,0274
26	0,00	0,00	0,48	4	1,10E+03	0,0112	C	2,08E+03	0,021	C	1,91E+04	0,1947	3,48%	1,81E-13	0,0	-4,70E-13	0,0	-2,56E+03	-0,0261
27	0,00	0,00	0,50	4	1,04E+03	0,0106	C	1,94E+03	0,020	C	1,84E+04	0,1877	3,35%	1,66E-13	0,0	-4,48E-13	0,0	-2,44E+03	-0,0248
28	0,00	0,00	0,52	4	9,81E+02	0,0100	C	1,81E+03	0,018	C	1,78E+04	0,1812	3,24%	1,53E-13	0,0	-4,26E-13	0,0	-2,32E+03	-0,0237
29	0,00	0,00	0,54	4	9,24E+02	0,0094	C	1,69E+03	0,017	C	1,72E+04	0,1750	3,12%	1,41E-13	0,0	-4,06E-13	0,0	-2,21E+03	-0,0225
30	0,00	0,00	0,56	4	8,71E+02	0,0089	C	1,58E+03	0,016	C	1,66E+04	0,1691	3,02%	1,30E-13	0,0	-3,87E-13	0,0	-2,11E+03	-0,0215
31	0,00	0,00	0,58	4	8,19E+02	0,0084	C	1,48E+03	0,015	C	1,60E+04	0,1635	2,92%	1,21E-13	0,0	-3,70E-13	0,0	-2,01E+03	-0,0205
32	0,00	0,00	0,60	4	7,70E+02	0,0079	C	1,38E+03	0,014	C	1,55E+04	0,1583	2,83%	1,12E-13	0,0	-3,53E-13	0,0	-1,92E+03	-0,0196
33	0,00	0,00	0,61	4	7,47E+02	0,0076	C	1,33E+03	0,014	C	1,53E+04	0,1557	2,78%	1,08E-13	0,0	-3,45E-13	0,0	-1,88E+03	-0,0191
34	0,00	0,00	0,62	4	7,24E+02	0,0074	C	1,29E+03	0,013	C	1,50E+04	0,1533	2,74%	1,04E-13	0,0	-3,37E-13	0,0	-1,84E+03	-0,0187
35	0,00	0,00	0,64	4	6,80E+02	0,0069	C	1,21E+03	0,012	C	1,46E+04	0,1485	2,65%	9,68E-14	0,0	-3,22E-13	0,0	-1,76E+03	-0,0179
36	0,00	0,00	0,66	4	6,39E+02	0,0065	C	1,13E+03	0,012	C	1,41E+04	0,1439	2,57%	9,03E-14	0,0	-3,08E-13	0,0	-1,68E+03	-0,0171
37	0,00	0,00	0,68	4	6,00E+02	0,0061	C	1,06E+03	0,011	C	1,37E+04	0,1396	2,49%	8,43E-14	0,0	-2,95E-13	0,0	-1,61E+03	-0,0164
38	0,00	0,00	0,70	4	5,63E+02	0,0057	C	9,92E+02	0,010	C	1,33E+04	0,1355	2,42%	7,88E-14	0,0	-2,83E-13	0,0	-1,54E+03	-0,0157
39	0,00	0,00	0,72	4	5,29E+02	0,0054	C	9,30E+02	0,009	C	1,29E+04	0,1315	2,35%	7,38E-14	0,0	-2,71E-13	0,0	-1,48E+03	-0,0151
40	0,00	0,00	0,74	4	4,97E+02	0,0051	C	8,73E+02	0,009	C	1,25E+04	0,1277	2,28%	6,91E-14	0,0	-2,60E-13	0,0	-1,42E+03	-0,0144
41	0,00	0,00	0,76	4	4,66E+02	0,0048	C	8,20E+02	0,008	C	1,22E+04	0,1241	2,22%	6,49E-14	0,0	-2,50E-13	0,0	-1,36E+03	-0,0139
42	0,00	0,00	0,78	4	4,38E+02	0,0045	C	7,70E+02	0,008	C	1,18E+04	0,1206	2,15%	6,10E-14	0,0	-2,40E-13	0,0	-1,31E+03	-0,0133
43	0,00	0,00	0,80	4	4,11E+02	0,0042	C	7,24E+02	0,007	C	1,15E+04	0,1172	2,09%	5,74E-14	0,0	-2,30E-13	0,0	-1,25E+03	-0,0128
44	0,00	0,00	0,82	4	3,87E+02	0,0039	C	6,81E+02	0,007	C	1,12E+04	0,1140	2,04%	5,41E-14	0,0	-2,22E-13	0,0	-1,21E+03	-0,0123
45	0,00	0,00	0,84	4	3,63E+02	0,0037	C	6,41E+02	0,007	C	1,09E+04	0,1109	1,98%	5,10E-14	0,0	-2,13E-13	0,0	-1,16E+03	-0,0118
46	0,00	0,00	0,86	4	3,42E+02	0,0035	C	6,04E+02	0,006	C	1,06E+04	0,1080	1,93%	4,82E-14	0,0	-2,05E-13	0,0	-1,12E+03	-0,0114
47	0,00	0,00	0,88	4	3,22E+02	0,0033	C	5,69E+02	0,006	C	1,03E+04	0,1051	1,88%	4,55E-14	0,0	-1,98E-13	0,0	-1,08E+03	-0,0110
48	0,00	0,00	0,90	4	3,03E+02	0,0031	C	5,37E+02	0,005	C	1,00E+04	0,1024	1,83%	4,31E-14	0,0	-1,90E-13	0,0	-1,04E+03	-0,0106
49	0,00	0,00	0,92	4	2,85E+02	0,0029	C	5,07E+02	0,005	C	9,78E+03	0,0997	1,78%	4,08E-14	0,0	-1,84E-13	0,0	-9,99E+02	-0,0102
50	0,00	0,00	0,94	4	2,69E+02	0,0027	C	4,80E+02	0,005	C	9,53E+03	0,0972	1,74%	3,87E-14	0,0	-1,77E-13	0,0	-9,64E+02	-0,0098
51	0,00	0,00	0,96	4	2,54E+02	0,0026	C	4,54E+02	0,005	C	9,29E+03	0,0948	1,69%	3,67E-14	0,0	-1,71E-13	0,0	-9,30E+02	-0,0095
52	0,00	0,00	0,98	4	2,40E+02	0,0024	C	4,29E+02	0,004	C	9,06E+03	0,0924	1,65%	3,48E-14	0,0	-1,65E-13	0,0	-8,98E+02	-0,0092
53	0,00	0,00	1,00	4	2,27E+02	0,0023	C	4,07E+02	0,004	C	8,84E+03	0,0901	1,61%	3,31E-14	0,0	-1,59E-13	0,0	-8,67E+02	-0,0088

MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX
1,76E-04	1,33E-04	3,55E-04	1,86E-20	1,09E-35	5,91E-20	3,13E-21	1,71E-05	4,63E-04	0,0	0,0171	0,4627		
MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN	MIN
-1,65E-04	-1,18E-04	-1,12E-05	-1,58E-20	-2,93E-20	-1,60E-04	-3,75E-21	-2,04E-05	2,47E-04	0,0	-0,0204	0,2470		

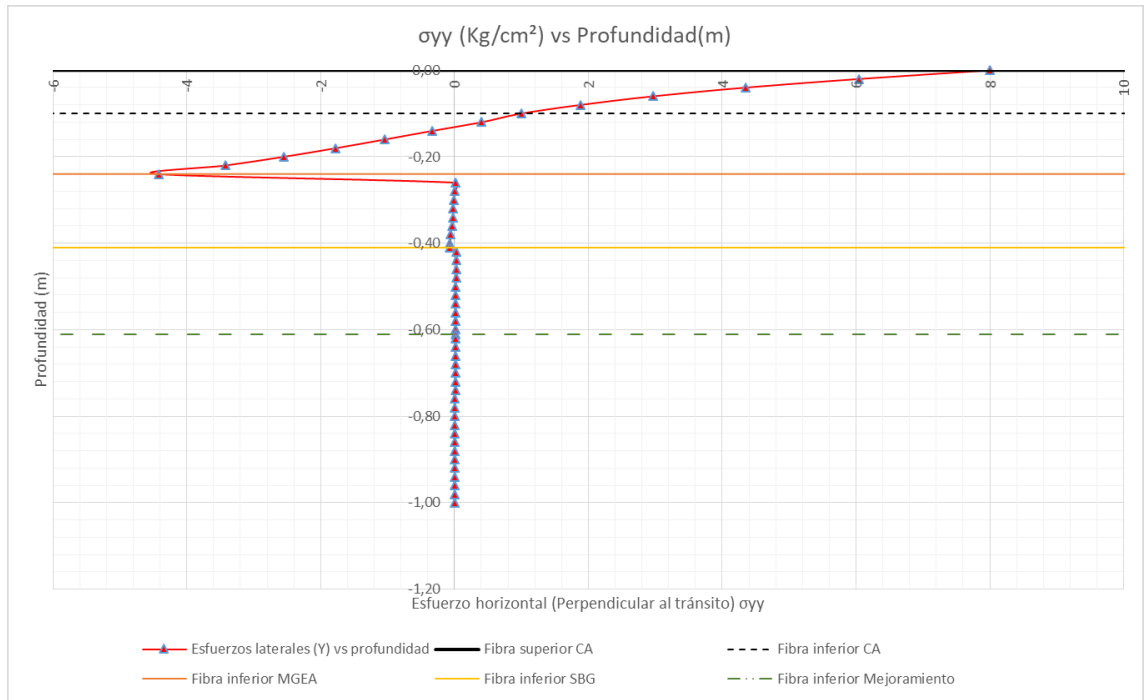
Puntos				Capa #	Descripción	Deformaciones unitarias (m/m)						Deflexiones (m)			Deflexiones (mm)		
ID	X (m)	Y (m)	Z (m)			Exx (1)	Eyy (1)	Ezz (1)	Exy (1)	Exz (1)	Eyz (1)	dx (m)	dy (m)	dz (m)	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)
1	0,00	0,00	0,00	1	Carpeta asfáltica	1,76E-04	1,33E-04	-1,12E-05	-1,58E-20	1,09E-35	5,91E-20	3,13E-21	1,71E-05	4,63E-04	0,0	0,0171	0,4627
2	0,00	0,00	0,02	1		1,11E-04	8,01E-05	5,10E-05	-1,14E-20	-2,58E-21	-1,41E-05	2,52E-21	1,37E-05	4,62E-04	0,0	0,0137	0,4623
3	0,00	0,00	0,04	1		5,89E-05	3,82E-05	9,36E-05	-7,63E-21	-4,98E-21	-2,71E-05	1,94E-21	1,06E-05	4,61E-04	0,0	0,0106	0,4608
4	0,00	0,00	0,06	1		2,06E-05	8,70E-06	1,16E-04	-4,35E-21	-6,90E-21	-3,76E-05	1,40E-21	7,61E-06	4,59E-04	0,0	0,0076	0,4587
5	0,00	0,00	0,08	1		-6,28E-06	-1,05E-05	1,23E-04	-1,54E-21	-8,40E-21	-4,57E-05	8,84E-22	4,81E-06	4,56E-04	0,0	0,0048	0,4563
6	0,00	0,00	0,10	1		-2,59E-05	-2,34E-05	1,21E-04	9,05E-22	-9,44E-21	-5,14E-05	3,90E-22	2,13E-06	4,54E-04	0,0	0,0021	0,4539
7	0,00	0,00	0,12	2	Base Granular estabilizada con asfalto en caliente	-4,08E-05	-3,26E-05	1,10E-04	3,01E-21	-1,02E-20	-5,57E-05	-8,57E-23	-4,67E-07	4,52E-04	0,0	-0,0005	0,4517
8	0,00	0,00	0,14	2		-5,45E-05	-4,10E-05	1,09E-04	4,98E-21	-1,03E-20	-5,58E-05	-5,57E-22	-3,03E-06	4,49E-04	0,0	-0,0030	0,4495
9	0,00	0,00	0,16	2		-6,90E-05	-5,00E-05	1,10E-04	6,97E-21	-9,70E-21	-5,28E-05	-1,03E-21	-5,62E-06	4,47E-04	0,0	-0,0056	0,4473
10	0,00	0,00	0,18	2		-8,57E-05	-6,08E-05	1,16E-04	9,13E-21	-8,55E-21	-4,65E-05	-1,52E-21	-8,28E-06	4,45E-04	0,0	-0,0083	0,4450
11	0,00	0,00	0,20	2		-1,06E-04	-7,43E-05	1,28E-04	1,17E-20	-6,78E-21	-3,69E-05	-2,03E-21	-1,11E-05	4,43E-04	0,0	-0,0111	0,4426
12	0,00	0,00	0,22	2		-1,32E-04	-9,16E-05	1,49E-04	1,47E-20	-4,39E-21	-2,39E-05	-2,58E-21	-1,40E-05	4,40E-04	0,0	-0,0140	0,4399
13	0,00	0,00	0,24	2	-1,65E-04	-1,14E-04	1,80E-04	1,86E-20	-1,41E-21	-7,69E-06	-3,16E-21	-1,72E-05	4,37E-04	0,0	-0,0172	0,4366	
14	0,00	0,00	0,26	3	Sub Base granular	-1,57E-04	-1,11E-04	3,34E-04	1,71E-20	-2,93E-20	-1,60E-04	-3,19E-21	-1,74E-05	4,30E-04	0,0	-0,0174	0,4297
15	0,00	0,00	0,28	3		-1,51E-04	-1,08E-04	3,17E-04	1,57E-20	-2,78E-20	-1,51E-04	-3,22E-21	-1,75E-05	4,23E-04	0,0	-0,0175	0,4232
16	0,00	0,00	0,30	3		-1,47E-04	-1,07E-04	3,04E-04	1,46E-20	-2,62E-20	-1,43E-04	-3,26E-21	-1,78E-05	4,17E-04	0,0	-0,0178	0,4170
17	0,00	0,00	0,32	3		-1,44E-04	-1,07E-04	2,94E-04	1,36E-20	-2,45E-20	-1,33E-04	-3,31E-21	-1,80E-05	4,11E-04	0,0	-0,0180	0,4110
18	0,00	0,00	0,34	3		-1,43E-04	-1,08E-04	2,86E-04	1,29E-20	-2,27E-20	-1,23E-04	-3,38E-21	-1,84E-05	4,05E-04	0,0	-0,0184	0,4052
19	0,00	0,00	0,36	3		-1,43E-04	-1,10E-04	2,81E-04	1,24E-20	-2,07E-20	-1,13E-04	-3,46E-21	-1,88E-05	4,00E-04	0,0	-0,0188	0,3996
20	0,00	0,00	0,38	3		-1,45E-04	-1,12E-04	2,78E-04	1,21E-20	-1,86E-20	-1,02E-04	-3,56E-21	-1,94E-05	3,94E-04	0,0	-0,0194	0,3940
21	0,00	0,00	0,40	3		-1,49E-04	-1,16E-04	2,78E-04	1,22E-20	-1,64E-20	-8,94E-05	-3,68E-21	-2,00E-05	3,88E-04	0,0	-0,0200	0,3884
22	0,00	0,00	0,41	3		-1,52E-04	-1,18E-04	2,79E-04	1,23E-20	-1,52E-20	-8,30E-05	-3,75E-21	-2,04E-05	3,86E-04	0,0	-0,0204	0,3856
23	0,00	0,00	0,42	4		Subrasante mejorada con geocelda y MGR	-1,48E-04	-1,16E-04	3,55E-04	1,18E-20	-2,73E-20	-1,49E-04	-3,70E-21	-2,01E-05	3,82E-04	0,0	-0,0201
24	0,00	0,00	0,44	4	-1,42E-04		-1,13E-04	3,42E-04	1,07E-20	-2,60E-20	-1,41E-04	-3,60E-21	-1,96E-05	3,75E-04	0,0	-0,0196	0,3751
25	0,00	0,00	0,46	4	-1,37E-04		-1,10E-04	3,30E-04	9,84E-21	-2,47E-20	-1,35E-04	-3,50E-21	-1,90E-05	3,68E-04	0,0	-0,0190	0,3684
26	0,00	0,00	0,48	4	-1,32E-04		-1,07E-04	3,18E-04	9,03E-21	-2,35E-20	-1,28E-04	-3,40E-21	-1,85E-05	3,62E-04	0,0	-0,0185	0,3619
27	0,00	0,00	0,50	4	-1,27E-04		-1,04E-04	3,07E-04	8,30E-21	-2,24E-20	-1,22E-04	-3,31E-21	-1,80E-05	3,56E-04	0,0	-0,0180	0,3556
28	0,00	0,00	0,52	4	-1,22E-04		-1,02E-04	2,97E-04	7,64E-21	-2,13E-20	-1,16E-04	-3,22E-21	-1,75E-05	3,50E-04	0,0	-0,0175	0,3496
29	0,00	0,00	0,54	4	-1,18E-04		-9,89E-05	2,88E-04	7,05E-21	-2,03E-20	-1,11E-04	-3,13E-21	-1,70E-05	3,44E-04	0,0	-0,0170	0,3437
30	0,00	0,00	0,56	4	-1,14E-04		-9,65E-05	2,79E-04	6,52E-21	-1,94E-20	-1,05E-04	-3,05E-21	-1,66E-05	3,38E-04	0,0	-0,0166	0,3381
31	0,00	0,00	0,58	4	-1,10E-04		-9,40E-05	2,70E-04	6,04E-21	-1,85E-20	-1,01E-04	-2,97E-21	-1,62E-05	3,33E-04	0,0	-0,0162	0,3326
32	0,00	0,00	0,60	4	-1,07E-04		-9,17E-05	2,62E-04	5,60E-21	-1,76E-20	-9,61E-05	-2,89E-21	-1,57E-05	3,27E-04	0,0	-0,0157	0,3273
33	0,00	0,00	0,61	4	-1,05E-04		-9,06E-05	2,58E-04	5,40E-21	-1,72E-20	-9,39E-05	-2,85E-21	-1,55E-05	3,25E-04	0,0	-0,0155	0,3247
34	0,00	0,00	0,62	4	Subrasante natural	-1,04E-04	-8,95E-05	2,54E-04	5,20E-21	-1,69E-20	-9,18E-05	-2,82E-21	-1,53E-05	3,22E-04	0,0	-0,0153	0,3221
35	0,00	0,00	0,64	4		-1,00E-04	-8,73E-05	2,47E-04	4,84E-21	-1,61E-20	-8,78E-05	-2,75E-21	-1,50E-05	3,17E-04	0,0	-0,0150	0,3171
36	0,00	0,00	0,66	4		-9,75E-05	-8,52E-05	2,39E-04	4,51E-21	-1,54E-20	-8,40E-05	-2,68E-21	-1,46E-05	3,12E-04	0,0	-0,0146	0,3122
37	0,00	0,00	0,68	4		-9,46E-05	-8,32E-05	2,33E-04	4,21E-21	-1,48E-20	-8,04E-05	-2,61E-21	-1,42E-05	3,08E-04	0,0	-0,0142	0,3075
38	0,00	0,00	0,70	4		-9,19E-05	-8,12E-05	2,26E-04	3,94E-21	-1,41E-20	-7,70E-05	-2,55E-21	-1,39E-05	3,03E-04	0,0	-0,0139	0,3029
39	0,00	0,00	0,72	4		-8,93E-05	-7,93E-05	2,20E-04	3,69E-21	-1,36E-20	-7,38E-05	-2,49E-21	-1,35E-05	2,98E-04	0,0	-0,0135	0,2985
40	0,00	0,00	0,74	4		-8,68E-05	-7,74E-05	2,14E-04	3,46E-21	-1,30E-20	-7,08E-05	-2,43E-21	-1,32E-05	2,94E-04	0,0	-0,0132	0,2941
41	0,00	0,00	0,76	4		-8,44E-05	-7,56E-05	2,08E-04	3,25E-21	-1,25E-20	-6,80E-05	-2,37E-21	-1,29E-05	2,90E-04	0,0	-0,0129	0,2899
42	0,00	0,00	0,78	4		-8,21E-05	-7,38E-05	2,03E-04	3,05E-21	-1,20E-20	-6,53E-05	-2,31E-21	-1,26E-05	2,86E-04	0,0	-0,0126	0,2858
43	0,00	0,00	0,80	4		-7,99E-05	-7,21E-05	1,97E-04	2,87E-21	-1,15E-20	-6,27E-05	-2,26E-21	-1,23E-05	2,82E-04	0,0	-0,0123	0,2818
44	0,00	0,00	0,82	4		-7,78E-05	-7,05E-05	1,92E-04	2,70E-21	-1,11E-20	-6,03E-05	-2,21E-21	-1,20E-05	2,78E-04	0,0	-0,0120	0,2779
45	0,00	0,00	0,84	4	-7,58E-05	-6,89E-05	1,87E-04	2,55E-21	-1,07E-20	-5,80E-05	-2,16E-21	-1,18E-05	2,74E-04	0,0	-0,0118	0,2741	
46	0,00	0,00	0,86	4	-7,39E-05	-6,73E-05	1,82E-04	2,41E-21	-1,03E-20	-5,59E-05	-2,11E-21	-1,15E-05	2,70E-04	0,0	-0,0115	0,2704	
47	0,00	0,00	0,88	4	-7,20E-05	-6,58E-05	1,78E-04	2,28E-21	-9,88E-21	-5,38E-05	-2,06E-21	-1,12E-05	2,67E-04	0,0	-0,0112	0,2668	
48	0,00	0,00	0,90	4	-7,02E-05	-6,43E-05	1,73E-04	2,15E-21	-9,52E-21	-5,18E-05	-2,02E-21	-1,10E-05	2,63E-04	0,0	-0,0110	0,2633	
49	0,00	0,00	0,92	4	-6,84E-05	-6,29E-05	1,69E-04	2,04E-21	-9,18E-21	-5,00E-05	-1,97E-21	-1,08E-05	2,60E-04	0,0	-0,0108	0,2599	
50	0,00	0,00	0,94	4	-6,67E-05	-6,14E-05	1,65E-04	1,93E-21	-8,85E-21	-4,82E-05	-1,93E-21	-1,05E-05	2,57E-04	0,0	-0,0105	0,2566	
51	0,00	0,00	0,96	4	-6,51E-05	-6,01E-05	1,61E-04	1,83E-21	-8,54E-21	-4,65E-05	-1,89E-21	-1,03E-05	2,53E-04	0,0	-0,0103	0,2533	
52	0,00	0,00	0,98	4	-6,35E-05	-5,88E-05	1,57E-04	1,74E-21	-8,24E-21	-4,49E-05	-1,85E-21	-1,01E-05	2,50E-04	0,0	-0,0101	0,2501	
53	0,00	0,00	1,00	4	-6,20E-05	-5,75E-05	1,53E-04	1,66E-21	-7,96E-21	-4,33E-05	-1,81E-21	-9,87E-06	2,47E-04	0,0	-0,0099	0,2470	



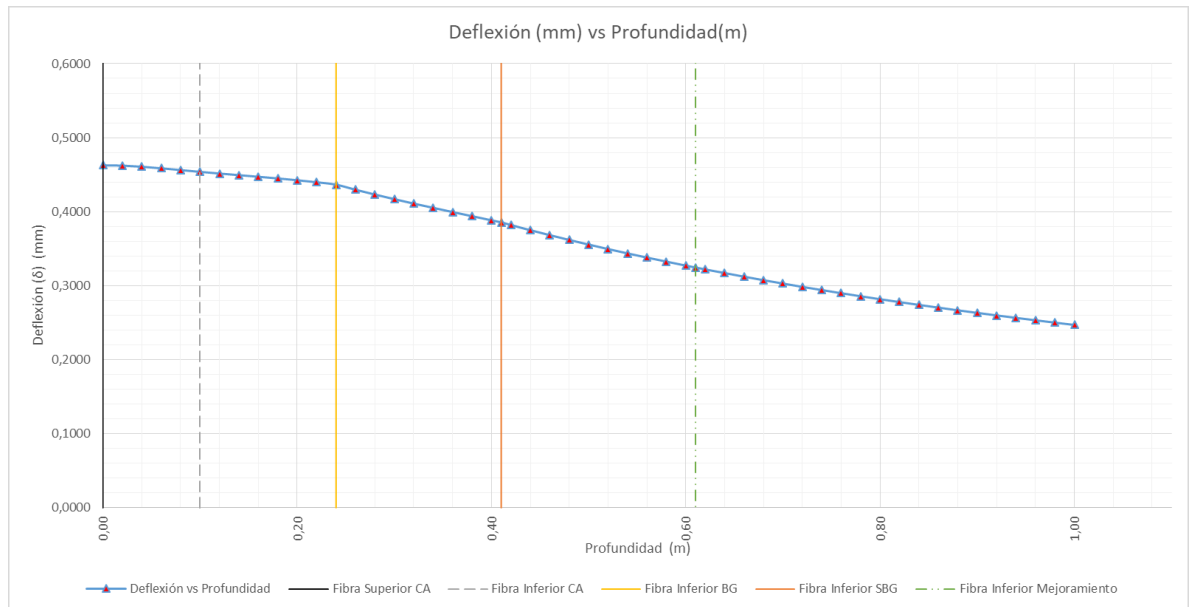
Distribución de esfuerzos verticales bajo la línea de carga de las ruedas, en función de la profundidad



Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección longitudinal del la estructura de pavimento, en función de la profundidad

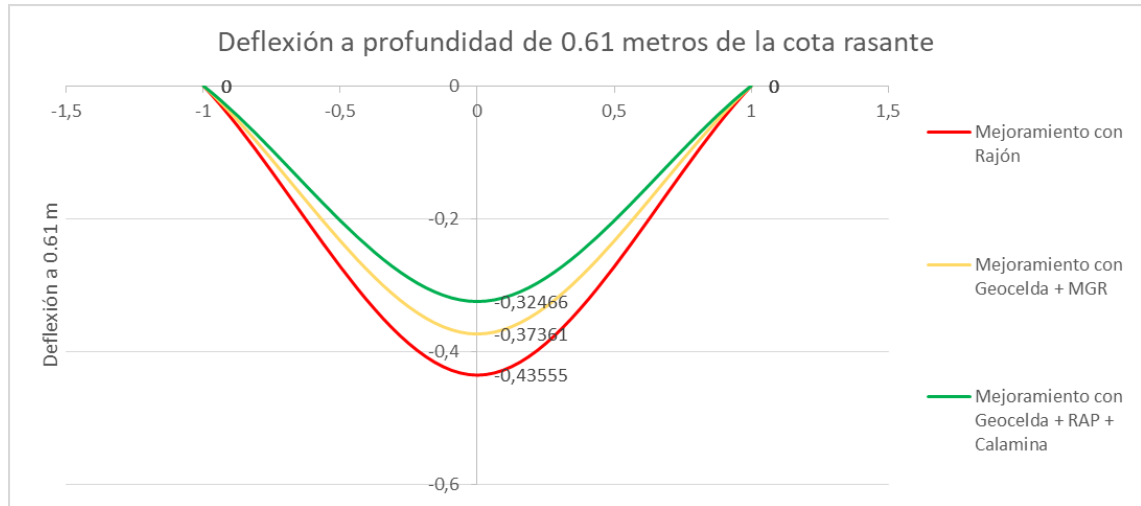


Distribución de esfuerzos horizontales bajo la línea de carga de la rueda, en dirección transversal del la estructura de pavimento, en función de la profundidad



Variación de la deflexión (δ) en función de la profundidad Z

Deflexión a 0.61 m de profundidad			
	Rajón	Geocelda con lleno MGR	Geocelda con lleno en RAP y Calamina
1	0	0	0
0	-0,43555	-0,37361	-0,32466
-1	0	0	0



Anexo 9. Programación – Análisis de tiempos de ejecución

