

EVALUACIÓN DEL USO DE GEOSINTÉTICOS (GEOMALLAS) PARA
AUMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS AFIRMADOS CON MATERIALES
CONVENCIONALES DEL CAUCA



JUAN CARLOS ORDOÑEZ GRIJALBA
EDUARD ANTONIO SANDOVAL LOPEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRIA EN INGENIERA DE PAVIMENTOS
POPAYÁN

2023

EVALUACIÓN DEL USO DE GEOSINTÉTICOS (GEOMALLAS) PARA
AUMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS AFIRMADOS CON MATERIALES
CONVENCIONALES DEL CAUCA



JUAN CARLOS ORDOÑEZ GRIJALBA
EDUARD ANTONIO SANDOVAL LOPEZ

Director de trabajo de investigación:
PhD. LUCIO GERARDO CRUZ VELASCO

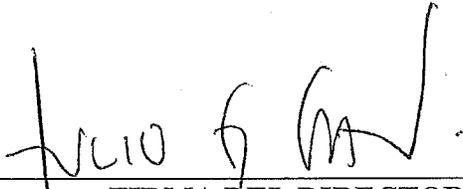
PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
POPAYÁN - CAUCA

2023

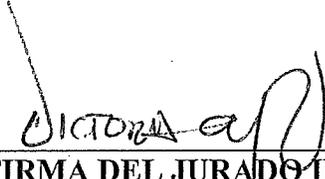
NOTA DE ACEPTACIÓN

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**

**TRABAJO DE GRADO TITULADO: EVALUACIÓN DEL USO DE
GEOSINTÉTICOS (GEOMALLAS) PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD DE
LOS AFIRMADOS CON MATERIALES CONVENCIONALES DEL CAUCA**



FIRMA DEL DIRECTOR



FIRMA DEL JURADO INTERNO



FIRMA DEL JURADO EXTERNO

LUGAR Y FECHA: Popayán, junio de 2023

Tabla de contenido

RESUMEN	23
ABSTRACT	24
1. INTRODUCCIÓN	25
1.1. Planteamiento del problema	28
1.2. Justificación	30
1.3. Objetivo del proyecto	32
1.3.1. Objetivo general	32
1.3.2. Objetivos específicos	32
2. Marco teórico	34
2.1. Diseños de Afirmado	40
2.2. Modelación Numérica de Afirmados	60
2.2.1. Software Abaqus	62
2.2.2. Software MTA	63
3. Caracterización	64
3.1. Caracterización de materiales para construcción de afirmados	64
3.1.1. Cantera la Yunga	68
3.1.2. Agregados Puracé S.A.S.	70
3.1.3. Mina Truck Ltda.	72
3.1.4. Cantera las Yescas	74

3.2.	Parámetros de diseño	76
3.3.	Geosintético y sus parámetros	82
4.	Diseño de estructuras en afirmado	86
5.	Modelaciones con Estructura de Afirmado	93
5.1.	Determinación de los Diseños de afirmado a modelar.	94
5.1.1.	Creación de las partes	94
5.1.2.	Geométrica de Cada una de las Capas	98
5.1.3.	Asignación de las propiedades para los materiales.....	99
5.1.4.	Ensamblaje de las Capas de la Estructura.....	103
5.1.5.	Definición de las Interacciones entre las Capas.....	104
5.1.6.	Aplicación de la Carga de Diseño.....	106
5.1.7.	Condiciones del Contorno.	107
5.1.8.	Creación de la Malla de la Estructura.	108
5.1.9.	Paso Obtención de Resultados.	109
5.2.	Modelación Estructura con Cumplimiento de Especificaciones – Fuente Agregados Puracé.	110
5.2.1.	Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.	113
5.2.2.	Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.	115
5.2.3.	Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.	117
5.2.4.	Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.	119
5.2.5.	Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.	122
5.2.6.	Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.	124

5.3. Resultados Modelaciones para Afirmados que no cumple con las especificaciones – Fuente La Yunga:	126
5.3.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.	128
5.3.2. Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.	130
5.3.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.	132
5.3.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.	134
5.3.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.	136
5.3.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.	138
5.4. Resultados Modelaciones para Afirmados que no cumple con las especificaciones – Fuente Yescas:	140
5.4.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.	142
5.4.2. Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.	144
5.4.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.	146
5.4.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.	148
5.4.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.	150
5.4.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.	152
5.5. Resultados Modelaciones para Afirmados que no cumple con las especificaciones – Fuente Minatruk:	154
5.5.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.	156
5.5.2. Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.	158
5.5.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.	160
5.5.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.	162

5.5.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.....	164
5.5.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.	166
5.6. Utilización Software MTA.	168
6. Análisis de Resultados.....	174
7. Análisis Económico.....	194
7.1. Análisis del Costo de la capa de afirmado cumpliendo	
especificaciones:.....	195
7.2. Análisis de Estructura sin el cumplimiento de especificaciones:.....	200
7.3. Análisis de Costos para las Estructura Convencional y Estructuras	
Reforzadas. 205	
8. Conclusiones.....	212
9. Recomendaciones.....	215
10. Bibliografía.....	217

Lista de Tablas

Tabla 1. Tipos y funciones de geosintéticos en carretera	35
Tabla 2. Franjas granulométricas del afirmado	41
Tabla 3. Relaciones que debe cumplir el material de afirmado.....	42
Tabla 4. Requisitos de los agregados para afirmados.....	42
Tabla 5. Especificaciones de material para afirmado por Austroads.....	43
Tabla 6. Especificaciones de material para afirmado en carreteras rurales descritas en TRH 20	44
Tabla 7. Clasificación del suelo según la zona.	47
Tabla 8. Clasificación climática de Thornthwaite.	49
Tabla 9. Coeficientes de drenaje de las capas granulares no tratadas, <i>mi</i>	50
Tabla 10. Valores aproximados de los índices de resistencia al corte en función de la SUCS.	66
Tabla 11. Parámetros de elasticidad	67
Tabla 12. Propiedades del material: Yunga.....	70
Tabla 13. Propiedades del material: Puracé.....	71
Tabla 14. Propiedades del material: MinaTruck.....	73
Tabla 15. Propiedades del material: Yescas	75
Tabla 16. Requisitos de calidad de los materiales de afirmado	81
Tabla 17. Propiedades geomalla biaxial propygrid BX 1200.....	85
Tabla 18. Resumen de espesores para estructuras no reforzadas	90
Tabla 19. Resumen de espesores para estructuras reforzadas	92
Tabla 20. Resumen de espesores para estructuras reforzadas	99

Tabla 21. Resumen Cálculo de Módulo Resiliente.....	100
Tabla 22. Resumen Valores Típicos Relación de Poisson.....	101
Tabla 23. Módulos Elásticos de las fuentes de agregado.	102
Tabla 24. Relación de Poisson para materiales granulares.....	102
Tabla 23. Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas sin refuerzo con la metodología invias con cumplimiento de especificaciones y con refuerzo para la fuente de afirmado Agregados Puracé.	111
Tabla 24. Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado La Yunga.	126
Tabla 25. Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Yescas.....	140
Tabla 26. Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Minatruck:	154
Tabla 29. Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Agregados Puracé:.....	195
Tabla 30. Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Cantera la Yunga:	201
Tabla 31. Resumen de costos por kilómetro para estructuras de afirmado convencional y reforzada con material proveniente de Cantera la Yunga:	210
Tabla 32. Resumen de costos por kilómetro para estructuras de afirmado convencional y reforzada con material proveniente de Agregados Puracé:	210

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Mecanismo de refuerzo y ejemplo de trabazón entre agregados y geomalla</i>	40
Figura 2. Clasificación del material según TRH 20	46
Figura 3. Ábaco para el diseño de afirmados.	51
Figura 4. Espesor del afirmado por Austroads	53
Figura 5. Esquema de la realización de pruebas.....	56
Figura 6. LCR en función del CBR.	59
Figura 7. Panorámica Cantera la Yunga.....	69
Figura 8. Panorámica Agregados Puracé.....	71
Figura 9. Panorámica Mina Truck.....	73
Figura 10. Panorámica cantera las Yescas.....	75
Figura 11. Implementación de geomalla biaxial propygrid BX- 1200 en campo para construcción de carreteras.	83
Figura 12. Localización vía “cruce ruta 2504 alto Tunia-Altamira-cruce ruta 26CCA farallones”	86
Figura 13. Selección de espesores, según Higuera (2008)	88
Figura 14. Selección de espesores, según AUSTROADS.....	89
Figura 15. Selección de LCR.....	91
Figura 16. Vista Entorno Software Abaqus/CAE.....	93
Figura 17. Vista Plano de Revolución sobre el Eje de simetria	95
Figura 18. Vista Estructura de Afirmado Convencional con la Carga a Modelar	97
Figura 19. Vista Estructura de Afirmado Reforzada con Geomalla.....	97

Figura 20. Definición de las partes que componen el modelo.....	104
Figura 21. Vista asignación propiedades de contacto entre capas.....	105
Figura 22. Vista asignación condiciones de interacción entre las capas	105
Figura 23. Vista localización y definición de la carga.	107
Figura 24. Vista definición condiciones de contorno – restricciones del contorno.	108
Figura 25. Vista Estructura con el enmallado para puntos de cálculos.	109
Figura 26. Vista Resultados Gráficos Cálculo Esfuerzo Vertical	110
Figura 27. Estructuras para modelar con afirmado fuente Agregados Puracé con y sin refuerzo.	112
Figura 28. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Ag. Puracé	113
Figura 29. <i>Resultado Gráfico Cálculo Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – Sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%.....</i>	114
Figura 30. <i>Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</i>	114
Figura 31. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</i>	115
Figura 32. <i>Resultado Gráfico Cálculo Esfuerzos Verticales – Capa Afirmado Agregados Puracé – Con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</i>	116
Figura 33. <i>Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – Con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</i>	116

Figura 34. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – Con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</i>	117
Figura 35. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</i>	118
Figura 36. <i>Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</i>	118
Figura 37. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</i>	119
Figura 38. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%</i>	120
Figura 39. <i>Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%</i>	121
Figura 40. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%</i>	121
Figura 41. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%</i>	122
Figura 42. <i>Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%</i>	123
Figura 43. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%</i>	123
Figura 44. <i>Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%</i>	124

<p>Figura 45. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%.....</p>	125
<p>Figura 46. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%.....</p>	125
<p>Figura 47. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente La Yunga</p>	127
<p>Figura 48. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente La Yunga.....</p>	128
<p>Figura 49. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	129
<p>Figura 50. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	129
<p>Figura 51. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	130
<p>Figura 52. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	131
<p>Figura 53. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	131
<p>Figura 54. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	132
<p>Figura 55. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</p>	133

Figura 56. Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%	133
Figura 57. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%	134
Figura 58. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	135
Figura 59. Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	135
Figura 60. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	136
Figura 61. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	137
Figura 62. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	137
Figura 63. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	138
Figura 64. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	138
Figura 65. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	139
Figura 66. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga –con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	139

Figura 67. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Yescas	141
Figura 68. <i>Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Yescas</i>	142
Figura 69. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%.....	143
Figura 70. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Yescas– sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%.....	143
Figura 71. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%.....	144
Figura 72. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%	145
Figura 73. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%	145
Figura 74. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%	146
Figura 75. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%.....	147
Figura 76. Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%	147
Figura 77. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%.....	148

Figura 78. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado	
Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	149
Figura 79. Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa	
Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	149
Figura 80. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado	
Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	150
Figura 81. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado	
Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	151
Figura 82. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado	
Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	151
Figura 83. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado	
Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	152
Figura 84. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado	
Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	152
Figura 85. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado	
Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	153
Figura 86. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado	
Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	153
Figura 87. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente	
Minatruk.	155
Figura 88. <i>Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente</i>	
<i>Minatruk.</i>	156

<p>Figura 89. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk– sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	157
<p>Figura 90. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	157
<p>Figura 91. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	158
<p>Figura 92. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	159
<p>Figura 93. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	159
<p>Figura 94. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%</p>	160
<p>Figura 95. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</p>	161
<p>Figura 96. Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</p>	161
<p>Figura 97. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%</p>	162
<p>Figura 98. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%</p>	163
<p>Figura 99. Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado</p> <p>Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%</p>	163

Figura 100. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado	
Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%	164
Figura 101. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado	
Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	165
Figura 102. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado	
Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	165
Figura 103. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado	
Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%	166
Figura 104. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado	
Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	167
Figura 105. Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado	
Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	167
Figura 106. Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado	
Minatruk –con Refuerzo – Subrasante CBR 7%	168
Figura107. <i>Creación del modelo a evaluar en MTA</i>	169
Figura108. <i>Respuesta del sistema ante evaluación de desplazamiento en software</i>	
<i>MTA</i>	170
Figura109. <i>Desplazamiento obtenido en el plano XY vs distancia</i>	171
Figura110. <i>Respuesta del sistema ante la evaluación del cálculo de esfuerzo</i>	
<i>verticales</i>	172
Figura 111. <i>Esfuerzo vertical vs distancia</i>	173
Figura 112. <i>Tensión vs distancia</i>	173

<p>Figura 113. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Agregados Puracé.....</p>	196
<p>Figura 114. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Agregados Puracé.....</p>	198
<p>Figura 115. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Cantera la Yunga.....</p>	201
<p>Figura 116. Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Cantera la Yunga.....</p>	203
<p>Figura 117. Resumen del análisis de costos para el caso de Agregados Puracé con $CBR_{sr} = 3\%$.....</p>	207
<p>Figura 118. Resumen del análisis de costos para el caso de Cantera la Yunga con $CBR_{sr} = 3\%$.....</p>	208
<p>Figura 119. Gráfica de comparación de costos por km para material proveniente de Cantera la Yunga con subrasante de diferente CBR.....</p>	209

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Especificación granulométrica INVIAS A – 38.....	77
Gráfica 2. Especificación granulométrica INVIAS A -25.....	78
Gráfica 3. Especificación granulométrica AUSTRROADS	79
Gráfica 4. Clasificación de los agregados según SANRAL	80
Gráfica 5. Gráfica Comparativa Esfuerzo Vertical vs Profundidad:	175
Gráfica 6. Gráfico comparativo Desplazamientos para CBR 3%	176
Gráfica 7. Gráfica Comparativa Esfuerzos de Tensión vs Profundidad:.....	177
Gráfica 8. Gráfico comparativo Esfuerzos Verticales sin refuerzo con refuerzo	178
Gráfica 9. Gráfica Comparativa Desplazamiento vs Profundidad:	179
Gráfica 10. Gráfica Resultados Cálculo de Esfuerzo de Tensión vs Profundidad de la Estructura	180
Gráfica 11. Resultados Gráfica de Esfuerzos Verticales vs Profundidad para la Estructura para un CBR 7%.	181
Gráfica 12. Gráfica Resultados Desplazamiento vs Profundidad de la Estructura para un CBR 7%.....	182
Gráfica 13. Gráfica Resultados Esfuerzos a Tensión vs Profundidad de la Estructura para un CBR 7%.	183
Gráfica 14. Esfuerzo Verticales vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante	184
Gráfica 15. Esfuerzos Verticales vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante.....	185

Gráfica 16. Esfuerzos Verticales vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante.....	186
Gráfica 17. Desplazamientos vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante	187
Gráfica 18. Desplazamientos vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante	188
Gráfica 19. Desplazamiento vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante	189
Gráfica 20. Esfuerzos de Tensión vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante.....	190
Gráfica 21. Esfuerzos de Tensión vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante.....	191
Gráfica 22. Esfuerzos de Tensión vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante.....	192

Lista de Anexos

Anexo 1. Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Yunga.....	82
Anexo 2. Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Puracé	82
Anexo 3. Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Truck.....	82
Anexo 4. Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Yescas	82

RESUMEN

La red terciaria en Colombia constituye la mayor parte de la infraestructura vial del país y desempeña un papel fundamental en el desarrollo social y productivo de las zonas más alejadas. A pesar de esto, el 96% de su extensión se encuentra en mal estado. Para mejorar la conectividad, se ha utilizado el material de afirmado, cuyo uso está regulado por el artículo 311 de las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS). No obstante, su implementación implica espesores considerables de capa, lo que aumenta el presupuesto debido a la adquisición y transporte de los granulares, además de generar impactos ambientales negativos debido a la explotación excesiva de las fuentes de material y las emisiones contaminantes producidas por los vehículos de transporte. En los últimos años, se ha despertado un interés creciente en el uso de geosintéticos, que ofrecen diversas funciones para mejorar el comportamiento de los materiales. En particular, las geoceldas han surgido como una alternativa prometedora para reducir los espesores en los diseños de afirmado. Con el objetivo de investigar su comportamiento, se propone un estudio comparativo entre estructuras de afirmado diseñadas mediante tres métodos diferentes y sus equivalentes reforzados con geomallas. Para predecir el rendimiento de estas alternativas, se emplean los programas de elementos finitos Abaqus y MTA. A partir de los resultados obtenidos, se lleva a cabo un análisis de costos, determinando en qué casos es recomendable emplear el refuerzo con geomalla para la reducción de espesores.

ABSTRACT

The tertiary road network in Colombia represents the majority of the country's road infrastructure and plays a fundamental role in the social and productive development of remote areas. However, 96% of its extent is in poor condition. To enhance connectivity, the use of road stabilization materials, regulated by Article 311 of the National Roads Institute (INVIAS) specifications, has been employed. Nevertheless, its implementation involves significant layer thickness, leading to increased budgetary requirements for material acquisition and transportation, as well as negative environmental impacts due to excessive material sourcing and pollutant emissions from transport vehicles. In recent years, there has been a growing interest in the utilization of geosynthetics, which offer various functions to enhance material performance. Geocells, in particular, have emerged as a promising alternative for reducing thickness in road design. To investigate their behavior, a comparative study is proposed between conventional road structures designed using three different methods and their equivalents reinforced with geogrids. Finite element programs such as Abaqus and MTA are employed to predict the performance of these alternatives. Based on the obtained results, a cost analysis is conducted to determine the cases in which geogrid reinforcement for thickness reduction is recommended.

1. INTRODUCCIÓN

La red terciaria representa el 69.2% de las vías en Colombia (Ministerio del transporte, 2022) y es clasificada como uno de los tipos de infraestructura fundamentales para el desarrollo social y de la productividad de la región (Narváez, 2017). Puesto que estas vías conectan a las zonas más alejadas, el estado que presenten definirá la calidad de vida de los habitantes (Departamento Nacional de Planeación -DNP-, 2021); pese a esta información, el 96% de la red vial terciaria se encuentra en mal estado (La república, 2019), presentando problemas como: intransitabilidad y mantenimiento deficiente (DNP, 2021); lo anterior, provoca que las poblaciones experimenten efectos adversos como lo son: incremento en los tiempos y costos de transporte, inasistencia escolar, incremento en los precios de la región, inoportuno acceso a servicios médicos, pérdida de cosechas, entre otros (DNP, 2021). Entre las alternativas propuestas por el gobierno para garantizar la conectividad de estos territorios se encuentra el uso del material de afirmado, siendo este una capa compacta de material con gradación específica que se encarga de soportar las cargas y esfuerzos generados por el tránsito (La república, 2019). Los requerimientos que debe cumplir el material de afirmado están dados por el artículo 311 de las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2013b).

A pesar de la importancia de la red terciaria, el dinero invertido en su mantenimiento durante el año 2017 representó el 0.7% del monto destinado a la infraestructura vial (La república, 2019). Con el fin de favorecer a la economía nacional, es necesaria la evaluación de métodos y estructuras alternativas que permitan la reducción de costos sin afectar la calidad de los trabajos. Entre los mejoramientos más empleados por las entidades, se

encuentra la colocación de material proveniente de canteras cercanas a las zonas a intervenir, sin embargo, debido a las propiedades características de la capa, se requieren espesores considerables para soportar las demandas impuestas, más aún, los métodos de diseño acrecientan los volúmenes requeridos en los casos donde el material a emplear no cumple con las propiedades especificadas en la norma. Este tipo de prácticas conlleva a la explotación desmedida de fuentes de materiales, resultando en un aumento en la cantidad de viajes requeridos, un incremento en el presupuesto de la obra y, teniendo en cuenta que los vehículos de carga son aquellos que más emisiones producen (Alfonso, 2023), aumentando la contaminación generada.

El término “geosintéticos” se refiere a una gama de materiales empleados en construcción para cumplir diferentes propósitos. El uso de este tipo de materiales en estructuras viales se ha incrementado teniendo en cuenta que algunas de sus funciones son: reducción de espesores, conferir mayor durabilidad a la estructura, mejorar la capacidad portante, facilitar métodos constructivos, entre otros (Baamonde roca et al., 2011). Los geosintéticos se encuentran clasificados en geotextiles, geomallas, geoceldas y geodrenes (Baamonde Roca et al., 2011), siendo necesaria una selección según los objetivos del proyecto. Los requisitos que deben cumplir estos materiales están consignados en los artículos 231, 232, 233, 464 y 673 de las especificaciones INVIAS (2013a). Las geomallas se caracterizan por presentar una forma tipo malla abierta con aplicaciones para refuerzo de materiales (Baamonde Roca et al., 2011). El estudio de geosintéticos es un tema de interés, teniendo en cuenta que predecir la interacción de estos elementos con los materiales disponibles permitirá evaluar el comportamiento de la estructura durante su vida útil.

Actualmente, el uso de modelación numérica mediante el método de elementos finitos (FEM) ha impactado significativamente a la investigación, durante este proceso, las estructuras de estudio se dividen en múltiples elementos que comparten características particulares y, sobre los que se definen ecuaciones que describen su comportamiento, luego, a partir del cálculo de las variable involucradas, es posible predecir el fenómeno considerado y obtener una solución aproximada al problema en estudio (Nieto et al, 2009). Esta herramienta se caracteriza por el uso de programas que permiten la solución de problemas ingenieriles complejos de forma eficiente, en factores de tiempo, economía y cálculo, además, teniendo en cuenta que las variables de entrada son las propiedades características de los materiales en estudio, un correcto uso dará como resultado respuestas más fieles al comportamiento real de la estructura, a comparación del uso de modelos calibrados para condiciones diferentes.

El proyecto de investigación actual se centra en analizar el comportamiento de las fuentes de material de afirmado provenientes del departamento del Cauca. Estas fuentes pueden o no cumplir con las especificaciones establecidas en el Artículo 311 del INVIAS (2013b). Con el fin de lograr esto, se utilizará la modelación numérica para representar de manera precisa la respuesta del sistema, tanto con cómo sin el refuerzo de materiales geosintéticos (geomallas). Estos materiales geosintéticos son utilizados y producidos a nivel nacional, cumpliendo con las normas ASTM correspondientes. Por último, se evaluarán los resultados obtenidos para determinar si este tipo de alternativas permiten una reducción en los montos de inversión requeridos.

1.1. Planteamiento del problema

De acuerdo a las cifras presentadas por el Ministerio de Transporte (2022), Colombia cuenta con una red vial estimada de 205.745 Km, la cual se encuentra estructurada en tres componentes: Red primaria (8.9 %), Red secundaria (19.4%) y Red terciaria (70.85); siendo esta última la de mayor extensión al contar con 142.284 Km. De acuerdo con documentos realizados por el Departamento Nacional de Planeación en el año 2018 y 2021, el estado de estas vías influye directamente en fenómenos como lo son: congestión en las vías, aumentos en tiempos de viaje y baja comercialización de productos (DNP,2021); resultando en situaciones desfavorables tales como: inoportuno acceso a servicios médicos, aumento en los costos de transporte de carga y pasajeros, incremento del riesgo de deserción escolar, incremento de precio de los alimentos, incremento de gastos económicos de las familias y pérdida de cosechas (DNP, 2021).

A pesar de la información anteriormente mencionada, investigaciones recientes indican que el 96% de la red vial terciaria se encuentra en mal estado (La república, 2019), dificultando la intercomunicación terrestre ya que se caracterizan por ser intransitables debido a la falta de mantenimiento adecuado o la ausencia total de este (DNP, 2021). Parte del problema consiste en la poca inversión de recursos destinado a este rubro, La república (2019) indica que: “según estimaciones de la Asociación Nacional de Instituciones Financiera (Anif), solo 0.7% de la inversión para la infraestructura vial en 2017, realizada por el Instituto Nacional de Vías, se destinó para su mantenimiento”. Debe tenerse en cuenta que las vías de la red terciaria están clasificadas en orden Nacional, Departamental

y Municipal, en el mejor de los casos, los caminos administrados por la Nación cuentan con mayor inversión y mantenimiento, mientras que las que son manejadas por los Departamentos y Municipios carecen de recursos y actividades de conservación. El estado de las vías depende de la inversión proyectada por cada una de estas entidades gubernamentales, marcando diferencias en cuanto a su manejo e importancia. Según cifras del estado de la red vial (INVIAS, 2023), el 88.2% de la red vial no pavimentada se encuentra en estado muy malo, malo y regular.

Entre los mejoramientos más empleados por las entidades, se encuentra la colocación de material proveniente de canteras cercanas a las zonas a intervenir para evitar grandes acarreo, sin embargo, debido a las propiedades características de la capa, se requieren espesores considerables para soportar las demandas impuestas, más aún, los métodos de diseño acrecientan los volúmenes requeridos en los casos donde el material a emplear no cumple con las propiedades especificadas en la norma. Además de esto, la baja durabilidad de la capa conlleva a una necesidad constante de reemplazar el material utilizado. Las anteriores prácticas conllevan a la explotación desmedida de fuentes de materiales, alterando los ecosistemas porque alejan a la fauna local, degradan el paisaje, agotan los recursos disponibles, contaminan las fuentes de aguas cercanas, entre otros efectos adversos.

Por otra parte, al requerir mayores volúmenes de material, el presupuesto se verá afectado en los conceptos de compra y transporte. Desde una perspectiva ambiental, se incrementará la cantidad de viajes necesarios lo que deriva en impactos desfavorables. Es crucial considerar que los vehículos de carga son reconocidos como los principales generadores de

emisiones en Colombia (Alfonso, 2023), lo que intensifica la contaminación generada y, por ende, contribuye al cambio climático y calentamiento global.

1.2. Justificación

La Política Nacional tiene como objetivo principal mejorar la conectividad en las zonas rurales, donde las vías terciarias prevalecen y representan el 69.5% de la red vial total a nivel nacional (Ministerio de transporte, 2022). En línea con este enfoque, el Departamento Nacional de Planeación se dedica a implementar acciones que buscan mejorar la calidad de la inversión y fomentar la innovación en materiales y tecnología (Departamento Nacional de Planeación et al., 2018).

Estas medidas se justifican debido a que las vías terciarias son consideradas fundamentales para el desarrollo social y el incremento de la productividad en la región (Narvárez, 2017). Sin embargo, a pesar de su importancia, la inversión destinada al mantenimiento de estas vías en el año 2017 representó tan solo el 0.7% del presupuesto total asignado a la infraestructura vial (La República, 2019). En aras de beneficiar a la economía nacional, resulta imperativo evaluar métodos y estructuras alternativas que permitan reducir los costos sin comprometer la calidad de los trabajos realizados en estas vías. Se busca encontrar soluciones que permitan optimizar los recursos disponibles y garantizar un mejor rendimiento económico sin comprometer la calidad de las obras.

En este sentido, existen dos efectos principales que se pretenden obtener. Mejorar la calidad de vida de las personas por medio de vías terciarias transitables, basándose en los estudios del DNP (2018) que establecen una relación entre el estado de la red vial terciaria con factores como índice de pobreza, incidencia del conflicto armado y cantidad de cultivos ilícitos. Por otro lado, al disminuir la cuantía requerida para la instalación y mantenimiento de los afirmados existentes, los recursos del presupuesto anual remanentes podrán destinarse a la creación de nuevos tramos de este tipo, permitiendo aumentar la cobertura vial terciaria en Colombia y beneficiar a una mayor cantidad de población.

Por lo anterior, se hace necesario estudiar alternativas para optimizar el rendimiento de los afirmados y permitan la reducción de los costos asociados al proyecto. Entre los materiales a considerar, se destacan los geosintéticos, los cuales se abarcan una amplia gama de elementos utilizados con diferentes propósitos en la construcción. Los geosintéticos han sido objeto de diferentes investigaciones y se encuentran regulados por las especificaciones INVIAS vigentes, lo cual respalda su idoneidad con los estándares actuales.

Los municipios beneficiados serán aquellos que se encuentran conectados por esta red vial. En caso de que la hipótesis de investigación sea correcta, las entidades encargadas tendrán las herramientas para desarrollar tramos viales con un mejor rendimiento a un costo menor. Un efecto adicional será el crecimiento económico de las poblaciones objeto, teniendo en cuenta su potencial agropecuario y ganadero que no ha podido ser plenamente aprovechado en las condiciones actuales. Además, los habitantes de estas áreas podrán

acceder de una manera más rápida a servicios médicos y atención de emergencias. Asimismo, se facilitará el ingreso de los entes de control y vigilancia, permitiendo reducir la amenaza en estos sectores y por ende, garantizando un mayor nivel de seguridad.

1.3. Objetivo del proyecto

La presente investigación tiene como fin analizar y evaluar un método de optimización de la durabilidad del material de afirmado utilizado en mantenimientos de vías terciarias en el Departamento del Cauca.

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la durabilidad de capas de rodadura en material de afirmado convencional del Cauca al implementar geosintéticos (geomallas), mediante modelación numérica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Comparar las propiedades del mejoramiento de material de afirmado con refuerzo y sin refuerzo, aplicando las especificaciones INVIAS con el fin de determinar el

porcentaje de mejora en la respuesta estructural, durabilidad y en términos económicos.

- Predecir el comportamiento que tendrá el afirmado con geosintéticos a futuro mediante la modelación numérica, usando para ello los softwares Abaqus (Dassault Systemes, 2013) y MTA (Solano, 2017), con todas las variables que influyen en el material.
- Identificar problemas presentados en la evaluación de este método de optimización y generar recomendaciones para futuras investigaciones.

2. Marco teórico

Colombia cuenta con una red vial nacional de 205.745Km de longitud (Ministerio de transporte, 2022), esto equivale a un índice de 17.8 km por cada 100 km² de territorio, cifra cercana al promedio de los países latinoamericanos. No obstante, aunque la red terciaria del país comprende 142.284 km de la red nacional, abarcando más de la mitad, su densidad de red es de 12,8 km/100km². Además, según lo señalado por Narváez (2017), la mayoría de las estructuras utilizadas en estas presentan fallos prematuros.

Según el Instituto Nacional de Vías (2016), la red vial terciaria es aquella compuesta por carreteras de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Entre las alternativas propuestas por el gobierno para garantizar la conectividad de estos territorios se encuentra el uso del material de afirmado, siendo este una capa compacta de material con gradación específica que se encarga de soportar las cargas y esfuerzos generados por el tránsito (La república, 2019). Los requerimientos que debe cumplir el material de afirmado están dados por el artículo 311 de las especificaciones generales de construcción del Instituto Nacional de Vías, INVIAS (2013b). En general, la calidad de los materiales disponibles en zonas alejadas y los procesos constructivos poco eficientes suelen representar una importante problemática para satisfacer la demanda de estos materiales.

En respuesta a esta problemática, en los últimos años ha surgido una creciente necesidad de identificar procesos o materiales que mejoren el comportamiento de la infraestructura vial terciaria. Según Rajagopal et al (2014), existen dos enfoques para

abordar esta situación: en primer lugar, aumentar el grosor de la capa para lograr un mejor rendimiento; y, como segunda opción, emplear un material que incremente la rigidez del afirmado y que a la vez reduzca los esfuerzos transmitidos a las capas subyacentes.

El uso de materiales geosintéticos en las estructuras viales ha despertado un gran interés en la actualidad debido a las numerosas ventajas que ofrecen en términos de construcción más sencilla, económica y eficiente. Estos materiales presentan un amplio rango de posibilidades para mejorar la calidad de las obras viales. Es importante destacar que los geosintéticos, en la práctica, cumplen diversas funciones de manera simultánea, sin embargo, la función principal que cumplen dependerá del tipo de geosintético escogido y su forma de integración en la obra. En la Tabla 1, Baamonde Roca et al. (2011) presentan una clasificación de los distintos tipos de geosintéticos, así como sus aplicaciones principales, las cuales son ampliamente aceptadas a nivel internacional.

Tabla 1.

Tipos y funciones de geosintéticos en carretera

Tipo de geosintéticos	Funciones
Geotextiles	Impedir contaminación entre capas de la estructura por el efecto de las cargas dinámicas y el arrastre del agua. Resistir los esfuerzos de tensión del material disminuyendo los espesores de diseño y los volúmenes de movimiento de tierras. Evitar el taponamiento por colmatación de estructuras de drenaje. Evitar la aparición de grietas por reflexión en la capa de rodadura al actuar como una interfase de separación entre la capa de rodadura nueva y la capa antigua fisurada.

Geomallas	<p>Reducir el espesor de las capas estructurales del firme o mejorar las especificaciones de las mismas.</p> <p>Reducir la formación de roderas por esfuerzo cortante y asentamientos diferenciales en el firme en general y las capas de pavimentación en particular.</p> <p>Conferir mayor durabilidad a la estructura de firme.</p> <p>Mejorar la capacidad portante, resistencia a movimientos y deformaciones laterales de la estructura de firme.</p> <p>Evitar la aparición de grietas por reflexión al absorber esfuerzos cortantes y tensiones causadas por efecto de las cargas actuantes sobre el área de influencia de las fisuras del pavimento anterior.</p>
Geoceldas / Geoesteras	<p>Facilitar métodos constructivos por medio de sus facilidades de instalación y su versatilidad.</p> <p>Reducir empuje sobre estructuras de contención: a) amortiguando cargas y b) reduciendo la densidad del relleno. Absorber deformaciones por efecto de las cargas estáticas y dinámicas en la estructura de pavimento.</p>
Geodrenes	<p>Captar y conducir agua intersticial de la estructura dirigiéndola hacia los elementos de conducción superficiales. Captar fluidos en profundidad.</p>

Nota: La tabla presenta los diferentes tipos de geosintéticos empleados en la vías y sus funciones. Tomado de: Baamonde Roca et al. (2011)

El tipo y uso de un geosintético debe estar justificado mediante una serie de ensayos de laboratorio que permitan predecir el correcto comportamiento en la práctica, para ello, Colombia cuenta con especificaciones del INVIAS basadas en la AASHTO, nombradas a continuación:

- Artículo 231-13: Separación de suelos de subrasante y capas granulares con geotextil (INVIAS, 2013a).
- Artículo 232-13: Estabilización de suelos de subrasante con geotextil (INVIAS, 2013a).

- Artículo 233-13: Estabilización de suelos de subrasante y refuerzo de capas granulares con geomallas (INVIAS, 2013a).
- Artículo 464-13: Geotextil para repavimentación (INVIAS, 2013c).
- Artículo 673-13: Subdrenes con geotextil y material granular (INVIAS, 2013c)

Las especificaciones previamente mencionadas establecen parámetros para el uso de geosintéticos a través de la evaluación de propiedades mecánicas según lo establecido por la norma ASTM. En cuanto a la calidad de los geosintéticos, es responsabilidad del fabricante garantizar un proceso adecuado que cumpla con las especificaciones de la norma ISO 9001.

En este sentido, debido a que la presente investigación se encuentra encaminada a evaluar el uso de geosintéticos (geomallas, geoceldas y geotextiles) para aumentar la durabilidad del material de afirmado aplicado a vías terciarias, reducir los espesores requeridos y disminuir costos. Es importante destacar que no existe una normativa colombiana específica que regule la implementación de geosintéticos en la capa de afirmado, por lo tanto, se tomarán como referencia los artículos mencionados anteriormente, evaluando que geosintético se adapta mejor a las condiciones y objetivos planteados.

De acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, se determinó que el geosintético que más contribuye a las metas propuestas es la geomalla. Como se puede observar en la Tabla 1, Baamonde Roca et al. (2011) indica que el empleo de geomalla ofrece una serie

de beneficios, tales como la reducción de espesores, mejora las propiedades de la capa, disminución en la formación de roderas, mayor durabilidad al afirmado, mejora de la capacidad portante, resistencia a movimientos y deformaciones laterales en la estructura, entre otros. Esta información está respaldada por el estudio realizado por Alkaissi & Al-Soud (2021), donde se evidenció que la incorporación de geomallas para refuerzo resultó en una reducción en la deformación permanente, tensiones verticales, deformaciones horizontales, entre otros, reportando finalmente que el refuerzo con geomalla condujo a un incremento del 73% de la vida útil de los caminos sin pavimentar. Asimismo, Calvarano et al. (2017) afirma que:

“Alternativamente, para el mismo tráfico y deformación permitida, el uso de un refuerzo con geomalla permite la reducción en los costos de construcción al disminuir los espesores de capa en comparación con los espesores requeridos sin refuerzo. De todas maneras, el uso de refuerzo permite reducir el tiempo requerido para la construcción del camino y contribuye a los plazos en mantenimiento”

Además, se ha demostrado que el confinamiento generado por la interacción con la geomalla minimiza los desplazamientos laterales de las partículas de agregado e incrementa el módulo de la capa. Esto a su vez conduce a una distribución mayor de los esfuerzos verticales y consecuentemente a una reducción tanto de las deformaciones verticales como las laterales (Calvarano et al., 2017).

Basándose en la información anteriormente presentada, esta investigación se limita a la modelación de estructuras de afirmado reforzadas con geomallas. Entre las razones

para la selección de este geosintético es la interacción entre el agregado y la geomalla, la cual permite un mejor comportamiento de la estructura. Respecto a esto, Alkaissi & Al-Soud (2021) indican que:

“El mecanismo de refuerzo de geomalla produce fricción y restricción entre el fuerzo de geomalla y la capa, esta restricción se produce debido a los orificios de la rejilla y nervaduras en el suelo de cimentación y evita el movimiento lateral de las partículas y materiales granulares para caminos sin pavimentar”.

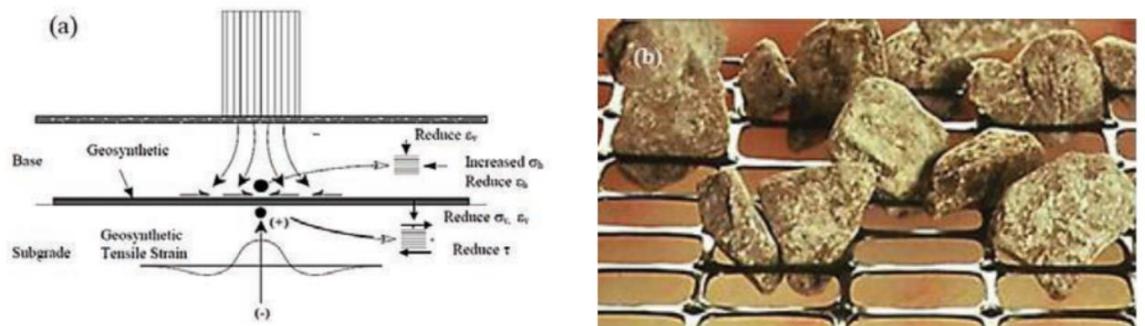
De igual manera, Calvarano et al. (2017) describen este mecanismo de la siguiente forma:

“En este caso, se enfoca al uso de geomalla como refuerzo, las cuales mejoran la resistencia de la interfaz debido a la trabazón en comparación con el geotextil. El confinamiento debido a la trabazón de geomalla minimiza los movimientos laterales de las partículas de agregado e incrementa el módulo de capa, lo que conlleva a una distribución mayor de los esfuerzos verticales y consecuentemente a una reducción de las deformaciones verticales y laterales.

La interacción entre el agregado y el geosintético se da por medio de la trabazón de agregados entre las aberturas de la geomalla, garantizado el refuerzo de la estructura granular. Situación que no es posible garantizar con el uso de geotextiles ya que no hay transmisión de esfuerzos tangenciales. La Ilustración 1 representa la trabazón de agregados con geomallas.

Figura 1.

Mecanismo de refuerzo y ejemplo de trabazón entre agregados y geomalla



Tomado de: Calvarano et al. (2017)

En relación a la implementación de geoceldas en el modelado, es importante destacar que, aunque su función es similar a la de las geomallas al confinar el agregado, no se consideró su uso debido a los elevados costos asociados, lo cual va en contra del objetivo de reducir los costos del proyecto. Además, la revisión bibliográfica realizada demostró que los beneficios proporcionados por las geomallas eran más adecuados para los propósitos de la investigación en comparación con los obtenidos mediante el uso de geoceldas.

2.1. Diseños de Afirmado

Una vía ideal en afirmado debe garantizar un material tal que dé como resultado una superficie uniforme, compacta, resistente a la erosión y el desgaste. Para ello, se han desarrollado normativas y especificaciones que buscan parametrizar el agregado a utilizar en la construcción de estos materiales. Además, es importante considerar otros factores,

como la disponibilidad y la procedencia del agregado. Estos aspectos influyen en la selección del material y en la implementación de técnicas adecuadas de construcción y mantenimiento del afirmado. Localmente, el Artículo 311-13 (INVIAS, 2013b) parametriza las características con las que debe cumplir los materiales para ser considerados en la construcción de un afirmado en Colombia, mediante franjas granulométricas

Tabla 2, relaciones **Tabla 3** y requisitos de calidad, presentados en la **Tabla 4**, a satisfacer; conjuntamente del equipo y la ejecución de los trabajos de la norma y sugiere que el tamaño máximo nominal no deberá exceder 1/3 del espesor de la capa compactada. Asimismo, es importante considerar la Normativa general para el control a la explotación ilícita de mineral (Minas y Energía, 2017) al momento de la adquisición de material.

Tabla 2.

Franjas granulométricas del afirmado

Tipo de gradación	Tamiz (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% Pasa								
A – 38	100	-	80- 100	60- 85	40- 65	30- 50	13- 30	9– 18
A – 25	-	100	90- 100	65- 90	45- 70	35- 55	15- 35	10– 20
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %			3 %

Nota: La tabla presenta las granulometrías con que debe cumplir un material de afirmado de acuerdo con el Tamaño Máximo Nominal, así como las tolerancias de producción. Tomado de INVIAS (2013b)

Tabla 3.*Relaciones que debe cumplir el material de afirmado*

Relación	Requisito
Relación 1: $\frac{\% \text{ pasa tamiz No.200}}{\% \text{ pasa tamiz No.10}}$	0.20 a 0.45
Relación 2: $\frac{\% \text{ pasa tamiz No.200}}{\% \text{ pasa tamiz No.40}}$	$\leq \frac{2}{3}$
Coefficiente de clasificación: [(%pasa tamiz de 1") – (%pasa tamiz No. 10)]x[%pasa tamiz No. 4]	16 a 34
Producto de contracción:(% de contracción lineal) x (% pasa tamiz No. 40)	100 a 240

Nota: La tabla presenta las relaciones entre tamices que debe cumplir el material de afirmado. Tomado de INVIAS (2013b)

Tabla 4.*Requisitos de los agregados para afirmados*

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Dureza		
Desgaste en la máquina de loa Ángeles (Gradación A), máximo (%) -500 revoluciones	E- 218	50
Durabilidad		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%) -Sulfato de sodio -Sulfato de magnesio	E- 220	12 18
Limpieza (f)		
Limite líquido, máximo (%)	E -125	40
Índice de plasticidad	E -125 Y E -126	4 – 9

Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E -211	2
Contracción lineal	E -127 y E -129	Tabla 311 – 3
Resistencia del material (F)		
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 311.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E -148	≥ 15

Nota: La tabla presenta los ensayos a evaluar en los materiales de afirmado y los valores requisito a cumplir. Tomado de INVIAS (2013b)

De manera similar, a nivel internacional existen referencias importantes como Austroads (2009), la cual es la organización principal de agencias de tráfico y transporte por carretera en Australia y Nueva Zelanda. En la **Tabla 5.** se pueden encontrar las recomendaciones proporcionadas por esta entidad.

Tabla 5.

Especificaciones de material para afirmado por Austroads.

Tamaño del tamiz (mm)	Porcentaje de aprobación para todos los tamaños máximos
55	100
37,5	95 – 100
26,5	90 – 100
19	80 – 100
2,36	35 – 65
0,425	15 – 50
0,075	10 – 40
Plasticidad	Precipitación anual inferior a 500 mm – máx.20 Más de 500 mm de precipitación anual – máx. 12 o Índice de plasticidad ponderado ($IP \times \%Pasa\ No.\ 40$) Máx. 500 para lluvias escasas

	Máx. 250 para lluvia alta
CBR tomado a los 4 días	Mínimo 40%
Permeabilidad máxima	1×10^{-4} m/s

Nota: La tabla presenta los porcentajes de aceptación para las granulometrías de materiales de afirmado. Tomado de Austroads (2009)

El comité de autoridades estatales de carreteras de Sudáfrica tiene una serie de publicaciones que describen prácticas recomendadas para la construcción de vías, estos documentos se conocen como Technical Recommendations for Highways o Recomendaciones técnicas para carreteras, TRH por sus siglas en inglés. La TRH 20 se refiere al manual de diseño estructural, construcción y mantenimiento de carreteras sin pavimentar (Departamento de Transporte de Sudáfrica, 1990). En la Tabla 6 se pueden detallar las especificaciones dadas por esta entidad para la selección de material para un camino rural en afirmado y las cuales han sido un referente mundial en este campo.

Tabla 6.

Especificaciones de material para afirmado en carreteras rurales descritas en TRH 20

Tamaño máximo	1½
Índice de sobredimensión (<i>I_o</i>)^a	≤ 5%
Producto de contracción (<i>S_p</i>)^b	100 -365 (máx. 240 preferiblemente)
Coefficiente de clasificación (<i>G_c</i>)^c	16 -34
CBR	≥ 15

Nota: ^a *I_o* = %Retenido en el tamiz 1½ ; ^b *S_p* = Contracción lineal × %Pasa N. 40;

^c *G_c* = (%Pasa 1" - %Pasa N. 10) × %Pasa N. 4.

La tabla presenta los requisitos de tamaño, clasificación y resistencia para materiales de afirmado. Tomado de Departamento de Transporte de Sudáfrica (1990)

Independientemente de la especificación, los parámetros del material de afirmado, como su clasificación, granulometría, plasticidad y relación de soporte de California (CBR), suelen ser más bajos que los requeridos para otro tipo de materiales. Esto se debe a que la necesidad de utilizar fuentes de material localmente disponibles en zonas alejadas conlleva a cierta flexibilidad en la selección. Otro factor a tener en cuenta es la formación de surcos, que en teoría es menos relevante al suponer que se realizarán mantenimientos constantes, sin embargo, esta práctica genera efectos nocivos para el medio ambiente y demanda cuantías altas que en ocasiones las entidades encargadas no poseen. Por lo anterior, es necesario cuidar cada uno de los factores que influyen en el comportamiento de la estructura para asegurar que la inversión realizada genere beneficios durante el mayor tiempo posible.

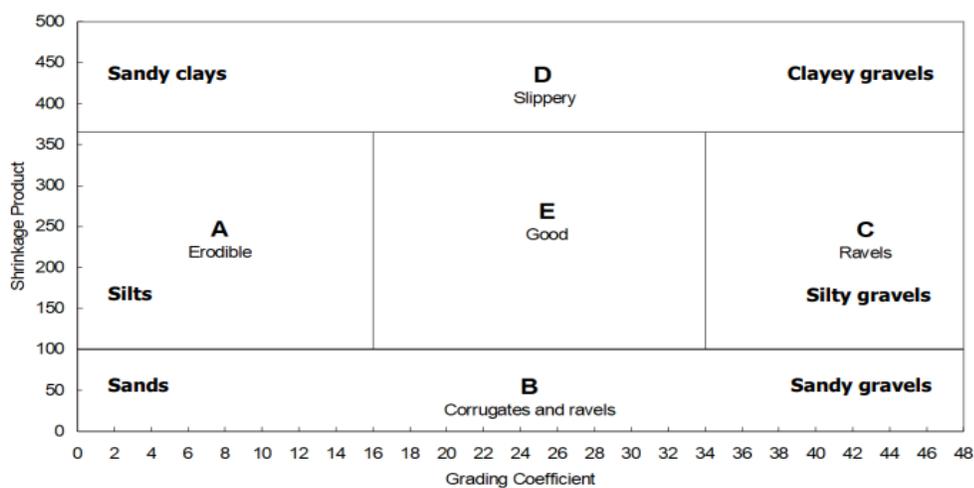
En referencia a la granulometría, hay que señalar que a medida en que aumenta el tamaño máximo del agregado, la superficie tiende a ser más susceptible al desacomodo de partículas. Por lo tanto, es fundamental proporcionar una gradación uniforme del agregado que permita entrelazar tamaños y disminuir la permeabilidad. En este mismo ámbito, Austroads (2009) recomienda controlar el índice de plasticidad para evitar deformaciones excesivas causadas por los cambios de volúmenes que se puedan presentar por las condiciones climáticas.

Para la clasificación del suelo e identificación de posibles problemas en obra, el Departamento de Transporte de Sudáfrica (1990) elaboró la gráfica presentada en la **Figura 1**, la cual emplea la relación que existe entre el producto de contracción y el

coeficiente de clasificación. La descripción de cada zona presentada, así como los aspectos a tener en cuenta con cada tipo de suelo se pueden evidenciar en la **Tabla 7**.

Figura 2.

Clasificación del material según TRH 20



Nota: La figura presenta la clasificación de los materiales según la relación entre el producto de contracción y el coeficiente de clasificación. Tomado de Departamento de Transporte de Sudáfrica (1990)

Por otro lado, en cuanto a lo que concierne al diseño de la estructura, Higuera (2008) propone una metodología destinada a volúmenes de tránsito en el carril y tiempo de diseño menores a 425.000 ejes equivalentes de 80 kN. Este procedimiento se encuentra influenciado tanto por el método de diseño de la guía norteamericana AASHTO como por las Especificaciones de Construcción de Carreteras INV-07.

Tabla 7.

Clasificación del suelo según la zona.

A	Erosionables	Limos arenosos y arcillosos con plasticidad insuficiente para proporcionar una unión firme. Sensible a la erosión provocada por escorrentías.
B	Corrugados	Comprende arenas y gravas arenosas con poca plasticidad; por lo tanto, el agregado se debilita y se desarrollan corrugaciones por el paso de vehículos. También puede erosionarse en áreas de alta precipitación.
C	Enredados	Gravas gruesas con pocos finos o plasticidad para formar una superficie uniforme.
D	Resbalosos	Arcillas limosas y gravas arcillosas con alto contenido de finos produciendo superficies resbaladizas cuando están mojadas.
E	Buenos	Suelos bien gradados, con suficiente plasticidad formando una superficie compacta y resistente al desgaste. Un mayor contenido de finos puede producir una superficie polvorienta

Nota: La tabla presenta la clasificación cualitativa de los materiales según la

clasificación por letras de la Tabla 6. Tomado de Departamento de Transporte de Sudáfrica (1990)

El procedimiento propuesto por Higuera (2008) consiste inicialmente en utilizar la ecuación básica de diseño de la AASHTO destinada al diseño de pavimentos flexibles **Ecuación 1**, donde se determina: el tránsito en número de ejes equivalentes (N), las propiedades de la subrasante en términos del módulo resiliente (Mr) correlacionados con valores obtenidos en subrasantes ya estudiadas.

$$\log(N) = Z_r \times S_o + 9,36 \times \log(SN + 1) - 0,20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \left(\frac{1,094}{(SN + 1)^{5,19}}\right)} \right] + 2,32 \times \log(Mr) - 8,07 \quad (1)$$

La determinación del tránsito se realiza mediante la utilización de conteos y haciendo uso de la metodología exigida por el manual de diseño de pavimentos asfálticos para bajos y medios volúmenes de tránsito (INVIAS, 2007) representada en la **Ecuación 2**.

$$N = 365 \times \left[\sum_{i=1}^k (TPD \times \%V_i \times FD_i) \right] \times Fd \times \frac{(1+r)^n - 1}{r} \times 10^{0,05Zr} \quad (2)$$

Los parámetros dados por Higuera (2008) para el diseño están definidos de la siguiente manera: confianza del diseño (R) = 75%, desviación normal estándar (Zr) = -0,674, error normal combinado (So) = 0,49, nivel de serviciabilidad final (Pf) = 1,5, pérdida de serviciabilidad (ΔIPS) = 2,7; y así, finalmente mediante iteraciones se obtiene el número estructural (SN) para el tránsito y las condiciones de resistencia de la subrasante.

Posterior a esto, se proponen espesores (d) de afirmado que cumplan la capacidad estructural requerida según la calidad del suelo, condición de tráfico, variación de la serviciabilidad durante la vida útil y condiciones ambientales. Para esto, se emplea la **Ecuación 3** para determinar la combinación de parámetros tal que, el número estructural desarrollado sea mayor al requerido, es decir, la condición de $SN \leq SN_{Estructura}$.

$$SN_{Estructura} = a \times d \times m \quad (3)$$

El Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos volúmenes de tránsito (INVIAS, 2007) sugiere valores de coeficiente estructural (a) según el cumplimiento de los criterios establecidos, por lo que, $a = 0,08$ para un afirmado que cumple la especificación INV - Artículo 311 y, en el caso de un afirmado que no cumple con la especificación, se tendrá un coeficiente $a = 0,06$. Lo anterior se da para todas las categorías de clasificación climática por temperatura.

Para la determinación del coeficiente de drenaje (m), es posible el uso del sistema de observación, medición y vigilancia meteorológica propuesto por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM); en este procedimiento, se procede a clasificar la zona mediante el índice de Thornthwaite. Una vez identificada la clasificación climática, INVIAS (2007) asigna valores para m en función de esta (Ver **Tabla 9**). La **Tabla 8** presenta la clasificación climática de Thornthwaite.

Tabla 8.

Clasificación climática de Thornthwaite.

Categoría	Descripción	Índice de Thornthwaite (I_m)
Árido	Muy pocas lluvias, alta evaporación	-100 a -61
Semi – árido	Pocas lluvias	-60 a -21
Sub-húmedo	Lluvia moderada ó lluvia fuertemente estacional	-20 a +19
Húmedo	Lluvia estaciona calurosa moderada	+20 a +100
Superhúmedo	Lluvias con alta frecuencia o muchos días con superficie húmeda	$I_m > 100$

Nota: La tabla presenta la clasificación climática de acuerdo con el índice de

Thornthwaite. Tomado de (INVIAS, 2007)

Tabla 9.

Coefficientes de drenaje de las capas granulares no tratadas, m_i .

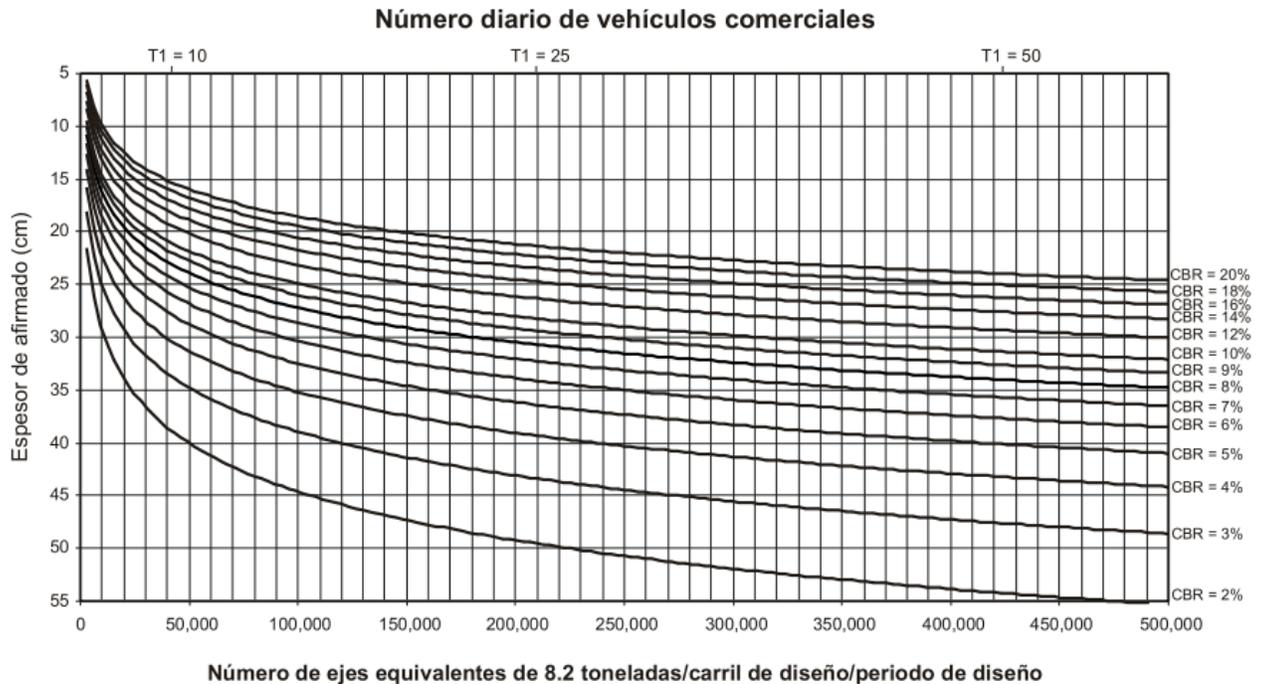
Clasificación climática por humedad	m
Árido	1,15
Semi-árido	1,05
Sub-húmedo	1,00
Húmedo	0,95
Muy húmedo	0,85

Nota: La tabla presenta los coeficientes de drenaje de las capas granulares de acuerdo con su humedad. Tomado de (INVIAS, 2007)

Por otro lado, para el cálculo del número estructural de la capa de afirmado, Higuera (2008) asume este material como un concreto asfáltico para el uso de la **Ecuación 3**; el espesor calculado luego es multiplicado por un factor de equivalencia con el fin determinar el espesor de afirmado correspondiente. La **Figura 2** presenta un ábaco desarrollado por Higuera (2008) a partir de una configuración de números estructurales de subrasante por categorías y de espesores de afirmado de distintas calidades. Esta herramienta constituye un método alternativo la determinación del espesor de afirmado durante el diseño.

Figura 3.

Ábaco para el diseño de afirmados.



Nota: La figura presenta el ábaco para definir los espesores afirmado de acuerdo con su % CBR y el número de ejes equivalentes en el periodo de diseño. Tomado de (Higuera, 2008)

Teniendo en cuenta las mismas referencias internacionales tomadas anteriormente, el diseño del espesor (d) por el Departamento de Transporte de Sudáfrica (1990) está dado por la **Ecuación 4**, siendo, c_t la compactación inducida por el tráfico; GL_p la perdidas anual de grava prevista; L_d la vida de diseño de la carretera; y t el espesor mínimo requerido para la protección de la subrasante en función del CBR, donde, para valores mayores o iguales a 5% se excluye, valores entre 5% y 3% se recomienda 50 mm, y menores a 3% un espesor no menos de 100 mm.

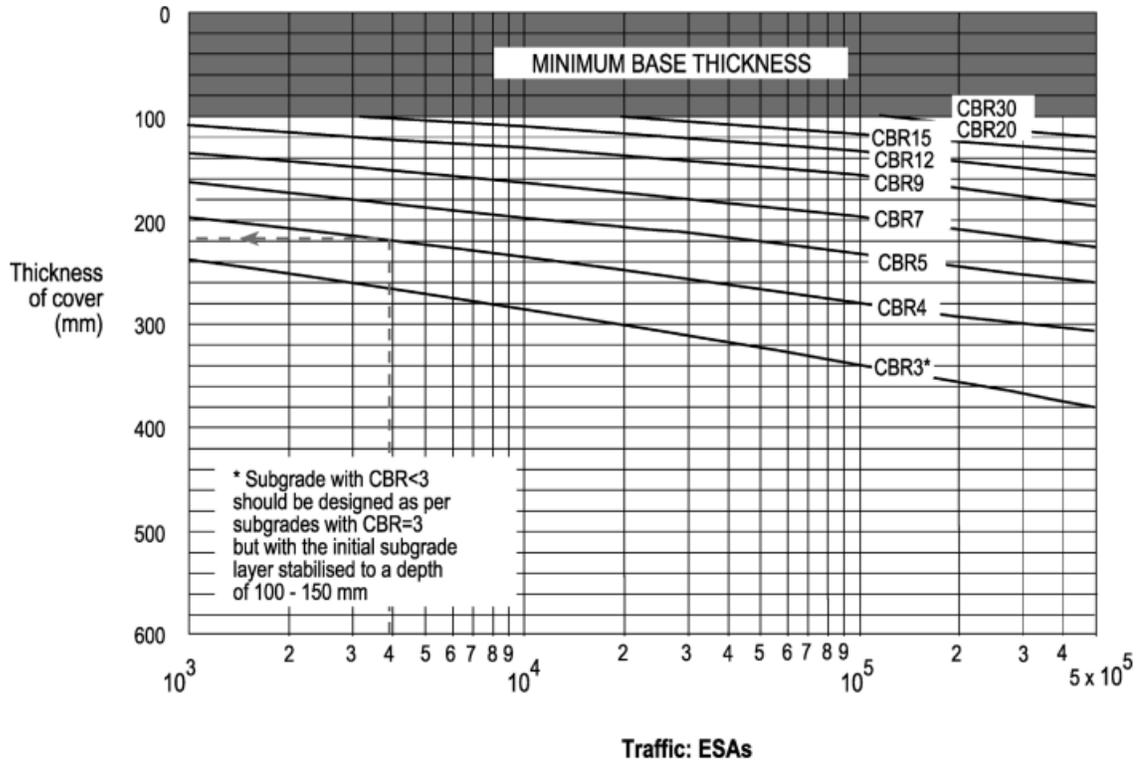
$$d = t + \frac{c_t}{100} GL_p L_d \quad (4)$$

Mientras que en la guía de pavimento australiano (Austroads, 2009) según su clasificación de carreteras sin sellar, según las características de estructura de pavimento que se implementa en la presente investigación se enfoca en la clase U4 correspondiente a una capa de material granular sobre la subrasante para TPD menores a 20, cuya especificación del material es gravas naturales, materiales de foso o residuos de canteras con tamaño máximo de 50mm y espesor mínimo de capa de 150 mm.

La determinación del espesor según la calidad de la subrasante lo sugiere mediante la **Figura 4**, quien está en función del CBR y el tráfico (ESAs), este último es equivalente al método convencional en Colombia dado por el INVIAS ya que corresponde al número de repeticiones de ejes equivalentes de 80 kN.

Figura 4.

Espesor del afirmado por Austroads



Nota: La figura presenta el ábaco para definir el espesor de la capa de afirmado según el % CBR de la subrasante con un porcentaje de confiabilidad del 80%. Tomado de Austroads (2009)

2.1.1. Reforzamiento de Afirmados con geosintéticos

En la actualidad existen varios enfoques experimentales para evaluar los efectos de integración de geosintéticos en estructuras de pavimento, especialmente en las capas granulares, debido a que se ha percibido una considerable mejora en el rendimiento en general de la estructura, optimizando la durabilidad del mismo.

Emersleben & Meyer (2005) observaron que la capacidad de carga de los suelos reforzados con geoceldas es de dos a cuatro veces la capacidad de carga de los suelos no reforzados, dado que la capa reforzada actúa como una placa distribuidora de carga rígida, lo que reduce los desplazamientos verticales. Además, cuando el sistema de geoceldas y material de relleno se carga hasta el estado límite, las geoceldas detienen la formación de planos de corte en la capa reforzada, por lo tanto, los planos de corte se desplazan a una mayor profundidad y la seguridad contra fallas aumentan significativamente.

Otra referencia de estudio es Rajagopal et al. (2014), quienes realizaron estudios sobre un tramo de carretera en campo y ensayos de laboratorio en afirmado reforzado y no reforzado con geoceldas, geomallas y geotextiles, de la cual se presentó un evidente y considerable mejora del rendimiento, rigidez y resistencia, debido a que las cargas se distribuyen sobre un área más grande de la subrasante debido a la provisión de la capa geosintética.

Luego, Wu et al. (2015) investigaron el efecto del refuerzo de geomallas en materiales granulares no ligados, demostrando mejorar su durabilidad. Esta investigación permite establecer puntos referentes en el presente estudio, como la profundidad adecuada de colocación del geosintético entre 20mm y 30mm, y la evaluación del refuerzo mediante los siguientes índices:

Relación de beneficio del tráfico (TBR): indica la cantidad de cargas adicionales de tráfico que puede soportar la estructura al ser reforzado por un geosintético mediante la

relación de la capacidad de repeticiones de carga del material reforzado ($N_{reforzado}$) y no reforzado ($N_{no-reforzado}$) para la misma profundidad de surco, definido así:

$$TBR = \frac{N_{reforzado}}{N_{no-reforzado}} \quad (5)$$

Relación de reducción de surco (RRR): indica el efecto del reforzamiento en términos de deformaciones, donde se define como la relación entre la profundidad de surco del material reforzado ($u_{reforzado}$) y no reforzado ($u_{no-reforzado}$) en una repetición de carga dada, definido así:

$$RRR = \frac{u_{reforzado}}{u_{no-reforzado}} \quad (6)$$

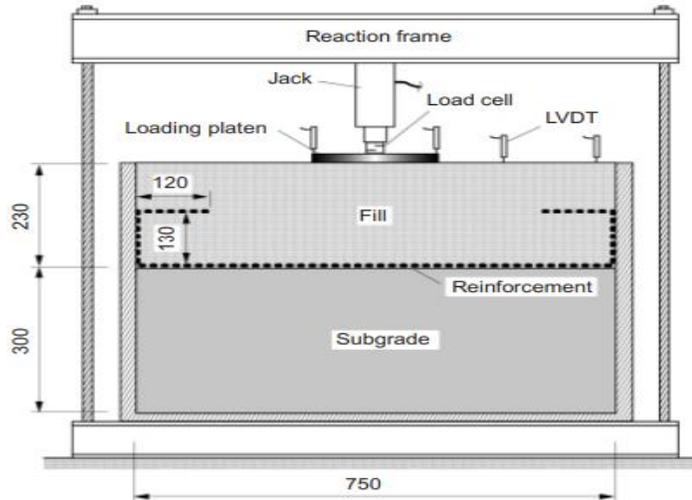
Tasa de deflexión (ROD): Indica la resistencia a la deflexión, medida mediante la velocidad de la deformación vertical, definida en la **Ecuación 6**, donde u_n es la deflexión y t_n es el lapso evaluado en el ciclo n .

$$ROD = \frac{u_{n+1} - u_n}{t_{n+1} - t_n} \quad (7)$$

En este mismo sentido, (Góngora & Palmeira, 2012) evaluaron la influencia de las características de la geomalla en el desempeño de carreteras sin pavimentar en subrasantes débiles, donde sugieren la instalación del geosintético en la interfaz del relleno/subrasante con un anclaje en forma de gancho **Figura 5** evitando así el desplazamiento del refuerzo.

Figura 5.

Esquema de la realización de pruebas.



Nota: La figura presenta el esquema y las partes del equipo de ensayo para la evaluación de la instalación del geosintético. *Tomado de Góngora & Palmeira (2012)*

En cuanto a la evaluación del rendimiento de la estructura reforzada con geomalla, según lo recomendado por Wu et al. (2015), se realiza una comparación de la estructura reforzada y no reforzada mediante la relación TBR, y define la consideración del módulo de estabilidad de apertura (ASM), denominado J , como parámetro de importancia para considerar en el diseño, el nivel de interacción del material granular con el geosintético y la resistencia de este contra daños mecánicos generados por la misma interacción, siendo factores determinantes en mejorar o atenuar el rendimiento.

Luego, estudios presentados por Ogundare et al. (2018), demuestran que el uso de geosintéticos mejora en gran medida la resistencia del suelo de la subrasante evaluada en el ensayo de CBR y a la vez permite reducir espesores de material.

En apoyo al estudio anterior, Meena et al. (2013) mediante un análisis cuasi-estático de carreteras sin pavimentar reforzadas con geotextil, demuestran que la implementación de esto como refuerzo puede disminuir los espesores de las capas de afirmado hasta en un 70%, sugiere un método de diseño de carreteras sin pavimentar reforzadas con geosintéticos, cuya expresión es definida en la **Ecuación 8**, donde se obtiene el espesor requerido de la capa de material granular cuando se implementa una capa de geotextil en la interfaz afirmado/subrasante.

$$\frac{P}{2(B + 2h \tan \alpha) \times (L + 2h \tan \alpha)} + \gamma h - P_g = cN_c + \gamma h N_q + 0,5\gamma(B + 2h \tan \alpha)N_\gamma \quad (8)$$

De igual manera, Giroud & Han (2005) ofrecieron uno de los métodos de diseño más reconocidos para estructuras de carreteras no pavimentadas sin o con refuerzo, principalmente con geomallas, donde el modelo contempla una base de espesor uniforme, donde la capa de geomalla se sitúa en la interfase de la subrasante y el material granular. Sin embargo, este diseño puede ser adoptado a cualquier geosintético mediante una constante K, afectando el módulo de estabilidad de la abertura (*J*).

El método contempla la disminución exponencial de la deformación de la capa de rodadura debido a la fricción producida por el geosintético y así su determinación del espesor de la capa de material granular (d_r), presentada en la **Ecuación 9**.

$$d_r = \frac{0.868 + (0.661 - 1.006J^2) \left(\frac{r}{d_r}\right)^{1.5} \log N}{1 + 0.204 \left(\frac{3.48 CBR_{bc}^{0.3}}{CBR_{sg}} - 1\right)} \times \sqrt{\frac{\frac{P}{\pi r^2}}{\frac{s}{f_s} \left(1 - 0.9e^{-\left(\frac{r}{d_r}\right)^2}\right) N_c f_c CBR_{sg}}} \times r \quad (9)$$

Donde, CBR_{bc} refiere al CBR de la capa granular y CBR_{sg} de la subrasante, r el radio del área de contacto del neumático, P carga de la rueda, f_s un factor igual a 75 mm, f_c factor igual a 30kPa, s profundidad permisible del ahuellamiento que según AASHTO (1993) para volúmenes bajos de tráfico se considera entre 13-75mm y N_c factor de capacidad de carga igual a 5,14 para el refuerzo con geotextiles y 5,71 en el caso de geomallas biaxiales.

Por otro lado, el uso de refuerzo de geomalla con resistencia a la tracción adecuada en vías sin pavimentar es una solución económica y adecuada, según Deshmukh et al. (2021) además, de que el método dado por la AASHTO (1993), permite adaptarse a la contribución estructural del geosintético a la estructura, teniendo en cuenta los valores de esfuerzos y módulos de resistencia, un factor conocido como relación de coeficiente de capa o LCR, el cual permite optimizar el CBR del suelo de subrasante, cuantificando el refuerzo adicional por una geomalla biaxial, siendo la determinación del nuevo espesor de capa granular reforzada, así:

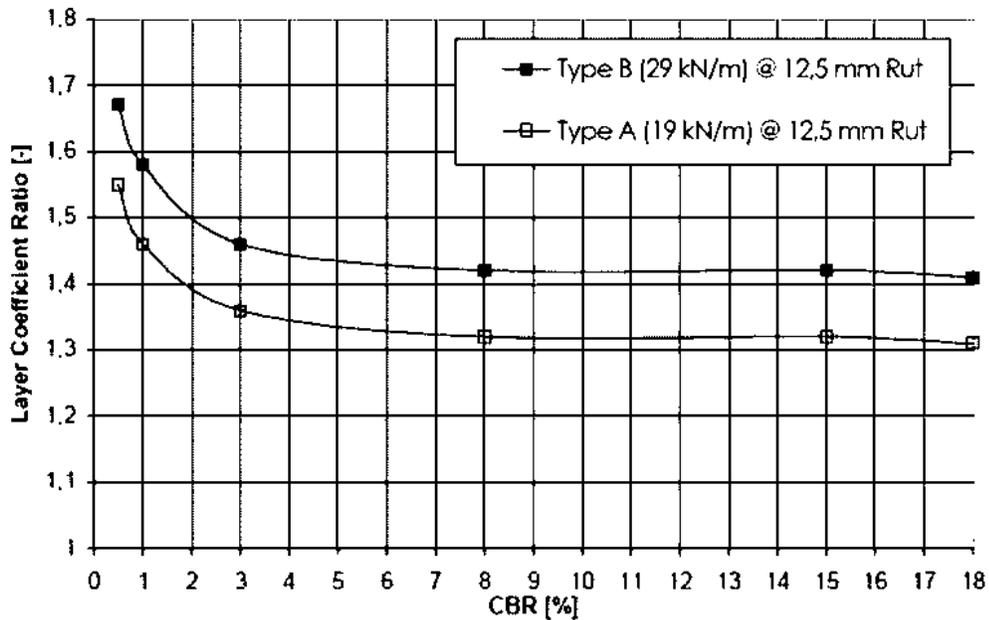
$$SN_r = a \times LCR \times d_r \times m \quad (10)$$

Donde, LCR es determinada por el ábaco presentado en la Figura 6, $SN_r = SN_{estructura}$ para así calcular el nuevo espesor (d_r) de la capa granular por la utilización de la geomalla. Luego, haciendo uso de la **Ecuación 11**, se determina el número estructural reforzado del diseño final.

$$SN_{reforzado} = a \times d_r \times m \quad (11)$$

Figura 6.

LCR en función del CBR.



Nota: La figura presenta los valores del coeficiente LCR de acuerdo con el % CBR de la subrasante y de resistencia a la tensión de la geomalla. Tomado de PAVCO (2012)

2.2. Modelación Numérica de Afirmados

Actualmente, el uso de la modelación numérica mediante el método de elementos finitos (FEM) ha impactado significativamente la modalidad de investigación, dado a la gran accesibilidad a computadoras y softwares de estudio que permiten la solución de problemas ingenieriles complejos de forma eficiente, en factores de tiempo, economía y cálculo. Además del interés de estudios numéricos para calibrar pruebas de laboratorio y campo e investigación.

El método de elementos finitos (FEM) permite la división de la estructura de estudio en varios elementos que comparten características particulares y sobre los que se definen ciertas ecuaciones que describen su comportamiento, luego, a partir del cálculo de las variables involucradas permite describir el fenómeno considerado y obtener una solución aproximada del problema en estudio (Nieto et al., 2009)

En este sentido, la evaluación de carreteras bajo diferentes estructuras no han sido la excepción, dado que permite la simulación de las cargas de tráfico, el acoplamiento de problemas que se producen simultáneamente en campo y la caracterización de los distintos materiales que componen el problema, según el modelo teórico que mejor represente su comportamiento. De esta manera, en cuanto a lo que concierne a la evaluación de afirmados reforzados con geosintéticos ha sobresalido el uso de softwares como Abaqus y Plaxis.

Abaqus por su parte, tiene referencias como el estudio de Leng & Gabr (2005) y la investigación de Calvarano et al. (2017), quienes evaluaron el desempeño de una estructura de afirmado reforzada con una geomalla sobre una subrasante blanda, teniendo en cuenta la rigidez, las propiedades geométricas y mecánicas del material granular y subrasante.

La interpretación del comportamiento del material de afirmado y subrasante optadas por ambas investigaciones, fueron mediante un modelo extendido de Drucker-Prager con criterios de rendimiento hiperbólico y en cuanto a la geomalla optaron por un modelo constitutivo elástico lineal. Para la representación matemática del fenómeno de falla a cortante, como es de esperarse, es optada por la teoría tradicional del método de Morh-Coulumb, sustentada por los parámetros ángulo de fricción y cohesión, intrínsecos del suelo.

Por otro lado, haciendo uso del software Plaxis, Das & Sivakumar Babu (2015) realizaron un estudio estático y dinámico de una carretera sin pavimentar reforzada con geomalla, siendo un modelo más “sencillo” en términos de enmallado y datos de entrada para caracterización, considerando los índices de resistencia a cortante, el módulo elástico, densidad y relación de Poisson.

De igual manera, Deshmukh et al. (2021) realizaron una modelación 3D con Plaxis con enfoque en el comportamiento de la formación de surcos de un pavimento reforzado con geomalla, evaluando efectos de la ubicación del geosintético, su rigidez axial y el CBR de la subrasante en estructuras de afirmado.

En cuanto a la modelación de estructuras reforzadas con geoceldas, Emersleben & Groeger (2013) expresaron la preocupación por la dificultad para medir los esfuerzos reforzantes y su influencia en el comportamiento del suelo al momento al ser considerado en un software de elementos finitos, debido a que son estructuras tridimensionales. Es por ello que, en su investigación desarrollada con Plaxis, sugirió un método alternativo donde la capa de suelo reforzada con geoceldas pueda ser reemplazada por una capa homogénea con parámetros de rigidez y resistencia mejorados.

Para la determinación de los parámetros alternativos se remite a Emersleben & Meyer (2008) donde se proporciona la ecuación permiten determinar cohesión artificial generada en el suelo por el confinamiento de la geocelda, mientras que el ángulo de fricción permanece inalterable.

2.2.1. Software Abaqus

Abaqus es un programa de cálculo por elementos finitos de propósito general parte de la plataforma SIMULIA de Dassault Systemes¹. Es un software que utiliza el método de los elementos finitos (MEF) para la resolución de problemas². Abaqus/Explicit es un software para análisis por elementos finitos para simular y resolver eventos dinámicos o de conducta no lineal como los que pueden aplicarse a procesos o productos, para evaluar su comportamiento bajo condiciones predeterminadas.

2.2.2. Software MTA

El software MTA es un código diseñado en la Universidad del Cauca en lenguaje Visual Basic para el análisis en 2D del comportamiento esfuerzo-deformación lineal y no lineal por el método de elementos finitos para muros de tierra armada con el fin de evaluar e incentivar el uso de recursos locales, se cuenta con el software MTA (Solano, 2017), con el fin de probar un software local.

3. Caracterización

A continuación, se presentan las consideraciones de modelos teóricos y propiedades de los materiales granulares y geosintético para el diseño y creación de modelos de estructuras de afirmado.

3.1. Caracterización de materiales para construcción de afirmados

La caracterización de materiales consistió en la extracción representativa y evaluación de material proveniente de cuatro fuentes del departamento del Cauca: cantera la Yunga, agregados Puracé, mina Truck y cantera las Yescas. Las muestras extraídas fueron sometidas a ensayos de granulometría, desgaste en la máquina de los ángeles, límites de consistencia, solidez a sulfato de sodio y magnesio, y ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznable.; los resultados obtenidos son presentados en el **Anexo 1,**

Anexo 2,

Anexo 3 y

Anexo 4 respectivamente.

Por otro lado, con base a los ensayos realizados, es posible la determinación de las propiedades empleadas como variables de entrada en la modelación numérica, sustentada mediante modelos teóricos establecidos que son adecuados para la simulación correcta del comportamiento de este.

Para empezar, la infiltración de agua sobre el medio poroso de los materiales que componen la estructura de la carretera sin pavimentar es determinada por la ley de Darcy, la cual, a partir de los trabajos iniciales del mismo, muchos otros investigadores han analizado esta ley. Luego, una de las fórmulas más utilizadas para el cálculo indirecto del coeficiente de permeabilidad en función de la granulometría, está dada por el manual de drenaje de carreteras (INVIAS, 2009), donde se sustenta en la porosidad (n) y el porcentaje en peso del material que pasa por el tamiz #200 (P_{200}), siendo representada en la **Ecuación 12**.

$$k = \frac{219,2 \times D_{10}^{1,478} \times n^{6,654}}{P_{200}^{0,597}} \quad (12)$$

La determinación de la porosidad (n) es descrita por el mismo manual y presentada en la **Ecuación 13**, la cual está en función del peso unitario del agua (γ_w), la gravedad específica del suelo (G_s) y de su peso unitario seco (γ_d). En cuanto a la gravedad específica, en la literatura es usual encontrar valores típicos, siendo común en gravas un valor de 2,65 a 2,68, en arenas de 2,65 a 2,68, en limos de 2,66 a 2,70 y en arcillas de 2,0.

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_w \times G_s} \quad (13)$$

Luego, en cuanto a la resistencia al cortante, el comportamiento del suelo es representado matemáticamente por la teoría de Mohr–Coulomb **Ecuación 14** y en su

análisis se requiere conocer los parámetros de ángulo de fricción y cohesión, los cuales, son considerados como propiedades intrínsecas del suelo.

$$\tau = \sigma \tan\phi + c \quad (14)$$

Estas propiedades dependen de un gran número de factores, entre ellos, la forma, tamaño y distribución de las partículas del suelo; y debido a la gran utilidad del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) que permite tener consideraciones en el comportamiento del suelo, subdividiendo a estos con criterios que abarcan similitudes en sus propiedades, es por ello que la US Bureau of Reclamation (1987) ofrece una adaptación de los valores aproximados de los índices de resistencia al corte, como se aprecia en la **Tabla 10**.

Tabla 10.

Valores aproximados de los índices de resistencia al corte en función de la SUCS.

Grupo	Resistencia al corte	
	C (kg/cm ²)	tan Φ
GW	-	> 0.79
GP	-	> 0.74
GM	0.05	> 0.67
GC	0.05	> 0.60
SW	-	0.53 - 0.67
SP	0.13 - 0.27	0.50 - 0.64
SM	0.09 - 0.21	0.48 - 0.65
SC	0.05 - 0.17	0.46 - 0.62
ML	0.09	0.51 - 0.64
CL	0.22	0.33 - 0.50
MH	0.10 - 0.15	0.31 - 0.48

CH	0.11 - 0.29	0.25 - 0.33
----	-------------	-------------

Nota: La tabla presenta los valores de Resistencia al Corte C y tan Φ , de acuerdo a al grupo de clasificación del suelo. Tomado de US Bureau of Reclamation (1987)

En este mismo sentido, es necesario caracterizar los agregados mediante sus parámetros elásticos dados por la ley de Hooke, la cual requiere conocer el módulo elástico (E) y el coeficiente de Poisson (ν). Una investigación hecha por Basante & Villacrés (2019), enfocada igualmente al departamento del Cauca presenta la **Tabla 11**, la cual presenta valores típicos de los distintos materiales de la estructura de pavimento obtenidos por distintos métodos.

Tabla 11.

Parámetros de elasticidad

			NORMA	CBR	E (MPa)	ν
SUBRASANTE	$Mr = B \times CBR$ (PSI)	Si CBR < 10% B=1500 pero puede variar entre 750 - 3600	AASHTO: 4.3.6.7 Correlación entre distintas variables de resistencia y el módulo resiliente (pag,74)	1%	10	0,45
				2%	20	
				3%	31	
	$Mr = 2555 \times CBR^{0,61}$ (PSI)		AASHTO T 493 – Teoría diseño racional de pavimentos Ing. Carlos Benavides	1%	18	
				2%	27	
				3%	34	
SUBBASE	$Mr = K1(\Theta3)^{K2}$ (PSI)	Valores comunes K1=9600, K2=0,55; $\Theta3= 5$ psi y 50 psi	AASHTO: 5.4.1.2 Módulo resiliente		163	0,4
					580	
	$Mr = 0,206h^{0,45}(Mr)$ (PSI)	Con valores de h=150 mm	Método SHELL – Teoría diseño racional de pavimentos Ing. Carlos Benavides	1%	20	
				2%	39	
			3%	61		

		CBR mínimo (INVIAS)	AASHTO – Abaco fig. 5.14	40%	110	
--	--	---------------------	--------------------------	-----	-----	--

Nota: La tabla muestra los valores de Módulo Elástico y Coeficiente de Poisson para materiales de subrasante y sub base de acuerdo con sus valores de % CBR Tomado de Basante & Villacrés (2019)

Finalmente, la capacidad de carga (*CBR*) es determinada mediante las correlaciones en función de las características granulométricas y el índice de plasticidad, sugeridas y avaladas para diseño por el INVIAS (2007), presentadas en la **Ecuación 15** y **Ecuación 16**. La elección de su forma de determinación está guiada por el producto entre la fracción que pasa por el tamiz #200 y el índice de plasticidad ($w \times IP$), dada la primera para suelos granulares limpios, con este parámetro igual a cero; la segunda en suelos que representan plasticidad, con $w \times IP$ mayor a 11%; y para valores intermedios del parámetro se deja a criterio del proyecto la elección de ecuación.

$$CBR = 28,09 \times D_{60}^{0,358} \quad (15)$$

$$CBR = \frac{75}{1 + 0,728 (w \times IP)} \quad (16)$$

3.1.1. Cantera la Yunga

La cantera la Yunga se encuentra ubicada en el departamento del Cauca, a aproximadamente 30 km de la ciudad de Popayán con coordenadas 2°32'39"N

76°45'15" W **Figura 7**, destinada a la explotación de materiales pétreos como roca muerta, triturado, arena de trituración y piedra gavión.

El material más contundente de esta cantera para el propósito de construcción de afirmado corresponde a una grava arcillosa, con caracterización sustentada en el capítulo 3.1, se presenta la **Tabla 12**.

Figura 7.

Panorámica Cantera la Yunga.



Nota: La figura muestra mapa en alto relieve con la ubicación de la Cantera la Yunga. Tomado de Google Maps

Tabla 12.

Propiedades del material: Yunga

Propiedad	Unidad	Valor
Clasificación según la SUCS	-	GC
Gravedad específica (G_s)	-	2,65
Ángulo de fricción (ϕ)	°	35
Cohesión (C)	MPa	0,4
Permeabilidad (k)	cm/s	8×10^{-4}
Módulo elástico (E)	MPa	164
Relación de Poisson (ν)	-	0,4
Densidad máxima (D)	g/cm^3	2,009
Humedad óptima (W)	%	7,5

Nota: La tabla presenta las propiedades del material de la Cantera la Yunga.

Elaboración propia

3.1.2. Agregados Puracé S.A.S.

Agregados Puracé es dedicada a la explotación de material de construcción en la cantera Golondrinas, ubicada en el kilómetro 4 del cruce Patico al municipio Puracé, a aproximadamente 20,8 km de la ciudad de Popayán en el departamento del Cauca con coordenadas 2°24'00" N 76°36'06" W, Ver **Figura 8**; brindado material como triturado, arena de trituración, subbase y base granular.

El material extraído de este banco de material destinado a la construcción de afirmado, y a carreteras en general, corresponde a una arena bien gradada limosa con caracterización sustentada en el capítulo 3.1, la cual se presenta en la **Tabla 13**.

Figura 8.

Panorámica Agregados Puracé



Nota: La figura muestra mapa en alto relieve con la ubicación de la Cantera

Agregados Puracé S.A.S. Tomado de Google Earth.

Tabla 13.

Propiedades del material: Puracé.

Propiedad	Unidad	Valor
Clasificación según la SUCS	-	SW - SM
Gravedad específica (G_s)	-	2,66
Ángulo de fricción (ϕ)	°	36

Cohesión (C)	MPa	1,0
Permeabilidad (k)	cm/s	2×10^{-3}
Módulo elástico (E)	MPa	190
Relación de Poisson (ν)	-	0,4
Densidad máxima (D)	g/cm^3	2,046
Humedad optima (W)	%	8,3

Nota: La tabla presenta las propiedades del material de la Cantera Agregados

Puracé S.A.S. Fuente: Elaboración propia

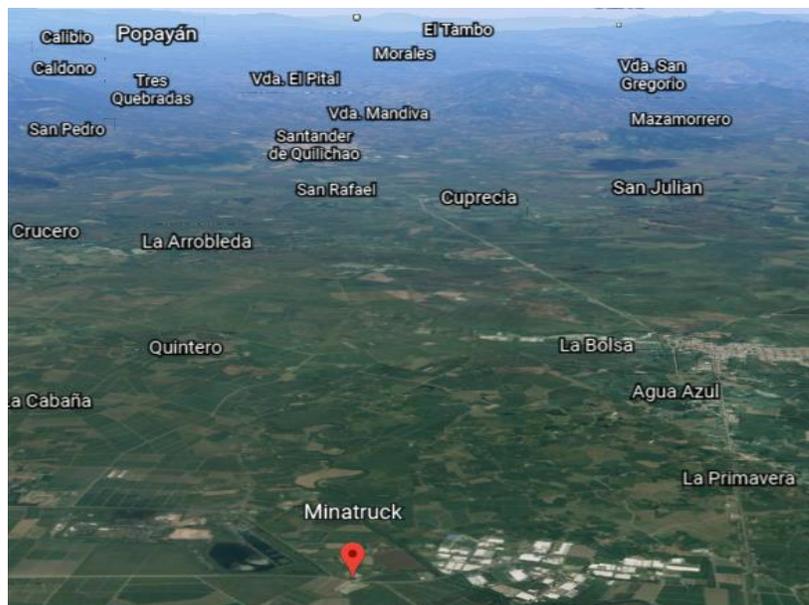
3.1.3. Mina Truck Ltda.

Mina Truck es una comercializadora de materiales de mina y rio para construcción y adecuación de vías como triturados, arena, base y subbase; ubicada en la vía Guachené a aproximadamente 112 km de Popayán – Cauca con coordenadas $3^{\circ}12'13''$ N $76^{\circ}24'34''$ W presentando una panorámica en la **Figura 9**.

De esta mina se extrajo un material clasificado como grava limosa pobremente gradada, siendo la más probable que se usase como material de afirmado para una construcción de este tipo local y su caracterización, sustentada en el capítulo 3.1, se presenta la **Tabla 14**.

Figura 9.

Panorámica Mina Truck



Nota: La figura muestra mapa en alto relieve con la ubicación de la Cantera

Minatruck. Tomada de Google Earth

Tabla 14.

Propiedades del material: MinaTruck

Propiedad	Unidad	Valor
Clasificación según la SUCS	-	GP - GM
Gravedad específica (G_s)	-	2,65
Ángulo de fricción (ϕ)	°	34
Cohesión (C)	MPa	0,5
Permeabilidad (k)	cm/s	9×10^{-4}
Módulo elástico (E)	MPa	209

Relación de Poisson (ν)	-	0,4
Densidad máxima (D)	g/cm^3	2,091
Humedad óptima (W)	%	10

Nota: La tabla presenta las propiedades del material de la Cantera Minatruck.

Fuente: Elaboración propia

3.1.4. Cantera las Yescas

Cantera las Yescas es propiedad de la empresa CAMAQ dedicada a la explotación de materiales y alquiler de maquinaria, ubicada en la vía Popayán – Rosas, a aproximadamente 26 km de la capital del Cauca con coordenadas 2°17'50" N 76°42'26"

W Figura 10.

Siendo la fuente más lejana de la ciudad, se extrajo un material extraído clasificado como grava arcillosa bien gradada, el cual es mayormente usado en su explotación local para la construcción de carreteras en general. Finalmente, la caracterización es presentada en la **Tabla 15**, la cual es sustentada en el capítulo 3.1.

Figura 10.

Panorámica cantera las Yescas



Nota: : La figura muestra mapa en alto relieve con la ubicación de la Cantera

Yeskas. Tomado de Google Earth

Tabla 15.

Propiedades del material: Yescas

Propiedad	Unidad	Valor
Clasificación según la SUCS	-	GW - GC
Gravedad específica (G_s)	-	2,65
Ángulo de fricción (ϕ)	°	35
Cohesión (C)	MPa	0,5
Permeabilidad (k)	cm/s	5×10^{-3}
Módulo elástico (E)	MPa	199
Relación de Poisson (ν)	-	0,4
Densidad máxima (D)	g/cm^3	1,763
Humedad óptima (W)	%	10,1

Nota: La tabla presenta las propiedades del material de la Cantera Yescas, Fuente:

Elaboración propia

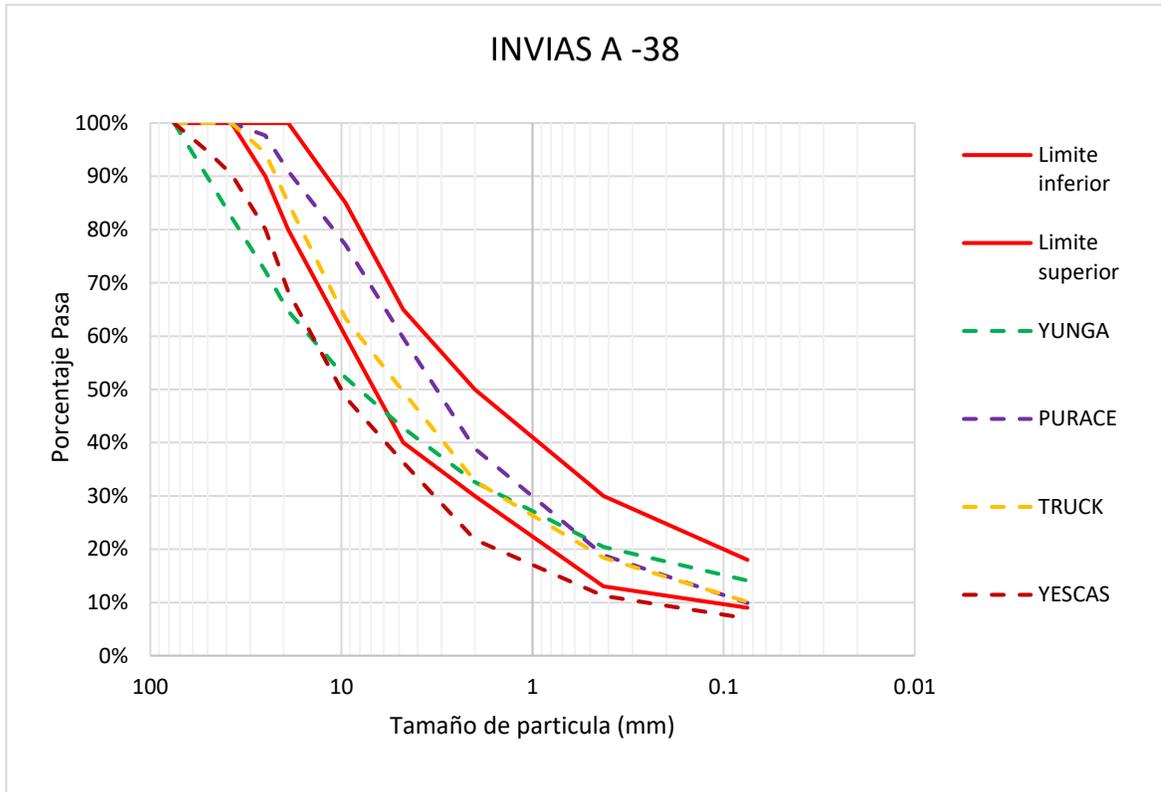
3.2. Parámetros de diseño

De acuerdo con la normatividad abarcada en el marco teórico se tiene como referencia la propia colombiana dada por el INVIAS y referencias internacionales dadas por AUSTROADS y SANRAL. A continuación, en la **Gráfica 1, Gráfica 2 y Gráfica 3**, se presenta las respectivas comparaciones de las sugerencias granulometrías ofrecidas por las organizaciones anteriormente mencionadas con los agregados obtenidos de los bancos de material seleccionados.

La normativa INVIAS ofrece dos tipos de gradaciones con el fin de ser más flexible, el agregado Puracé se logra ajustar a ambos tipos siendo clara su cumplimiento a la norma, mientras que el agregado Truck se ajusta solo a la A-38 y, en contraste ni el agregado Yunga ni Yescas cumplen con las especificaciones dadas. Por parte de la norma australiana, el agregado Puracé se encuentra dentro de las franjas y el Truck se encuentra muy cerca al límite inferior, sin embargo, no logra cumplir con la especificación al igual que el material Yunga y Yescas.

Gráfica 1.

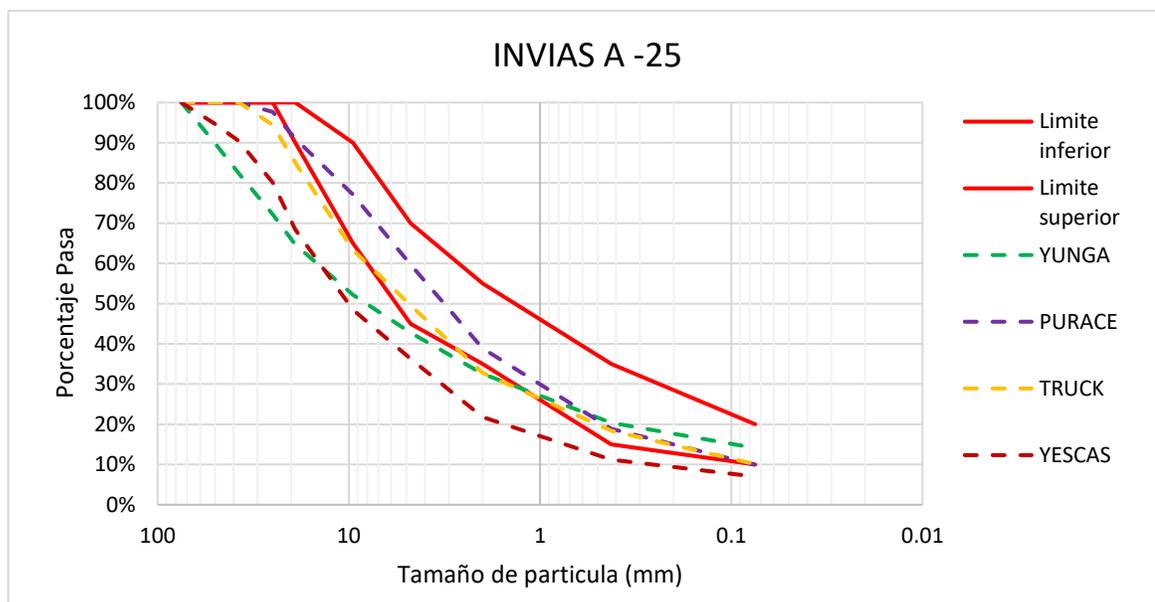
Especificación granulométrica INVIAS A – 38



Nota: La gráfica presenta la banda granulométrica de la Especificación Invias para material de afirmado tipo A – 38. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2.

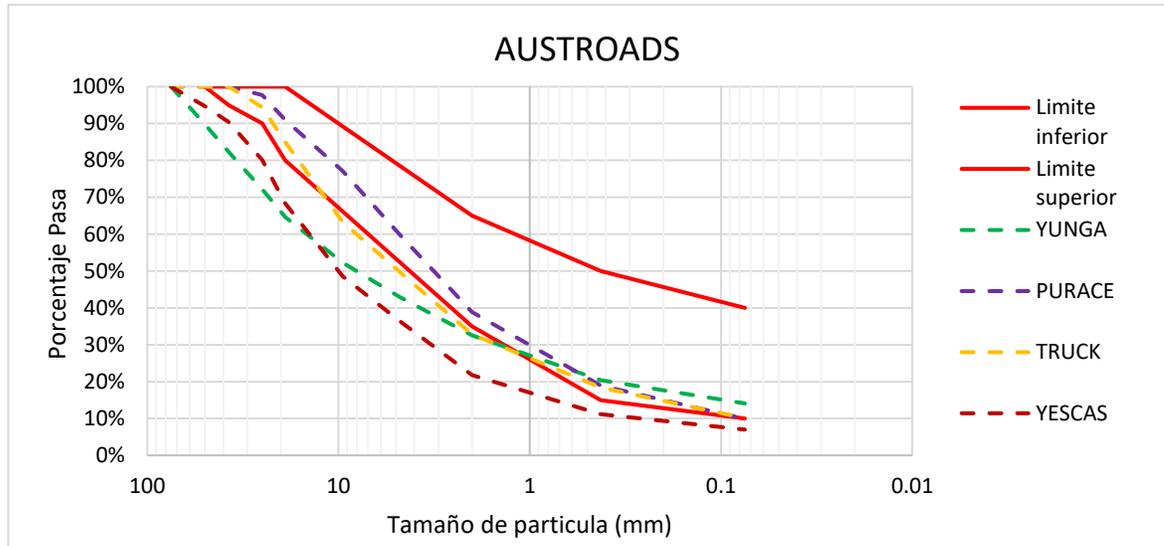
Especificación granulométrica INVIAS A -25



Nota: La gráfica presenta la banda granulométrica de la Especificación Invias para material de afirmado tipo A – 38. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3.

Especificación granulométrica AUSTROADS



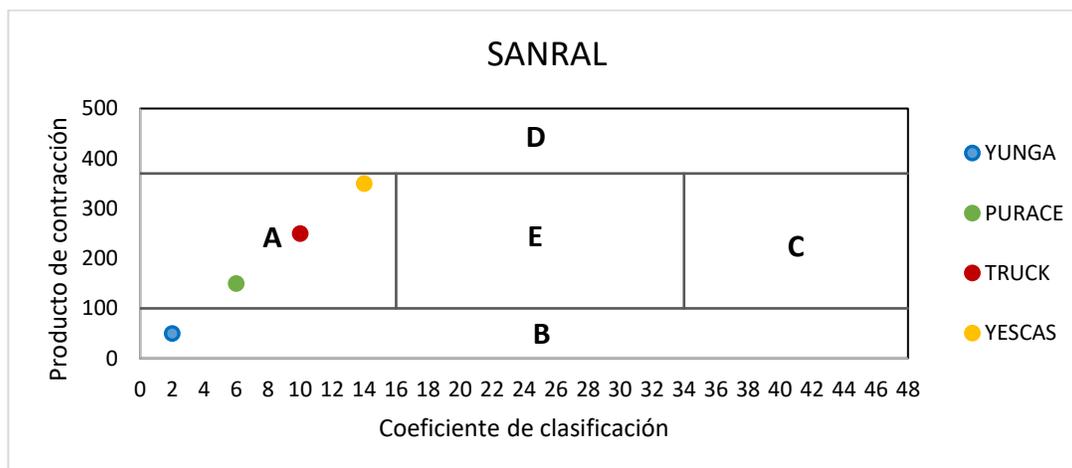
Nota: La gráfica presenta la banda granulométrica de la Especificación Atroads

para material de afirmado. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la norma SANRAL no presenta sugerencia granulométrica, si no que clasifica al material dada la Gráfica 4, en función del producto de contracción y el coeficiente de clasificación.

Gráfica 4.

Clasificación de los agregados según SANRAL



Nota: Elaboración propia

Luego, lo que concierne a las especificaciones de calidad del material de afirmado, se presenta un resumen de la normativa, característica y requisito solicitado, y el cumplimiento o no de cada uno de los agregados en la **Tabla 16**, donde las casillas sombreadas por color verde representan aprobación y las rojas no cumplimiento.

Tabla 16.

Requisitos de calidad de los materiales de afirmado

Norma	Característica	Requisito	YUNGA	PURACE	TRUCK	YESCAS
INVIAS	Relación 1	0,2 - 0,45	0.43	0.25	0.31	0.32
	Relación 2	≤ 0,67	0.69	0.52	0.55	0.63
	Desgaste en la máquina de loa Ángeles	≤ 50%	27,6%	27,4%	37,3%	29,8%
	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio	≤ 12%	7,27%	4,03%	2,28%	7,40%
	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	≤ 18%	8,28%	2,63%	1,17%	7,05%
	Limite líquido	≤ 40%	29%	20%	20%	30%
	Índice de plasticidad	4 – 9	9	4	4	8
	Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales	≤ 2%	1.16%	0.65%	0.90%	1.07%
	Coef. de clasificación	16 – 34	16.9	35.1	30.6	21.2
SANRAL	Tamaño máximo	1 ½”	4”	1 ½”	1 ½”	4”
	Índice de sobredimensión	≤ 5%	17.7%	0.0%	0.0%	9.6%
	Coef. de clasificación	16 – 34	16.9	35.1	30.6	21.2
AUSTROADS	Índice de plasticidad ponderado	≤ 500%	184%	76%	74%	90%
	Permeabilidad máx.	1x10 ⁻⁴ m/s	8x10 ⁻⁶ m/s	2x10 ⁻⁵ m/s	9x10 ⁻⁶ m/s	5x10 ⁻⁵ m/s

Nota: La tabla presenta los resultados de caracterización de los materiales de las fuentes seleccionadas, así como su cumplimiento con la especificación INVIAS 2013.

Fuente: Elaboración propia

2. Anexos

Anexo 1.

Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Yunga

Anexo 2.

Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Puracé

Anexo 3.

Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Truck

Anexo 4.

Resultados de ensayos de laboratorio: afirmado Yescas

3.3. Geosintético y sus parámetros

Teniendo en cuenta el análisis de geosintéticos realizados en el capítulo 2. Marco teórico, se decide emplear geomalla como elemento de refuerzo porque los beneficios que ofrece a la capa se encuentran alineados con los objetivos de la presente investigación. Según PAVCO (2012), las geomallas biaxiales “son estructuras bidimensionales de polipropileno, químicamente inertes, producidas mediante un proceso de extrusión, garantizando alta resistencia a la tensión y un alto módulo de elasticidad”.

Este tipo de geosintéticos están diseñados para estabilizar y reforzar, es por ello que en el mercado son recomendados por sus fabricantes, principalmente, para la estabilización de suelos blandos y refuerzo de materiales granulares en vías. Dentro de las consideraciones en la implementación de estas en un diseño se encuentran: el aumento de la vida útil de la estructura vial al ser utilizada en materiales granulares, la reducción del espesor de la capa granular, disminución del impacto ambiental y una solución alternativa cuando los materiales locales no cumple con requerimientos de calidad.

Figura 11.

Implementación de geomalla biaxial propygrid BX- 1200 en campo para construcción de carreteras.



Nota: La figura presenta la instalación de geomalla y colocación de afirmado en una obra de infraestructura vial, así como el detalle de la geomalla. Fuente: *Tomado de Geomatrix.*

En Colombia existe una gran variedad de proveedores de geosintéticos como lo son Geomatrix, Geoandes, Pavco, entre otros; y la selección de la geomalla adecuada se basa en las recomendaciones dadas por el artículo 233-13 del INVIAS dedicada a regular el uso de geomallas para la estabilización de suelos de subrasante y refuerzo de capas granulares.

Dado esto, la geomalla debe ser biaxial o multiaxial y las propiedades mecánicas de la misma son reguladas por la tabla 233-2, sin embargo, muchas propiedades son dejadas al criterio del proyecto como lo es el tamaño de abertura, y con el fin de tener una referencia se cuenta con la tabla 233 -1 la cual define las propiedades mecánicas para estabilización de la subrasante, donde el tamaño debe ser mayor o igual al D50 y menor o igual a dos veces D85 del agregado.

Luego, con el propósito de parametrizar un solo geosintético que sea apropiado para los 4 agregados, se opta por la geomalla biaxial propygrid BX- 1200 de Geomatrix mostrada en la Figura 11, dadas sus características mecánicas y físicas, las cuales son presentadas en la Tabla 17.

Tabla 17.*Propiedades geomalla biaxial propygrid BX 1200*

Característica	Norma	Unidad	Valores típicos
Propiedades mecánicas			
Resistencia a la tensión 2% deformación (MD/TD)	ASTM D 6637	kN/m	6,0 / 9,0
Resistencia a la tensión 5% deformación (MD/TD)			11,8 / 19,6
Resistencia última a la tensión (MD/TD)			19,2 / 28,0
Eficiencia de los nodos	ASTM D 7737	%	93,0
Rigidez flexural	ASTM D 7748	mg – mc	750.000
Rigidez torsional (<i>J</i>)	GRI GG9	cm– kg/deg	6,5
Propiedades físicas			
Tamaño de abertura (MD/TD)	Medido	mm	25 / 33
Espesor de las costillas (MD/TD)	ASTM D 5199	mm	1,3
Presentación del rollo			
Ancho x largo	Medido	m	3,95 x 50
Área	Medido	m ²	197,5

Nota: MD: dirección a lo largo del rollo, TD: dirección transversal. La tabla presenta las propiedades mecánicas y físicas, así como los tamaños de presentación de la geomalla biaxial. Fuente: Tomado de Geomatrix (2021)

Adicionalmente, el estudio se enmarca dado el Plan Vial del Municipio de Piendamó, donde la red vial terciaria priorizada cuenta con la vía “cruce ruta 2504 alto Tunia-Altamira-cruce ruta 26CCA farallones” de código 25KA55, con un orden de prioridad estratégica, una longitud de 5.200 km, un TPD de 35 veh/día y su estado es categorizado como malo; siendo está acorde al enfoque del presente estudio.

Luego, se cuenta con una composición vehicular del 74% de autos y 26% de C2g; y asumiendo que las características del proyecto son de un período de diseño igual a 10 años, una tasa de crecimiento anual del 3%, un ancho de la calzada de 6m y un factor direccional de 0,5, se obtiene el número de ejes equivalentes de $N = 85598$ haciendo uso de la ecuación 2, de lo cual, finalmente se determina el número estructural (SN), mediante la ecuación 1 teniendo en cuenta los parámetros dados por Higuera (2008) mencionados en el capítulo 2.

Seguido, para la determinación el espesor (d) que satisfaga la condición $SN \leq SN_{estructura}$, es necesario definir el coeficiente de drenaje con una clasificación del índice de Thornthwaite (I_m) en la categoría Húmedo, obteniendo un valor de $m = 0,95$. En este mismo sentido se tiene en consideración el coeficiente estructural que está en función de la calidad del material, dadas las sugerencias por INVIAS y mencionadas anteriormente.

Finalmente, se determina los espesores de las estructuras sin reforzar por el método que ofrece INVIAS mediante la ecuación 3, sin embargo, en términos de comparación y

determinados bajo el coeficiente $a = 0,08$, se observan valores adecuados e intermedios en comparación con los otros dos métodos de diseño.

Tabla 18.

Resumen de espesores para estructuras no reforzadas

Subrasante	CBR (%)	SN	INVIAS				Higuera	AUSTROADS
			Cumple ¹		No cumple ²			
			SN ³	D	SN ³	d	d	d
A	3	2,34	2,38	35	2,35	49	39	34
B	5	2,10	2,11	31	2,14	42	32	24
C	7	1,93	1,97	29	1,94	38	28	20

Nota: Todos los espesores (d) se expresan en centímetros. Fuente propia

¹ Material de afirmado que satisface los requerimientos del Art. 311-13 del INVIAS

² Material de afirmado que no satisface los requerimientos del Art. 311-13 del INVIAS

³ $SN_{Estructura}$

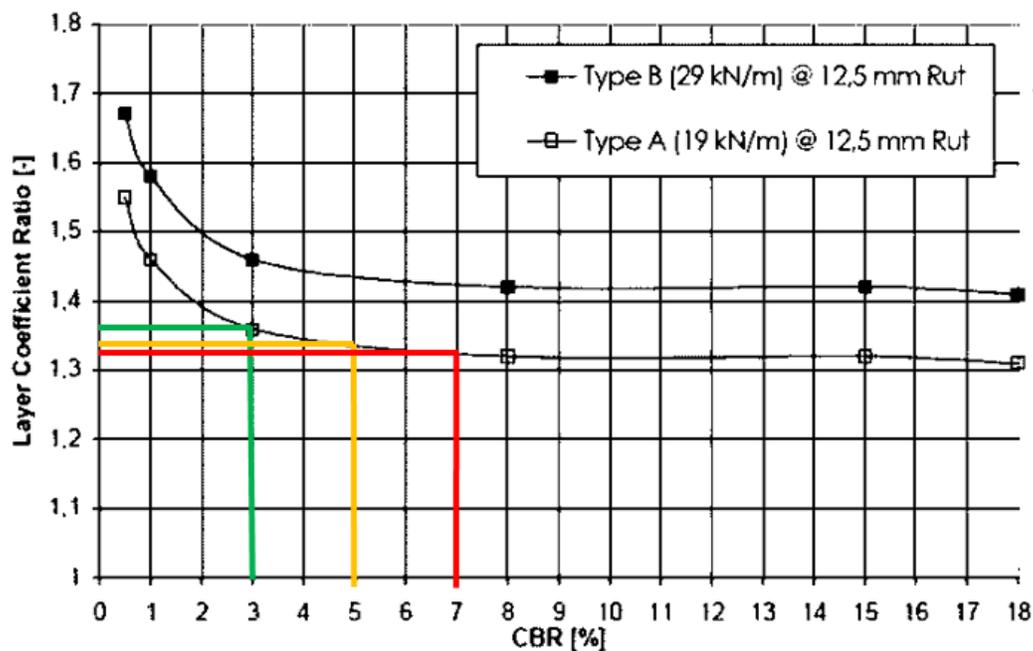
En este mismo sentido, para el diseño de las estructuras reforzadas con geomallas biaxiales se cuenta con una adaptación del método AASHTO para diseño de pavimentos flexibles, quien es la misma norma de principal referencia a la normativa colombiana INVIAS. Para este diseño, como se vio anteriormente, se basa en un coeficiente (LCR) que representa la equivalencia del soporte que ofrece el geosintético y que se le atribuye a la subrasante.

En la Figura 15 se presenta la determinación de LCR según el valor de CBR de la subrasante de la estructura y en función de la resistencia última a la tensión por el lado más

débil de la geomalla biaxial, la cual es reemplazada en la ecuación 10 bajo las mismas consideraciones del coeficiente estructural y de drenaje del diseño sin refuerzo, y se obtienen los espesores.

Figura 15.

Selección de LCR.



Nota: La figura presenta la selección del coeficiente LCR de acuerdo con los valores de %CBR de la subrasante, empleando el ábaco de PAVCO. *Fuente propia*

Por otro lado, el diseño propuesto por Giroud & Han (2004), a diferencia del anterior, tiene en consideración el soporte estructural del material de afirmado, optimizando aquellos agregados que no cumplen con todos los requerimientos de la norma para considerarse como material de afirmado. Además, es importante considerar la presión que

ejerce la rueda en la estructura ($P/\pi r^2$), luego teniendo en cuenta el tránsito vehicular de la vía de diseño, se hace uso de las características de un eje SRD, donde la presión es igual a 550 kPa con un radio (r) de 10,8 cm y una carga (P) de 20,5 kN.

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en el capítulo 2.1.1, el módulo de rigidez del geosintético (J), el número de ejes equivalentes de diseño (N) y los valores de CBR de la subrasante y material de afirmado, reemplazando en la ecuación 9 e iterando se determinan los espesores pertinentes a cada estructura. En la Tabla 19, se presenta un resumen de los espesores obtenidos, además de los determinados por la adaptación del método de diseño de la AASHTO.

Tabla 19.

Resumen de espesores para estructuras reforzadas

Método de diseño			Giroud y Han				Adaptación AASHTO	
Material de afirmado			Yunga	Puracé	Truck	Yescas	NC ¹	SC ²
Subrasante	LCR	CBR (%)	39	49	58	53		
			Espesor (cm)					
A	1,36	3	26	25	25	25	36	26
B	1,33	5	25	25	24	25	32	23
C	1,32	7	24	24	23	24	29	22

Nota: Material de afirmado que no satisface los requerimientos del Art. 311-13 del INVIAS

La tabla presenta los espesores de diseño

2 Material de afirmado que satisface los requerimientos del Art. 311-13 del INVIAS

5. Modelaciones con Estructura de Afirmado

Para la evaluación de la durabilidad de las estructuras de afirmado reforzadas con geosintéticos, se determinó la utilización del programa de elementos finitos Abaqus (Dassault Systemes, 2013), para lo cual se definen los parámetros que requiere este software para lograr la predicción del comportamiento de las estructuras de afirmado de acuerdo con los diseños previamente calculados, para las cuatro fuentes de materiales seleccionadas, así como tres calidades de subrasante (CBR 3%, CBR 5% Y CBR 7%), donde para dichas modelaciones se seleccionaron las estructuras de afirmado convencionales diseñadas con el método de INVIAS y para las estructuras de afirmado reforzadas con geomalla biaxial con el método de GIROUD-HAN relacionados en el capítulo 4.

Figura 16.

Vista Entorno Software Abaqus/CAE



Nota: Fuente propia

5.1. Determinación de los Diseños de afirmado a modelar.

Un de los objetivos específicos determinados para el presente trabajo es el de predecir el comportamiento que tendrá el afirmado con geosintéticos a futuro mediante la modelación numérica, para ello se establece modelar en el programa Abaqus (Dassault Systemes, 2013), una estructura de afirmado convencional y reforzada con cumplimiento de las especificaciones generales de construcción de carreteras, que de las cuatro fuentes analizadas se toma la fuente de materiales de Agregados Puracé dado que este material de afirmado cumple con las especificaciones Invias de acuerdo con la caracterización que se realizó en el capítulo 3, además de escoger el material de una fuente sin el cumplimiento de especificaciones que para el presente trabajo es de la cantera La Yunga.

Los pasos para seguir en la modelación del programa ABAQUS son los siguientes:

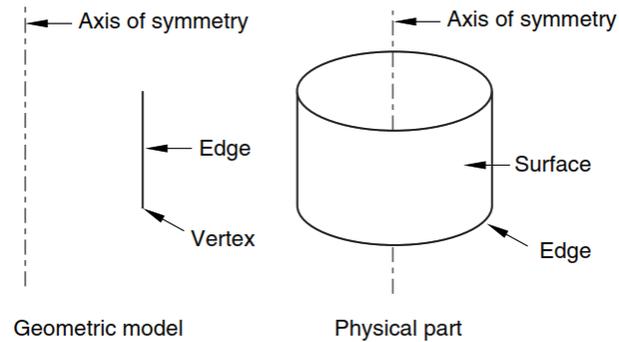
5.1.1. Creación de las partes

Se definen los componentes de la estructura de pavimento mediante la instrucción “Part”, para nuestro caso son: capa de afirmado, subrasante y geomalla biaxial, esto de acuerdo con los diferentes espesores definidos en el diseño.

En la creación de las partes se define que nuestro modelo es axisimétrico, el que asume el programa es que el eje de revolución es el “eje y” y se puede agregar un grado de libertad para el giro.

Figura 17.

Vista Plano de Revolución sobre el Eje de simetria



Nota: Fuente CAE User's Manual - Simulia

Para la evaluación se aplica una carga de 40 kN de manera estática. Pese a que el software otorga la opción de una aplicación dinámica, se opta por llevar a cabo una evaluación estática obedeciendo a dos aspectos primordiales: el uso de módulo resiliente en la formulación y el empleo de un modelo elástico. En primer lugar, Moreno Rubio (2005) se refiere al módulo resiliente de la siguiente manera:

Los materiales que constituyen los pavimentos se ven sometidos a cargas dinámicas de diversas magnitudes que le son transmitidas por el tráfico. Con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman una estructura de pavimento, así como el comportamiento no lineal y resiliente de los materiales, se han realizado en el mundo varios trabajos experimentales, tanto en modelos a escala natural como en muestras de material probadas en el laboratorio, obteniéndose valiosa información sobre el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales. Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suele denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el

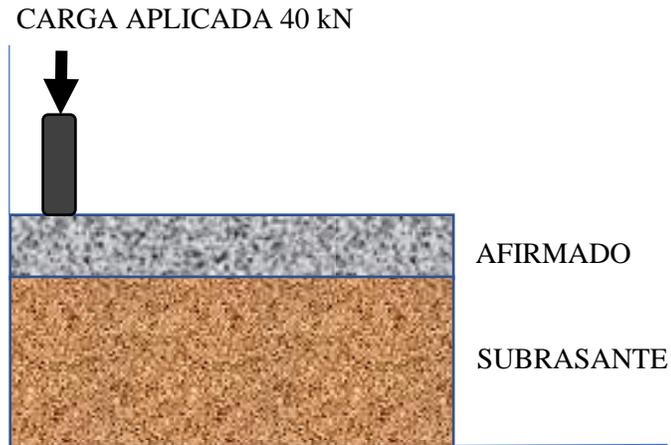
pavimento después de cesar la carga. Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando y para ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente. De aquí se desprende el concepto de módulo resiliente, el cual está definido como el esfuerzo desviador repetido aplicado en compresión triaxial entre la deformación axial recuperable.

Basándose en la información anterior, Moreno Rubio (2005) afirma que: “El concepto de módulo resiliente está ligado invariablemente a un proceso de carga repetida”. Por lo que en este sentido, al ingresar el módulo resiliente de los materiales, se tiene en cuenta la respuesta dinámica de estos.

Por otra parte, el uso de un modelo elástico sigue un par de fundamentos que, en las condiciones adecuadas, definen una equivalencia entre la respuesta estática y dinámica de un material. El uso del método de elemento finitos permite la modelación de la estructura mediante la división en elementos más pequeños y su discretización, así, representando el comportamiento elástico del material. La ley de Hooke, así como otras variables en las ecuaciones empleadas por el software empleado son las mismas tanto para análisis dinámicos, como estáticos, teniendo presente que las respuestas ante cargas dinámicas se calculan dentro del rango elástico utilizando los mismos principios fundamentales que en el análisis estático.

Figura 18.

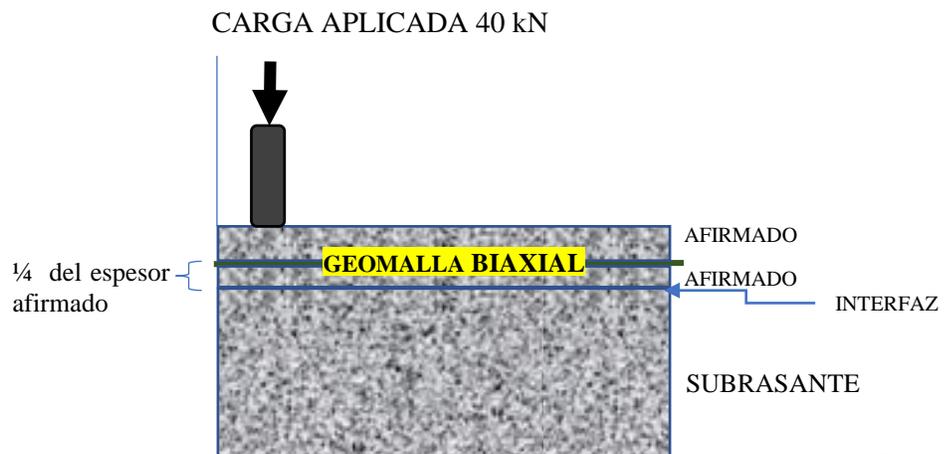
Vista Estructura de Afirmado Convencional con la Carga a Modelar



Nota: Fuente propia

Figura 19.

Vista Estructura de Afirmado Reforzada con Geomalla



Nota: Fuente propia

El modelo general que se considera en el programa ABAQUS para las estructuras convencional con capa de afirmado es la siguiente:

Estructura de pavimento tipo “Deformable” y las características de los componentes de las capas “Shell”. Una vez definido el modelo en el programa, se procede a especificar geometría a las capas, teniendo los espesores de diseño de la capa de afirmado con estructura convencional y reforzada con geomalla para cada cantera.

5.1.2. Geométrica de Cada una de las Capas

Se define las partes dentro del modelo.

- Capa de Afirmado con el espesor determinado por cada diseño
- Capa de subrasante con un espesor de 1.5 m, el cual es suficiente para disipar las cargas aplicadas por las llantas del vehículo.
- La ubicación de la geomalla se define a $\frac{1}{4}$ del espesor de la capa para las estructuras reforzadas

Caracterización de los materiales.

- Se debe definir el rango de trabajo que para nuestro caso estamos trabajando en el rango elástico.
- Se asumen que los materiales son isotrópicos, que tienen las mismas propiedades en todo su volumen.

- Para cada uno de los materiales se debe introducir los módulos determinados.
- Se asigna el coeficiente de la relación de poisson.

5.1.3. Asignación de las propiedades para los materiales.

a. Subrasante:

La subrasante en la capa de fundación de cualquier estructura de pavimento, para el trabajo se definieron tres tipos de calidades de subrasante de acuerdo con su resistencia, así:

Tabla 20.

Resumen de espesores para estructuras reforzadas

CBR Subrasante	Resistencia
3%	Baja
5%	Aceptable
7%	Buena

Nota: Fuente propia

Módulo Resiliente

El cual se puede obtener por medio de ensayo de laboratorio o por correlaciones según el nivel de importancia del proyecto.

La expresión para estimar el módulo resiliente en función del CBR, es la expresión recomendada en la guía Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, (AASHTO,2015), que guarda correspondencia con la expresión determinada en el Laboratorio de Transporte e Investigación de Carreteras del Reino Unido (TRRL), propuesta inicialmente por Powell et al. para ser aplicada en suelos con valores de CBR entre 2 y 12%:

$$\text{Módulo Resiliente} = 17.6 * (\text{CBR})^{0.64}$$

$$\text{Módulo Resiliente}_{\text{CBR } 3\%} = 17.6 * (3)^{0.64}$$

$$\text{Módulo Resiliente}_{\text{CBR } 3\%} = 36 \text{ Mpa}$$

$$\text{Módulo Resiliente}_{\text{CBR } 5\%} = 17.6 * (5)^{0.64}$$

$$\text{Módulo Resiliente}_{\text{CBR } 5\%} = 49 \text{ Mpa}$$

$$\text{Módulo Resiliente}_{\text{CBR } 7\%} = 17.6 * (7)^{0.64}$$

$$\text{Módulo Resiliente}_{\text{CBR } 7\%} = 61 \text{ Mpa}$$

Tabla 21.

Resumen Cálculo de Módulo Resiliente

CBR Subrasante a Modelar	Módulo Resiliente [Mpa]
3%	36 Mpa
5%	49 Mpa
7%	61 Mpa

Nota: Fuente propia

Relación de Poisson

Es una constante elástica que proporciona una medida, que se calcula de la relación entre la deformación en el sentido de aplicación de la carga donde se deforma el eje perpendicular a la aplicación de la carga que se estira.

Para la capa de subrasante de acuerdo con el Manual de Diseño de Medios y Altos Volúmenes del INVIAS se recomienda el siguiente valor:

Tabla 22.

Resumen Valores Típicos Relación de Poisson

Relación de Poisson	Valor Típico
Subrasante	0.45
Bases Granulares No ligadas	0.40

Nota: Tomado de (INVIAS, 2007)

b. Capa de Afirmado

La capa de afirmado para la fuente Agregados Puracé fue determinado por el ensayo de laboratorio:

Para determinar el Módulo Elástico de la Capa Granular de Afirmado, se determinó el Módulo Elástico así:

Tabla 23.

Módulos Elásticos de las fuentes de agregado.

Afirmado	Módulo Elástico [Mpa]
Puracé	190
La Yunga	164
Yescas	199
Mina Truck	209

Nota: Módulos Elásticos Fuentes de Material - Caracterización

. Fuente: Elaboración Propia.

Para la capa de subrasante de acuerdo con el Manual de Diseño de Medios y Altos

Volúmenes del INVIAS se recomienda el siguiente valor:

Tabla 24.

Relación de Poisson para materiales granulares.

Relación de Poisson	Constante
Material Granular No Ligado	0.40

Nota: Tomado de Invias (2007)

c. Geomalla Biaxial

Para la geomalla de refuerzo, se recomienda una geomalla biaxial construida de referencia P-BX1200 este material se debe establecer el Módulo Elástico, para lo cual se toma de las recomendaciones del fabricante:

Relación de Poisson = 0,35

Módulo Elástico = 275 Mpa

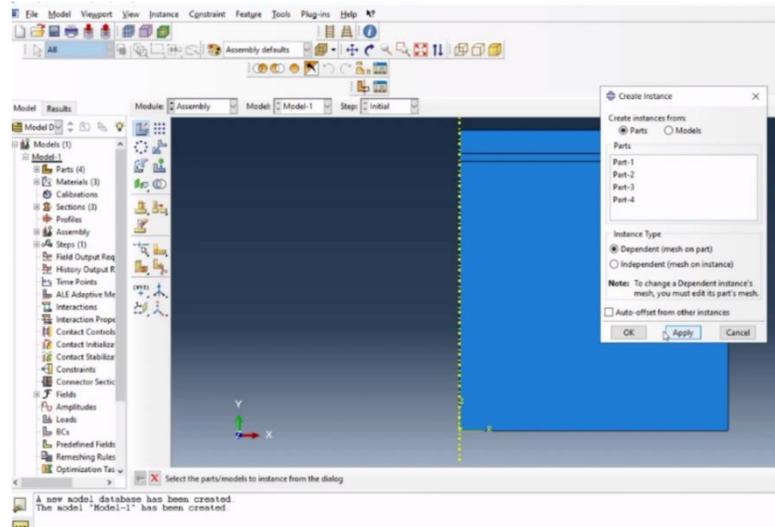
Espesor de la Geomalla = 0,003 m

5.1.4. Ensamblaje de las Capas de la Estructura

Una vez se asigna a cada capa sus características, se debe ensamblar las capas de acuerdo con la configuración del modelo, por lo que se además se debe definir las interacciones entre las caras de las capas. (afirmado – geomalla – afirmado – subrasante) para estructuras reforzadas y para estructura convencional (afirmado – subrasante).

Figura 20.

Definición de las partes que componen el modelo



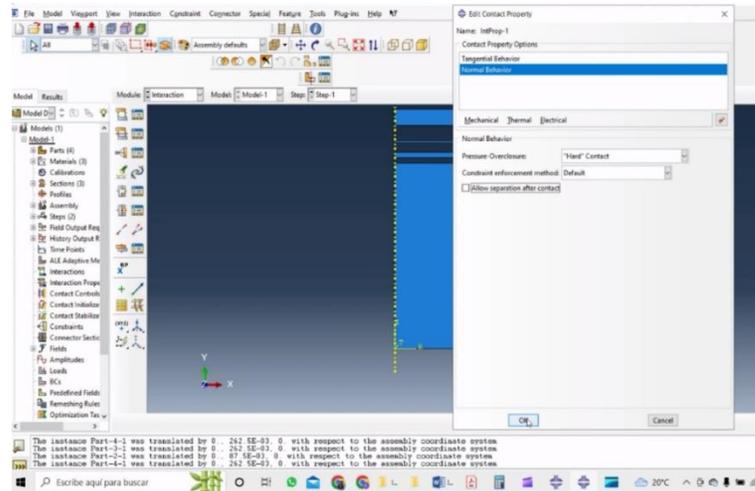
Nota: Fuente propia

5.1.5. Definición de las Interacciones entre las Capas.

Con el fin de establecer al programa como van a interactuar entre si los materiales creados, contacto afirmado – subrasante en el caso de las estructuras no reforzadas, y en el contacto entre capas afirmado – geomalla – afirmado – subrasante, se asigna la interacción así: Se define que la interacción entre capas es de contacto, “tangencial behavior”, para este comportamiento tangencial se seleccionar “rough” que define el contacto rugoso entre capas, además se debe agregar la interacción entre capas “normal behavior”, donde se selecciona la opción “hard-contact” y se desactiva la opción “allow separation after contact” con el fin de permitir que el programa permita la interacción individual entre capas (no las ligue).

Figura 21.

Vista asignación propiedades de contacto entre capas.

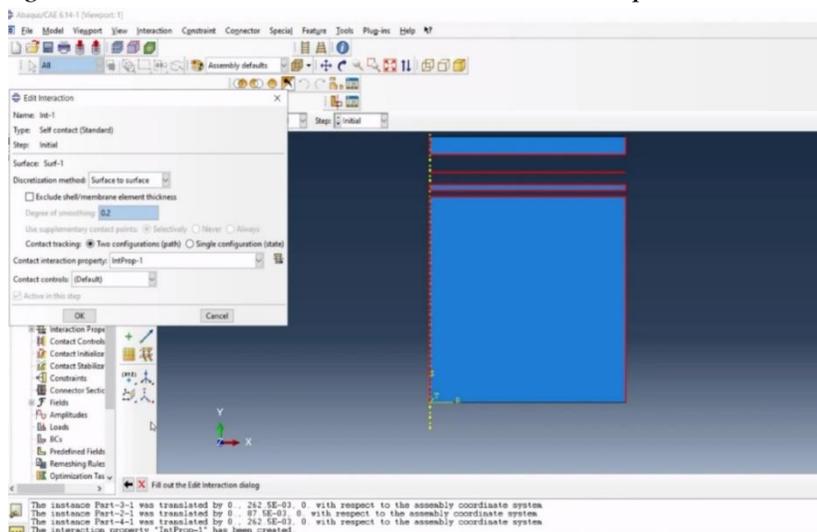


Nota: Fuente propia

Una vez definidas las interacciones entre las caras de las capas (afirmado – geomalla – afirmado – subrasante), se deben asignar al modelo.

Figura 22.

Vista asignación condiciones de interacción entre las capas



Nota: Fuente propia

5.1.6. Aplicación de la Carga de Diseño.

Avaluación de las Cargas: La carga aplicada está definida por un eje simple de ruedas tándem es la de un semi-eje de 8.2 tn, carga estándar para definir el número de ejes equivalentes, por lo tanto, la carga considerada por rueda es de 40 kN, para lo cual encontramos el área de contacto entre la rueda y el material granular para la aplicación de la carga.

r: radio de aplicación de la carga

P: carga aplicada [kN]

p: presión de inflado [kPa]

$$r = \sqrt{\frac{P}{p * \pi}}$$

$$r = \sqrt{\frac{40 \text{ kN}}{550 \text{ kPa} * \pi}}$$

$$r = 0.15 \text{ m}$$

Separación entre cargas: Se considera una separación entre las llantas es 3 veces el radio de aplicación de la carga

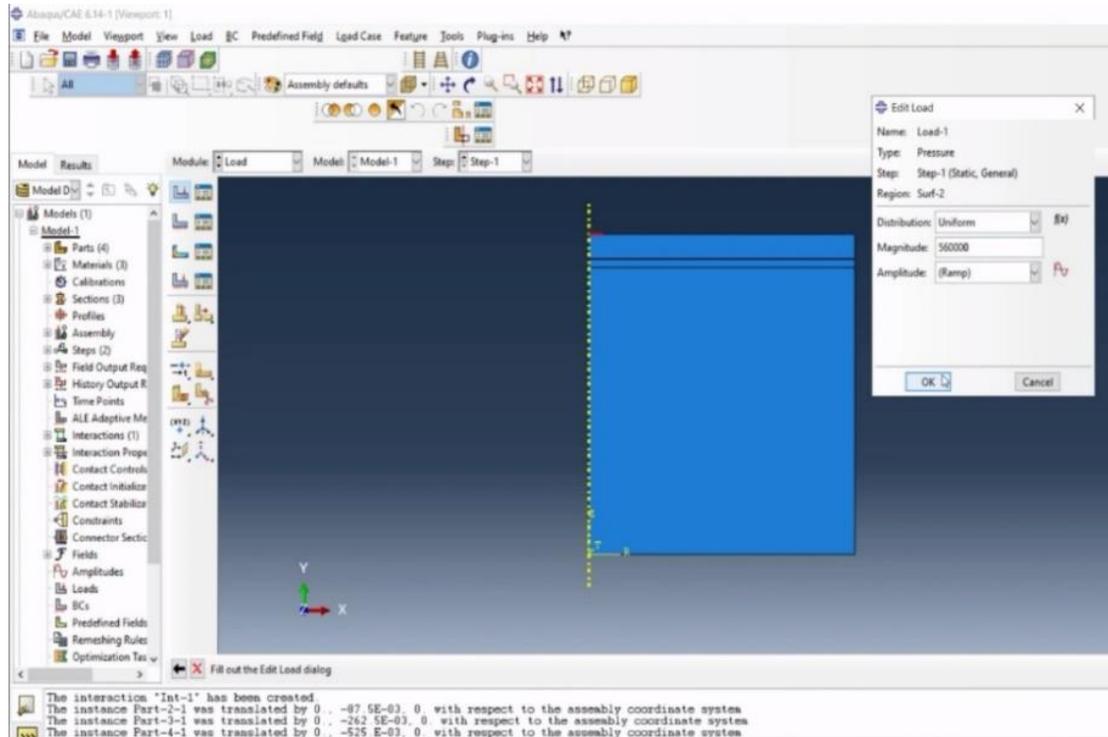
$$a = 3 * r$$

$$a = 3 * 0.15 \text{ m}$$

$$a = 0.45 \text{ m}$$

Para introducir la magnitud de la carga en el programa se establece 560.000 Pa

Figura 23.
Vista localización y definición de la carga.



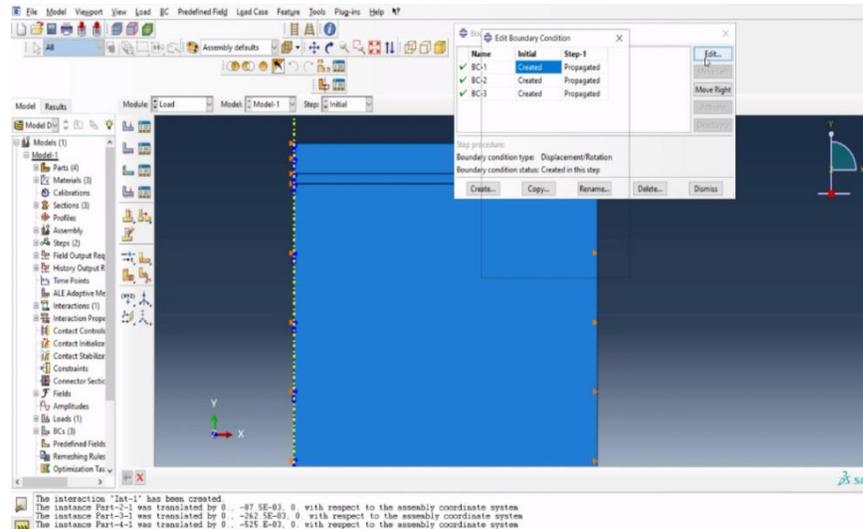
Nota: Fuente propia

5.1.7. Condiciones del Contorno.

Para el modelo creado en el programa Abaqus, se debe definir las condiciones del contorno de la estructura, por lo que se debe restringir el desplazamiento, así como se asigna el eje de rotación (modelo axisimétrico) que para nuestro caso en el eje Y.

Figura 24.

Vista definición condiciones de contorno – restricciones del contorno.



Nota: Fuente propia

5.1.8. Creación de la Malla de la Estructura.

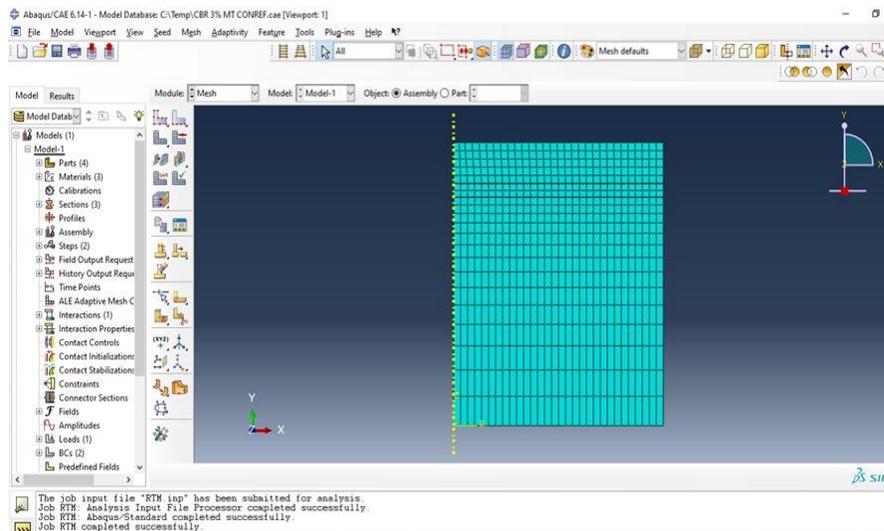
Con el fin de definir los puntos donde se desea que se calcule tanto los esfuerzos como las deformaciones en las diferentes capas que componen la estructura. Para la modelación a realizar se definió una separación de cuadrícula de 5 cm porque proporciona una resolución adecuada para capturar la geometría, detalle del pavimento y respuestas del sistema; se consideró el espaciamiento de 5 cm para considerar los criterios de evaluación del sistema y eficiencia computacional. Por un lado, separaciones mayores pueden no representar detalladamente el modelo ingresado, sin embargo, un dimensionamiento de malla menor incrementará los tiempos de evaluación y exigirá un computador con

especificaciones considerables. Teniendo en cuenta el número de estructuras a evaluar, se llega a la conclusión que la separación escogida desarrolla una resolución adecuada a la vez que se asocia con tiempos de proceso prudentes.

Para la capa de subrasante se definió en el interfaz afirmado – subrasante inicie cada 5 cm y terminando en 20 cm en el eje Z considerando la distribución de esfuerzos.

Figura 25.

Vista Estructura con el enmallado para puntos de cálculos.



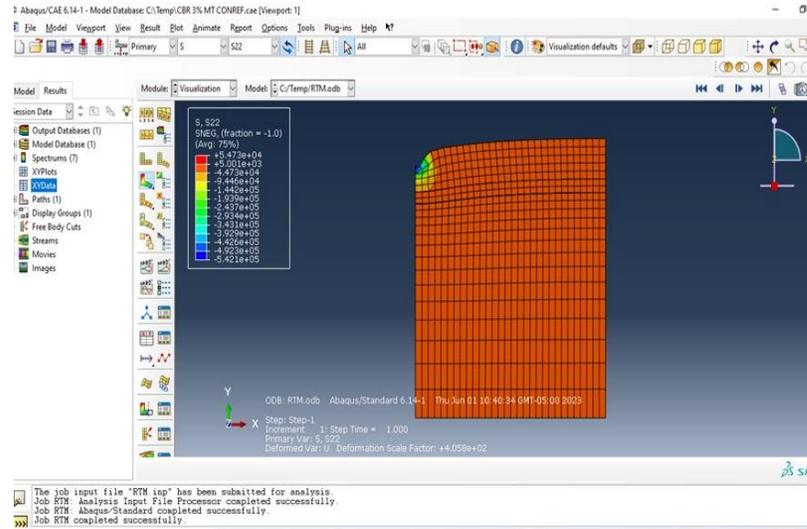
Nota: Fuente propia

5.1.9. Paso Obtención de Resultados.

Una vez establecidos todos los parámetros en los pasos anteriores, se procede a crear el trabajo para que el programa pueda realizar los cálculos correspondientes a cada punto definido en nuestro enmallado.

Figura 26.

Vista Resultados Gráficos Cálculo Esfuerzo Vertical



5.2. Modelación Estructural con Cumplimiento de Especificaciones – Fuente Agregados Puracé.

Se presentan a configuración los modelos con los espesores de acuerdo con los diseños por cada uno de los métodos definidos en el Capítulo 4, para la fuente Agregados Puracé:

Tabla 25.

Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas sin refuerzo con la metodología invias con cumplimiento de especificaciones y con refuerzo para la fuente de afirmado Agregados Puracé.

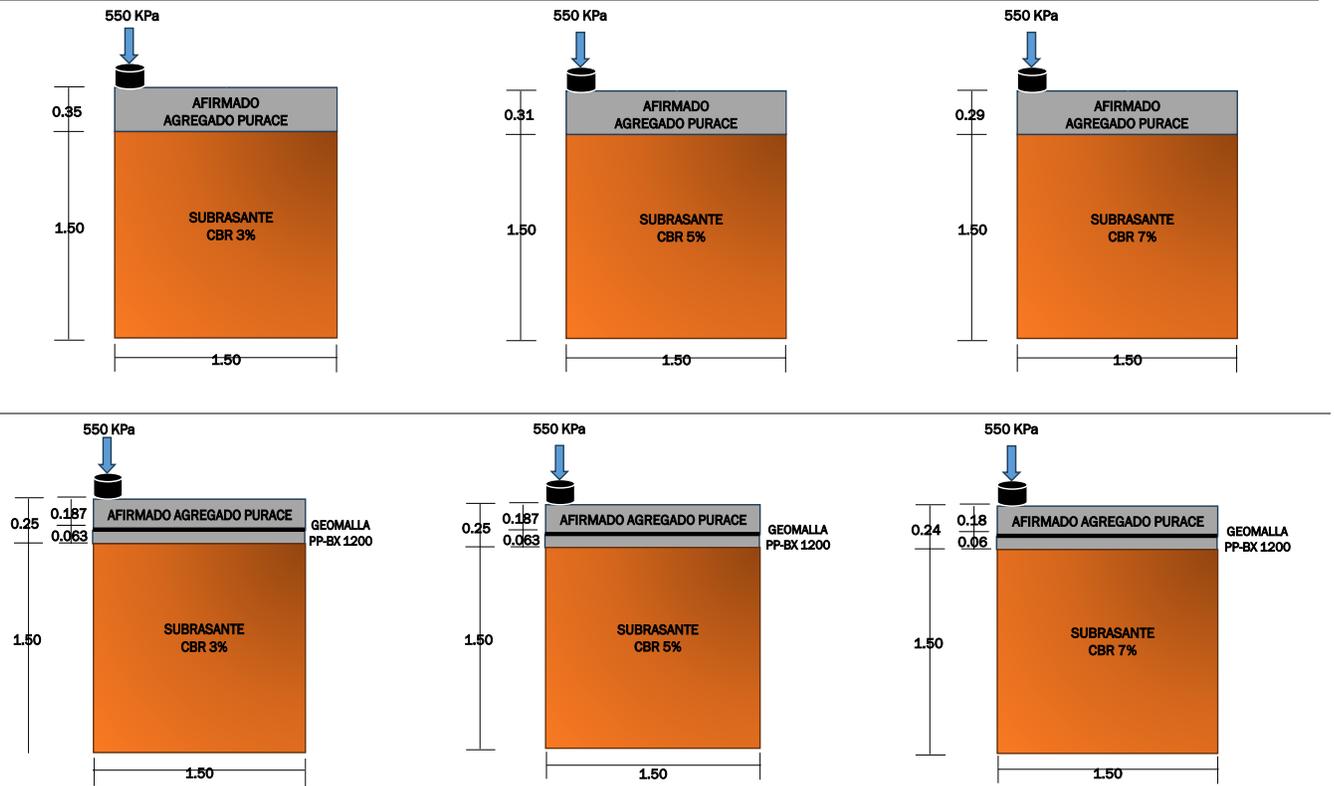
Subrasante	CBR (%)	Sin Refuerzo	Con Refuerzo
		INVIAS	Giroud - Han
		Cumple	
		D	
A	3	35	25
B	5	31	25
C	7	29	24

Nota: Todos los espesores (d) se expresan en centímetros. Fuente propia

Se asignan las propiedades de cada una de las capas definidas dentro del modelo, tanto para la capa de subrasante y la capa de afirmado.

Los espesores para modelar sin refuerzo son los determinados por el diseño INVIAS y con refuerzo con geomalla con la metodología Giroud-Han.

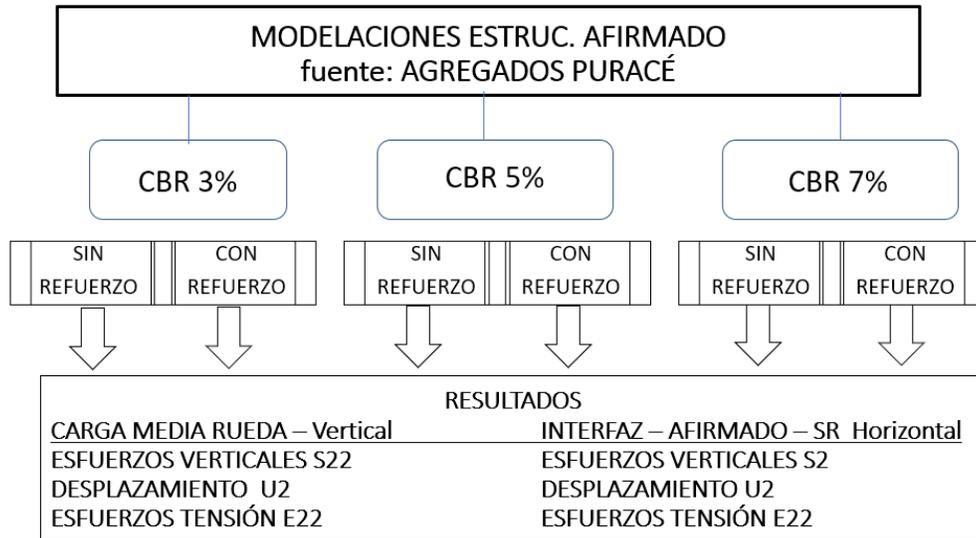
Figura 27.
Estructuras para modelar con afirmado fuente Agregados Puracé con y sin refuerzo.



Nota: Fuente propia

Figura 28.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Ag. Puracé



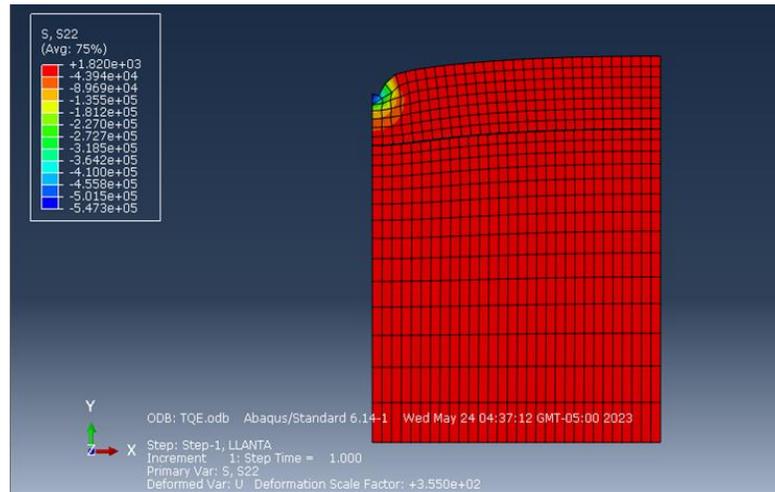
Nota: Fuente propia.

5.2.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 29.

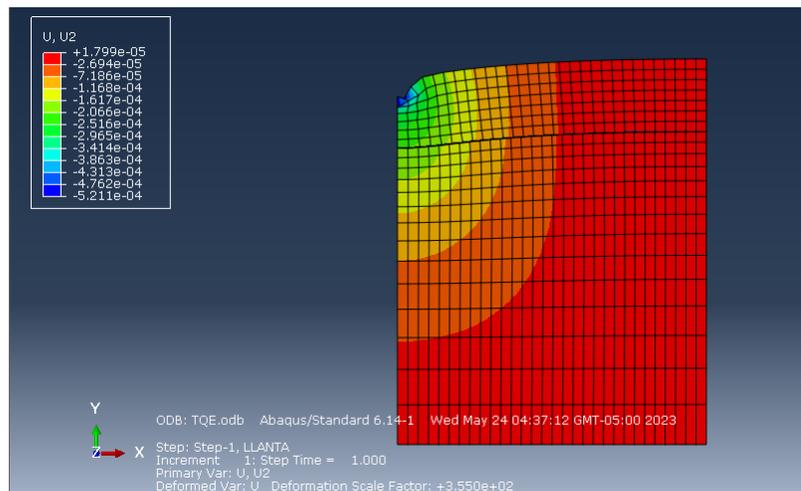
Resultado Gráfico Cálculo Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – Sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 30.

Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%

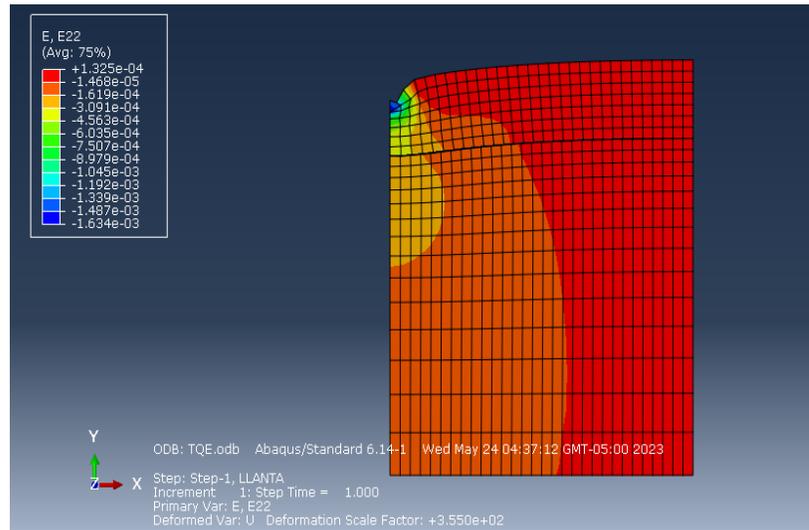


Nota: Fuente propia

Figura 31.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé

– sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



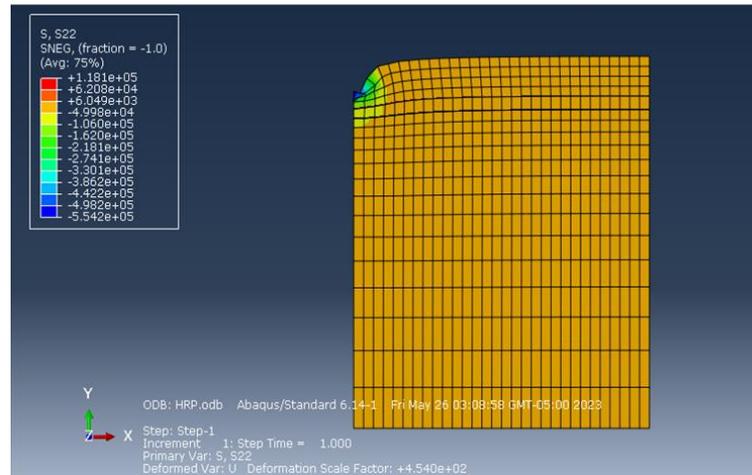
Nota: Fuente propia

5.2.2. Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han es de 25 cm, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 32.

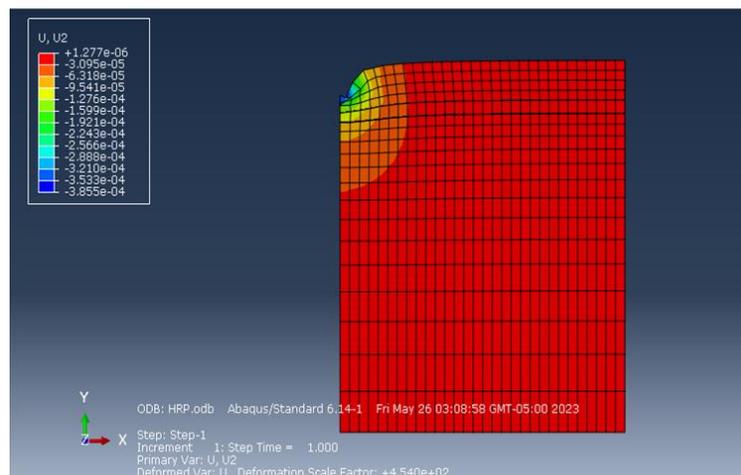
*Resultado Gráfico Cálculo Esfuerzos Verticales – Capa Afirmado Agregados Puracé –
Con Refuerzo – Subrasante CBR 3%*



Nota: Fuente propia

Figura 33.

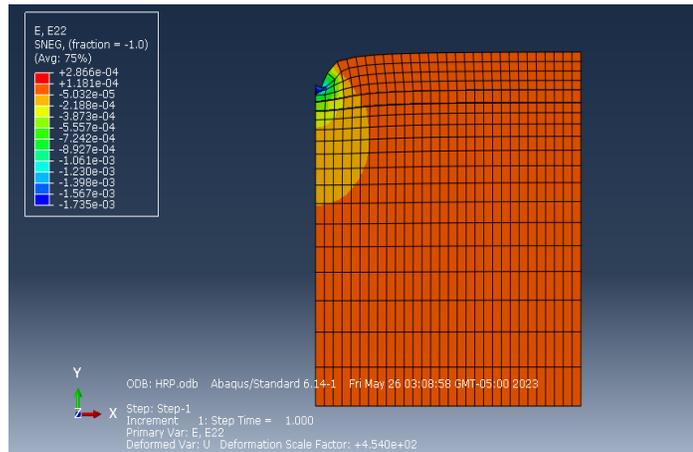
*Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado Agregados
Puracé – Con Refuerzo – Subrasante CBR 3%*



Nota: Fuente propia

Figura 34.

*Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé
– Con Refuerzo – Subrasante CBR 3%*



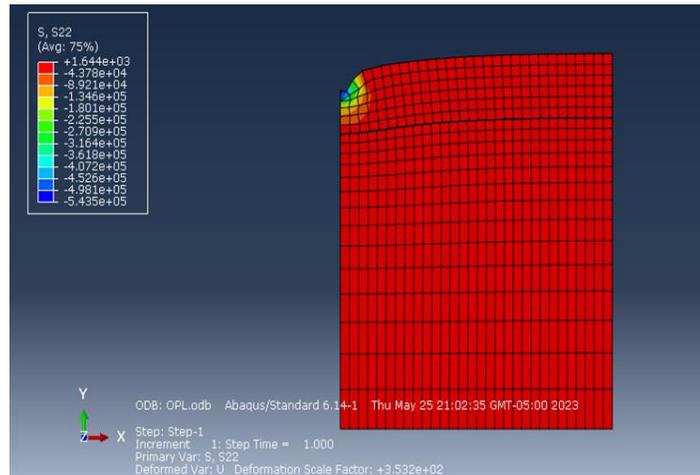
Nota: Fuente propia

5.2.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 31 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 35.

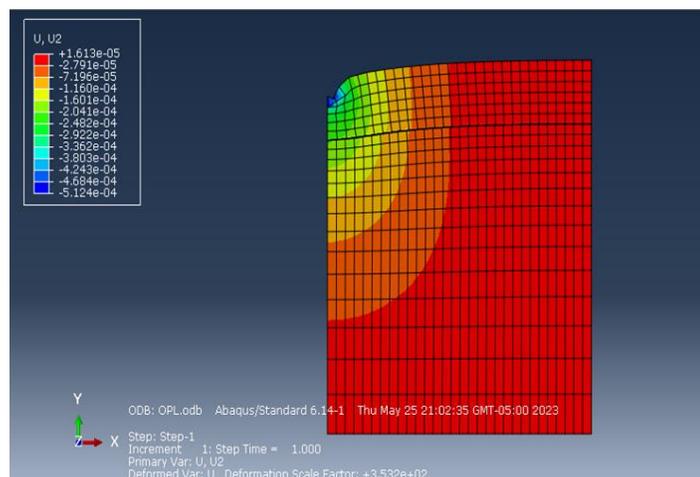
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia Capa de afirmado sin refuerzo.

Figura 36.

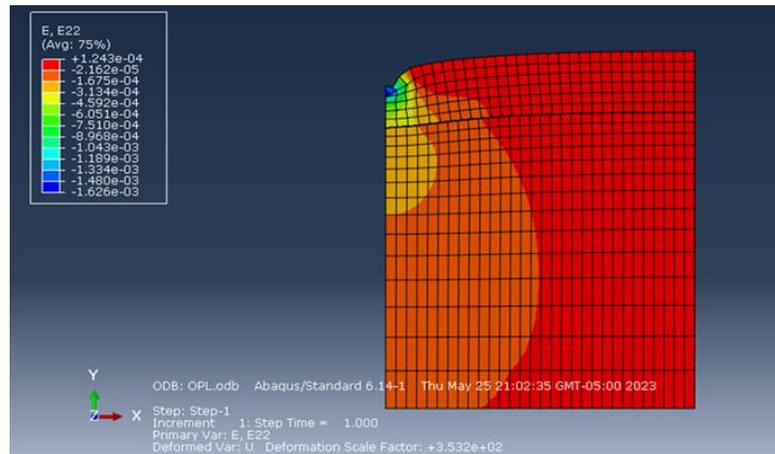
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 37.

*Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé
– sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%.*



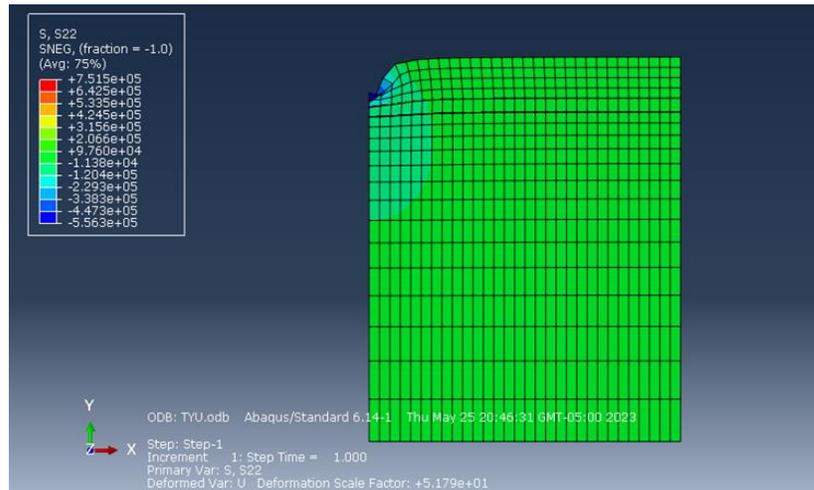
Nota: Fuente propia

5.2.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han es de 25 cm, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 38.

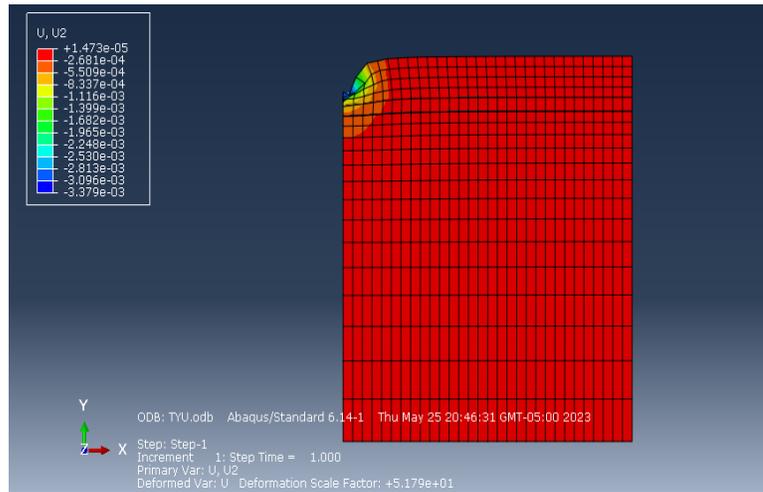
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 39.

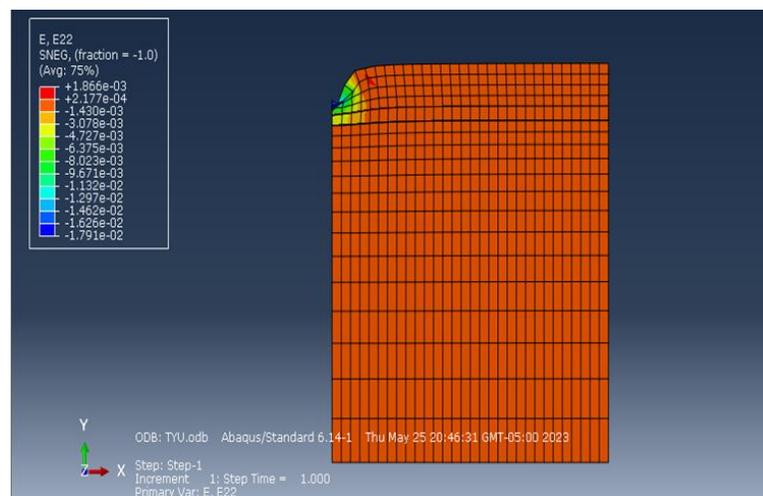
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 40.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



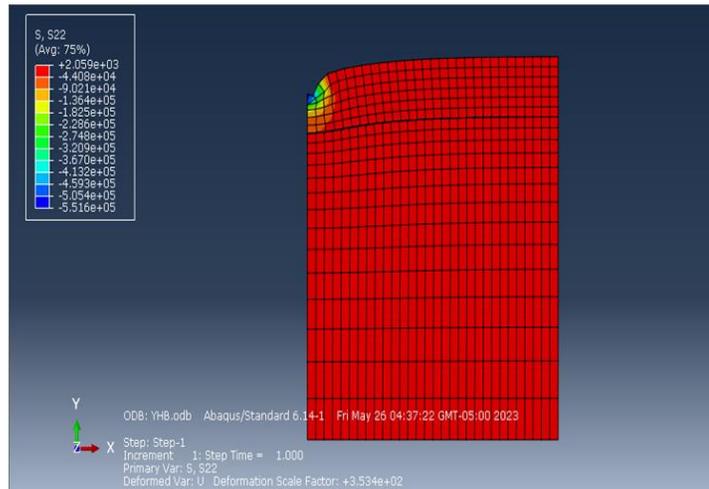
Nota: Fuente propia

5.2.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 29 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 41.

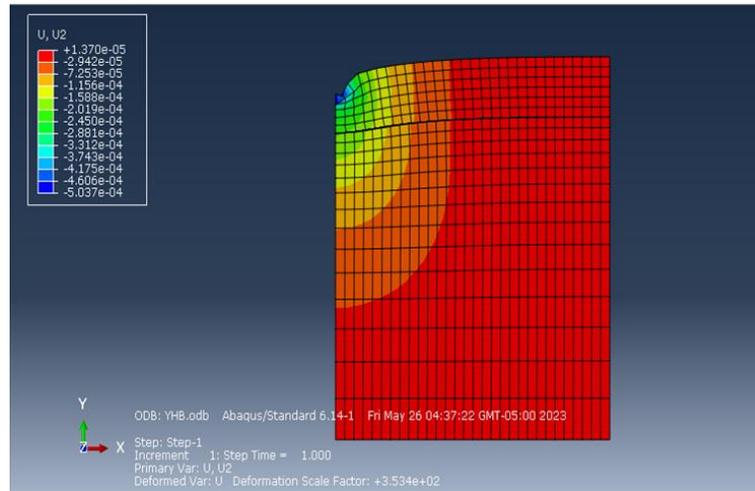
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 42.

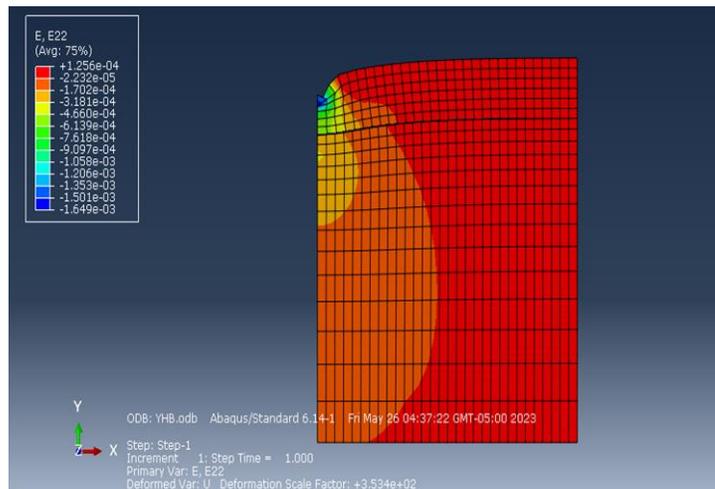
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 43.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



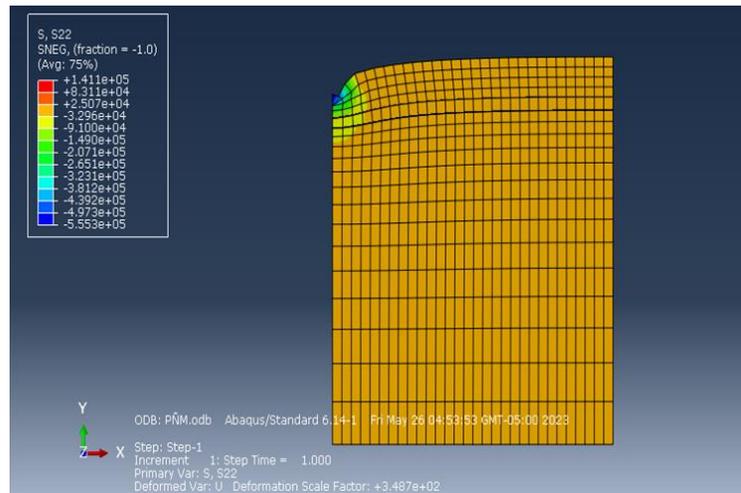
Nota: Fuente propia

5.2.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han es de 24 cm, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 44.

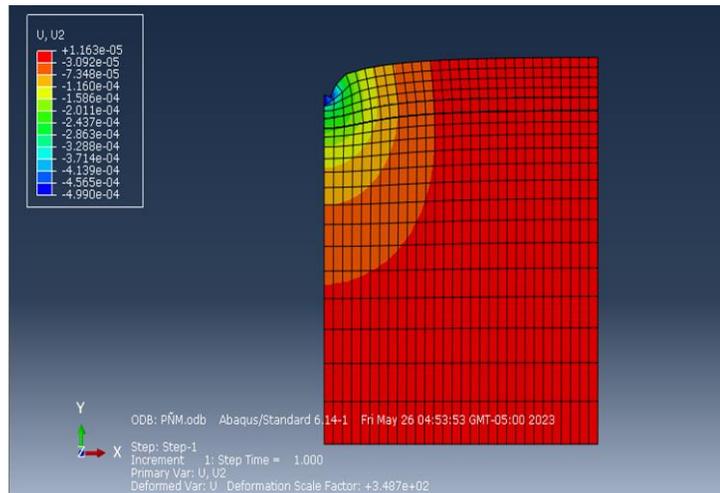
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 45.

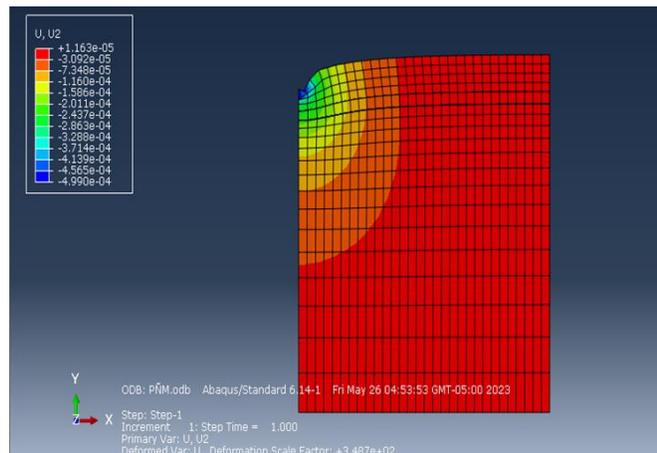
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 46.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Agregados Puracé – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

5.3. Resultados Modelaciones para Afirmados que no cumple con las especificaciones – Fuente La Yunga:

Se presentan a configuración los modelos con los espesores de acuerdo con los diseños por cada uno de los métodos definidos en el Capítulo 4, para la fuente La Yunga:

Tabla 26.

Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado La Yunga.

Subrasante	CBR (%)	Sin Refuerzo	Con Refuerzo
		INVIAS	Giroud - Han
		No Cumple	
		D	d
A	3	49	26
B	5	42	25
C	7	38	24

Nota: Todos los espesores (d) se expresan en centímetros. Fuente propia

Se asignan las propiedades de cada una de las capas definidas dentro del modelo, tanto para la capa de subrasante y la capa de afirmado.

Los espesores para modelar sin refuerzo son los determinados por el diseño INVIAS y con refuerzo con geomalla con la metodología Giroud-Han.

Figura 47.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente La Yunga

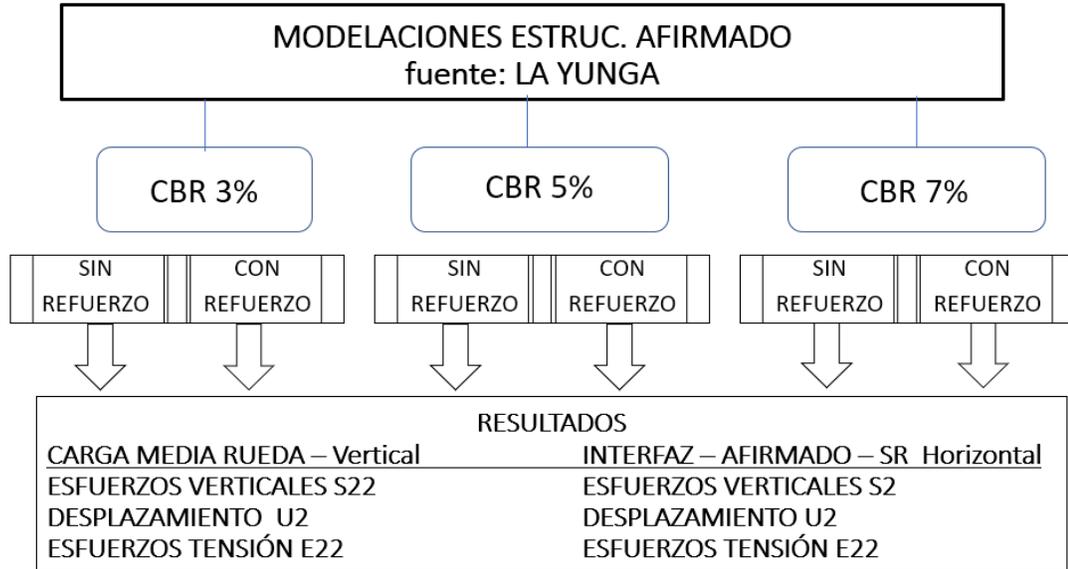
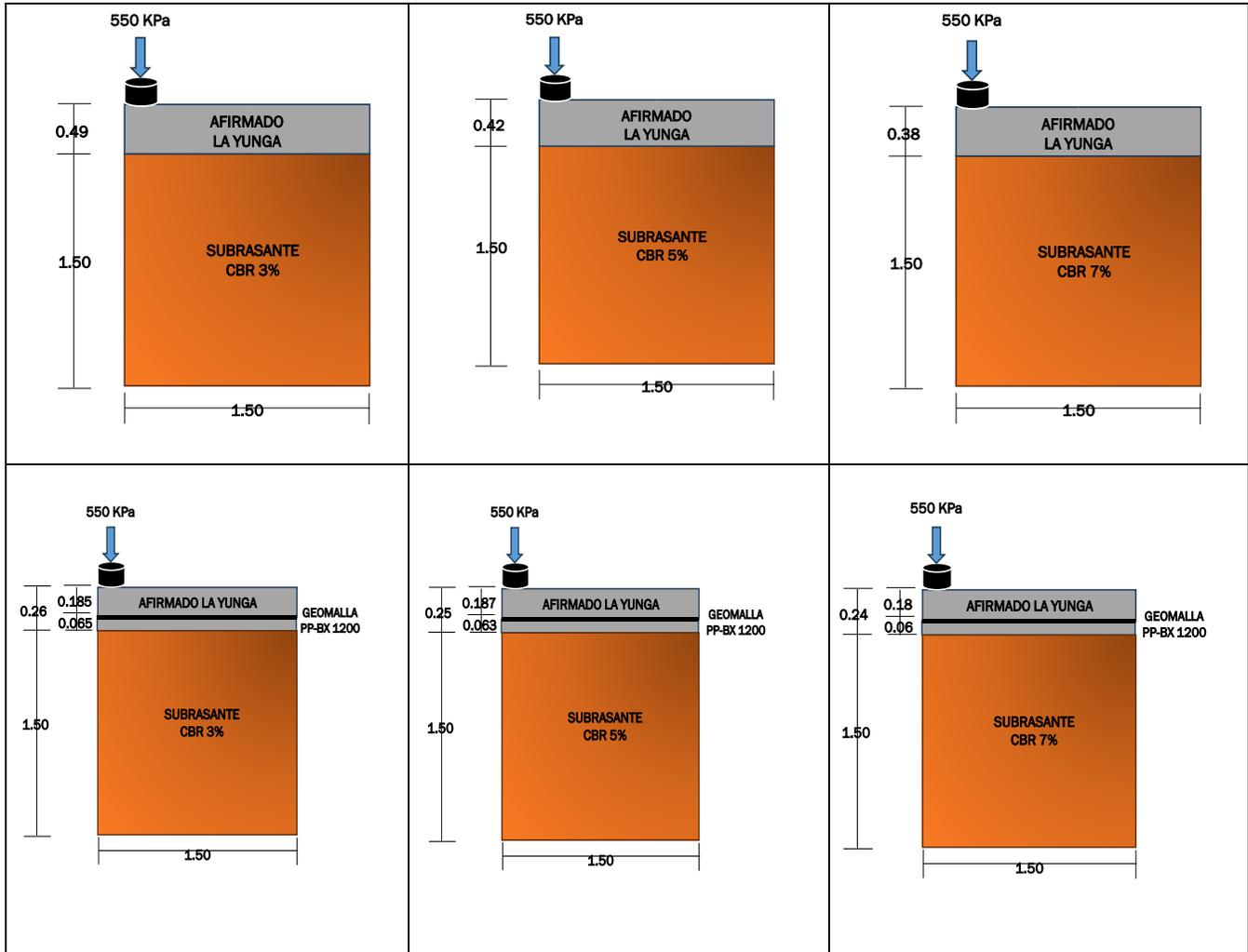


Figura 48.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente La Yunga



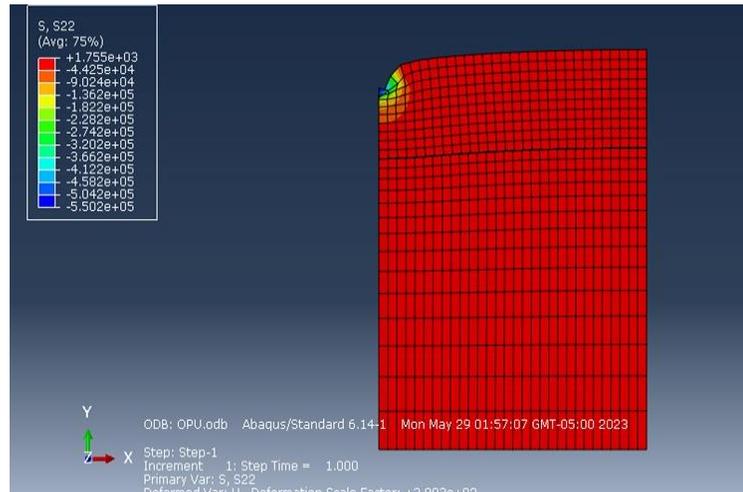
Nota: Fuente propia

5.3.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación los resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 49.

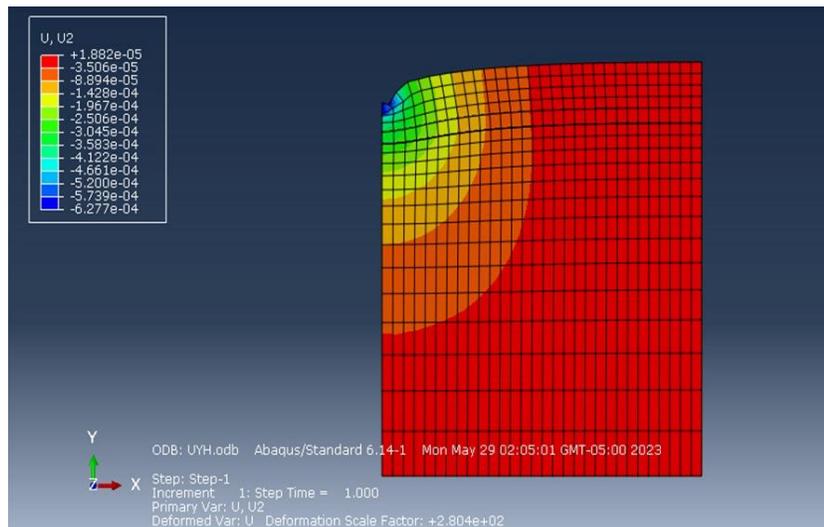
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 50.

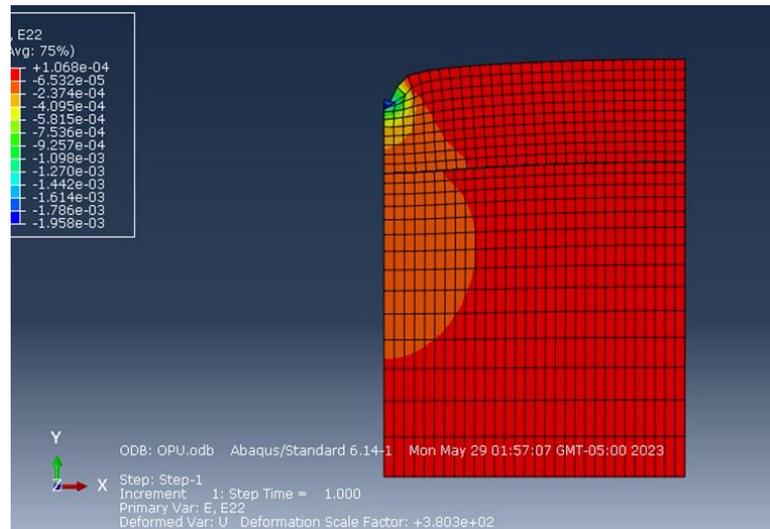
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 51.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



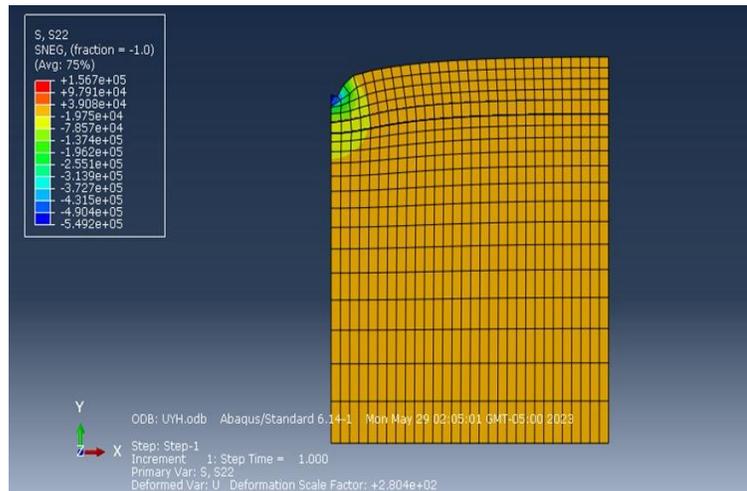
Nota: Fuente propia

5.3.2. Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 52.

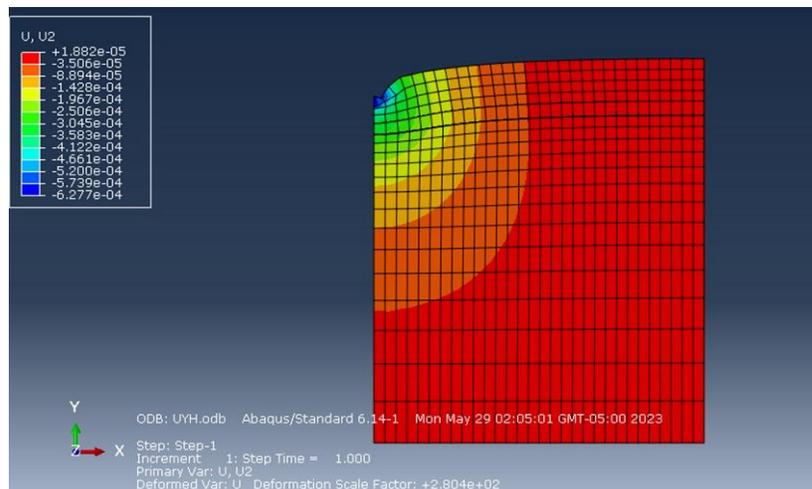
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



- *Nota:* - Capa de afirmado con geomalla de refuerzo

Figura 53.

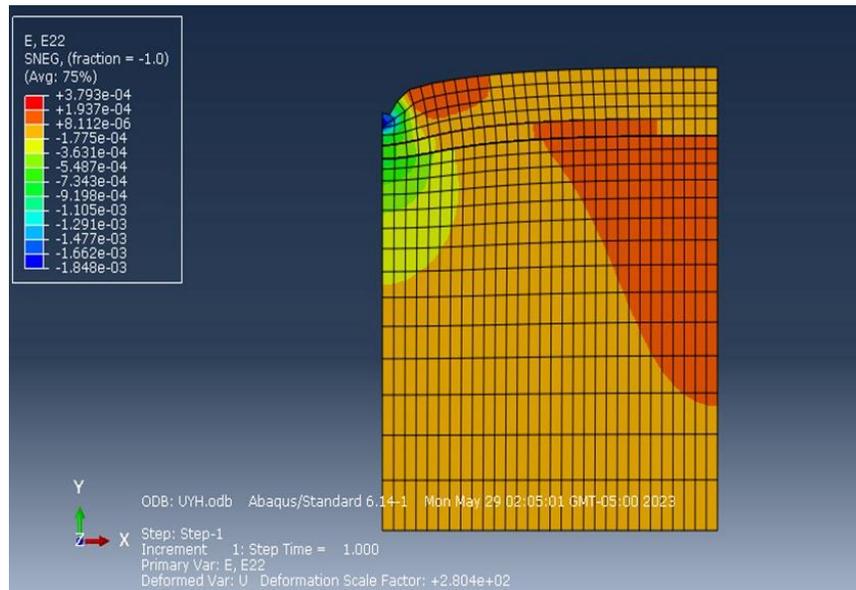
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



- *Nota:* - Capa de afirmado con refuerzo.

Figura 54.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



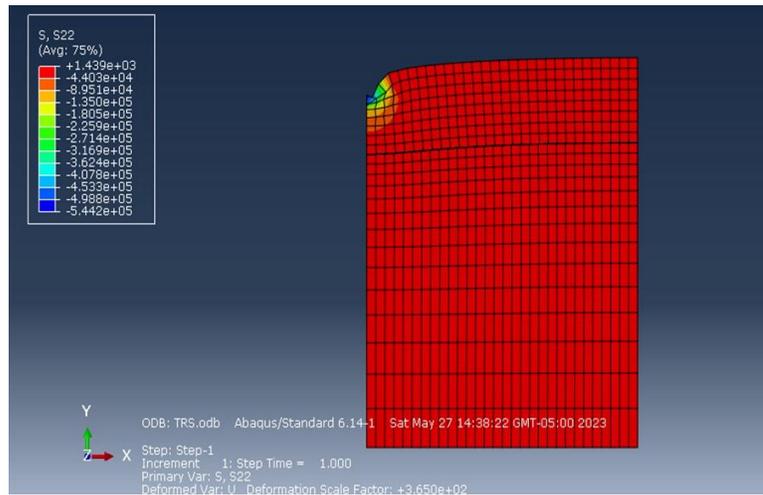
- *Nota:* - Capa de afirmado con refuerzo.

5.3.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 55.

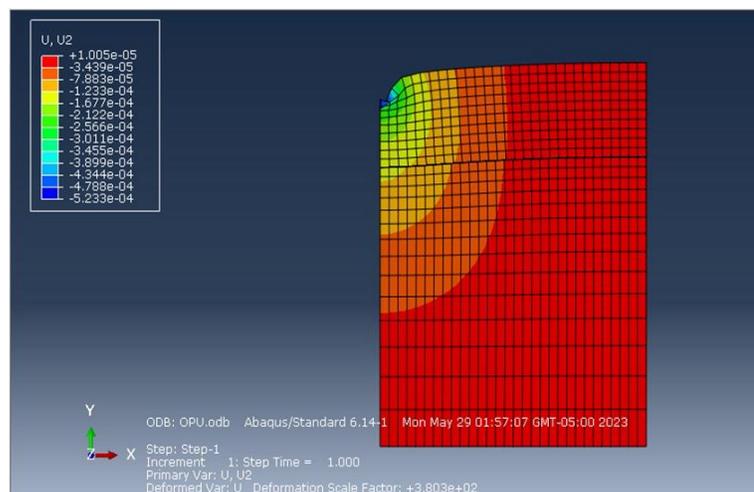
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 56.

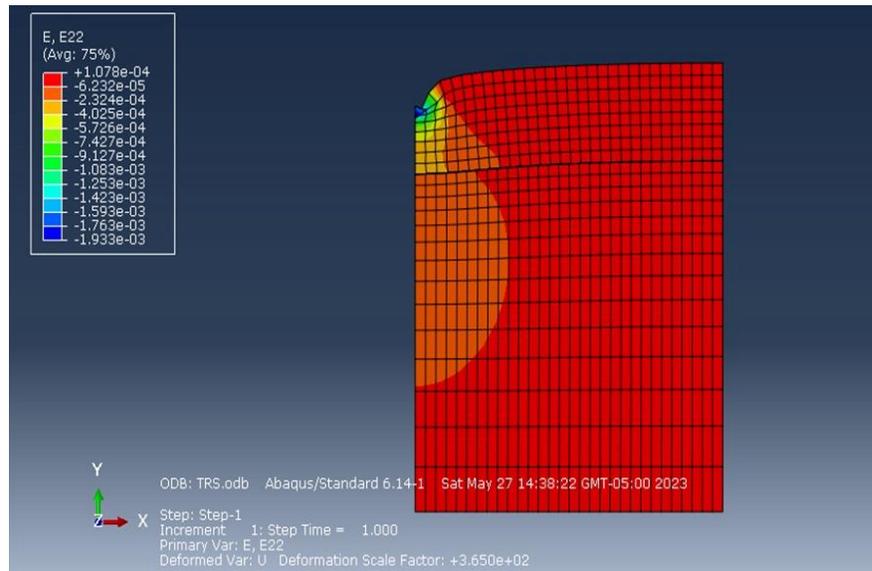
Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 57.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



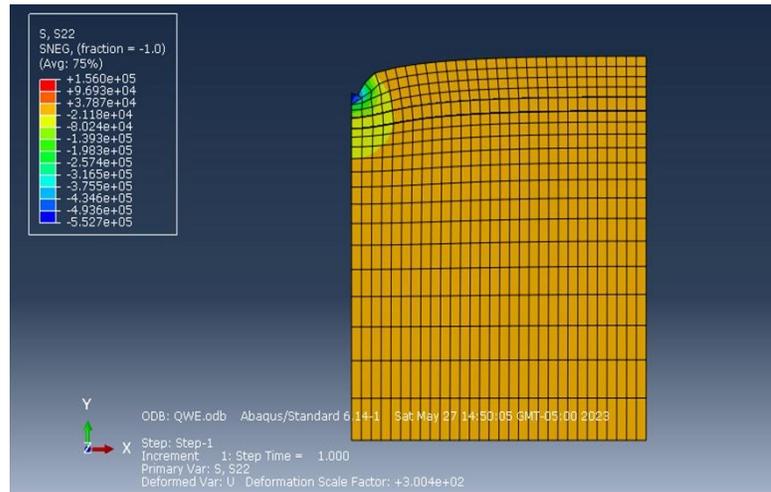
Nota: Fuente propia

5.3.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 58.

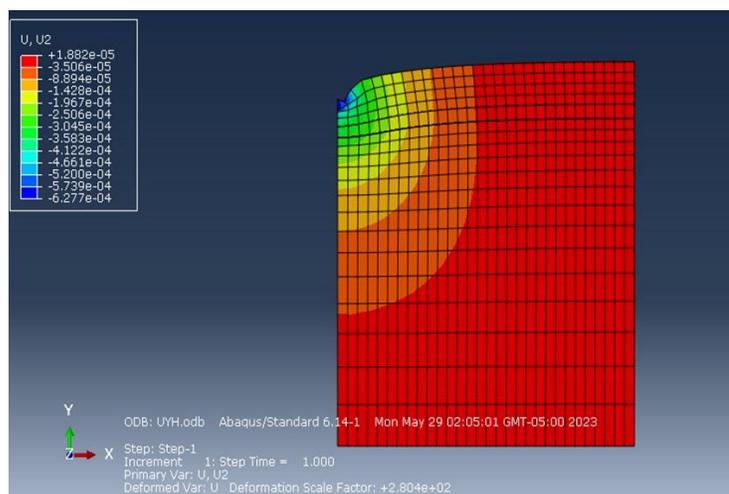
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 59.

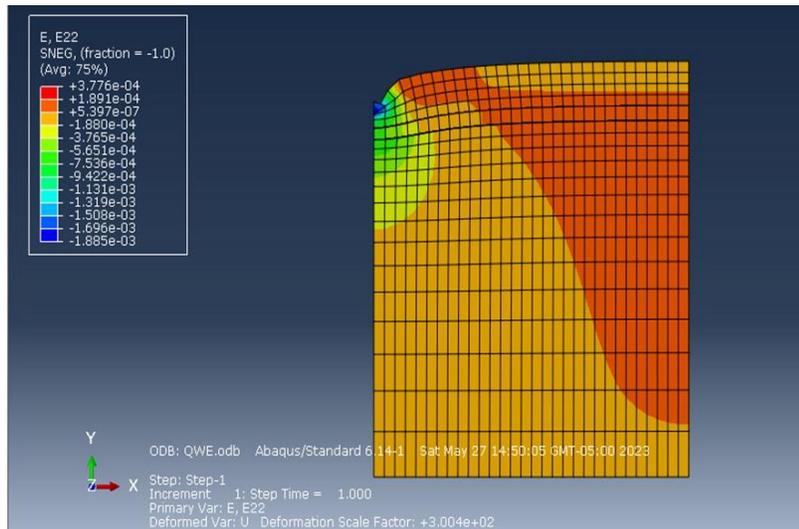
Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 60.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



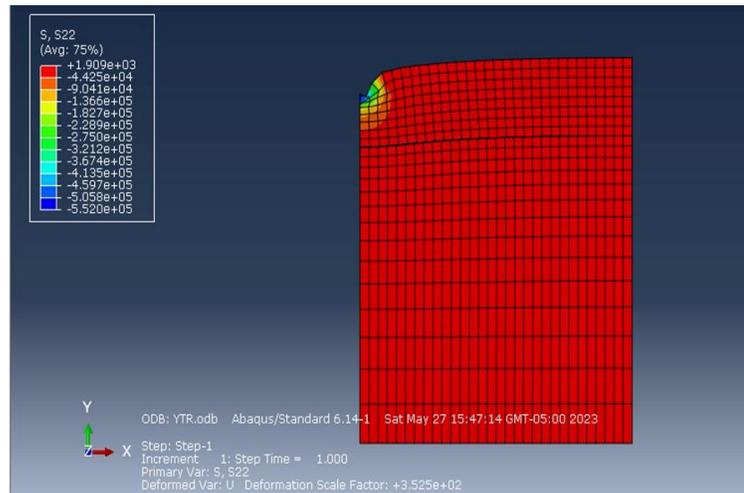
Nota: Fuente propia

5.3.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 61.

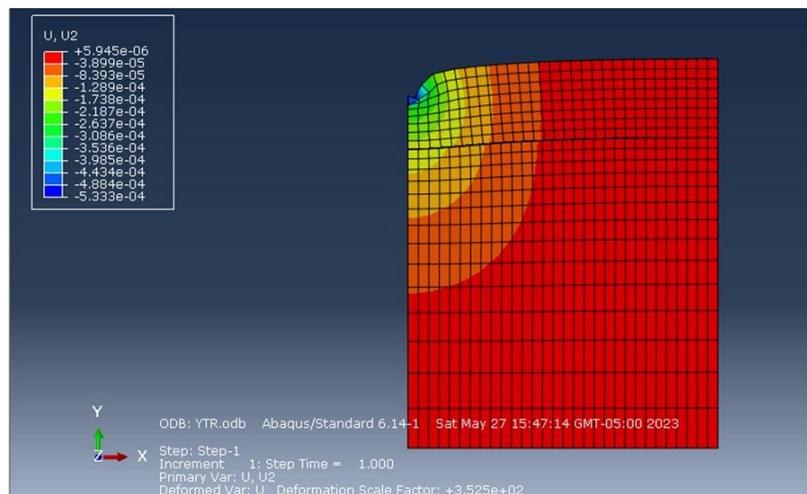
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



- *Nota:* Fuente propia

Figura 62.

Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



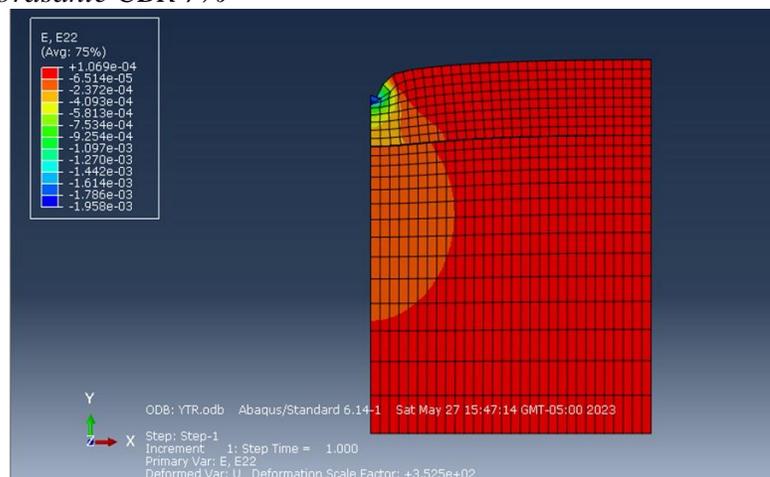
Nota: Fuente propia

5.3.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 63.

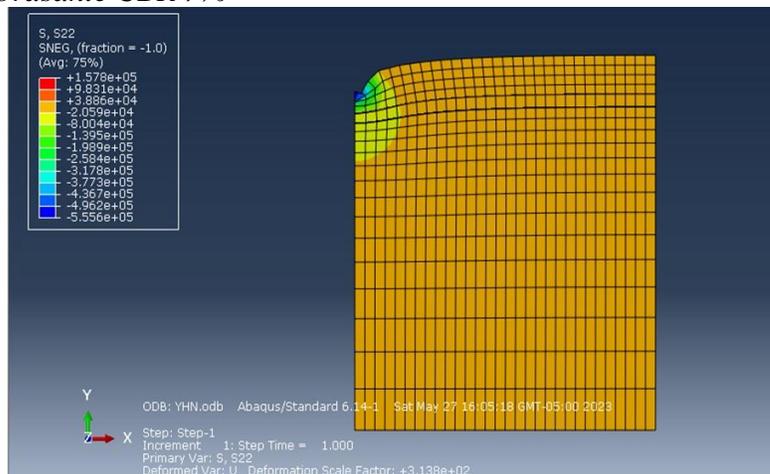
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 64.

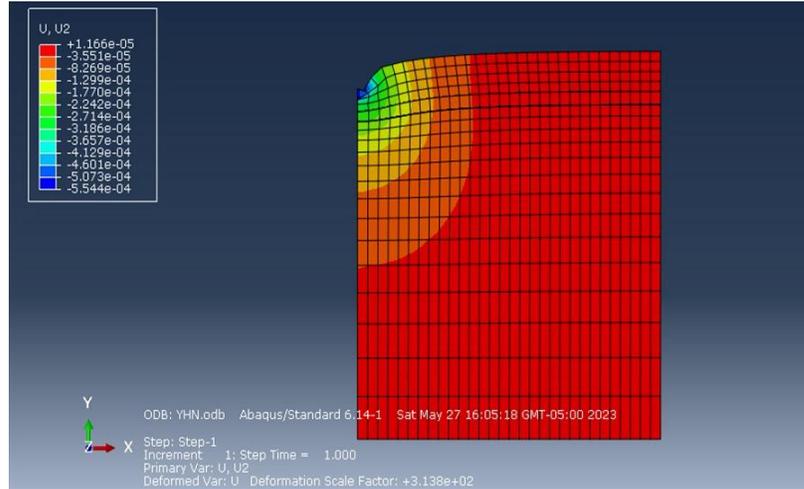
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 65.

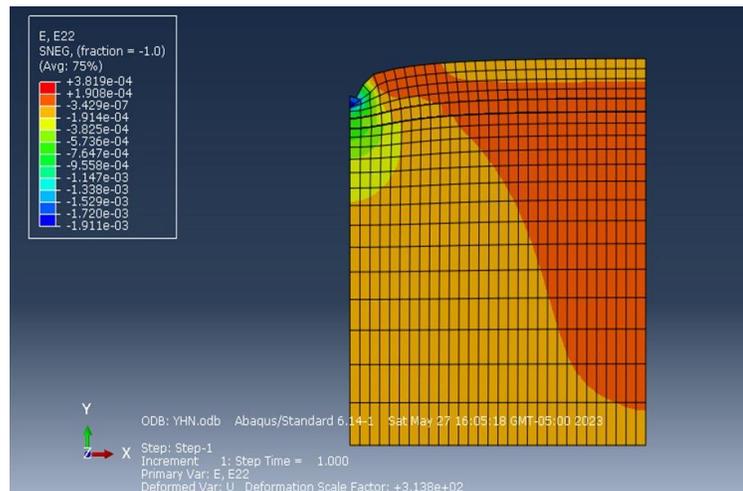
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 66.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado La Yunga – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

5.4. Resultados Modelaciones para Afirmados que no cumple con las especificaciones – Fuente Yescas:

Se presentan a configuración los modelos con los espesores de acuerdo con los diseños por cada uno de los métodos definidos en el Capítulo 4, para la fuente Yescas:

Tabla 27.

Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Yescas.

Subrasante	CBR (%)	Sin Refuerzo	Con Refuerzo
		INVIAS	Giroud - Han
		No Cumple	
		D	
A	3	49	25
B	5	42	25
C	7	38	24

Nota: Todos los espesores (d) se expresan en centímetros. Fuente propia

Se asignan las propiedades de cada una de las capas definidas dentro del modelo, tanto para la capa de subrasante y la capa de afirmado.

Los espesores para modelar sin refuerzo son los determinados por el diseño INVIAS y con refuerzo con geomalla con la metodología Giroud-Han.

Figura 67.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Yescas

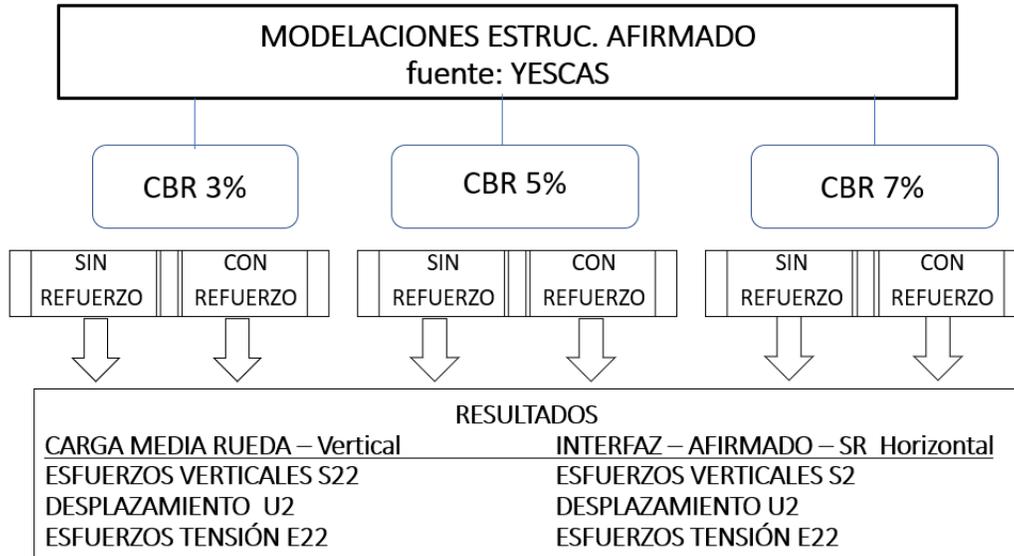
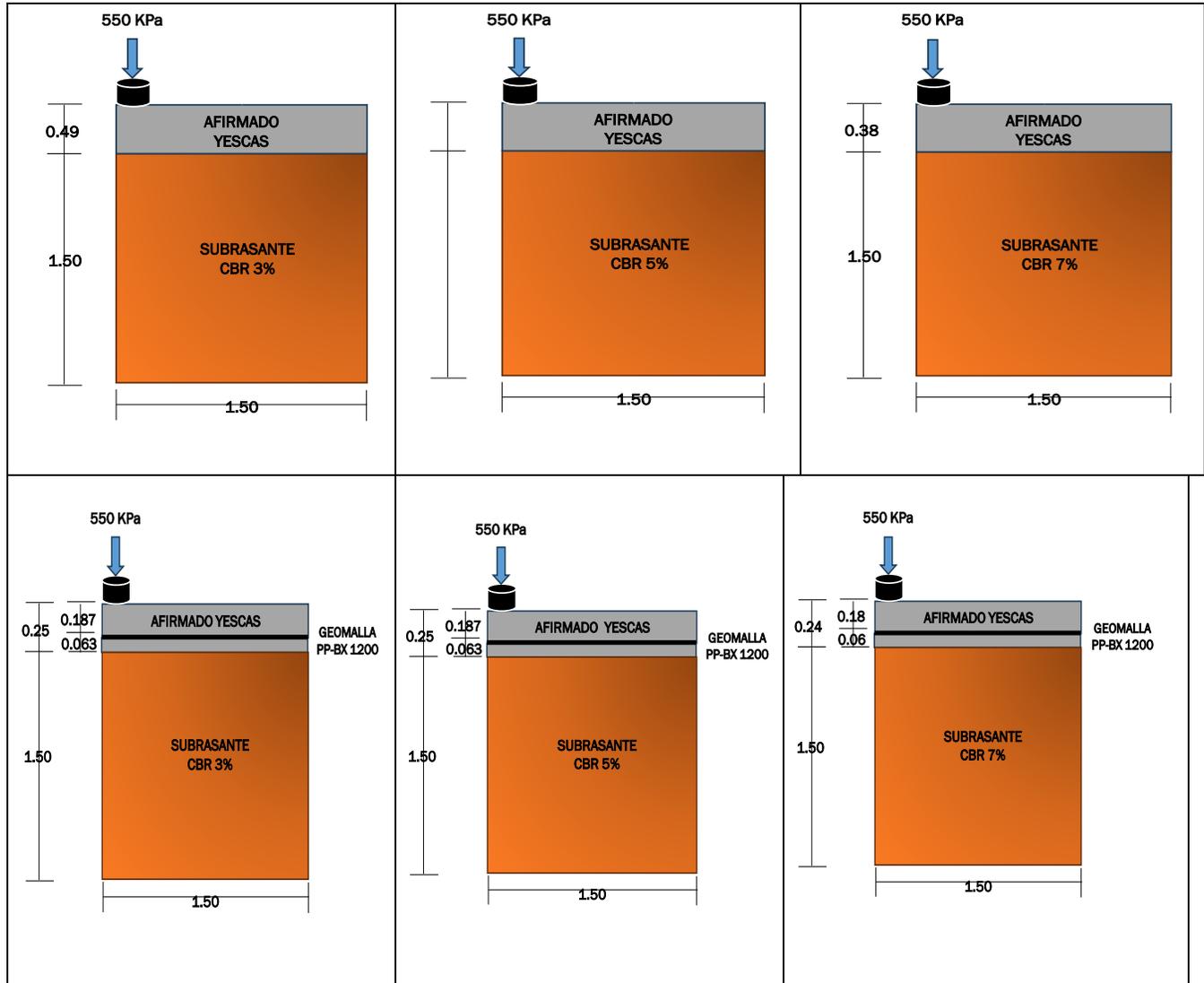


Figura 68.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Yescas



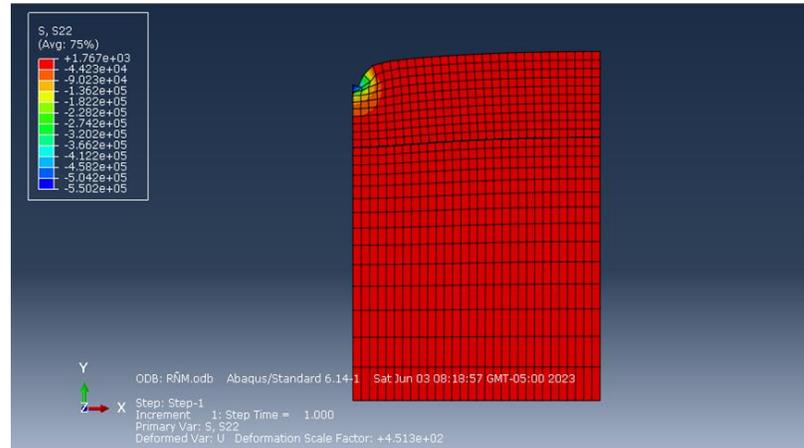
Nota: Fuente propia

5.4.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 69.

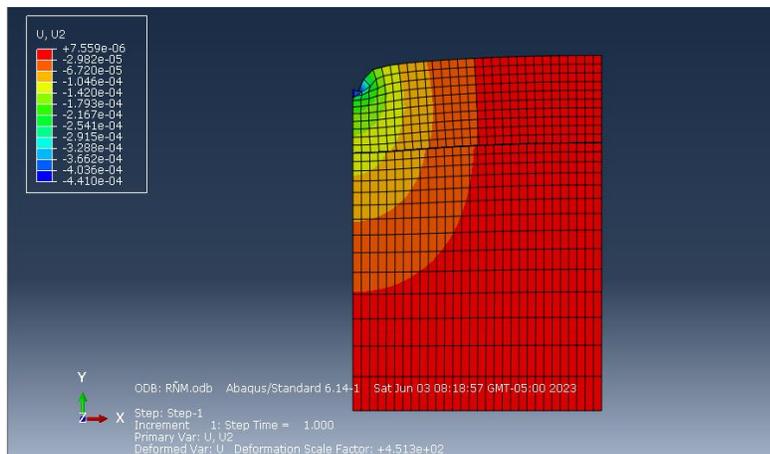
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 70.

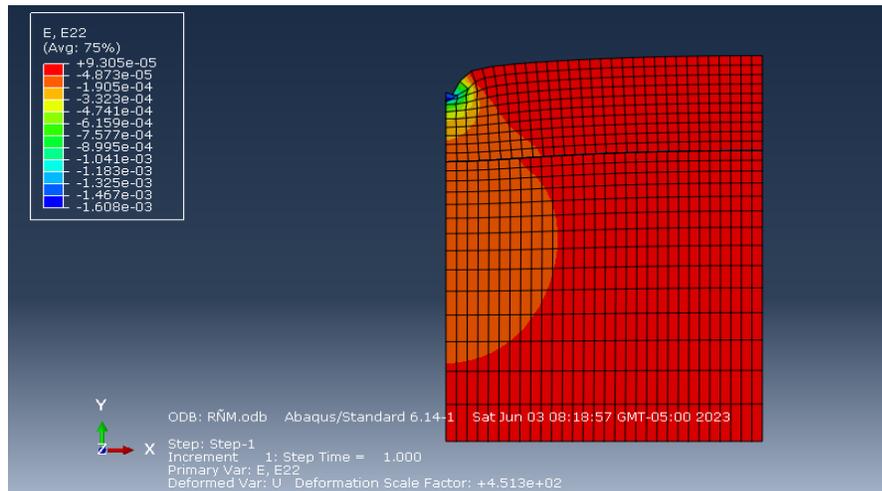
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Yescas– sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 71.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



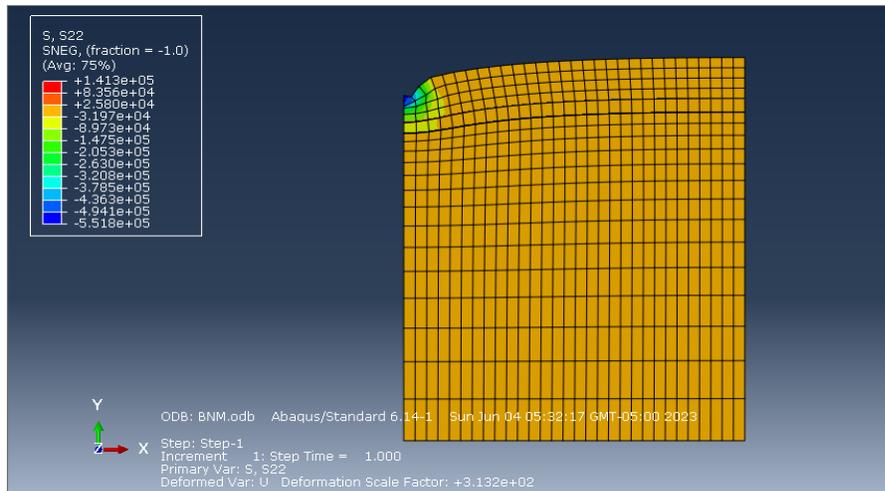
Nota: Fuente propia

5.4.2. Con Refuerzo CBR 3% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 72.

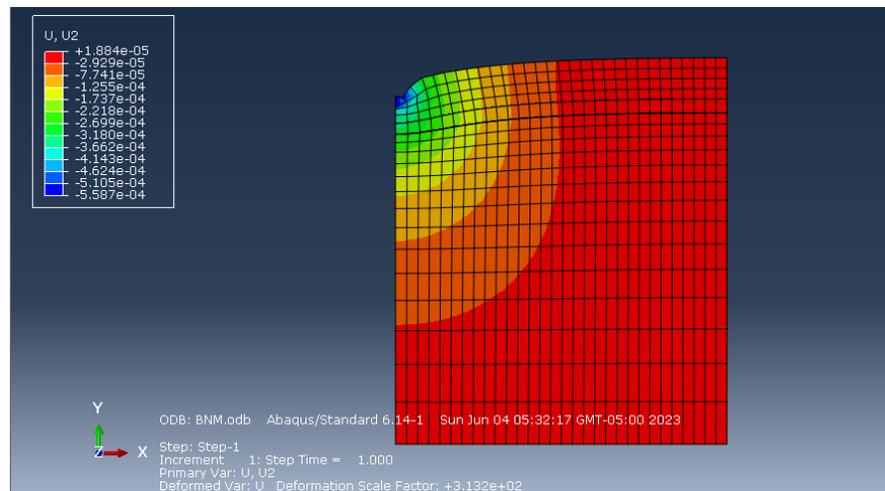
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 73.

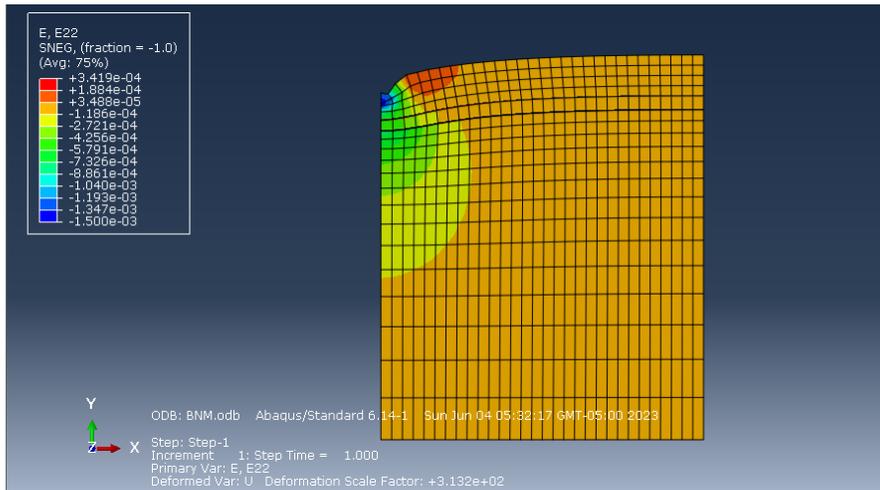
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 74.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



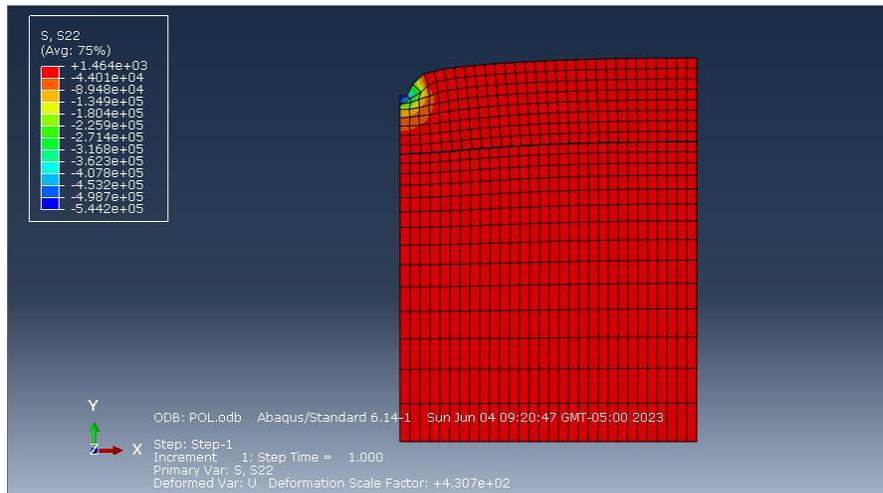
Nota: Fuente propia

5.4.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 75.

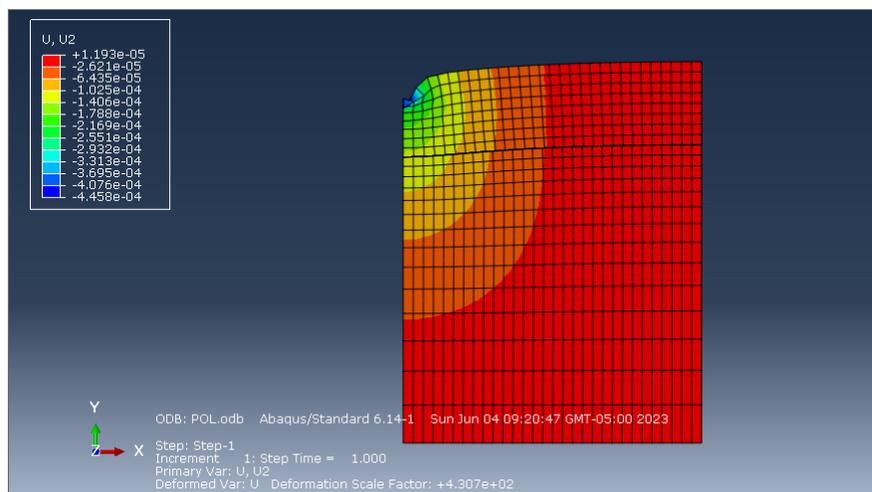
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 76.

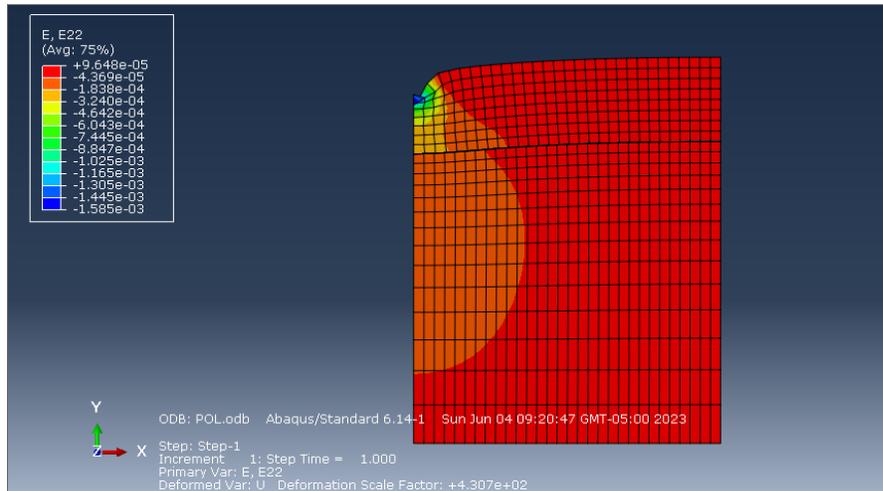
Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 77.

*Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo
– Subrasante CBR 5%*



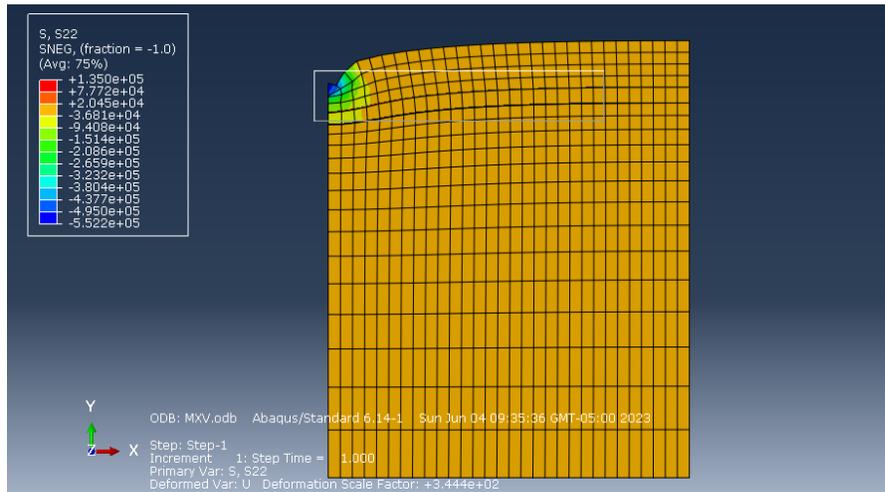
Nota: Fuente propia

5.4.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 78.

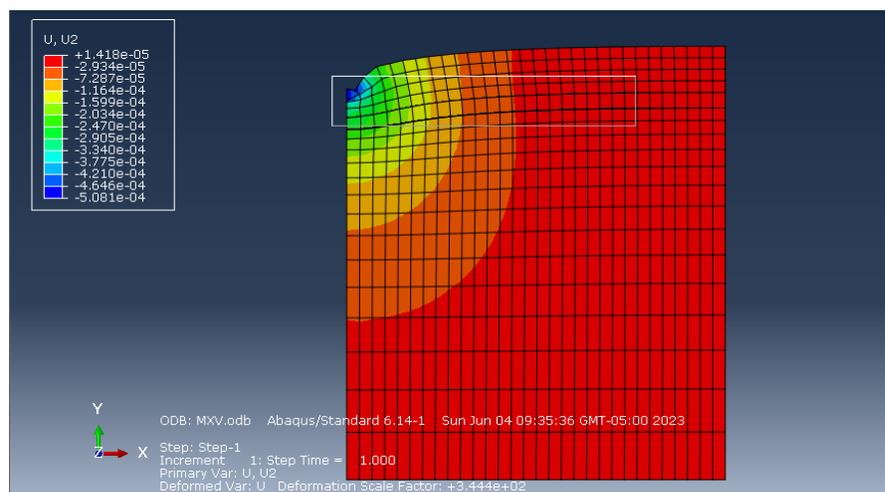
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 79.

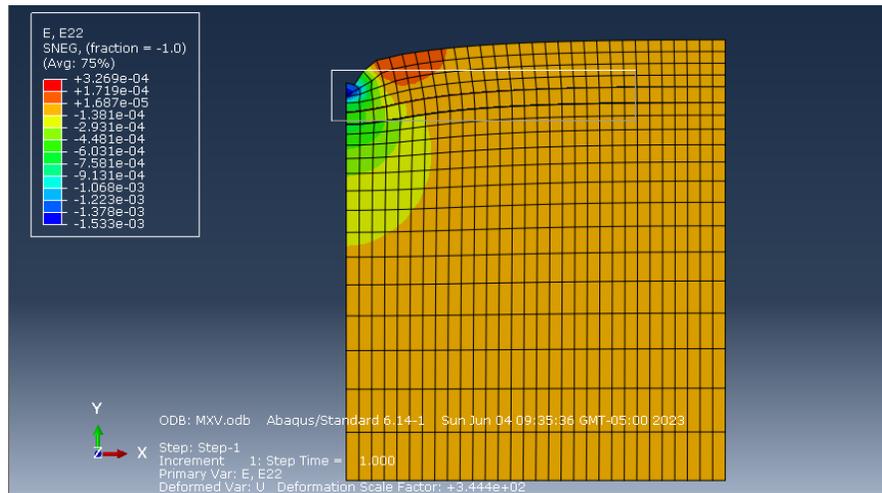
Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 80.

*Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo
– Subrasante CBR 5%*



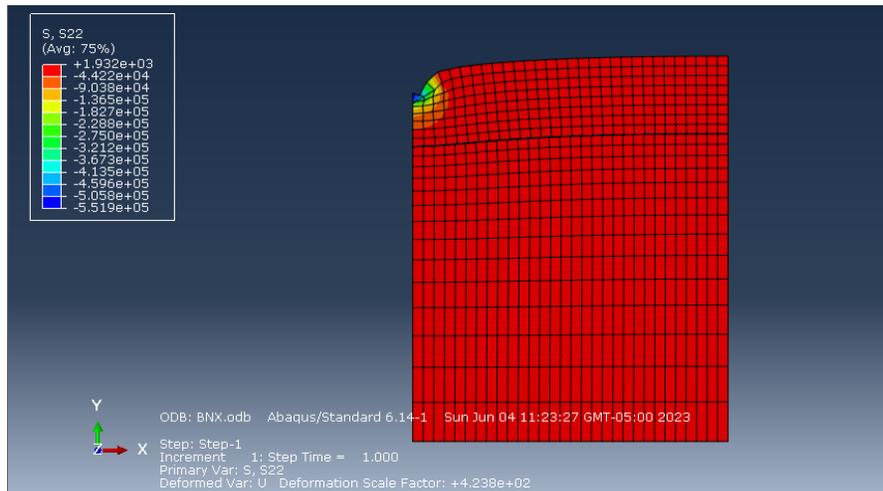
Nota: Fuente propia

5.4.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación los resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 81.

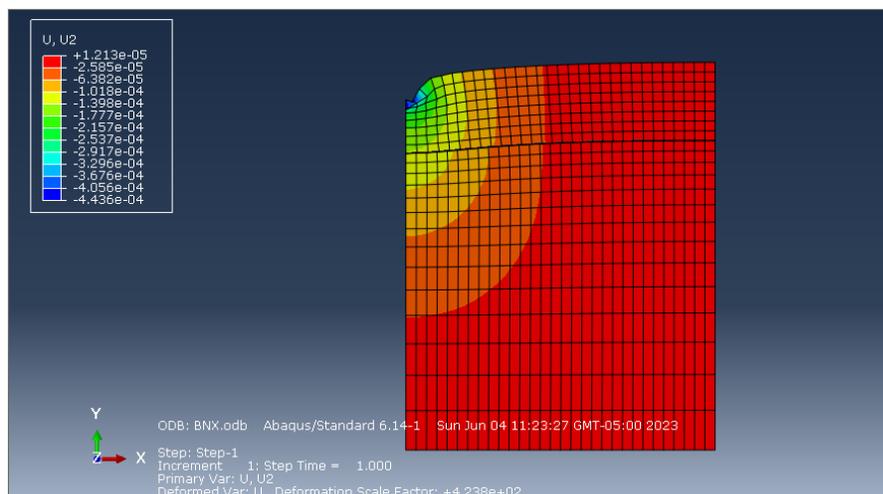
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



- *Nota:* Fuente propia

Figura 82.

Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



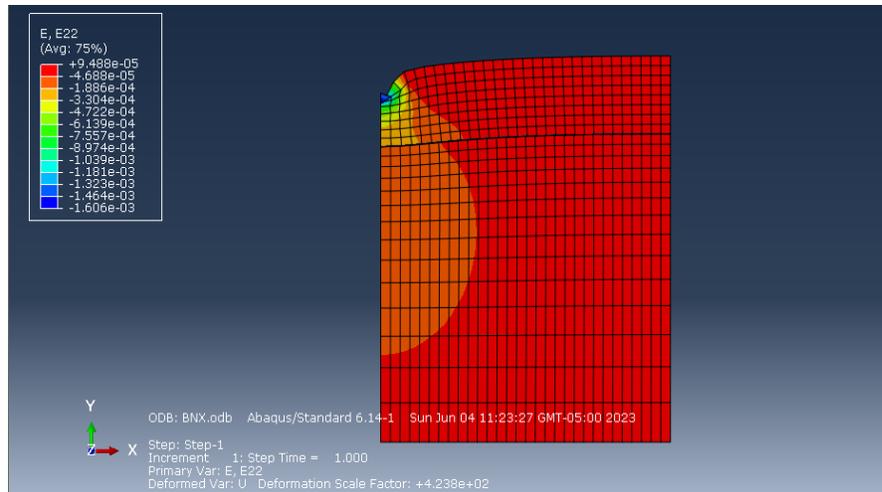
Nota: Fuente propia

5.4.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 83.

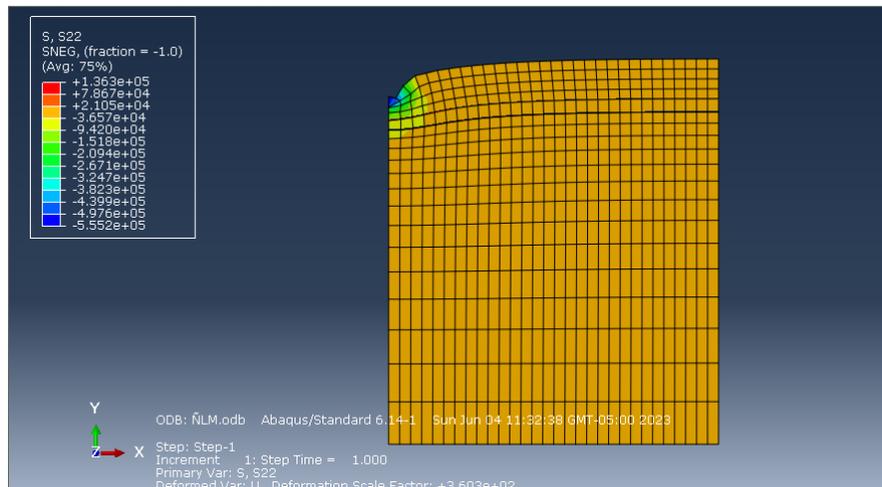
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Yescas – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 84.

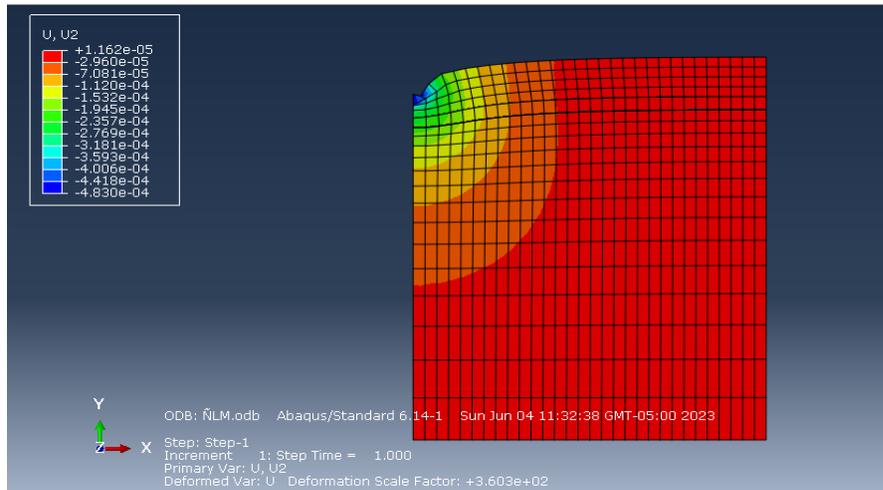
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 85.

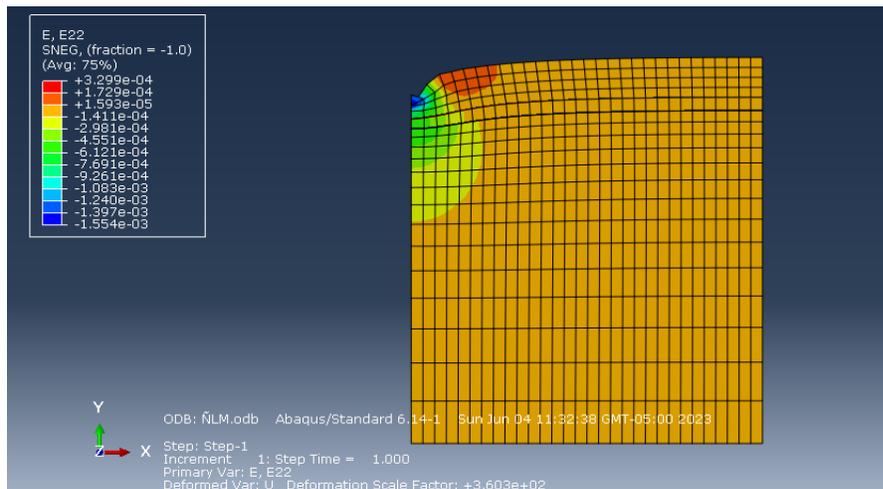
*Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Yescas – con Refuerzo –
Subrasante CBR 7%*



Nota: Fuente propia

Figura 86.

*Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Yescas –con
Refuerzo – Subrasante CBR 7%*



Nota: Fuente propia

5.5. Resultados Modelaciones para Afirmados que no cumple con las especificaciones – Fuente Minatruk:

Se presentan a configuración los modelos con los espesores de acuerdo con los diseños por cada uno de los métodos definidos en el Capítulo 4, para la fuente Minatruk:

Tabla 28.

Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Minatruk:

Subrasante	CBR (%)	Sin Refuerzo	Con Refuerzo
		INVIAS	Giroud - Han
		No Cumple	
D	d		
A	3	49	25
B	5	42	25
C	7	38	24

Nota: Todos los espesores (d) se expresan en centímetros. Fuente propia

Se asignan las propiedades de cada una de las capas definidas dentro del modelo, tanto para la capa de subrasante y la capa de afirmado.

Los espesores para modelar sin refuerzo son los determinados por el diseño INVIAS y con refuerzo con geomalla con la metodología Giroud-Han.

Figura 87.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Minatruk.

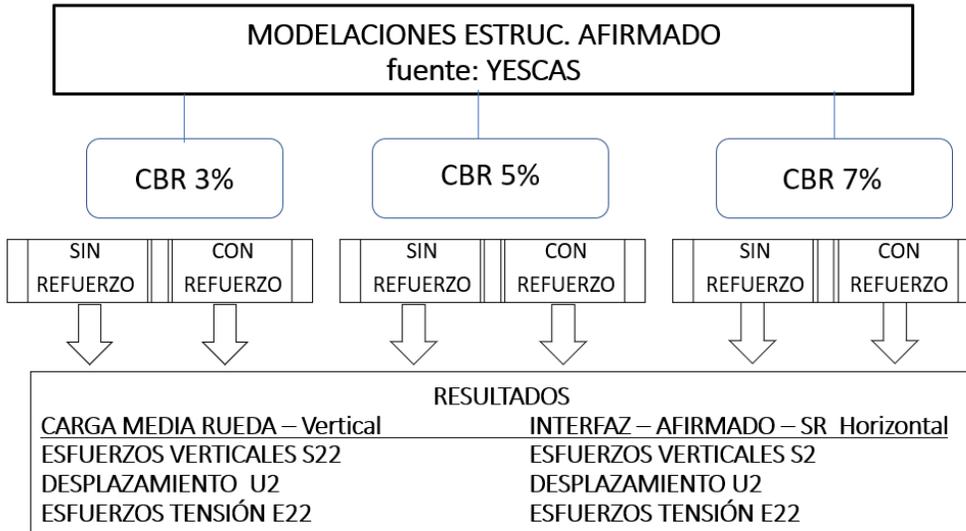
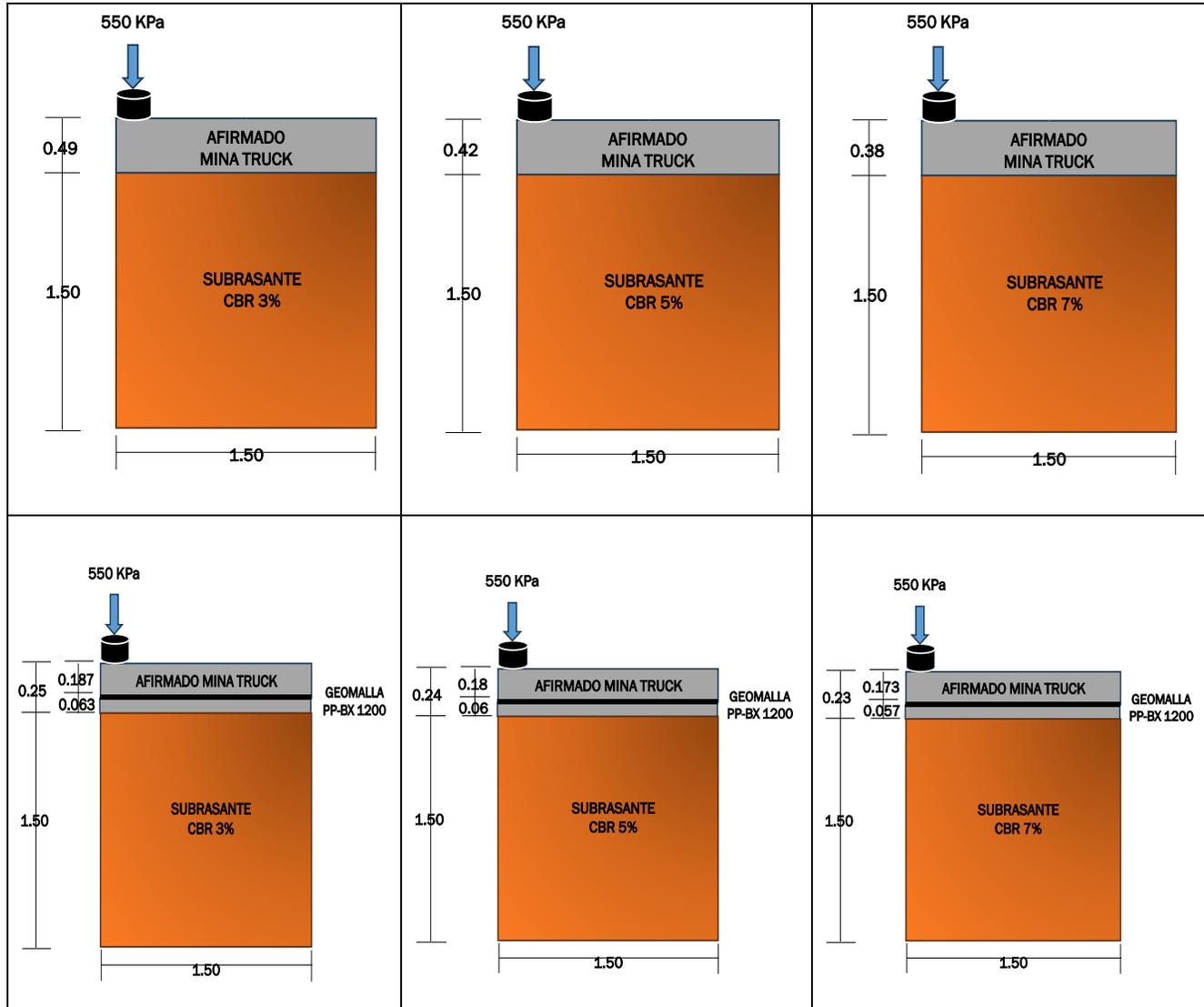


Figura 88.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Minatruk.



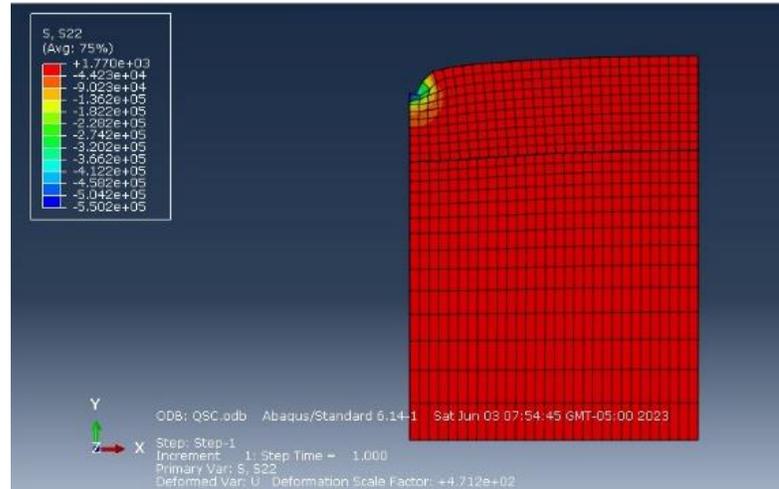
Nota: Fuente propia

5.5.1. Sin Refuerzo CBR 3% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 89.

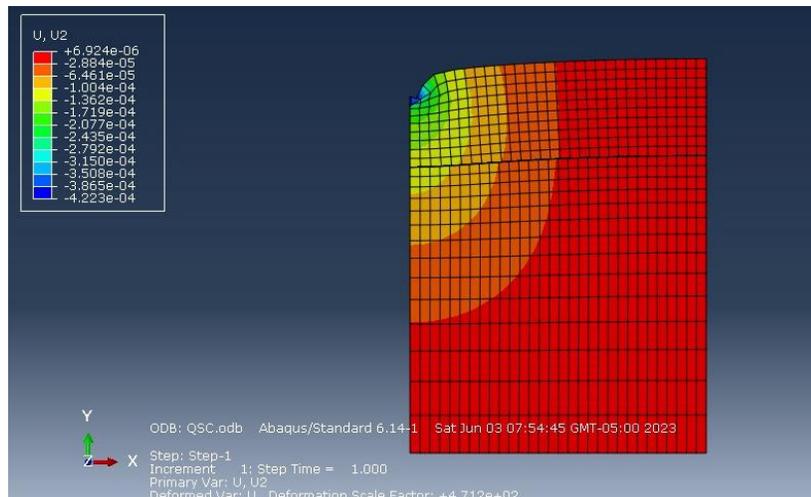
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Minatruk– sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 90.

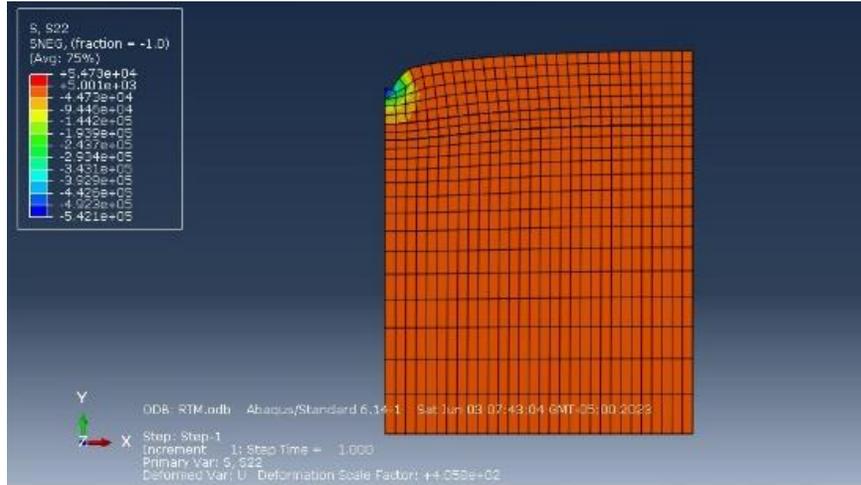
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 92.

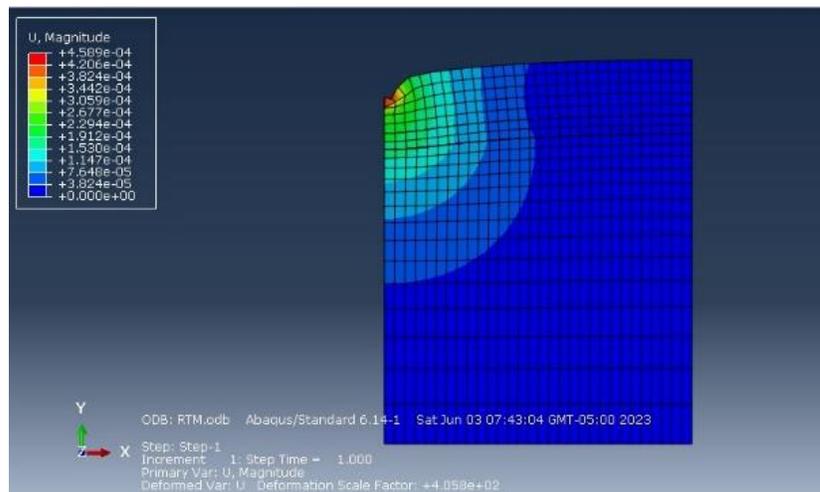
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 93.

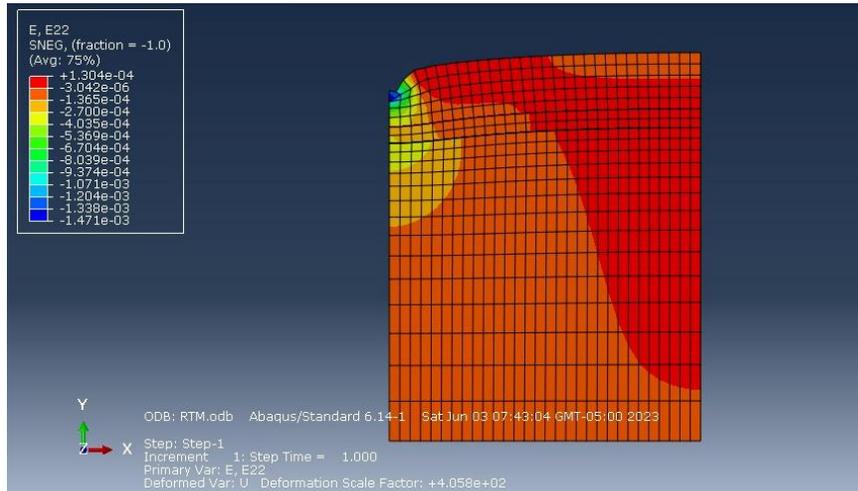
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos Verticales - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



Nota: Fuente propia

Figura 94.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 3%



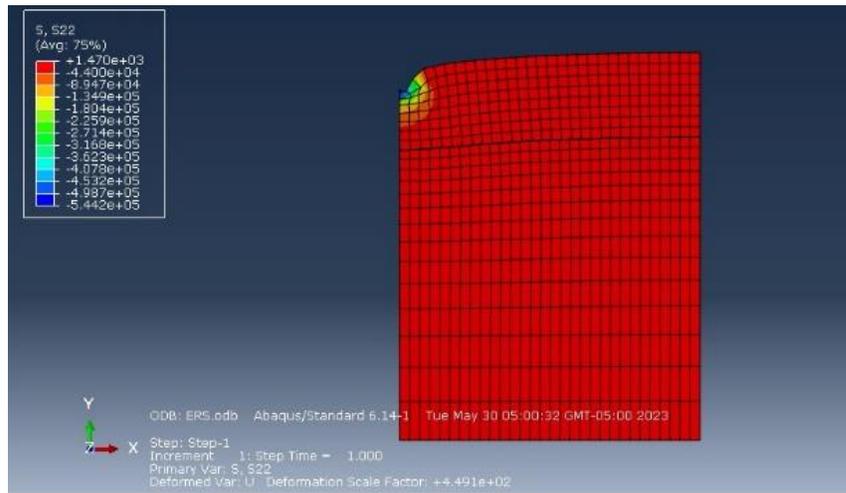
Nota: Fuente propia

5.5.3. Sin Refuerzo CBR 5% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 42 cm, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 95.

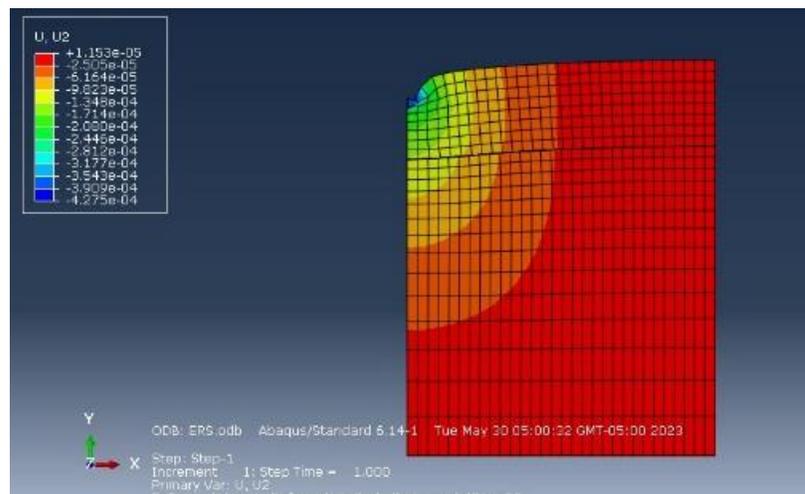
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 96.

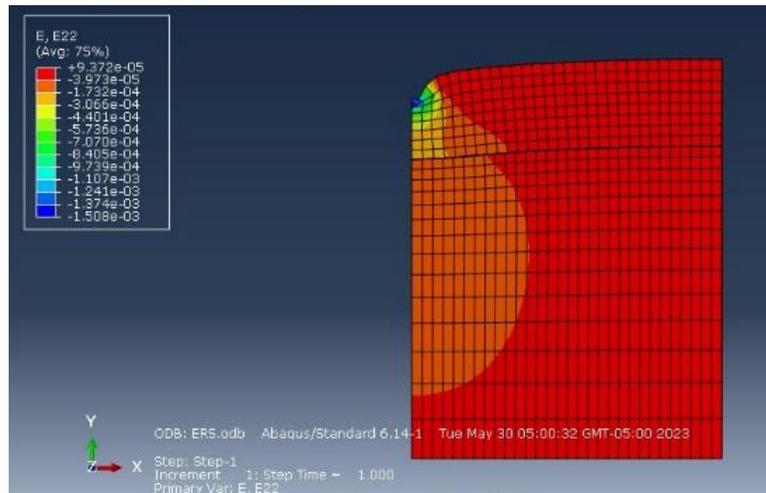
Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 97.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 5%



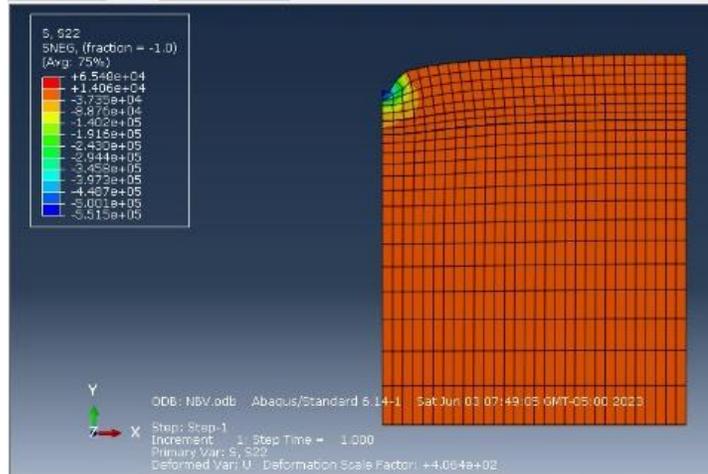
Nota: Fuente propia

5.5.4. Con Refuerzo CBR 5% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 98.

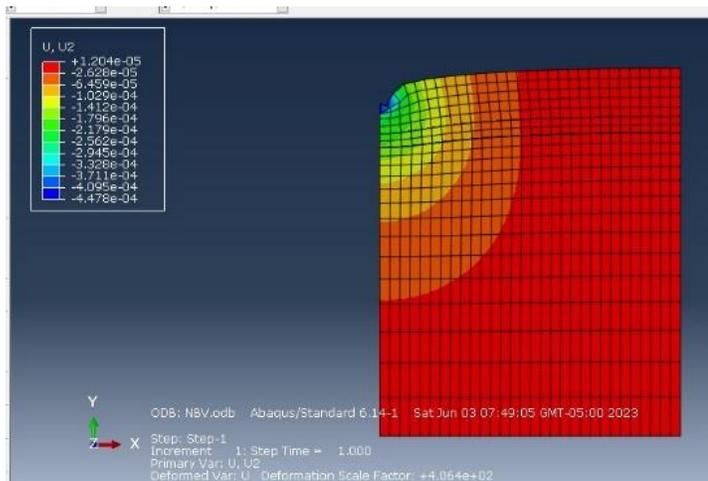
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 99.

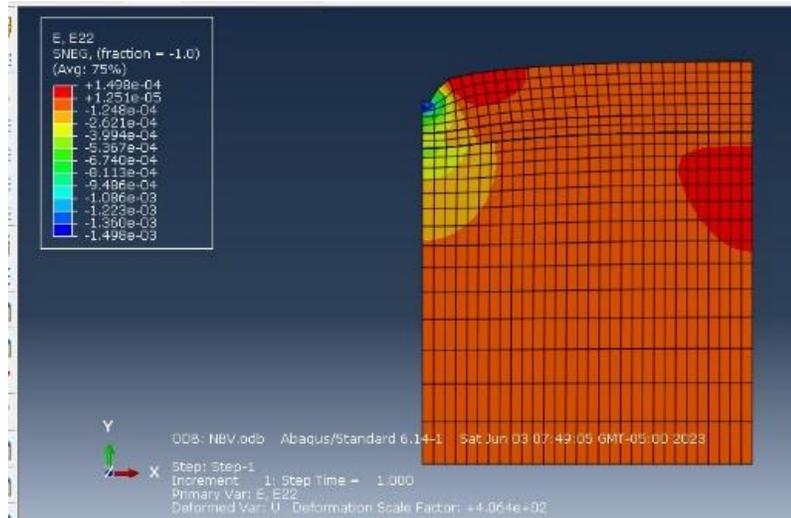
Resultado Gráfico Resultados Desplazamiento Vertical - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



Nota: Fuente propia

Figura 100.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Tensión - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 5%



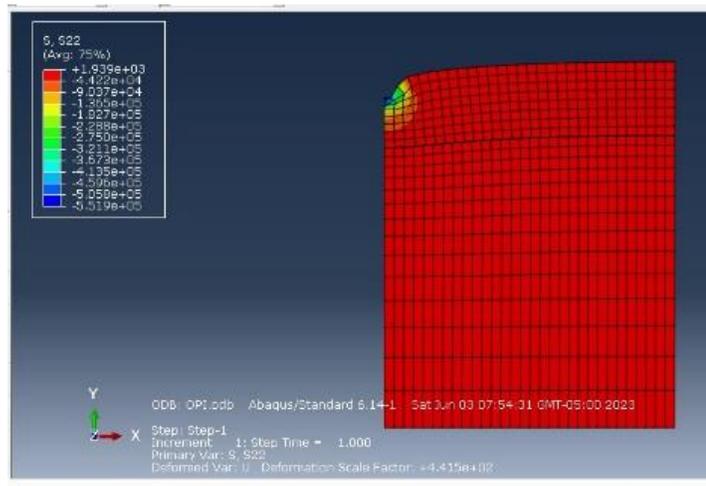
Nota: Fuente propia

5.5.5. Sin Refuerzo CBR 7% - Diseño Invias.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Invias es de 35 cm, para lo cual se presenta a continuación los resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 101.

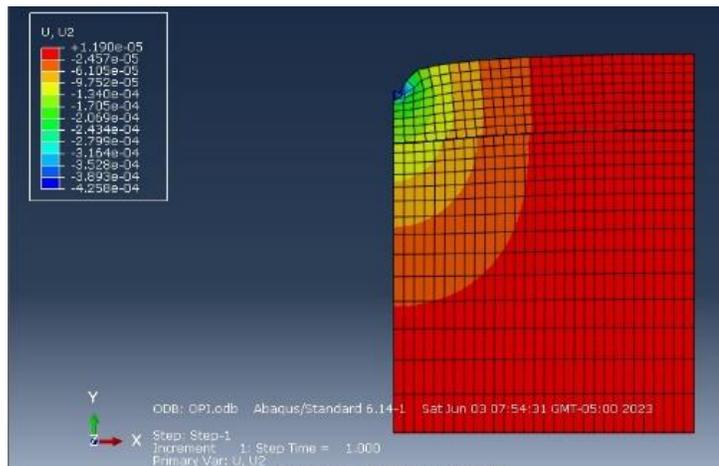
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



- *Nota:* Fuente propia

Figura 102.

Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



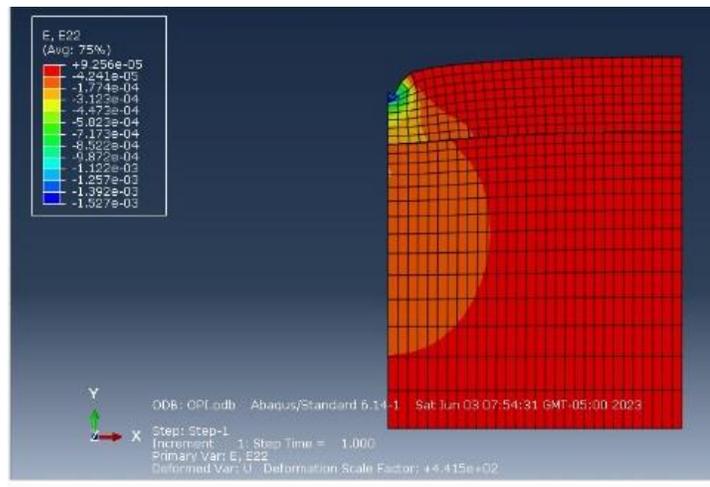
Nota: Fuente propia

5.5.6. Con Refuerzo CBR 7% - Giroud – Han.

El espesor de la capa de afirmado según el diseño Método Giroud – Han, con la geomalla a tres cuartos de capa, para lo cual se presenta a continuación lo resultados arrojados por el Software Abaqus.

Figura 103.

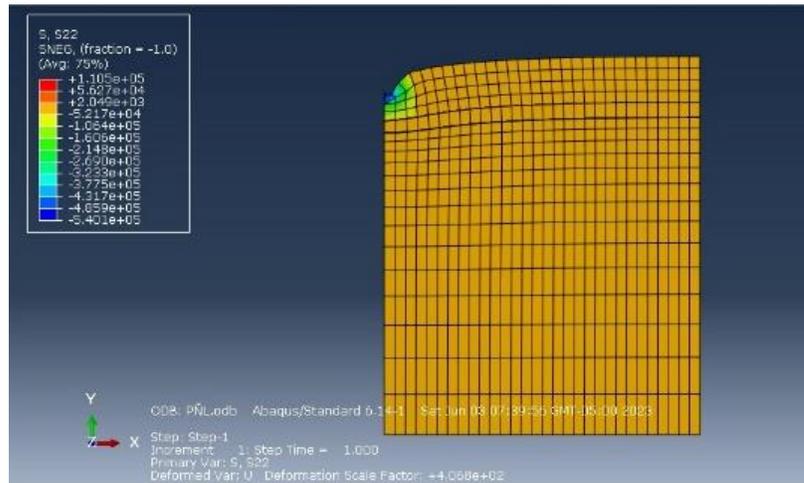
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Minatruk – sin Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 104.

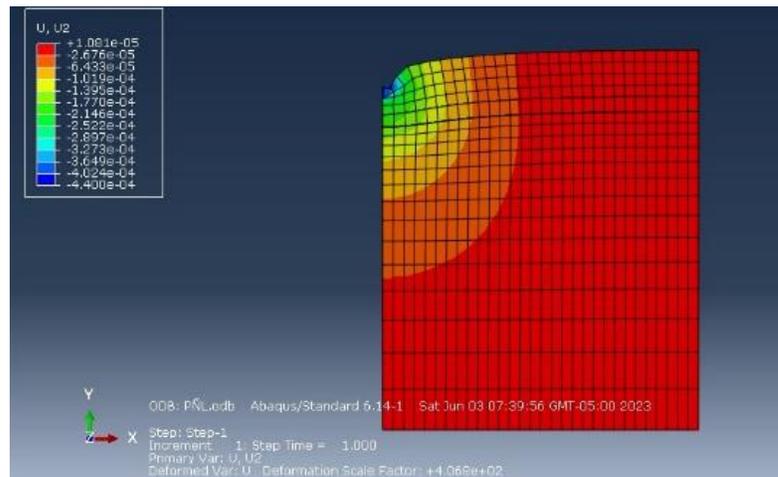
Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos Verticales - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 105.

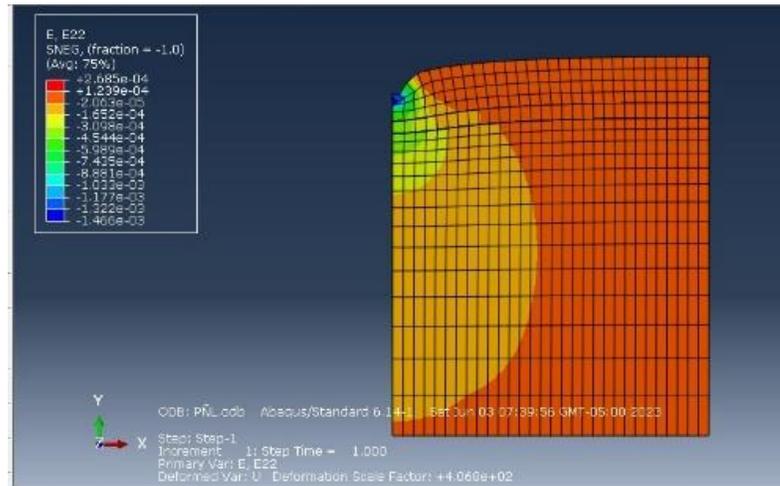
Resultado Gráfico Resultados Desplazamientos - Capa Afirmado Minatruk – con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

Figura 106.

Resultado Gráfico Resultados Esfuerzos de Tensión - Capa Afirmado Minatruk –con Refuerzo – Subrasante CBR 7%



Nota: Fuente propia

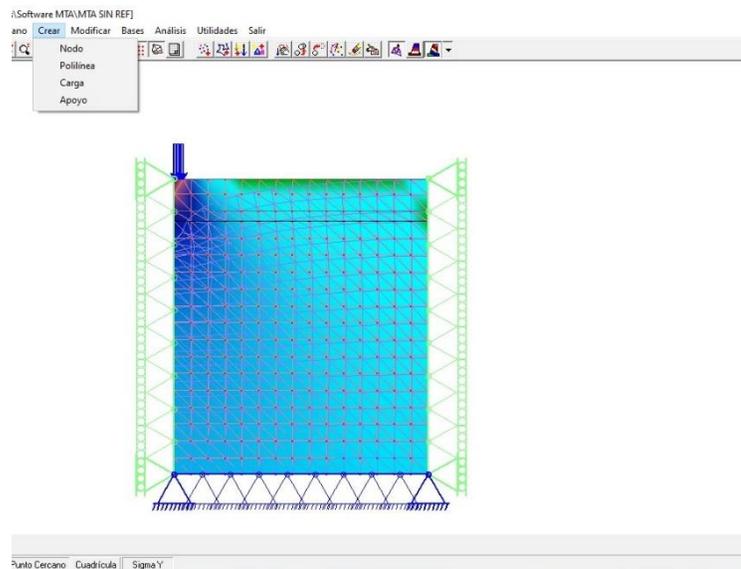
5.6. Utilización Software MTA.

El software MTA el cual fue desarrollado por la ingeniera Luz Eneida Botina como trabajo de grado para la maestría en ingeniería y el programador fue el Ingeniero Efrain Solano, programa desarrollado para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en muros de tierra reforzada con geosintético, utilizando el Método de los Elementos Finitos, en el cual se puede modelar la estructura de pavimento con afirmado convencional y con la capa de afirmado reforzada con geomalla. (Solano Efrain, 2009). Se opta por utilizar este software para motivar el uso de herramientas desarrolladas por la Universidad del Cauca y para comparación de los resultados obtenidos previamente con ABAQUS.

Se realizó la modelación de la estructura de afirmado convencional sin refuerzo en el programa MTA donde se definen las propiedades de la cada capa, así como la carga.

Figura107.

Creación del modelo a evaluar en MTA



Nota: Fuente propia

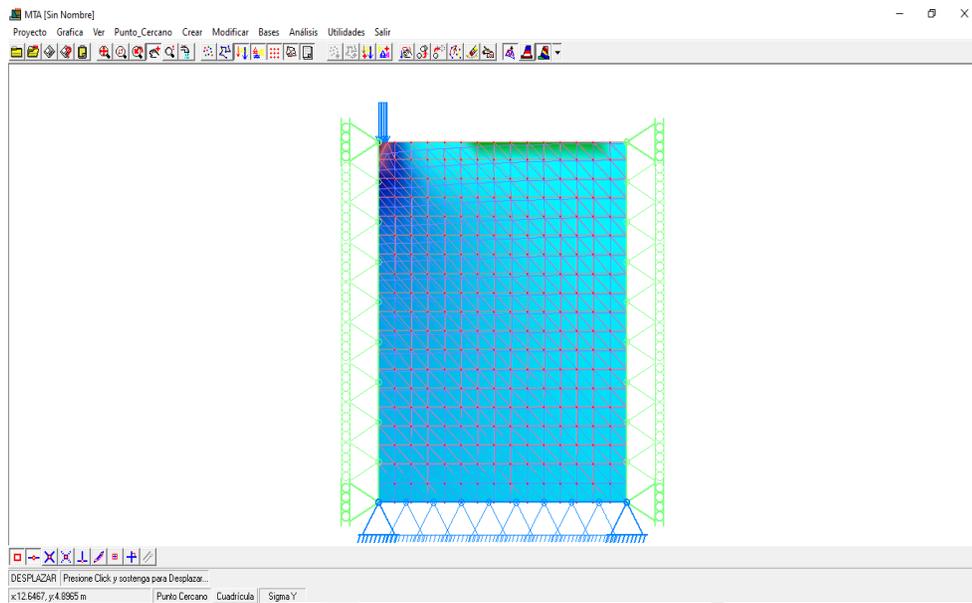
Una vez modelada la estructura, se definen los apoyos en las fronteras de la estructura, para las restricciones en los ejes X y Y. Para luego crear la malla de elementos finitos en la estructura, el cual va a ser objeto de cálculo de las deformaciones y esfuerzos por efectos de la carga definida.

Los resultados obtenidos de la modelación de las estructuras tanto convencional como con refuerzo con geomalla, los cuales se resumen en las siguientes gráficas

La primera gráfica es el cálculo de los desplazamientos en la estructura en el plano xy.

Figura108.

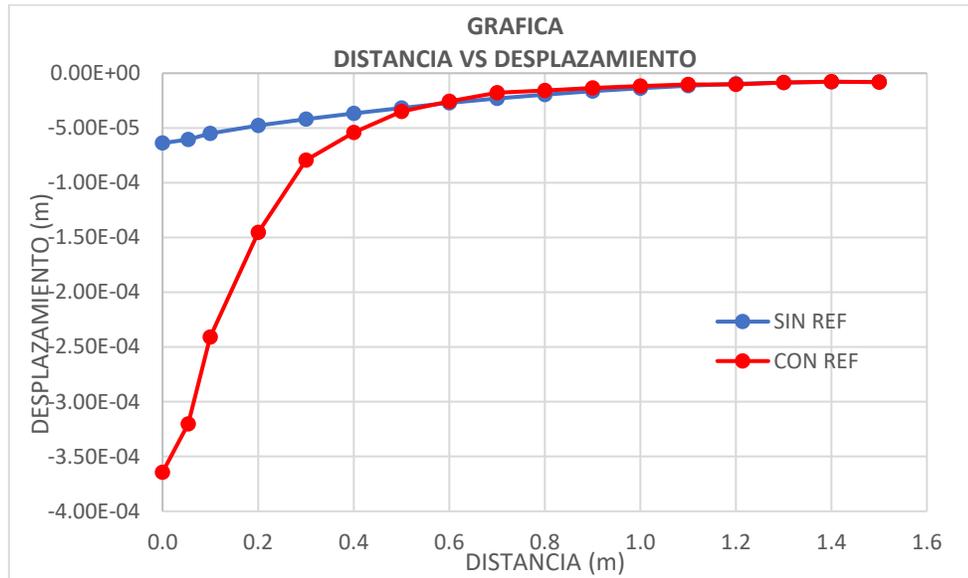
Respuesta del sistema ante evaluación de desplazamiento en software MTA



Nota: Fuente propia

Figura109.

Desplazamiento obtenido en el plano XY vs distancia

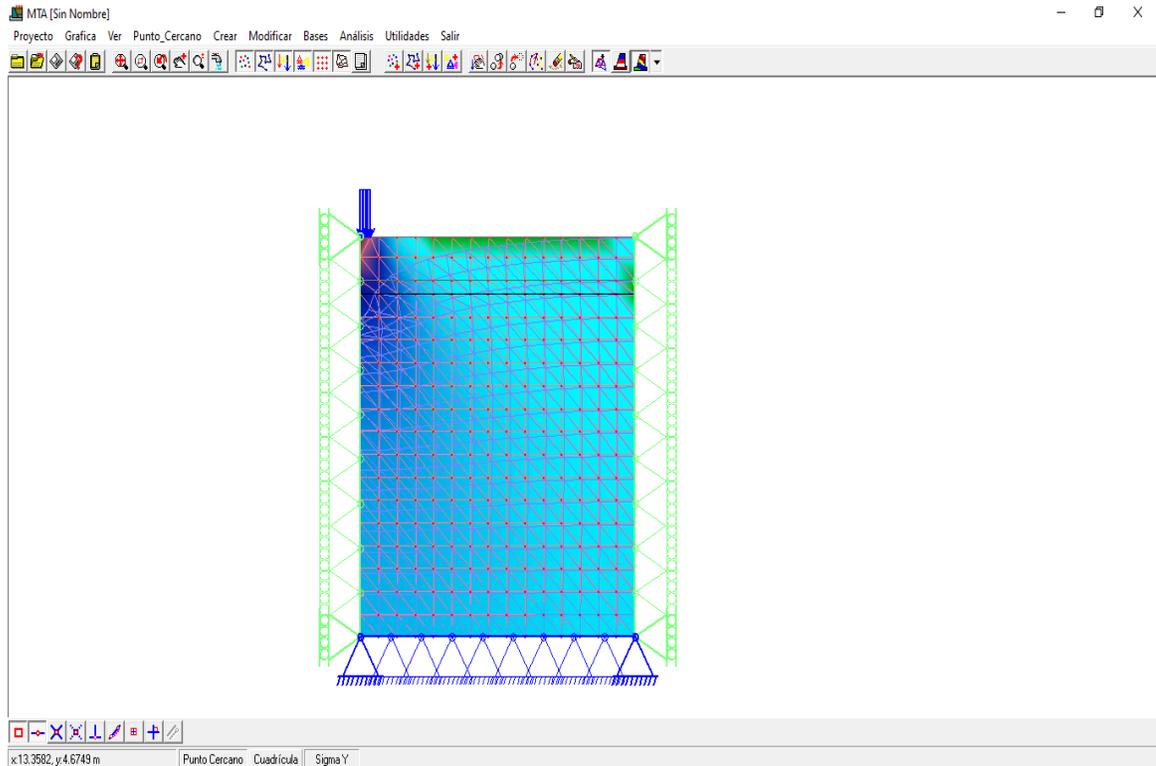


Nota: Fuente propia

La segunda gráfica es la representación del cálculo de los esfuerzos verticales.

Figura110.

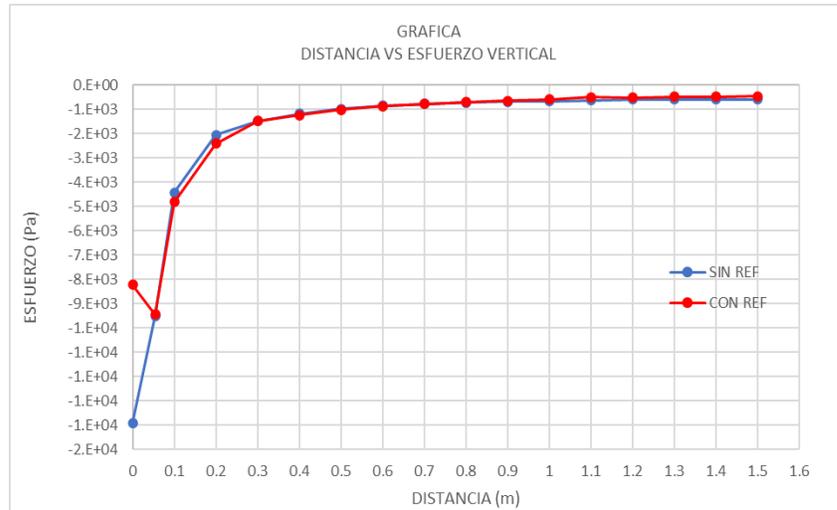
Respuesta del sistema ante la evaluación del cálculo de esfuerzo verticales



Nota: Fuente propia

Figura 111.

Esfuerzo vertical vs distancia

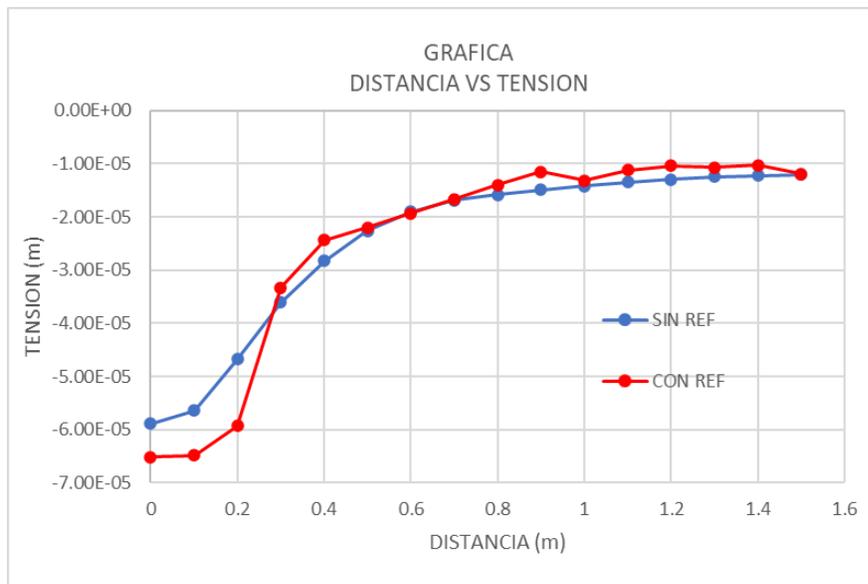


Nota: Fuente propia

La tercera gráfica es la representación del cálculo de los esfuerzos verticales.

Figura 112.

Tensión vs distancia



Nota: Fuente propia

6. Análisis de Resultados

En el presente capítulo se presentan los resultados de las modelaciones realizadas para dos fuentes de materiales de afirmado, clasificadas de manera opuesta según las especificaciones INVIAS. En primer lugar, Agregados Puracé, que, según la caracterización realizada, cumple con los requerimientos de la norma para su uso como capa de afirmado. Por otro lado, cantera la Yunga, la cual se determinó que no posee las propiedades necesarias para ser considerada apta como fuente para afirmado según el artículo 311 del INVIAS. Se realizó el análisis de tres parámetros que se consideraron como los más relevantes para definir el comportamiento de la estructura, esfuerzo vertical, desplazamiento vertical y esfuerzo tensional. Se obtuvieron las gráficas correspondientes y se evaluó la respuesta de la estructura de afirmado sin refuerzo y con refuerzo con geomalla biaxial.

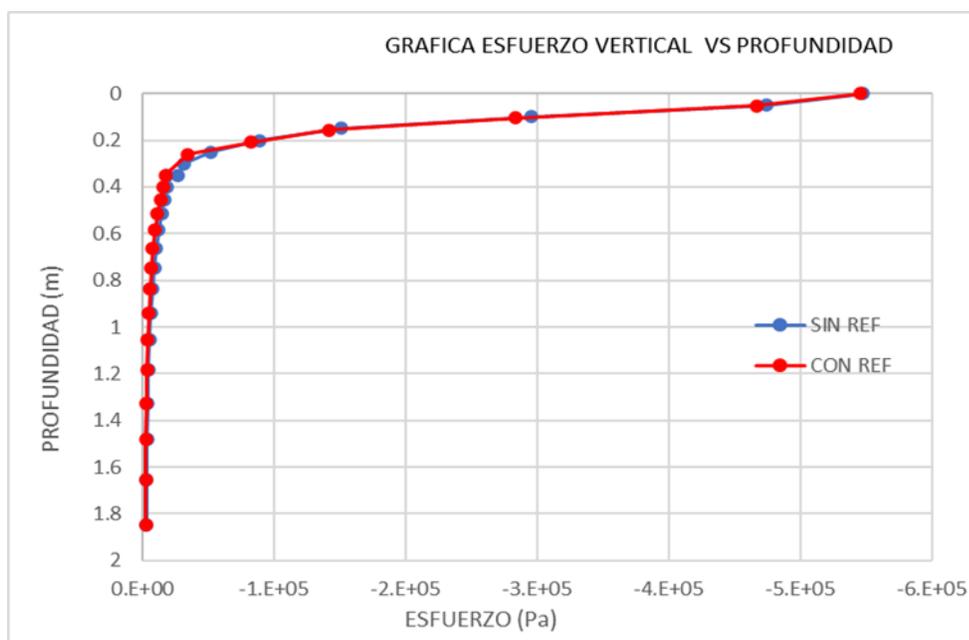
Las gráficas obtenidas de acuerdo con las modelaciones realizadas corresponden a las determinadas en el eje y (verticales) y en la interfaz (afirmado – subrasante), para lo cual se presentan a continuación:

A continuación, se presentan las gráficas comparativas en cada uno de los tres parámetros tomadas en el eje y el punto de referencia es en medio de las dos llantas.

Comparación de Esfuerzos Verticales vs Profundidad para la Estructura para un CBR 3%.

Gráfica 5.

Gráfica Comparativa Esfuerzo Vertical vs Profundidad:



Nota: Gráfico comparativo Esfuerzos de estructuras sin refuerzo con refuerzo.

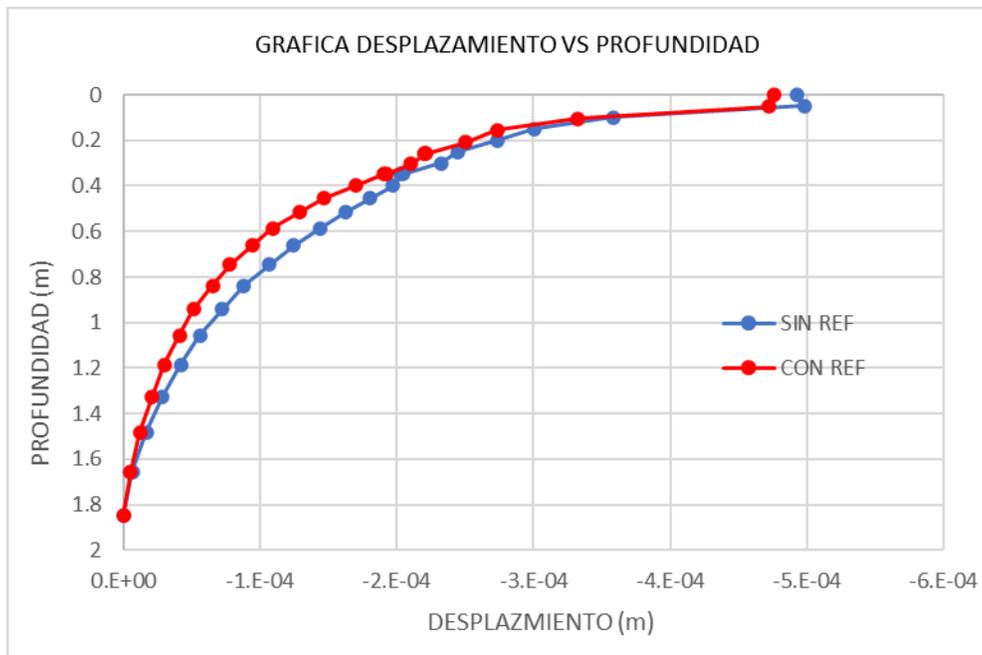
Fuente propia

Se observa que los esfuerzos en la interfaz afirmado – subrasante, son más bajos en la estructura sin refuerzo debido a que el espesor de la capa de afirmado es mayor, pero una vez entra la geomalla a recibir los esfuerzos, estos se disipan a menor profundidad en la estructura con refuerzo.

Comparación Resultado Desplazamientos Verticales - Agregados Puracé CBR 3% Sin y Con Refuerzo.

Gráfica 6.

Gráfico comparativo Desplazamientos para CBR 3%



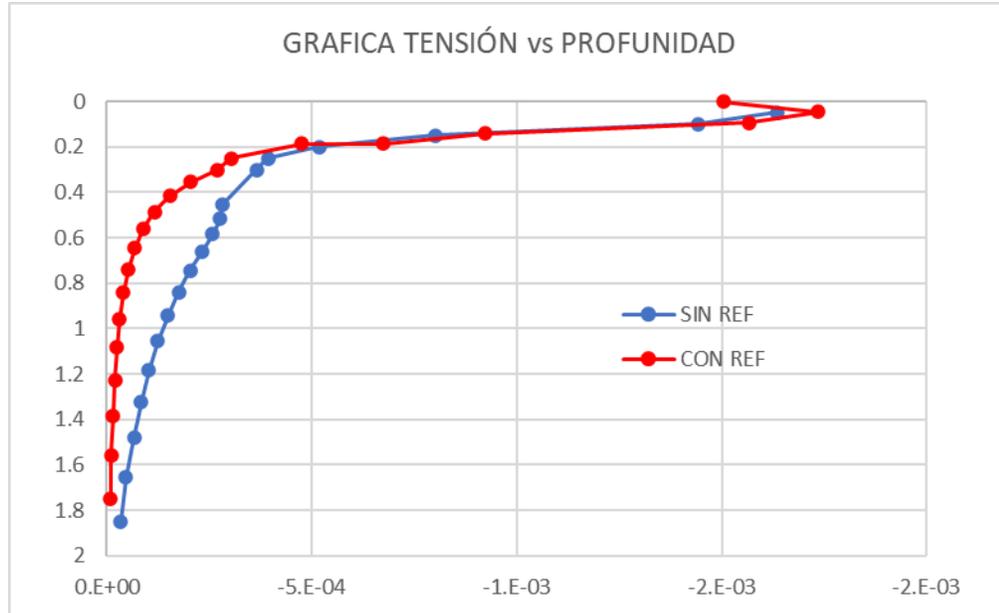
Nota: Fuente propia

Se evidencia que los resultados de los desplazamientos son menores en la estructura con refuerzo y en la estructura sin refuerzo a pesar de tener un mayor espesor de capa de afirmado, esta inclusive tiene a tener desplazamientos positivos por efecto de la carga.

Resultado Gráfico Cálculo Esfuerzos de Tensión - Agregados Puracé CBR 3%

Gráfica 7.

Gráfica Comparativa Esfuerzos de Tensión vs Profundidad:



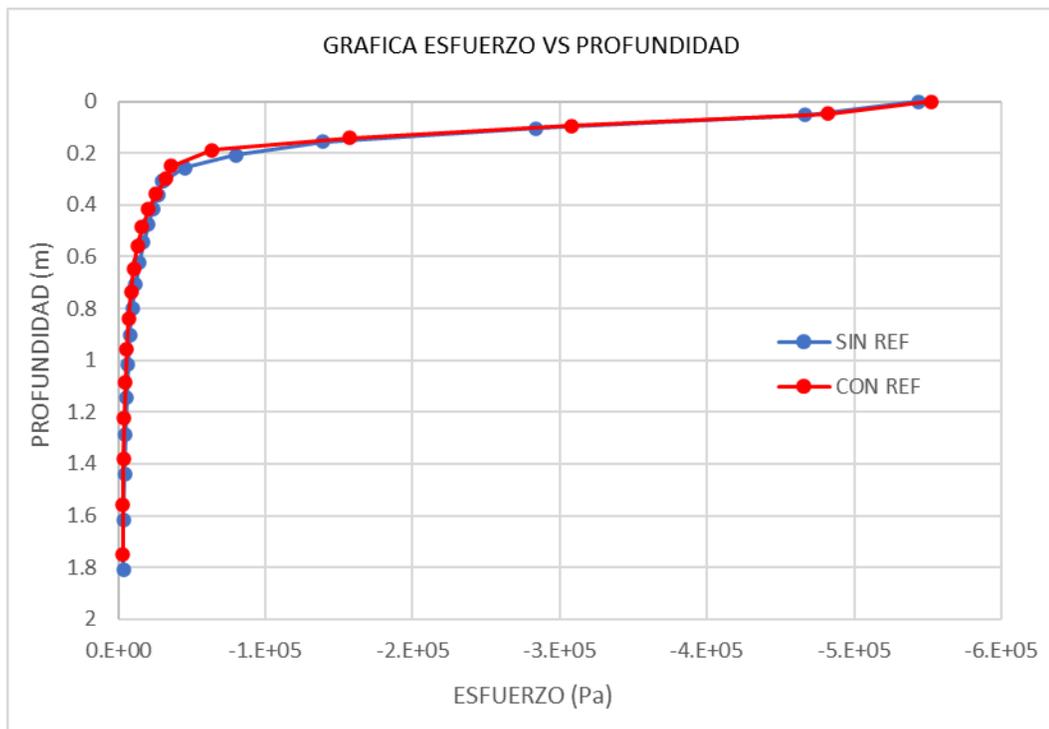
Nota: Fuente propia

Se puede observar que los resultados de los esfuerzos de tensión son menores en la estructura con refuerzo y en la estructura sin refuerzo a pesar de tener un mayor espesor de capa de afirmado, esta inclusive tiene a tener desplazamientos positivos por efecto de la carga.

Comparación Resultado Esfuerzo Vertical - Agregados Puracé CBR 5% Sin y Con Refuerzo.

Gráfica 8.

Gráfico comparativo Esfuerzos Verticales sin refuerzo con refuerzo



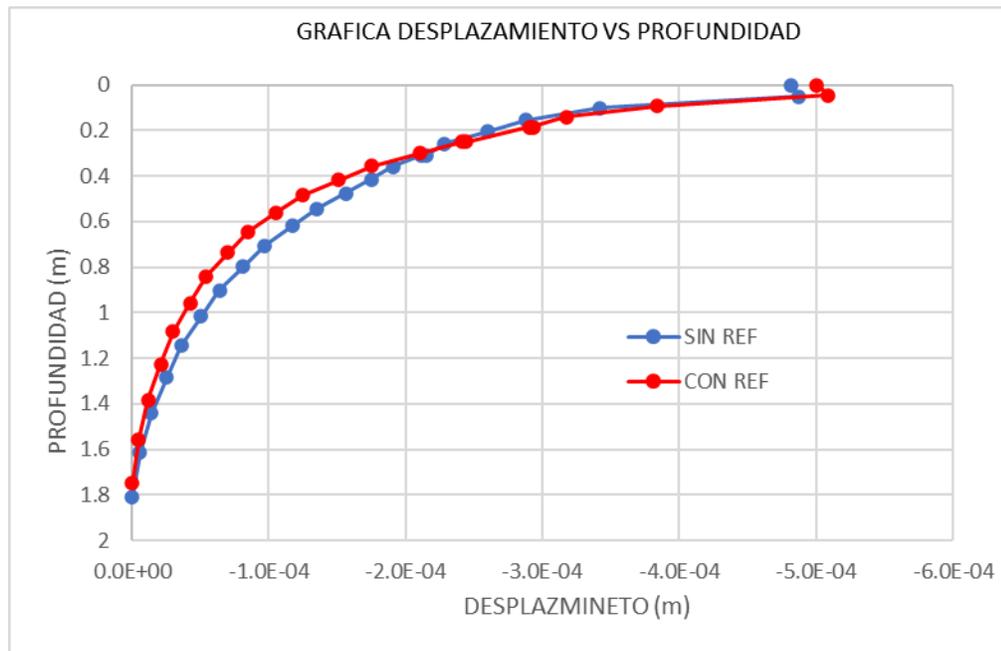
Nota: Fuente propia

Se observa que los esfuerzos en la interfaz afirmado – subrasante, los resultados son similares con estructuras tanto con un espesor de afirmado sin refuerzo y su estructura equivalente reforzada con geomalla.

Gráfica Resultados de Desplazamiento vs Profundidad de la Estructura para un CBR 5%.

Gráfica 9.

Gráfica Comparativa Desplazamiento vs Profundidad:



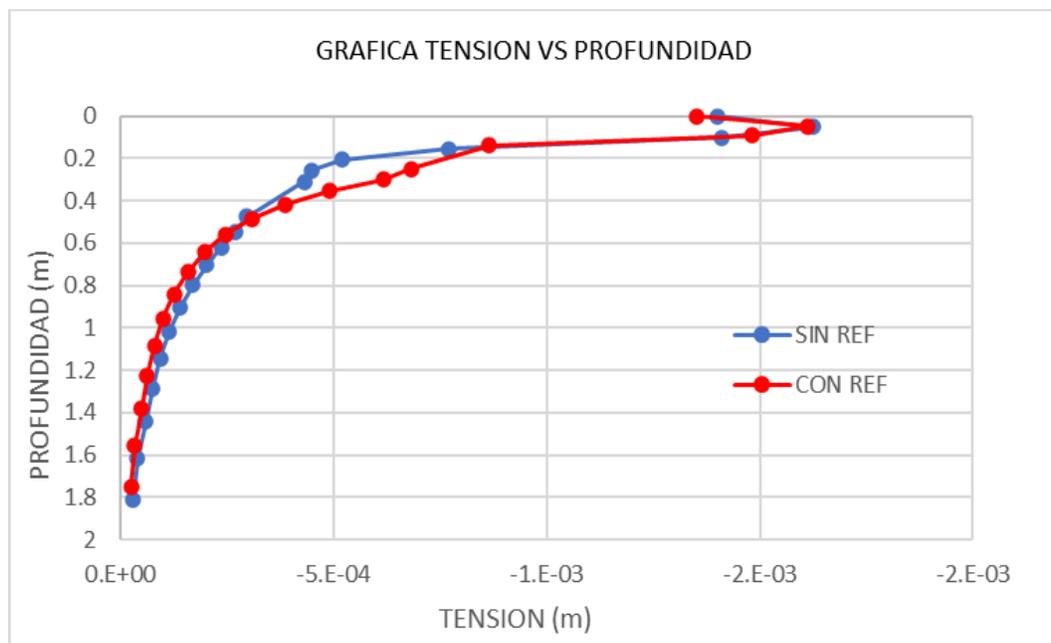
Nota: Gráfico comparativo desplazamientos de estructuras sin refuerzo con refuerzo.

Fuente propia

Se evidencia que los resultados de los desplazamientos son similares en ambas estructuras, esto se debe a la mayor resistencia de la subrasante y se observa que las estructuras son equivalentes.

Gráfica 10.

Gráfica Resultados Cálculo de Esfuerzo de Tensión vs Profundidad de la Estructura

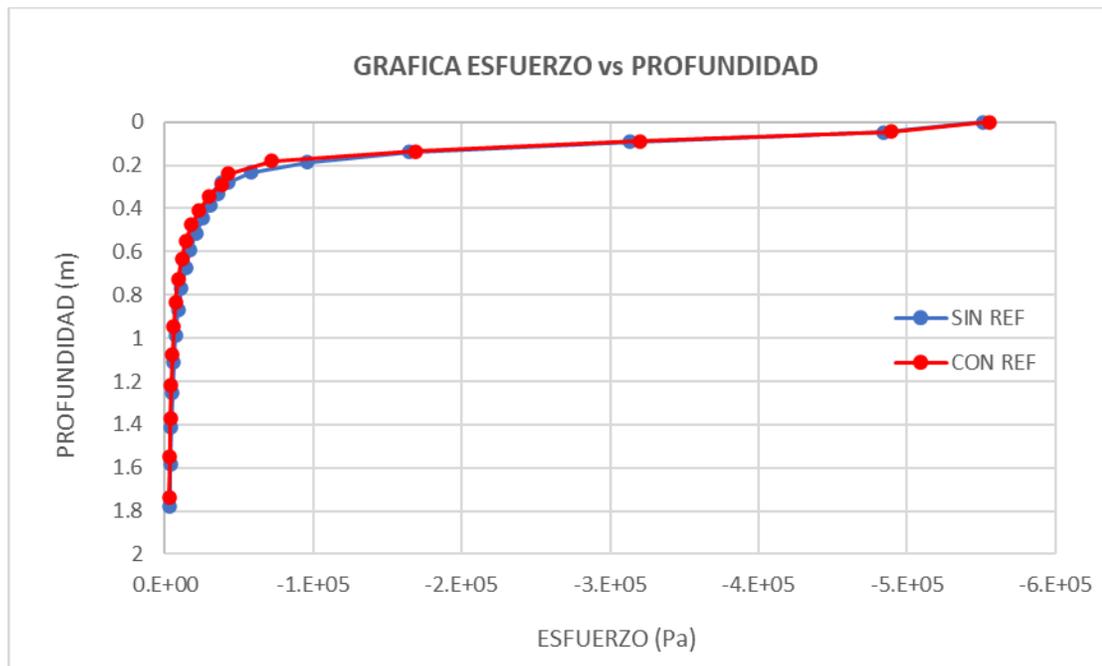


Nota: Gráfica Comparativa Esfuerzos de Tensión vs Profundidad: Fuente propia

Se puede observar que los resultados de los esfuerzos de tensión son menores en la estructura sin refuerzo debido al mayor espesor de la capa de afirmado, pero una vez la geomalla toma los esfuerzos a tensión absorbe dichos esfuerzos logrando disiparlos en la misma profundidad de la estructura sin refuerzo.

Gráfica 11.

Resultados Gráfica de Esfuerzos Verticales vs Profundidad para la Estructura para un CBR 7%.



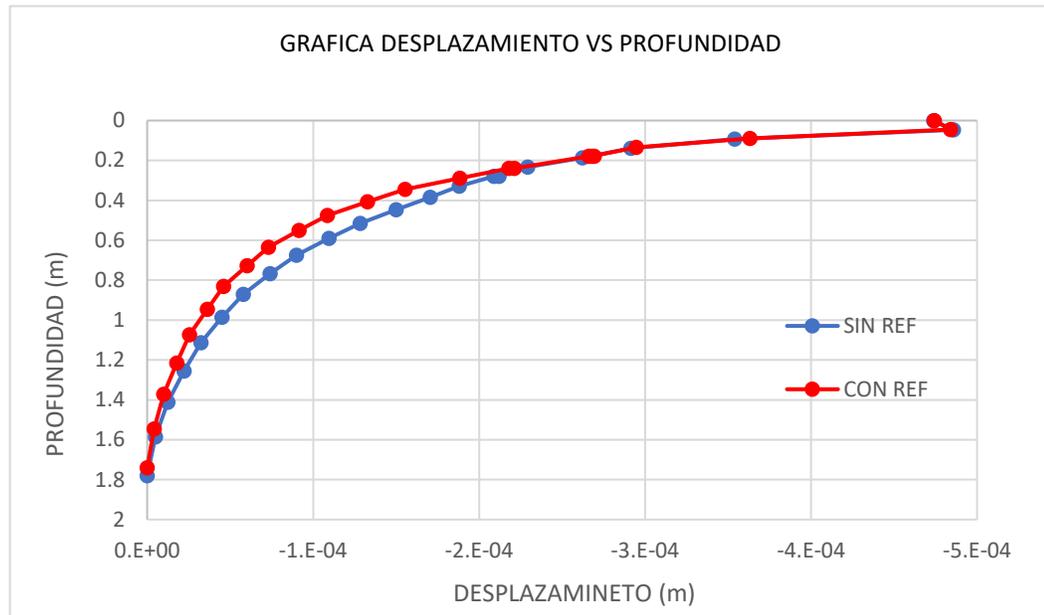
Nota: Gráfico comparativo Esfuerzos de estructuras sin refuerzo con refuerzo.

Fuente propia

Se observa que los esfuerzos en la interfaz afirmado – subrasante, son equivalentes donde la respuesta de las estructuras sin o con refuerzo de la geomalla tiene la misma respuesta dado que los esfuerzos verticales se disipan de manera similar.

Gráfica 12.

Gráfica Resultados Desplazamiento vs Profundidad de la Estructura para un CBR 7%.



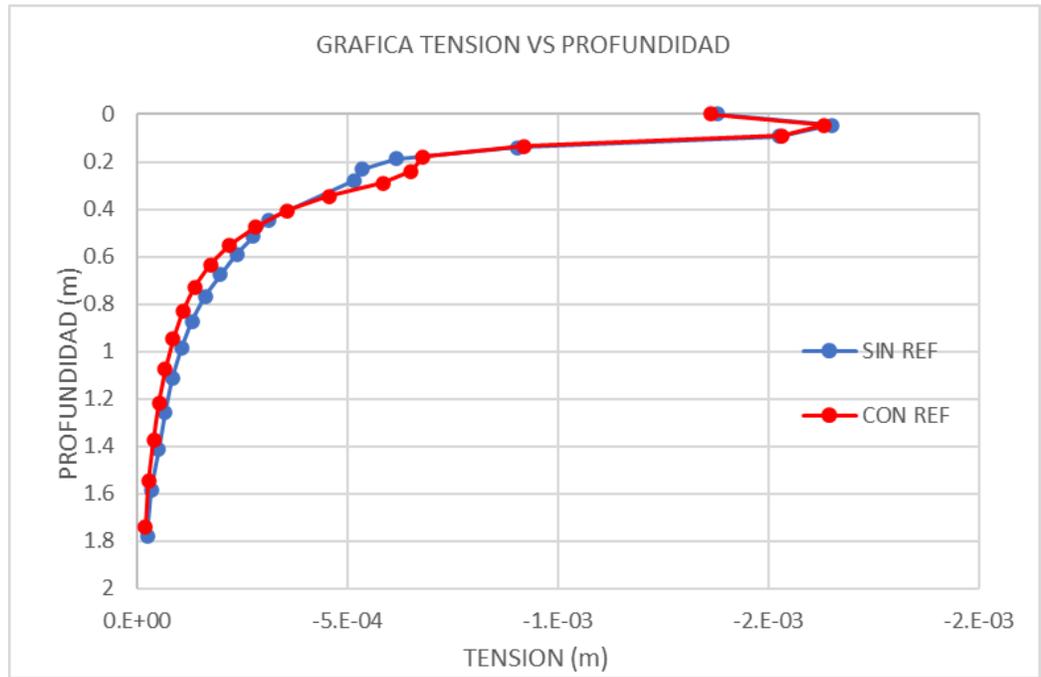
Nota: Gráfico comparativo Esfuerzos de estructuras sin refuerzo con refuerzo.

Fuente propia

Se evidencia que los resultados de los Desplazamientos presentan un comportamiento similar.

Gráfica 13.

Gráfica Resultados Esfuerzos a Tensión vs Profundidad de la Estructura para un CBR 7%.



Nota: Gráfica Comparativa Esfuerzos de Tensión vs Profundidad:

Fuente propia

Se observa que los resultados de los esfuerzos de tensión obtenidos en ambas modelaciones de las estructuras sin y con refuerzo, son similares esto debido a la equivalencia de las dos estructuras y a la capacidad de la subrasante en tomar estos esfuerzos.

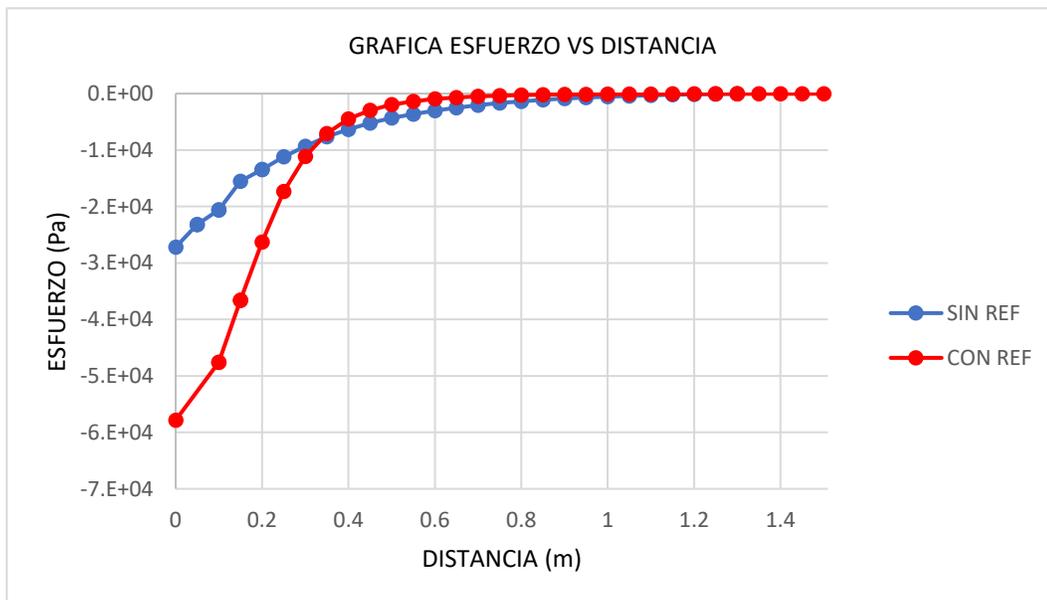
Se presentan a continuación las gráficas de los resultados obtenidos de acuerdo con las modelaciones en la interfaz de contacto afirmado con la subrasante, donde se observa la disipación de los esfuerzos desde la aplicación de la carga ampliando la distancia en el eje x.

Como las modelaciones se dividieron en dos fuentes, se presenta los resultados para la fuente que cumple especificaciones INVIAS.

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 3%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 14.

Esfuerzo Verticales vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

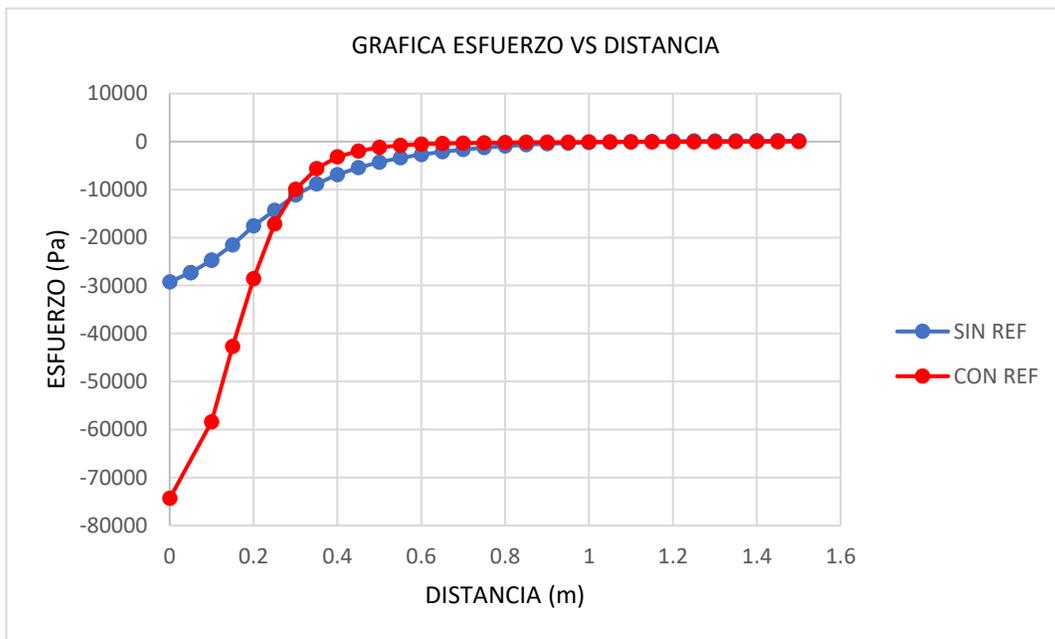


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 5%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 15.

Esfuerzos Verticales vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

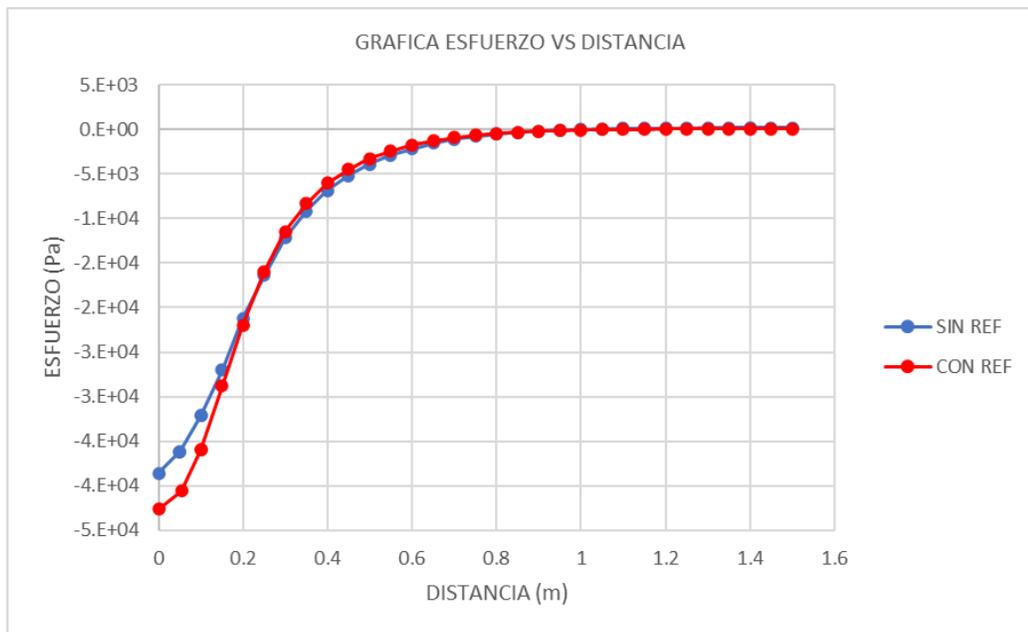


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 7%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 16.

Esfuerzos Verticales vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

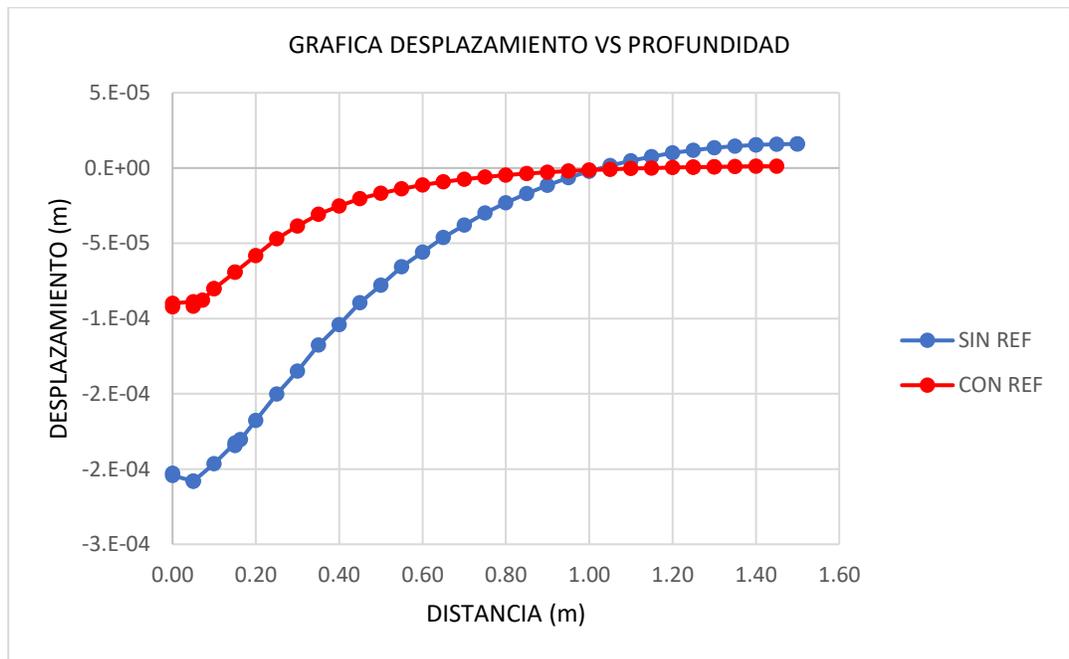


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 3%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 17.

Desplazamientos vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

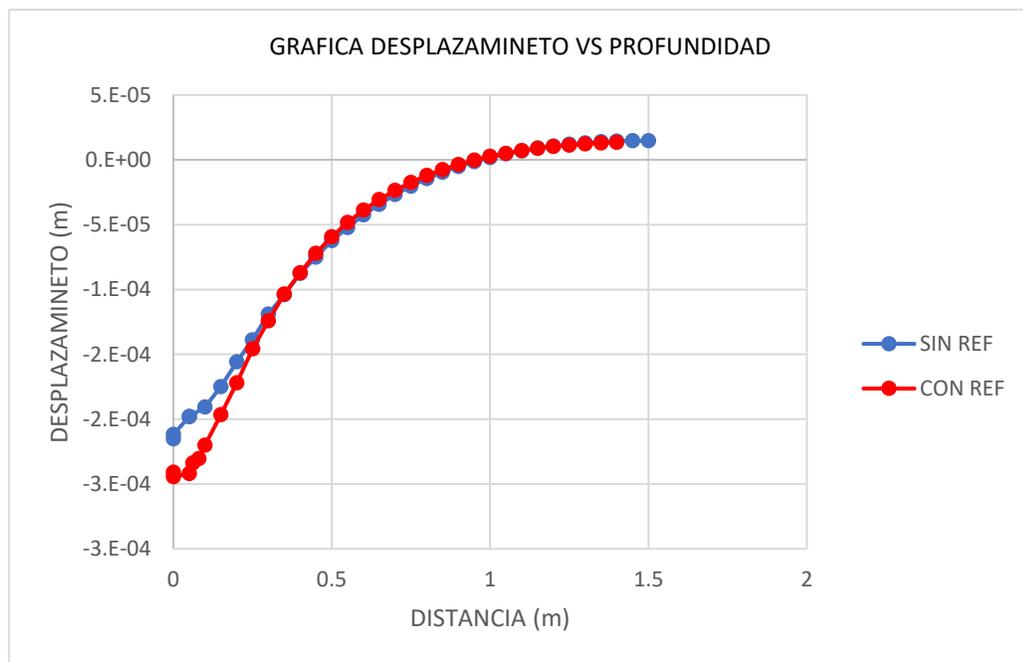


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 5%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 18.

Desplazamientos vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

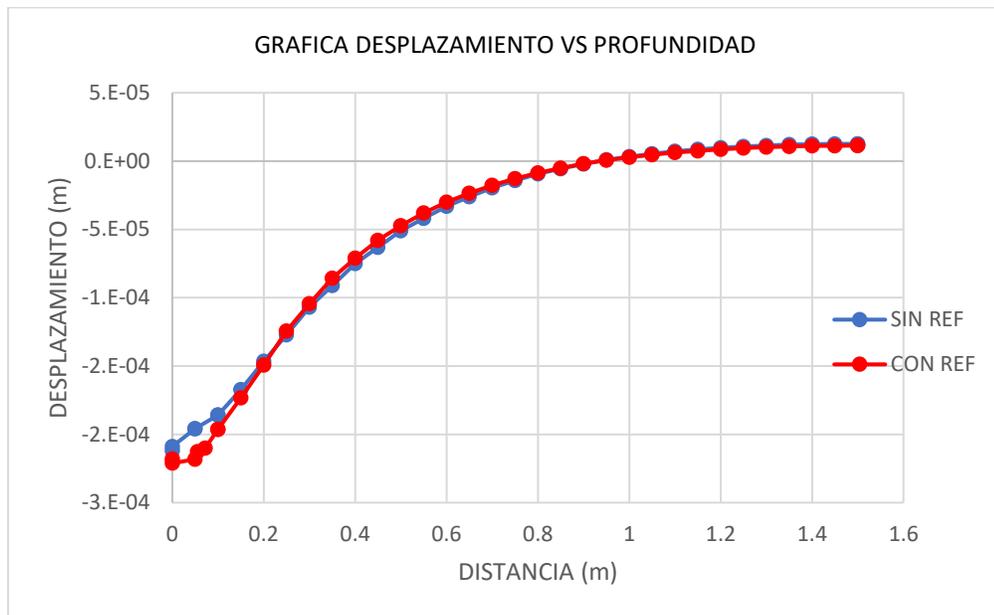


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 7%, se se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 19.

Desplazamiento vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

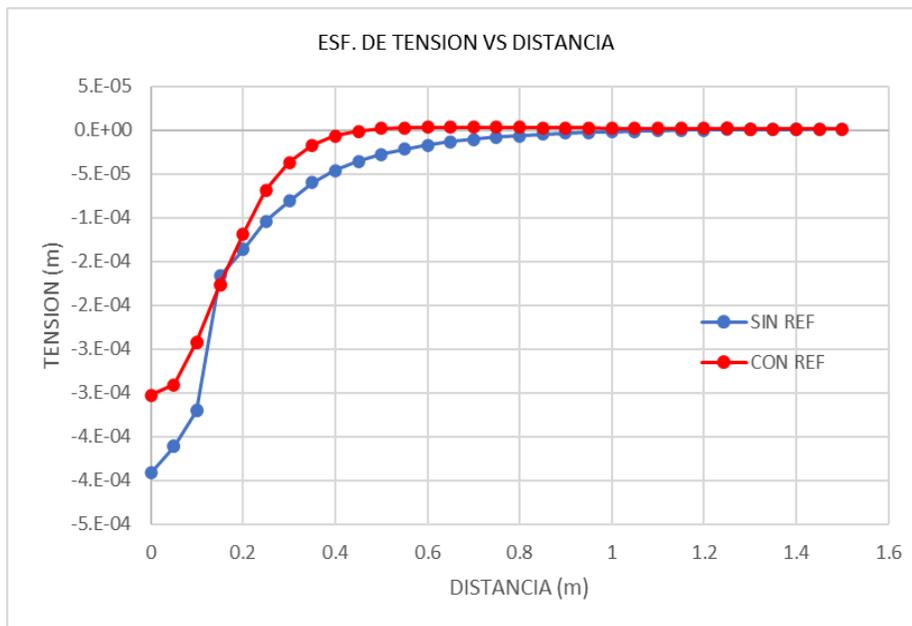


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 3%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 20.

Esfuerzos de Tensión vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

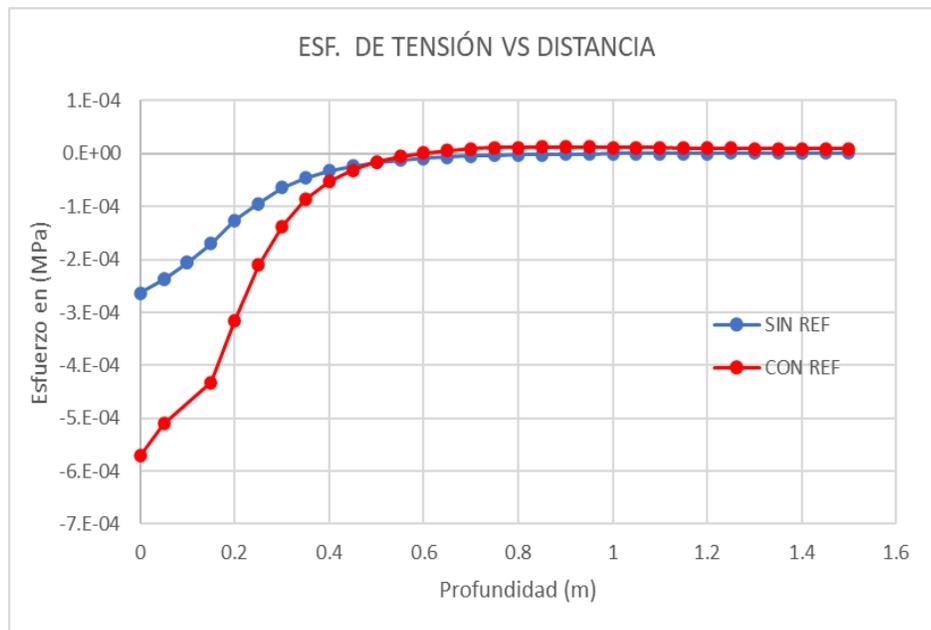


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 5%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 21.

Esfuerzos de Tensión vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante

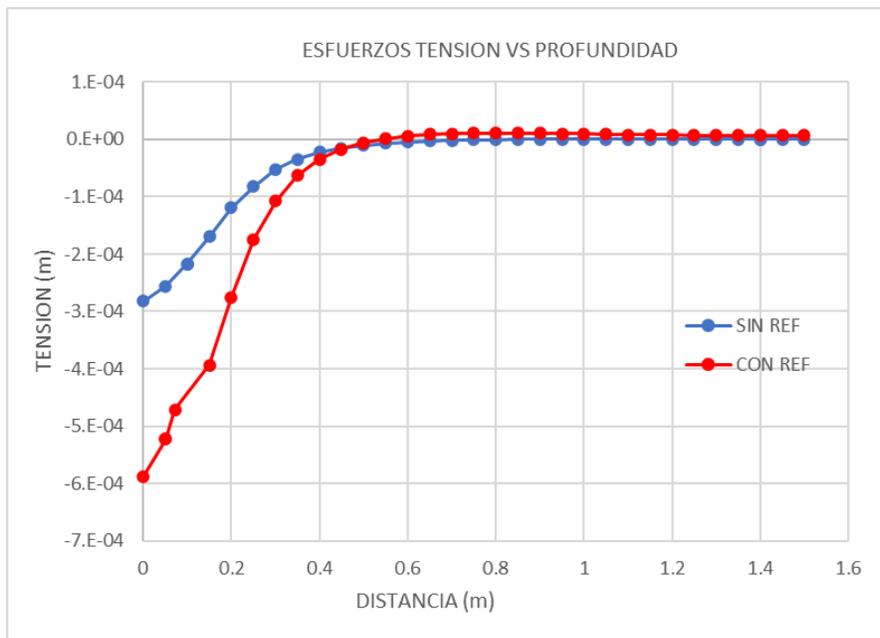


Nota: Fuente propia

Para la modelación de Agregados Puracé CBR 7%, se presenta a continuación la siguiente gráfica.

Gráfica 22.

Esfuerzos de Tensión vs Distancia en la Interfaz Afirmado – Subrasante



Nota: Fuente propia

Por otra parte, teniendo en cuenta que el diseño se realizó para 87.500 ejes de diseño, es posible determinar si la respuesta de la estructura equivalente reforzada con geomalla otorga una mejora en el número de ejes admisibles, para esto, se utiliza la fórmula del Instituto Nacional del Asfalto para el tránsito admisible de la subrasante:

$$Nf_{adm\ sr} = 1.365 \text{ E-9} \times (\text{Def Compresión SR})^{-4.477}$$

Reemplazando la anterior ecuación con los resultados obtenidos para el material de Agregado Puracé, se obtiene:

$$Nf_{adm\ sr} = 1.365 \text{ E-9} \times (0.0006)^{-4.477}$$

$$Nf_{adm\ sr} = 362.535 \text{ Repeticiones de ejes equivalentes}$$

$$Nf_{adm\ sr} > Nf_{diseño\ sr} \Rightarrow 362.535 \text{ ejes admisibles} > 87.500 \text{ Ejes de diseño}$$

Por otra parte, al realizar este proceso con la deformación experimentada por el material de Cantera la Yunga se obtuvo:

$$Nf_{adm\ sr} = 1.365 \text{ E-9} \times (0.0006)^{-4.477}$$

$$Nf_{adm\ sr} = 271.559 \text{ Repeticiones de ejes equivalentes}$$

$$Nf_{adm\ sr} > Nf_{diseño\ sr} \Rightarrow 271.559 \text{ ejes admisibles} > 87.500 \text{ Ejes de diseño}$$

Se evidencia que para ambos los ejes admisibles son mayores a los de diseño, con un incremento mayor de repeticiones para el caso de la fuente de material que cumple con los requerimientos del INVIAAS.

7. Análisis Económico

Referente al análisis económico que se debe realizar por parte de la Entidades encargadas del mantenimiento de la malla vial, es importante que dentro de los diseños que se presentan para la intervención de las vías en afirmado, se debe considerar estas metodologías donde se incluye el uso de geosintéticos, para lo cual se desarrolla en este capítulo una evaluación económica de un posible ahorro en los costos de intervención, para lo cual se hacen las siguientes consideraciones:

Para el determinar el valor del del afirmado por metro cúbico, se tendrá en cuenta el valor del material en planta con un factor de compactación, el costo del equipo de extensión y compactación, el costo del transporte se calcula por la distancia de la planta al centro de gravedad de la vía por cada metro cúbico.

El valor de la geomalla cuya unidad es por metro cuadrado, cubre el costo del material de la geomalla, su transporte a obra e instalación.

7.1. Análisis del Costo de la capa de afirmado cumpliendo especificaciones:

Concordante con la modelación realizada para la fuente denominada Agregados Puracé que cumple con las especificaciones invias para afirmados, se hace la siguiente evaluación con los espesores determinados en los diseños:

Se define por kilómetro de vía, el costo del suministro y conformación de la capa de afirmado comparándolo con el costo incluyendo el uso de la geomalla biaxial.0

Tabla 29.

Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Agregados Puracé:

Estructura	CBR subrasante	INVIAS	Giroud
		cumple	Hann
		D [cm]	d [cm]
A	3%	35	25
B	5%	31	25
C	7%	29	24

Nota: Fuente propia

Caso 1: El espesor de diseño de la capa de afirmado con el cumplimiento de especificaciones Invias, se seleccionó la fuente Agregados Puracé con un espesor de diseño para una subrasante de CBR 3%.

Figura 113.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Agregados Puracé.



Nota: Fuente propia

Dentro del procedimiento de cuantificación de los volúmenes requeridos para esta estructura de afirmado, se tiene que el espesor de diseño es de 0.35 m, un ancho promedio para la vía terciaria de 5.0 m y una longitud a mejorar de 5 km, para lo cual tenemos lo siguiente:

$$\text{Volumen Afirmado} = 5.000 \text{ m} * 5.0 \text{ m} * 0.35 \text{ m} = 8.750 \text{ m}^3$$

El costo del ítem de afirmado, que incluye el material, equipo de extensión y compactación, mano de obra, con un valor de \$ 125.000 / m³, calculando el costo del transporte se calcula desde la fuente del material a la vía.

Transporte Fuente a la Obra = se asumen una distancia de 25 km lo que equivale al siguiente costo.

Costo Transporte Afirmado = Distancia Transporte a Obra * Factor de Compactación * Vr. Transporte por metro cúbico.

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = 12 \text{ km} * 1.30 * \$ 1.500/\text{m}^3$$

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = \$ 23.400/\text{m}^3 \text{ instalado}$$

$$\text{Costo m}^3 \text{ afirmado instalado} = \text{Costo Material Af} + \text{Costo Transporte af a obra.}$$

$$\text{Costo m}^3 \text{ afirmado instalado} = \$ 125.000 + \$ 23.400 = \$ 148.400/\text{m}^3 \text{ instalad}$$

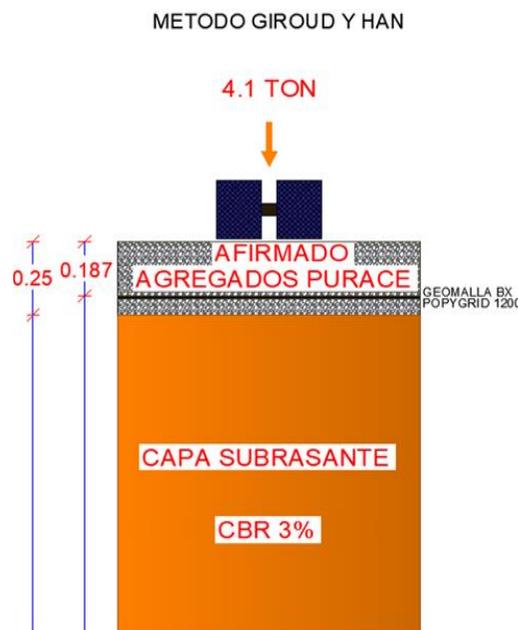
$$\text{Valor afirmado 5 km} = \text{vol. Afirmado instalado} * \text{costo m}^3 \text{ afirmado instalado}$$

$$\text{Valor afirmado 5 km} = 8.750 \text{ m}^3 * \$ 148.400 = \underline{\underline{\$ 1,298'500,000}}$$

Caso 2: El espesor de diseño de la capa de afirmado para la vía con refuerzo con geomalla biaxial por la metodología Giroud para una subrasante de CBR 3%.

Figura 114.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Agregados Puracé.



Nota: Fuente propia

Al realizar la determinación de los volúmenes requeridos para esta estructura de afirmado, se tiene que el espesor de diseño es de 0.25 m, un ancho promedio para la vía terciaria de 5.0 m y una longitud a mejorar de 5 km, además se considera la inclusión de una geomalla biaxial en polipropileno bx-30 para lo cual tenemos lo siguiente:

$$\text{Volumen Afirmado} = 5.000 \text{ m} * 5.0 \text{ m} * 0.25 \text{ m} = 6.250 \text{ m}^3$$

El costo del ítem afirmado, que incluye el material, equipo de extensión y compactación, mano de obra, con un valor de \$ 125.000 / m³, calculando el costo del transporte se calcula desde la fuente del material a la vía.

Transporte Fuente a la Obra = se asumen una distancia de 25 km lo que equivale al siguiente costo.

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = \text{Distancia Transporte a Obra} * \text{Factor de Compactación} *$$

Vr. Transporte por metro cúbico.

$$\text{Valor m}^3/\text{afirmado} = \$ 125.000/\text{m}^3$$

Transporte Fuente a la Obra = se asumen una distancia de 25 km lo que equivale al siguiente costo.

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = 12 \text{ km} * 1.30 * \$ 1.500/\text{m}^3$$

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = \$ 23.400/\text{m}^3 \text{ instalado}$$

$$\text{Costo m}^3 \text{ afirmado instalado} = \$ 125.000 + \$ 23.400 = \$ 148.400/\text{m}^3 \text{ instalad}$$

$$\text{Area Geomalla a utilizar} = 5.000 \text{ m} * 5 \text{ m} = 25.000 \text{ m}^2$$

$$\text{Costo m}^2 \text{ de Geomalla según precio referencia INV} = \$ 11.243/\text{m}^2$$

$$\text{Costo Geomalla} = 25.000 \text{ m}^2 * \$ 11.243/\text{m}^2$$

$$\text{Costo total de la Geomalla} = \$ 281'075.000$$

Valor afirmado 5 km = vol. Afirmado instalado * costo m3 afirmado instalado

Valor afirmado 5 km = 6,250 m³ * \$ 148.400 = \$ 927'500,000

Valor Geomalla 5 km = \$ 281'075.000

Valor Total Inversión = Vr. Afirmado 5 km + Vr. Geomalla 5km

Valor Total Inversión = \$ 927'500.000 + \$ 281'075.000 = **\$ 1,208'575,000**

7.2. Análisis de Estructura sin el cumplimiento de especificaciones:

Concordante con la modelación realizada para la fuente denominada La Yunga, la cual no las especificaciones Invias para afirmados, para lo cual se hace la siguiente evaluación con los espesores determinados en los diseños:

Se define por kilómetro de vía, el costo del suministro y conformación de la capa de afirmado comparándolo con el costo incluyendo el uso de la geomalla biaxial.

Tabla 30.

Resumen de espesores de acuerdo con las metodologías adoptadas con y sin refuerzo para la fuente de afirmado Cantera la Yunga:

Estructura	CBR subrasante	INVIAS	Giroud
		No Cumple	Hann
		D	d
A	3%	49	26
B	5%	42	25
C	7%	38	24

Nota: Fuente propia

Caso 3: El espesor de diseño de la capa de afirmado sin el cumplimiento de normas para la vía por la metodología Invias para una subrasante de CBR 3%.

Figura 115.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Cantera la Yunga.



Nota: Fuente propia

Para el cálculo de los volúmenes requeridos para esta estructura de afirmado, se tiene que el espesor de diseño es de 0.49 m, un ancho promedio para la vía terciaria de 5.0 m y una longitud a mejorar de 5 km, para lo cual tenemos lo siguiente:

$$\text{Volumen Afirmado} = 5.000 \text{ m} * 5.0 \text{ m} * 0.49 \text{ m} = 12.250 \text{ m}^3$$

El Cotos del ítem afirmado, que incluye el material, equipo de extensión y compactación, mano de obra, con un valor de \$ 125.000 / m³, calculando el costo del transporte se calcula desde la fuente del material a la vía.

Transporte Fuente a la Obra = se asumen una distancia de 25 km lo que equivale al siguiente costo.

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = 12 \text{ km} * 1.30 * \$ 1.500/\text{m}^3$$

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = \$ 23.400/\text{m}^3 \text{ instalado}$$

$$\text{Costo m}^3 \text{ afirmado instalado} = \$ 125.000 + \$ 23.400 = \$ 148.400/\text{m}^3 \text{ instalad}$$

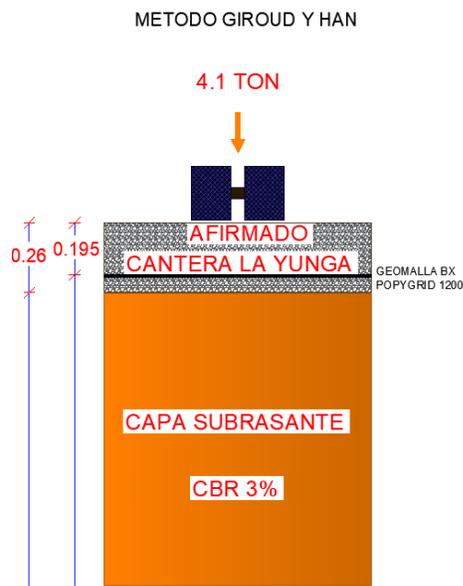
Valor afirmado 5 km = vol. Afirmado instalado * costo m³ afirmado instalado

$$\text{Valor afirmado 5 km} = 12.250 \text{ m}^3 * \$ 148.400 = \underline{\underline{\$ 1,817,900,000}}$$

Caso 4: El espesor de diseño de la capa de afirmado para la vía con refuerzo con geomalla biaxial por la metodología Giroud para una subrasante de CBR 3%

Figura 116.

Diagrama de Resultados de las Modelaciones Afirmado Fuente Cantera la Yunga.



Nota: Fuente propia

Para el cálculo de los volúmenes requeridos para esta estructura de afirmado, se tiene que el espesor de diseño es de 0.26 m, un ancho promedio para la vía terciaria de 5.0 m y una longitud a mejorar de 5 km, además se considera la inclusión de una geomalla biaxial en polipropileno bx-30 para lo cual tenemos lo siguiente:

$$\text{Volumen Afirmado} = 5.000 \text{ m} * 5.0 \text{ m} * 0.26 \text{ m} = 6.500 \text{ m}^3$$

El costo del ítem afirmado, que incluye el material, equipo de extensión y compactación, mano de obra, con un valor de \$ 125.000 / m³, calculando el costo del transporte se calcula desde la fuente del material a la vía.

Transporte Fuente a la Obra = se asumen una distancia de 25 km lo que equivale al siguiente costo.

Costo Transporte Afirmado = Distancia Transporte a Obra * Factor de Compactación * Vr. Transporte por metro cúbico.

$$\text{Valor m}^3/\text{afirmado} = \$ 125.000/\text{m}^3$$

Transporte Fuente a la Obra = se asumen una distancia de 25 km lo que equivale al siguiente costo.

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = 12 \text{ km} * 1.30 * \$ 1.500/\text{m}^3$$

$$\text{Costo Transporte Afirmado} = \$ 23.400/\text{m}^3 \text{ instalado}$$

$$\text{Costo m}^3 \text{ afirmado instalado} = \$ 125.000 + \$ 23.400 = \$ 148.400/\text{m}^3 \text{ instalad}$$

$$\text{Area Geomalla a utilizar} = 5.000 \text{ m} * 5 \text{ m} = 25.000 \text{ m}^2$$

$$\text{Costo m}^2 \text{ de Geomalla según precio referencia INV} = \$ 11.243/\text{m}^2$$

$$\text{Costo Geomalla} = 25.000 \text{ m}^2 * \$ 11.243/\text{m}^2$$

$$\text{Costo total de la Geomalla} = \$ 281\,075.000$$

Valor afirmado 5 km = vol. Afirmado instalado * costo m3 afirmado instalado

Valor afirmado 5 km = 6,500 m3 * \$ 148.400 = \$ 964'600.000

Valor Geomalla 5 km = \$ 281'075.000

Valor Total Inversión = Vr. Afirmado 5 km + Vr. Geomalla 5km

Valor Total Inversión = \$ 964'600.000 + \$ 281'075.000 = **\$ 1,245'675,000**

7.3. Análisis de Costos para las Estructura Convencional y Estructuras Reforzadas.

En cuanto al cálculo de costos para la realización de un mantenimiento con una capa de afirmado, se debe determinar si económicamente representa un ahorro para las entidades la implementación de los proyectos con estructuras reforzadas con geosintéticos, para lo cual se tiene lo siguiente:

El porcentaje de disminución de costos en la estructura con cumplimiento de especificaciones convencional (sin geomalla) y afirmado con refuerzo (con geomalla), se calcula de la siguiente manera (Agregados Puracé).

Costo por km estructura convencional = \$ 1,298'500,000 / 5 km = \$ 259,700,000

Costo por km estructura reforzada = \$ 1.208'575.00 / 5 km = \$ 241'715.000

Vr. Disminución Costo por km = Vr. Costo Estructura Convencional – Vr. Costo Estr.
Reforzada con geomalla

$$\text{Vr. Disminución Costo por km} = \$ 259'700.000 - \$ 241'715.000 = \$ 17'985.000$$

$$\% \text{ Ahorro por kilómetro} = 100\% - (\$ 241'715.000 / \$ 259'700.000) = 7.0\% \text{ costo por km}$$

El porcentaje de disminución de costos en la estructura sin el cumplimiento de especificaciones convencional (sin geomalla) y afirmado con refuerzo (con geomalla), se calcula de la siguiente manera (Cantera la Yunga).

$$\text{Costo por km estructura convencional} = \$ 1,817'900,000 / 5 \text{ km} = \$ 363'580,000$$

$$\text{Costo por km estructura reforzada} = \$ 1.245'675,000 / 5 \text{ km} = \$ 249'135,000$$

Vr. Disminución Costo por km = Vr. Costo Estructura Convencional – Vr. Costo Estr.
Reforzada con geomalla

$$\text{Vr. Disminución Costo por km} = \$ 363'580.000 - \$ 249'135.000 = \$ 114,445,000$$

$$\% \text{ Ahorro por kilómetro} = 100\% - (\$ 249'135.000 / \$ 363'580.000) = 31.4\% \text{ costo por km.}$$

De manera similar, se realiza el mismo proceso para la fuente de material que no cumple con las especificaciones INVIAS.

Figura 118.

Resumen del análisis de costos para el caso de Cantera la Yunga con CBRsr = 3%

DISEÑO CON MAT. NON CUMPLE ESPECIFICACIONES - ART. 311 INV13				
CBR 3%				
CALCULO COSTOS MANTENIMIENTO / KM				
ESTRUCTURA CONVENCIONAL ESPESOR 49 CM - ANCHO VIA 5 M				
ACTIVIDAD	UND	CANT.	VR. UNT	VR. TOTAL
AFIRMADO	M3	2,450.0	\$ 125,000	\$ 306,250,000
TRANSPORTE AFIRMADO	M3-KM	38,220.0	\$ 1,500	\$ 57,330,000
COSTO CONF. CAPA AFIRMADO / KM				\$ 363,580,000

CALCULO COSTOS MANTENIMIENTO / KM				
ESTRUCTURA CONVENCIONAL ESPESOR 26 CM				
ACTIVIDAD	UND	CANT.	VR. UNT	VR. TOTAL
AFIRMADO	M3	1,300.0	\$ 125,000	\$ 162,500,000
TRANSPORTE AFIRMADO	M3-KM	20,280.0	\$ 1,500	\$ 30,420,000
GEOMALLA BIAxIAL	M2	5,500.0	\$ 11,243	\$ 61,836,500
COSTO CONF. CAPA AFIRMADO / KM				\$ 254,756,500

DISMINUCIÓN VOL. AFIRMADO x KM 1,150.00 M3/KM
 DISMINUCIÓN EN COSTOS x KM \$ 108,823,500 AHORRO \$/KM

PORCENTAJE AHORRO COSTOS	30%	% AHORRO/KM
--------------------------	-----	-------------

* DISTANCIA DE ACARREO CONSIDERADA: 12 KM

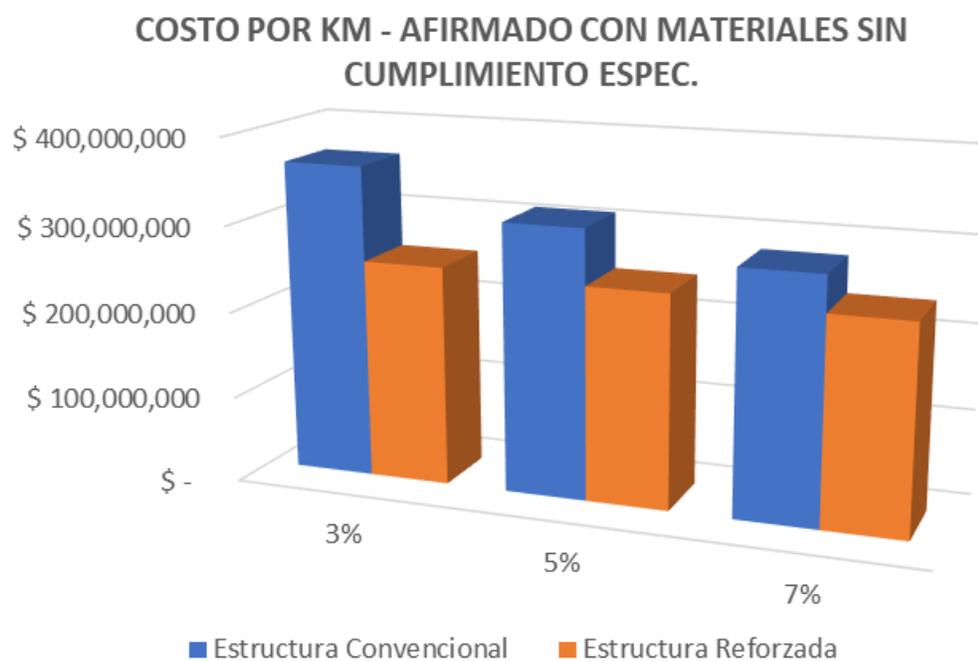


Nota: Fuente propia

Al repetir el procedimiento anterior para las diferentes estructuras de agregados Puracé y cantera la Yunga se obtiene la siguiente gráfica y tablas resumen:

Figura 119.

Gráfica de comparación de costos por km para material proveniente de Cantera la Yunga con subrasante de diferente CBR.



Nota: Fuente propia

Tabla 31.

Resumen de costos por kilómetro para estructuras de afirmado convencional y reforzada con material proveniente de Cantera la Yunga:

MAT. SIN CUMPLIMIENTO ESPECIFICACIONES INV	PARAMETRO DE DISEÑO		
	3%	5%	7%
ESTRUC. CONVENCIONAL	\$ 363,580,000	\$ 311,640,000	\$ 281,960,000
ESTRUC. REFORZADA	\$ 254,756,500	\$ 247,336,500	\$ 239,916,500
% AHORRO	30%	21%	15%
LONG. BENEFICIO PARA CONSTRUCCIÓN 1 KM ADICIONAL	3.3	4.8	6.7

Nota: Fuente propia

Tabla 32.

Resumen de costos por kilómetro para estructuras de afirmado convencional y reforzada con material proveniente de Agregados Puracé:

MAT. CON CUMPLIMIENTO ESPECIFICACIONES INV	PARAMETRO DE DISEÑO		
	3%	5%	7%
ESTRUC. CONVENCIONAL	\$ 259,700,000	\$ 230,020,000	\$ 215,180,000
ESTRUC. REFORZADA	\$ 247,336,500	\$ 247,336,500	\$ 239,916,500
% AHORRO	5%	-8%	-11%

Nota: Fuente propia

Los resultados obtenidos evidencian un mayor ahorro en condiciones de subrasante baja y material sin cumplimiento de especificaciones (Caso Cantera la Yunga), esto se cuantifica mediante la determinación de una longitud requerida para construcción de 1 km adicional,

que representa los kilómetros a construir por el método convencional tal que, el ahorro producido permita la construcción de un kilómetro adicional de estructura reforzada, así, para el caso de CBR 3%, la cuantía requerida para construir 3.3 km de afirmado sin refuerzo es la misma para la instalación de 4.3 km de afirmado reforzado con geomalla.

Por otra parte, los resultados para material con cumplimiento de especificaciones INVIAS (Caso Agregados Puracé) indica que, en términos de costos, esta opción no representa un ahorro significativo e inclusive, requiere una inversión mayor en algunas condiciones.

8. Conclusiones

Se realizaron treinta y seis modelaciones, dieciocho para la fuente de la Cantera la Yunga y dieciocho para el material de Agregados Puracé, los resultados obtenidos por el programa se utilizaron para comparar las deformaciones verticales, esfuerzos verticales y esfuerzos horizontales, graficando cada uno de estos parámetros contra la profundidad de la estructura. El análisis de resultados permite apreciar que el refuerzo planteado con las metodologías de diseño utilizadas permite obtener estructuras equivalentes al reforzar el afirmado, garantizando soportar el tránsito de diseño con espesores menores. Los espesores de diseño obtenidos por la metodología INVIAS para materiales que no cumplen las especificaciones del artículo 311 son considerablemente mayores a comparación de los resultantes por INVIAS con cumplimiento de requisitos, Higuera y AUSTROADS.

El uso de refuerzo con geosintéticos representa una alternativa a tener en cuenta para suplir deficiencias que puedan presentarse en los proyectos, los resultados de esta investigación indican que la geomalla tuvo mejor desempeño en los casos donde se presenten subrasantes débiles y se trabaje con fuentes de materiales que no cumplan las especificaciones INVIAS. Esta reducción de espesores se traduce en una disminución del presupuesto y beneficios ambientales como lo son: conservación de las fuentes de material, conservación del ecosistema y menor producción de emisiones contaminantes por uso de vehículos de carga.

El beneficio obtenido del refuerzo con geomalla disminuye a medida que la resistencia de la subrasante aumenta esto se explica porque los esfuerzos de tensión en la geomalla al tener mayor sollicitación distribuyen mejor los esfuerzos, a medida que la calidad de la subrasante mejora, la disminución de espesores es menor, pero los resultados de la modelación corroboran que estas estructuras siguen siendo equivalentes. Teniendo en cuenta que el funcionamiento de la geomalla depende de los esfuerzos a los que se encuentre sometidos, la puesta en práctica de los modelos aquí descritos dependerá de la correcta interacción entre el agregado y la geomalla, resaltando que la fricción en la interfaz es vital para que el geosintético experimente las demandas necesarias para funcionar adecuadamente.

El criterio de utilizar el material de la cantera más cercana no garantiza una economía, debido a que existen materiales que no cumplen la norma, resultando en un espesor de diseño mayor y, requerirán mantenimientos más frecuentes.

A pesar de que el análisis económico favoreció el uso de fuentes de materiales que no cumplen las especificaciones, la evaluación de ejes admisibles de la estructura con refuerzo presentó mejores resultados en el caso de la fuente que cumple los requerimientos INVIAS. Esto presenta una alternativa de mejora a considerar en aquellos proyectos donde la vida útil del pavimento sea el criterio para priorizar.

La utilización de software de elementos finitos como herramienta predictiva del comportamiento de estructuras con diferentes materiales, limita la necesidad de tener que

crear prototipos complicados en laboratorio y realizar ensayos sobre ellos, además de resolver problemas complejos presentando resultados de manera relativamente rápida, por lo que se tiene un ahorro en tiempo y dinero.

9. Recomendaciones

Según los resultados obtenidos, es viable emplear fuentes o canteras locales que no cumplan con el artículo 311-INV. Estos podrán ser utilizados siempre y cuando se empleen las metodologías de diseño aquí consignadas.

El presente trabajo es dirigido a las entidades de orden Nacional, Departamental y Municipal, con la finalidad que los recursos a invertir garanticen durabilidad y calidad en el mejoramiento de las vías terciarias en el Departamento del Cauca, teniendo en cuenta el uso de geosintéticos para material de afirmados, que contempla la opción del cumplimiento o no de las especificaciones requeridas por el INVIAS.

Se recomienda a los diseñadores presentar alternativas con geosintéticos para que la entidad encargada evalúe y seleccione la opción que más se ajuste con los criterios del proyecto, sean: costos, tiempos, material, vida útil, entre otros.

Para continuar esta línea de investigación se recomienda llevar a cabo evaluación en laboratorio para chequear el comportamiento obtenido por el afirmado antes y después del refuerzo con geomalla.

Se motiva a las entidades encargadas a realizar investigaciones de este tema para solucionar una problemática experimentada en todo el país, en caso de optar por evaluaciones a nivel de tramo de prueba, es primordial garantizar la trabazón, interfaz

agregado – geomalla, siendo un mecanismo fundamental para que la malla trabaje adecuadamente. Además, si se considera poner en práctica esta investigación, se resalta que la respuesta estructural equivalente aquí propuesta se complementa con una capa de impermeabilización para evitar la erosión del material. Esto permitirá enfocar la evaluación en determinar la mejora en la vida útil del afirmado.

10. Bibliografía.

- AASHTO. (1993). *DISEÑO DE-PAVIMENTO METODO AASHTO-93 ESPAÑOL*.
- Austroroads. (2009). *Guide to pavement technology. Part 6, Unsealed pavements*.
Austroroads.
- Alfonso, J. (2023). Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Baamonde Roca, A., Pérez Pérez, I. & Herrador, M. F. (2011). Geosintéticos en carreteras: Planteamientos para su aplicación en las capas de firme. *Ingeopres*, 202.
- Basante, E. & Villacrés, M. (2019). *Simulación esfuerzos y deformaciones de subrasantes de baja resistencia, estabilizadas con material de sobretamaño (rajón)*.
- Calvarano, L. S., Leonardi, G. & Palamara, R. (2017). Finite Element Modelling of Unpaved Road Reinforced with Geosynthetics. *Procedia Engineering*, 189, 99–104.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.017>
- Contraloría General de la República. (2019). *Auditoría de la Contraloría cuestiona calidad,*.
- Das, S. K. & Sivakumar Babu, G. L. (2015). *Static and dynamic analysis of geogrid reinforced unpaved road*.
- Departamento Nacional de Planeación, Mintransporte & Invias. (2018). *Proyectos Tipo. Soluciones ágiles para un nuevo país: Mejoramiento de vías terciarias - vías de tercer orden*. In *DPN* (1st ed.).
- Departamento Nacional de Planeación (2021). *Mejoramiento de vías terciarias. Versión 3.0*.

- Departamento de Transporte, República de Sudáfrica (1990). The structural design, construction and maintenance of unpaved roads. *TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR HIGHWAYS*.
- Deshmukh, R., Patel, S. & Shahu, J. T. (2021). Finite Element Modeling of Geogrid-Reinforced Unpaved Road. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 149, 205–213. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1303-6_16
- Emersleben, A. & Groeger, D. (2013). Numerical Modeling of Three Dimensional Geosynthetic Soil Reinforcement by Using Alternative Parameters. *Geo-Congress 2013*, 1–9. <https://doi.org/10.1061/9780784412787.001>
- Emersleben, A. & Meyer, N. (2005). *Construcciones con Geoceldas*.
- Emersleben, A. & Meyer, N. (2008). *Bearing Capacity Improvement of Gravel Base Layers in Road Constructions using Geocells*.
- Geomatrix. (2021). *Ficha técnica propygrid*. <https://www.geomatrix.co/productos/geomallasbiaxiales/propygrid>
- Giroud, J. & Han, J. (2004). Design Method for Geogrid-Reinforced Unpaved Roads. Español. *REVISTA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA Y GEOAMBIENTAL ASCE*.
- Góngora, I. A. G. & Palmeira, E. M. (2012). Influence of fill and geogrid characteristics on the performance of unpaved roads on weak subgrades. *Geosynthetics International*, 19(2). <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.191>
- Higuera, C. (2008). Diseño de estructuras de pavimentos en afirmado. *Revista Facultad de Ingeniería UPTC*.

- INVIAS. (2007). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.*
- INVIAS. (2013a). Especificaciones generales para la construcción de carreteras. CAPÍTULO 2-EXPLANACIONES. In *Especificaciones generales para la construcción de carreteras.* .
- INVIAS. (2013b). Especificaciones generales para la construcción de carreteras. CAPÍTULO 3-AFIRMADOS. In *Especificaciones generales para la construcción de carreteras.*
- INVIAS. (2013c). Especificaciones generales para la construcción de carreteras. CAPÍTULO 4-PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. In *Especificaciones generales para la construcción de carreteras.*
- INVIAS (2016). Clasificación de las carreteras. Disponible en:
<https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-uncategorised/2706-clasificacion-de-las-carreteras>
- INVIAS (2023). Estado de la Red Vial. Disponible en:
<https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>
- Leng, J. & Gabr, M. A. (2005). Numerical analysis of stress-deformation response in reinforced unpaved road sections. *Geosynthetics International.*
- Meena, S., Choudhary, L. & Dey, A. (2013). Quasi-static Analysis of Geotextile Reinforced Unpaved Road Resting on c- ϕ Subgrade. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.116>

- Minas y Energía, M. de. (2017). *Normatividad general para el control a la explotación ilícita de minerales*.
- Ministerio del Transporte. (2021). *Transporte en cifras 2021. Anuario Nacional de Transporte*. Edición 12. Bogotá. Colombia.
- Moreno Rubio, J. (2005). Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas.
- Narváez, L. (2017). *VÍAS Terciarias: motor del desarrollo económico rural Tertiary roads: engine of rural economic development*.
- Nieto, A., Camacho, J. & Ruiz, E. (2009). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos mohr-coulomb y hardening soil en suelos arcillosos. *Revista de Ingenierías: Universidad de Medellín*, 8(15).
- Ogundare, D., Adebara, S., Familusi, A. & Adewumi, B. (2018). STABILIZATION OF SUBGRADE USING GEOSYNTHETICS (CASE STUDY-GEOTEXTILE) UNDER SOAKED CONDITION. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara*.
- PAVCO. (2012). *Manual de diseño con geosintéticos* (9a ed.).
- Rajagopal, K., Chandramouli, S., Parayil, A. & Iniyani, K. (2014). Studies on geosynthetic-reinforced road pavement structures. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000042>
- Solano Efrain. (2009). *Manual Usuario MTA*.
- Wu, H., Huang, B., Shu, X. & Zhao, S. (2015). Evaluation of geogrid reinforcement effects on unbound granular pavement base courses using loaded wheel tester.

Geotextiles and Geomembranes, 43(5), 462–469.

<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.04.014>