

ARQ. BETSIE  
MIRANDA  
SÁNCHEZ

“AHORRO DE COSTOS EN ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLENES  
MEDIANTE GEOMALLAS BIAXIALES Y PREDICCIÓN DE FALLAS CON  
MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL”

2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
QUERÉTARO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

“AHORRO DE COSTOS EN ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLENES  
MEDIANTE GEOMALLAS BIAXIALES Y PREDICCIÓN DE FALLAS **CON  
MODELOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**”

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO  
DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA DE VÍAS TERRESTRES Y MOVILIDAD

PRESENTA:

ARQ. BETSIE MIRANDA SÁNCHEZ

DIRIGIDA POR:

DR. OMAR CHÁVEZ ALEGRÍA

CO-DIRIGIDO POR:

DR. EDUARDO ROJAS GONZÁLEZ

Santiago de Querétaro, Qro. Marzo 2025

La presente obra está bajo la licencia:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

### Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro  
Faculta de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

**“AHORRO DE COSTOS DE ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLENES MEDIANTE  
GEOMALLAS BIAXIALES Y PREDICCIÓN DE FALLAS CON MODELOS DE  
INTELIGENCIA ARTIFICIAL”**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

**Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad**

Presenta:

Arq. Betsie Miranda Sánchez

Dirigida por:

Dr. Omar Chávez Alegría

Co-dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

Dr. Omar Chávez Alegría

Presidente

Dr. Eduardo Rojas González

Secretario

M.I. Gerardo Medellín Aguilar

Vocal

M.E.A.S.C. Rosas Mercedes Cabrera

Suplente

M.C. Erick Omar López Montes

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro. México

Marzo 2025

## RESUMEN

Los terraplenes son estructuras fundamentales en la infraestructura vial y ferroviaria, cuya estabilidad puede verse comprometida por factores geotécnicos y ambientales, generando deslizamientos con consecuencias críticas: colapsos estructurales, pérdidas humanas, afectaciones económicas y deterioro en la conectividad regional. Estas fallas pueden manifestarse en formas rotacionales, traslacionales, por asentamiento, capacidad portante o cargas cíclicas, y son agravadas por condiciones como la infiltración de agua, presión lateral, tensiones internas y precipitaciones intensas.

Este proyecto de tesis aborda una solución innovadora y sostenible para la estabilización de terraplenes mediante el uso de geomallas biaxiales ya que han demostrado mejoras sustanciales en la capacidad de carga y en la estabilidad estructural sometidos a diferentes condiciones de carga, al proporcionar resistencia a la tracción (30 kN/m) y confinamiento estructural. Se basa en criterios establecidos por el Instituto Mexicano del Transporte (publicación técnica No. 382) y la norma brasileña ABNT NBR 11682:2008, analizando diferentes espaciamientos verticales propuestos por ambas normativas.

El estudio combina análisis experimental con simulaciones computacionales avanzadas del software experimental con modelos analíticos con la licencia del Slide v6.0 Universidad Autónoma de Querétaro, utilizando técnicas de correlación de datos característicos físicos y modelaciones para una evaluación detallada de las deformaciones del sistema así como herramientas de inteligencia artificial, las cuales se utilizan para optimizar el diseño, predecir el comportamiento del terraplén ante distintas condiciones operativas y evaluar la eficiencia del drenaje interno. Así mismo, se construirá un prototipo físico por cada escenario que simule condiciones reales de carga para validar los resultados ante los dos supuestos distanciamientos verticales, teniendo como guía la caracterización del material, así como las

condiciones similares de comportamiento mecánico a largo plazo bajo cargas cíclicas del artículo *“The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic footing loading”*

El objetivo principal es desarrollar un enfoque técnico que permita reducir riesgos de deslizamientos, puntualizar zonas críticas, anticipar fallas estructurales y optimizar los costos de construcción y mantenimiento, especialmente en contextos donde las cargas dinámicas y cíclicas como las generadas por el tránsito vehicular pueden comprometer la seguridad y el desempeño de las estructuras. Los resultados de esta investigación no solo fortalecerán la seguridad y durabilidad de las infraestructuras viales, sino que también servirán como base técnica para una futura normativa mexicana sobre el uso de geomallas en terraplenes.

**Palabras clave:** terraplén, espaciamiento vertical, geosintéticos, inteligencia artificial, geomallas Biaxiales, prototipo físico y factor de seguridad.

## SUMMARY

Embankments are critical structures in road and rail infrastructure, but their stability can be compromised by geotechnical and environmental factors that can lead to landslides with critical consequences, including structural collapse, loss of life, economic impacts and deterioration of regional connectivity. Such failures can occur in rotational, translational, settlement, bearing capacity or cyclic loading modes and are often intensified by conditions such as water infiltration, lateral pressure, internal stresses and intense precipitation.

This thesis proposes an innovative and sustainable solution for stabilizing landfills through the use of biaxial geogrids, which have demonstrated significant improvements in load capacity and overall stability under various loading conditions, providing tensile strength (30 kN/m) and structural confinement. The study is based on the criteria established by the Mexican Transport Institute (Technical Publication nº 382) and the Brazilian standard ABNT NBR 11682:2008, examining the vertical spacing configurations proposed by both standards.

The research integrates experimental analysis with advanced numerical simulations carried out in the licensed version of Slide v6.0 software (Autonomous University of Querétaro, copy: 7929A). Data correlation techniques, physical parameter evaluation, and computational modeling are used to analyze system deformations, while artificial intelligence tools are incorporated to optimize the design, predict landfill performance under different operating conditions, and evaluate internal drainage efficiency. In addition, a physical prototype will be built for each scenario to simulate realistic loading conditions and validate the results for the two vertical spacing assumptions, following material characterization criteria and mechanical behavior similar to those reported in the article “The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic base load.”

The main objective is to establish a technical methodology that reduces the risk of landslides, identifies critical zones, anticipates structural failures and optimizes construction and maintenance costs, particularly in contexts where dynamic and cyclical loads, such as those generated by vehicle traffic, can compromise the safety and performance of embankment structures. The results of this research will not only improve the safety and durability of transportation infrastructure, but will also provide technical foundations for a future Mexican standard on the use of geogrids in landfills.

**Key words:** Embankment, vertical spacing, geosynthetics, artificial intelligence, geogrids, safety factor.

## DEDICATORIAS

### **A mis Hijas:**

Quiero agradecerles profundamente a mis hijas Allison Juliette y Judith Samadhi por haber estado a mi lado durante todo este proceso de posgrado incluso desde mi vientre. Gracias por su paciencia, comprensión y amor incondicional en esos momentos en que tuve que dedicar tiempo al estudio y al trabajo. Ustedes han sido mi mayor inspiración y la única razón por la que nunca me rendí. Su apoyo y sus sonrisas me llenaron de energía en cada paso del camino, recordándome siempre por qué valía la pena el esfuerzo. Este logro es tanto mío como de ustedes, porque lo alcanzamos juntas. Gracias por estar siempre conmigo y por ser el motor de mi vida.

### **A mí Esposo:**

Gracias por tu apoyo incondicional y tus palabras de aliento en cada paso de este camino. Por ser mi compañero en cada paso de este viaje, por creer en mí incluso cuando dudé de mí misma, y por brindarme amor y fortaleza en los momentos más difíciles. Tu apoyo, esfuerzo y sacrificios hicieron que este sueño se hiciera realidad. Gracias por ser mi refugio, mi compañía y motivación. Este logro también es tuyo Bruno Isaac Arciniega Córdoba.

### **A mis padres:**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento Adela Sánchez Yañez y Luis Miranda Mondragón por todo el apoyo que me han brindado a lo largo de este camino. Gracias por sus sacrificios, por su paciencia infinita y por su confianza en mí. Han sido mi ejemplo de esfuerzo y perseverancia, y su amor incondicional me ha dado la fuerza para superar cada obstáculo y alcanzar mis metas. Sin ustedes, nada de esto sería posible. Hoy celebro este logro, pero también celebro todo lo que me han enseñado y el gran apoyo que siempre me han dado. Gracias por estar siempre a mi lado. No es solo un logro es su herencia en mi camino, ruego a dios poderles regresar un poco de lo mucho que me han dado.

### **A mí:**

Reconozco el esfuerzo, las complicaciones y las noches sin fin que fueron necesarias para llegar hasta aquí. En este camino enfrenté retos, momentos de duda y desesperación, pero siempre estuvo fija la meta, esa fortaleza interna me ayudo a seguir adelante. Esto es el resultado de mi perseverancia, compromiso y sin duda mi terquedad para terminar lo que inicie; estoy orgullosa de la persona que hoy soy e infinitamente agradecida con Dios.

## **AGRADECIMIENTOS**

En la preparación de este trabajo Expreso mi más sincero y profundo agradecimiento al Dr. Omar Chávez Alegría, quien fue un pilar fundamental en el desarrollo de esta investigación. Su acompañamiento constante, su guía experta y su compromiso académico fueron claves para la consolidación de este trabajo.

A pesar de las dificultades que marcaron mi paso por la universidad, el Dr. Chávez nunca dudó de mi capacidad ni de los objetivos trazados. Su apoyo incondicional, incluso en los momentos más desafiantes, me motivó a continuar. Su confianza y orientación no solo enriquecieron este proyecto, sino también mi formación profesional.

Así mismo se brinda gratitud a los sinodales el Dr. Eduardo Rojas González y al M.I Gerardo Medellín Aguilar que con gusto se tomaron el tiempo de analizar y dar su punto de vista en este trabajo.

Se otorga un agradecimiento por las opiniones desinteresadas de los directores y Coordinadores de Investigación y Posgrado de todas las Facultades de la Universidad Autónoma de Querétaro, así como de investigadores, académicos y personal administrativo de la misma en particular, la Dirección de Servicios Escolares y la Dirección de Investigación y Posgrado, haber revisado el texto y por sus atinados comentarios para mejorarlo.

Le agradezco a mis familiares y amigos, que me mostraron su apoyo, en especial aquellos que llegaron en el transcurso de este proyecto especialmente a la Ing. Yadira Díaz Águilar quien con paciencia y sinceridad me ayudo y apporto gran enriquecimiento a mi conocimiento tras mi proceso de pruebas de laboratorio.

Reconozco y respondo el sustento del consejo nacional de ciencia, y tecnología (CONACYT) así como de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) para realizar esta investigación.

De la misma forma quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la empresa **MaccaFerri (México)** por su generoso apoyo a mi proyecto de investigación, mediante la donación de muestras de geomalla biaxial fundamentales para el desarrollo y alcance de esta tesis. Su valiosa colaboración ha contribuido significativamente al cumplimiento de los objetivos planteados, permitiéndome avanzar con recursos de alta calidad y pertinencia técnica.

Este gesto solidario refleja el compromiso de MaccaFerri con la investigación y el desarrollo académico, por lo cual reitero mi profundo reconocimiento y gratitud.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>3</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>5</b>
<b>DEDICATORIAS</b> .....	<b>7</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>8</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>10</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>12</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>17</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b> .....	<b>18</b>
<b>I. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
1.1 Suelo.....	19
1.2 Efecto del contenido de agua en suelos arenosos.....	27
1.3 Comportamiento mecánico de suelos arenosos frente a cargas externas, considerando la influencia de factores clave como la humedad, la densidad, y el confinamiento. ....	28
1.4 Compactación de un suelo .....	30
1.6 Factor de seguridad.....	32
1.7 Espaciamiento Vertical en Geosintéticos .....	35
1.8 Geotextiles como Refuerzo.....	36
1.9 Prototipo Geotécnico .....	40
1.10 Inteligencia Artificial (IA) .....	44
1.10.1 El Aprendizaje Automático .....	46
1.10.2 Redes neuronales artificiales (RNA).....	47
1.10.3 IA generativa y modelos de lenguaje.....	47
1.10.4 Entorno de desarrollo e implementación (Visual Studio Code y Python) .....	48
1.10.5 Flujo de implementación de la IA en la investigación .....	49
1.10.6 Ventajas y Limitaciones .....	51
1.11 Métodos de análisis y estabilización de taludes .....	52
1.12 Algoritmos Genéticos.....	56
1.13 Simulación.....	58
1.14 Elementos Finitos y Diferencias Finitas .....	58
1.15 Teoría de la Estabilidad de Taludes .....	61
1.16 Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático.....	61
1.17 Simulación Semi - Numérica.....	63
1.18 Integración de Datos y Sensores .....	65
1.19 Análisis de Riesgo y Toma de Decisiones.....	66

1.20 Teoría de la Optimización .....	66
1.21 Aportes en la Sostenibilidad.....	67
<b>II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>70</b>
1. Identificación y Caracterización del Suelo .....	70
2. Evaluación de Normativas .....	71
3. Diseño y Simulación con Geomallas .....	71
4. Integración de Inteligencia Artificial .....	72
5. Prototipo físico.....	74
6. Evaluación de Resultados .....	74
7. Desarrollo de Recomendaciones y Buenas Prácticas .....	76
8. Aplicación Futura.....	77
<b>III. DISCUSIÓN y RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
1. Identificación y caracterización del suelo: .....	78
2. Evaluación de Normativas: .....	99
3. Diseño y Simulación con Geomallas .....	115
4. Integración de Inteligencia Artificial .....	266
5. Prototipo físico.....	320
6. Evaluación y validación de resultados.....	376
<b>IV. CONCLUSIONES.....</b>	<b>437</b>
6. Desarrollo de Recomendaciones y Buenas Prácticas.....	446
7. Implementación y Seguimiento .....	448
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>450</b>
<b>APENDICE.....</b>	<b>455</b>
<b>APENDICE.....</b>	<b>456</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas de la arena estándar de Fujian .....	19
Tabla 2. Análisis de suelos arenosos:.....	28
Tabla 3. Características del geosintético/geomalla .....	39
Tabla 4. Características del material de relleno (arena tipo Fujian).....	39
Tabla 5. Resumen de los métodos para corregir y prevenir deslizamientos de tierra .....	53
Tabla 6. Concentrado de resultados de Prueba de corte directo.....	82
Tabla 7. Concentrado de resultados de Permeabilidad.....	85
Tabla 8. Análisis de peso Volumétrico .....	86
Tabla 9. Análisis granulométrico Banco EL CONIN .....	88
Tabla 10. Análisis granulométrico Banco LA CAÑADA .....	88
Tabla 11. Análisis granulométrico Banco LA LUZ .....	89
Tabla 12. Análisis granulométrico San José Iturbide.....	89
Tabla 13. Análisis granulométrico Arena Fujian (a partir de los datos reportados por Liu et al., 2022).....	90
Tabla 18. Clasificación SUCS.....	99
Tabla 19. Resumen de costos .....	109
Tabla 20. Resumen costos (porcentaje) y ahorros (\$).....	111
Tabla 21. Resumen costos arena vs base/súbase .....	114
Tabla 22. Resumen informativo de métodos para la evaluación de los modelos analíticos .....	119
Tabla 23. Análisis de modelos analíticos en Slide 2.....	122
Tabla 24. Beneficios sustentables asociados al uso de geomallas biaxiales en muros de contención. ....	125
Tabla 25. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	130
Tabla 26. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	141
Tabla 27. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	150
Tabla 28. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	163
Tabla 29. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	173
Tabla 30. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio límite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	188
Tabla 31. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	200
Tabla 32. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.....	212
Tabla 49. Datos usados en el montaje del prototipo 1:.....	352
Tabla 50. Datos usados en el montaje del prototipo 2:.....	358
Tabla 51. Datos usados en el montaje del prototipo 3:.....	363
Tabla 52. Datos usados en el montaje del prototipo 4:.....	368
Tabla 53. Datos usados en el montaje del prototipo 5:.....	373
Tabla 54. Datos de comparación en condiciones de corte y acción sísmica de modelos analíticos 3 y 5:.....	384
Tabla 55. Datos de comparación en condiciones de escala real de modelos analíticos 6 y	

7:.....	388
Tabla 56. Datos de comparación en Prototipos Físicos 2 Sv (10 cm) y 4 Sv (8cm):.....	397
Tabla 57. Datos de comparación en Prototipos Físicos 3 Sv (10 cm) y 5 Sv (8cm):.....	399
Tabla 58. Datos de comparación en Modelo Analítico 2 y Prototipos Físicos 2 Sv (10 cm) en ambos:.....	402
Tabla 59. Datos de comparación en Modelo analítico 3 y Prototipos Físicos 3 Sv (10 cm) en ambos y corte en geomallas: .....	404
Tabla 60. Datos de comparación en Modelo analítico 4 y Prototipos Físicos 4 Sv (8 cm) en ambos:.....	406
Tabla 61. Datos de comparación en Modelo analítico 5 y Prototipos Físicos 5 Sv (8 cm) en ambos y corte en geomallas: .....	408
Tabla 62. Datos de comparación en Modelo Analítico 6 (Sv 1m) VS simulación con IA 6 (Sv 1m):.....	415
Tabla 63. Datos de comparación en Modelo Analítico 7 (Sv 0.80) VS simulación con IA 7 (Sv 0.80m):.....	419
Tabla 64. Datos de comparación en Modelo Analítico 8 (Sv 1.20m) VS simulación con IA 8 (Sv 1.20m):.....	422
Tabla 65. Datos de comparación en Modelo Analítico 9 (Sv 1.25m) VS simulación con IA 9 (Sv 1.25m):.....	426
Tabla 66. Datos de comparación en Modelo Analítico 10 (Sv 1.50m) VS simulación con IA 10 (Sv 1.50m): .....	429
Tabla 67. Datos de comparación en Modelo Analítico 11 (Sv 2 m) VS simulación con IA 11 (Sv 2 m):.....	432
Tabla 68. Datos de comparación en Modelo Analítico 12 (Sv 0.60 m) VS simulación con IA 12 (Sv 0.60 m): .....	435

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Análisis de estabilidad por el método ordinario de dovelas, superficie de la prueba de falla. Fuente: Das (2015).....	22
Figura 2. Evolución de las condiciones de estabilidad de un talud de excavación a lo largo del tiempo.....	27
Figura 3. Efecto del contenido de agua en la fuerza del suelo expansivo (35%) .....	31
Figura 4. Elementos de la curva de retención .....	31
Figura 5. Falla de fondo típica por rotación, en terraplenes sobre suelos blandos. ....	37
Figura 6. Resumen del procedimiento a seguir.....	77
Figura 7. Ubicación de los bancos para extracción de muestras de suelo. ....	79
Figura 8. Muestreo en 4 bancos de materiales.....	80
Figura 9. Almacenamiento de material en la Universidad UAQ.....	80
Figura 10. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.....	81
Figura 14. Gráficas de Granulometría.....	95
Figura 15. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.....	96
Figura 15. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.....	97
Figura 16. Gráfica de barras Elaboración propia.....	112
Figura 17. Escenarios gráficos analizados en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad.....	123
Figura 18. Esquema de uso del software Slide 2 .....	128
Figura 19. Escenario gráfico del prototipo 1 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	129
Figura 20. Escenario gráfico Prototipo 1 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	135
Figura 21. Escenario gráfico del prototipo 2 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	139
Figura 22. Escenario gráfico Prototipo 2 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	145
Figura 23. Escenario gráfico del Prototipo 3 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	148
Figura 24. Escenario gráfico del Prototipo 3 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	158
Figura 25. Escenario gráfico del prototipo 4 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	161
Figura 26. Escenario gráfico Prototipo 4 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	168
Figura 27. Escenario gráfico del prototipo 5 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	171
Figura 28. Escenario gráfico Prototipo 5 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga. ....	181
Figura 29. Escenario gráfico del prototipo 6 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo	

condiciones de carga CICLICAS.....	184
Figura 30. Representación de cargas en prototipo 6 a escala real Sv 1m. Fuente: Elaboración propia.....	187
Figura 31. Escenario gráfico Prototipo 6 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.	193
Figura 32. Escenario gráfico del prototipo 6 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.....	196
Figura 33. Representación de cargas en prototipo 6 a escala real Sv 1m. Fuente: Elaboración propia.....	199
Figura 34. Escenario gráfico Prototipo 7 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.	206
Figura 36. Representación de cargas en prototipo 8 a escala real Sv 1.20 m. Fuente: Elaboración propia.....	211
Figura 65. Prototipo 1 Confinado solo de un lado, Sv 10 cm Norma Brasileña.....	330
Figura 66. Prototipo 2 confinado en ambos lados, Sv 10 cm Norma Brasileña. ....	331
Figura 67. Prototipo 3 Corte en geomallas, Sv 10 cm Norma Brasileña. ....	332
Figura 68. Prototipo 4 Confinado ambos lados, Sv 8 cm Norma Mexicana. ....	333
Figura 69. Prototipo 5 Corte en geomallas, Sv 8 cm Norma Mexicana. ....	334
Figura 70. Estructuras de IPR para montaje de los prototipos en laboratorio. ....	336
Figura 71. Pasos de Montaje Prototipo 1. ....	339
Figura 72. Pasos de Montaje Prototipo 2. ....	342
Figura 73. Pasos de Montaje Prototipo 3. ....	344
Figura 74. Pasos de Montaje Prototipo 4. ....	346
Figura 75. Pasos de Montaje Prototipo 5. ....	348
Figura 76. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 1. ....	354
Figura 77. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 1. .....	355
Figura 78. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 1. .....	356
Figura 79. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 2. ....	359
Figura 80. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 2. .....	360
Figura 81. Comportamiento Tiempo Deslizamientos de los 5 micrómetros Prototipo 2. .	361
Figura 82. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 3. ....	364
Figura 83. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 3. Fuente: Elaboración Propia.....	365
Figura 84. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 3. Fuente: Elaboración Propia.....	365
Figura 85. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 4. ....	369
Figura 86. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 4. .....	369
Figura 87. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 4. .....	370
Figura 88. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 5. ....	374
Figura 89. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 5. .....	374
Figura 90. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 5. .....	375

## INTRODUCCIÓN

El estudio de la estabilidad en terraplenes es fundamental en proyectos de infraestructura, ya que estas estructuras deben soportar cargas y resistir las condiciones climáticas y geotécnicas adversas. Tradicionalmente, la estabilización de terraplenes requiere de técnicas y materiales costosos que aseguren su durabilidad y seguridad. Sin embargo, en los últimos años han surgido tecnologías innovadoras que buscan optimizar estos procesos, reduciendo costos y mejorando la eficiencia. Entre ellas, el uso de geomallas biaxiales se ha consolidado como una solución efectiva para aumentar la resistencia y estabilidad de los terraplenes al demostrar mejoras sustanciales en la capacidad de carga y en la estabilidad de suelos sometidos a diferentes condiciones de carga, permitiendo una reducción significativa en el volumen de materiales y en el costo total de construcción.

Además, la incorporación de los modelos de Inteligencia Artificial (IA) en la predicción de fallas en terraplenes abre nuevas posibilidades para la gestión preventiva y el mantenimiento de estas estructuras. Estos modelos analíticos pueden analizar grandes volúmenes de datos geotécnicos y climáticos utilizando técnicas de correlación de datos característicos físicos y modelaciones para una evaluación detallada de las deformaciones del sistema, permitiendo anticipar posibles riesgos y optimizar los recursos destinados a la estabilización. Este enfoque combinado de estabilización mediante geomallas biaxiales en el correcto espaciado vertical y predicción de fallas con IA no solo representa un avance en términos de seguridad y sustentabilidad, sino también una oportunidad para generar ahorros sustanciales en costos y tiempo en proyectos de infraestructura.

En este contexto, el uso de geomallas biaxiales representa una alternativa eficiente para reducir costos en la estabilización de terraplenes. A su vez, la incorporación de modelos de inteligencia artificial permite optimizar el análisis del comportamiento del sistema, reduciendo la incertidumbre en el proyecto y evitando sobredimensionamientos que pueden generar incrementos innecesarios de costos. De esta manera, ambas herramientas se integran como un enfoque complementario para lograr soluciones técnica y económicamente eficientes.

## HIPÓTESIS

**“El uso de geomalla biaxial con el mejor espaciamiento vertical reducirá en un 25% el costo de estabilización, así mismo el monitoreo y control de los terraplenes mediante modelos de simulación de la inteligencia artificial se reducirán en un 85% las fallas”**

Para efectos de la presente investigación se estableció como estimación preliminar el valor del ahorro del 25% propuesto con relación al uso de geomallas biaxiales, derivado de un análisis exploratorio realizado en conjunto con el supervisor de la investigación, en el cual se evaluó un caso simplificado del sistema de refuerzo del suelo. En este análisis se compararon configuraciones de proyecto basadas en diferentes criterios normativos de espaciamiento vertical ( $S_v$ ), observando que aquellas que permiten un mayor espaciamiento implican un menor número de capas de geomalla y, en consecuencia, una reducción en el costo del sistema. Con base en esta relación directa entre espaciamiento y consumo de material, se propuso como valor de referencia inicial el 25%, el cual posteriormente es contrastado y validado a través de los resultados del análisis económico desarrollado en esta investigación.

Así mismo se propone como escenario teórico de referencia el porcentaje del 85% asociado a la implementación de modelos de inteligencia artificial que representa el impacto potencial de estas herramientas en la reducción de costos asociados a fallas en los terraplenes. Varios estudios han demostrado que los modelos de inteligencia artificial, en particular las redes neuronales artificiales y los algoritmos de aprendizaje automático, pueden predecir el factor de seguridad de pendientes con altos niveles de precisión y baja dispersión de errores (Pradhan et al., 2010; Nguyen et al., 2021), lo que permite anticipar las condiciones de inestabilidad antes de que ocurran fallas reales. En este contexto, la capacidad predictiva de la inteligencia artificial se traduce en una herramienta de toma de decisiones más eficiente, reduciendo la incertidumbre en el proyecto geotécnico y evitando

soluciones sobredimensionadas o costosas intervenciones correctivas. Por lo tanto, el valor propuesto no se interpreta como un resultado directo de la investigación, sino como una estimación conceptual del impacto máximo que podría lograrse mediante la implementación de modelos predictivos en las fases iniciales de diseño y evaluación de taludes.

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar cuál es el espaciamiento vertical óptimo en geomallas biaxiales como refuerzo interno en terraplenes, comparando la normativa brasileña y la mexicana, con ello proponer un criterio normativo y brindar una alternativa para el ahorro de costos en construcción y mantenimiento en terraplenes.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Comparativa entre normas conforme a la publicación técnica del Instituto Mexicano del Transporte no 382 “Diseño de muros reforzados con geosintéticos” ( $V_s = 0.80$  m) y la norma brasileña ABNT NBR 11682:2008 que se titula “Estabilidad de Taludes mediante geosintéticos” ( $V_s = 1$  m).
- Replicar características de los materiales y condiciones que brinda el artículo origen Ying Liu, Yongzhe Zhao, Deng Zhang y Zhiyong Liu (2022): “The long-term mechanical performance of geogrid-reinforced soil retaining walls under cyclic footing loading”, Case Studies in Construction Materials, e01642, Elsevier [ouci.dntb.gov.ua](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.101642). Seleccionando el material de relleno (arena) con base a diferentes pruebas de laboratorio con el fin de semejar los parámetros para realizar la modelación analítica y para el prototipo físico.
- Brindar resultados del mejor espaciamiento vertical ( $S_v$ ) con base a la información técnica arrojada en los resultados otorgando un criterio sustentado en las pruebas físicas, así como en los modelos analíticos con el fin de implementar una normativa que regule el uso de refuerzo con geosintéticos en terraplenes.

## I. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1 Suelo

De acuerdo con Liu et al. (2022) el uso de material de relleno arena estándar de Fujian, ampliamente utilizada en investigaciones geotécnicas en China por sus propiedades conocidas y reproducibles. Dicha arena posee una gravedad específica de 2.64, un tamaño medio de grano ( $d_{50}$ ) de aproximadamente 0.7 mm, y un coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) de 7.32. Las relaciones de vacíos máxima y mínima son 0.71 y 0.32, respectivamente, y el ángulo de fricción interna alcanzado en pruebas triaxiales es de  $44^\circ$  a una densidad relativa del 65 %.

La elección de este suelo corresponde a la necesidad de evaluar el comportamiento mecánico a largo plazo de muros de contención de suelo reforzados con geogrid, bajo condiciones de carga cíclica de cimentación. Su comportamiento bajo condiciones controladas permite analizar con precisión la deformación acumulada, la interacción con refuerzos geosintéticos y los efectos inducidos por vibraciones similares a las del tráfico o eventos sísmicos.

Aunque la arena de Fujian no presenta características expansivas típicas de arcillas de alta plasticidad, su uso controlado y homogéneo en laboratorio permite comparar resultados de forma repetible, excluyendo variables relacionadas con la actividad mineralógica o plasticidad del suelo.

Tabla 1. Propiedades físicas de la arena estándar de Fujian

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad / Observación</b>
Gravedad específica ( $G_s$ )	2.64	—
Relación de vacíos máxima ( $e_{max}$ )	0.71	—
Relación de vacíos mínima ( $e_{min}$ )	0.32	—
Tamaño medio de partícula ( $d_{50}$ )	0.7	mm
Coeficiente de uniformidad ( $C_u = d_{60} / d_{10}$ )	7.32	—

$d_{10}$		
Ángulo de fricción interna (a 65 % DR)	44°	Grados (obtenido en pruebas triaxiales)
Densidad relativa usada en pruebas (DR)	65 %	Porcentaje de compactación relativa

Fuente: Sridharan & Prakash (2016)

Además, los suelos son uno de los materiales más complejos, debido a su enorme variedad y a las propiedades variables a través del tiempo y espacio, lo que dificulta su medición y comprensión (Juaréz y Rico, 2006). Es necesario entender que el suelo es un recurso natural bioquímicamente dinámico que soporta todos los componentes del ecosistema terrestre. Su estudio requiere una ciencia interdisciplinaria que integre conocimientos de procesos biológicos, físicos y químicos, a lo largo del tiempo y el espacio (Rice et al., 2009).

Entre las propiedades mecánicas de un suelo, Terzaghi (1943) y Das (2015) coinciden en la Ecuación (1) conocido como criterio de falla de Mohr-Coulomb, pues determina el esfuerzo cortante; Terzaghi (1943) y Das (2015) consideran a la cohesión como uno de los principales factores de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos no saturados, así como al ángulo de fricción interna del suelo.

$$s = c + \sigma' \tan \phi \quad (1)$$

Donde:

$s$  = Resistencia al esfuerzo cortante

$c$  = Cohesión

$\sigma'$  = Esfuerzo efectivo

$\phi$  = Ángulo de fricción interna del suelo

Entonces, al considerar que el esfuerzo es definido como la fuerza sobre un área determinada, entonces, el esfuerzo total será la suma de

todas las fuerzas, incluyendo las fuerzas internas del suelo, como la presión de poro ( $U_w$ ), misma que considera Terzaghi (1943) en la ecuación (2).

$$s = c + (\sigma - u_w) \tan \phi \quad (2)$$

Ahora, los poros de un suelo pueden contener aire y agua, por lo que, Verruijt (2018) define al grado de saturación ( $G_w$ ) como la relación entre ellos; se obtiene por medio de la Ecuación (3, donde  $V_w$  es el volumen de agua y  $V_v$  es el volumen de vacíos (aire y agua).

$$G_w = V_w/V_v \quad (3)$$

Si consideramos este último concepto para obtener esfuerzo efectivo; Debe aplicarse a través de la ecuación (4) propuesta por Bishop en 1959. Pues bien, expone la influencia sobre la tensión efectiva ( $\sigma'$ ) de la tensión cortante ( $\sigma$ ), la presión de poro del aire ( $U_a$ ), el agua ( $U_w$ ) y un parámetro relacionado con el grado de saturación ( $\chi$ ), que varía de cero a uno.

$$\sigma' = (\sigma - U_a) + \chi(U_a - U_w) \quad (4)$$

La definición de esfuerzo cortante en el suelo se utiliza para cuantificar la estabilidad de un talud. En este sentido, Das (2015) describe el método del segmento o segmento como una opción; Como se puede observar en la Figura 1, apartado (a), el arco AC representa la superficie de prueba de falla que se divide en varias dovelas que no pueden tener diferentes anchos. Ahora, en la Figura 1, apartado (b), se representa una unidad de longitud perpendicular al arco y las fuerzas que actúan sobre él. Esto incluye la componente normal y tangencial de la reacción ( $N_r$  y  $T_r$ ), las fuerzas normales que actúan sobre los lados del segmento ( $P_n$  y  $P_{n+1}$ ) y las fuerzas cortantes que actúan sobre los lados del segmento ( $T_n$  y  $T_{n+1}$ ).

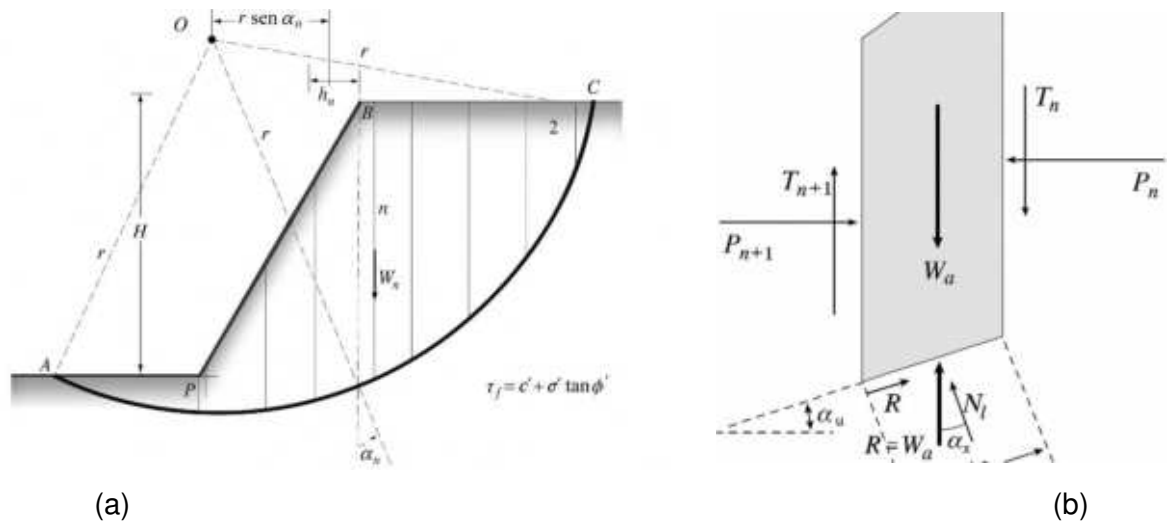


Figura 1. Análisis de estabilidad por el método ordinario de dovelas, superficie de la prueba de falla. Fuente: Das (2015)

Ahora, en la ecuación 4 el esfuerzo cortante ( $\sigma$ ) constituirá los momentos resistentes, Duncan et al. (2014) y Das (2015) demuestran que el requerimiento fundamental para la estabilidad de un talud es que la resistencia al corte del suelo sea mayor que el esfuerzo al corte requerido para el equilibrio, esto se debe a que el factor de seguridad (FS) es representado por Ecuación (5).

$$FS = \frac{\Sigma \text{Momentos resistentes}}{\Sigma \text{Momentos actuantes}} \quad (5)$$

Al respecto, Das (2015) describe que si FS es igual a 1 el talud se encuentra cercano a la falla, pero si alcanza un valor de 1.5 se considera un estable y aceptable para el diseño. Ahora bien, Morales (2002) afirma que para las fallas circulares es coherente utilizar el método de esfuerzos efectivos (Ecuación 6).

$$FS_u = \left( \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha_n} \right) \left[ \frac{\Sigma (c' b + W (1 - ru) \tan \Phi) [\sec \alpha_n]}{\left( 1 + \frac{(\tan \alpha_n \tan \Phi)'}{FS} \right)} \right] \quad (6)$$

Donde:

W: Peso total de la dovela, basándose en el peso volumétrico del suelo más la sobrecarga ( $q \times b$ ) si existiera.

$q$  Sobrecarga uniformemente repartida actuando sobre la cresta del talud

$b$  Ancho horizontal de las dovelas

$\alpha$  Ángulo formado por la tangente al punto medio de la dovela y la horizontal

$c'$  cohesión del suelo en la base de la dovela

$\phi$  ángulo de fricción en la base de la dovela

$u$  coeficiente de presión de poro, adimensional obtenida mediante:

$$U/(W/b)$$

Donde:

$$U = hwrw$$

$hw$  es la altura del agua

$rw$  es el peso volumétrico del agua

En esta investigación se utilizan diferentes modelos matemáticos y mecánicos para describir, analizar y predecir el comportamiento de terraplenes reforzados con geomallas biaxiales, así como para evaluar su estabilidad y factor de seguridad bajo diferentes condiciones de carga. Los principales modelos utilizados se describen a continuación:

Modelo constitutivo de resistencia al corte (Mohr – Coulomb)

El comportamiento mecánico del suelo se modela utilizando el criterio de falla de Mohr-Coulomb, que relaciona la resistencia al esfuerzo cortante con la cohesión efectiva y el ángulo de fricción interna del material. Este modelo se expresa matemáticamente como:

$$T = c + \sigma' \tan \phi$$

donde  $\tau$  es la resistencia al corte,  $c$  la cohesión,  $\sigma'$  la tensión efectiva y  $\phi$  el ángulo de fricción interna. Este modelo es fundamental para la caracterización del suelo arenoso utilizado y para los análisis de estabilidad

realizados en esta investigación (Terzaghi, 1943; Das, 2015).

#### Modelo de estrés efectivo para suelos no saturados

Para considerar la influencia del contenido de humedad y la presión de poro en el comportamiento del suelo se utiliza el modelo de tensiones efectivas propuesto por Bishop, el cual introduce un parámetro dependiente del grado de saturación del suelo. Este enfoque permite evaluar la variación de resistencia al corte en condiciones parcialmente saturadas, comunes en terraplenes viales expuestos a filtración de agua:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$$

dónde  $\sigma$  es el esfuerzo total,  $u_a$  presión de aire,  $u_w$  presión de agua y  $\chi$  un Parámetro relacionado con el grado de saturación (Bishop, 1959; Fredlund & Rahardjo, 1993).

#### Modelo de equilibrio límite para la estabilidad de taludes.

La evaluación de la estabilidad global del terraplén se realiza mediante modelos de equilibrio límite, en los que se compara la suma de los momentos resistentes con la suma de los momentos que actúan a lo largo de una superficie de falla potencial. El factor de seguridad (FS) se muestra en la ecuación (5)

En particular, se utilizan los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath, que satisfacen simultáneamente el equilibrio de fuerzas y momentos, permitiendo un análisis más riguroso del comportamiento del talud reforzado en condiciones estáticas y pseudo-sísmicas (Spencer, 1967; Duncan, Wright & Brandon, 2014).

#### Modelo matemático de interacción suelo-refuerzo.

El efecto estabilizador de las geomallas biaxiales se incorpora a través de modelos que consideran la contribución de las fuerzas de tracción movilizadas en el refuerzo al equilibrio global del sistema. Estos modelos permiten evaluar mecanismos de falla como extracción de refuerzo o falla por sobretensión, integrando la contribución del refuerzo al factor de

seguridad del talud (Jewell, 1996; FHWA, 2009).

Modelos numéricos implementados en software especializado.

Los modelos matemáticos descritos se implementan mediante simulaciones numéricas utilizando el software Slide v6.0, el cual discretiza el terraplén en segmentos y resuelve las ecuaciones de equilibrio límite para diferentes geometrías, condiciones de carga, espaciamientos verticales y configuraciones de refuerzo. Estas simulaciones nos permiten obtener factores de seguridad, superficies críticas de falla y distribuciones de tensiones en geomallas (Rocscience Inc., 2020).

Modelos de inteligencia artificial para la predicción de fallos

Además, se incorporan modelos de inteligencia artificial para predecir comportamientos e identificar zonas críticas de falla. Estos modelos se basan en técnicas de aprendizaje automático que analizan relaciones no lineales entre variables geotécnicas, geométricas y de carga, mejorando la capacidad predictiva frente a métodos puramente deterministas (Zhang, Goh & Li, 2015; Bui et al., 2016).

Así mismo en taludes o cortes anclados, las fuerzas y momentos del refuerzo geosintético deben considerarse con una ecuación, en la que el término del lado derecho (FS<sub>u</sub>) representa un factor de seguridad por el efecto estabilizador del refuerzo.

$$FS_r = FS_u + \frac{\text{(momento resistente, debido al refuerzo)}}{\text{momento motor}} \quad (7)$$

Dónde:

FS<sub>u</sub>= Factor de seguridad debido al efecto estabilizador del refuerzo.

Según Morales (2002), al momento de seleccionar el refuerzo, hay dos mecanismos de falla que se deben considerar: primero, la falla por extracción o adhesión del refuerzo ocurre cuando hay un desplazamiento excesivo de la capa de refuerzo geosintético en el suelo. Menciona que comúnmente se asocia a suelos friccionales, pues en este caso hay poca

interacción entre el suelo reforzado y el refuerzo; en segundo lugar, la rotura por sobreesfuerzo de la armadura, es decir, cuando la tensión actuante en tensión supera la tensión de trabajo admisible en dicha armadura, lo que resulta en una deformación inaceptable y posiblemente en su rotura.

Ahora bien, en términos de suelos no saturados, Flores y Zepeda (2004) destacan que se debe conocer el rango de variación de la resistencia del suelo a causa de las variaciones de humedad; para ello, Fredlund (1993) describe al ensayo triaxial como una de las pruebas más comunes para medir la resistencia al cortante de un suelo en el laboratorio; Verruijt (2018) describe que en una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de goma y ubicada en una cámara plástica o de vidrio, esta muestra se conecta a dos platos (arriba y abajo). El cierre de las válvulas y las características de la información obtenida en esta prueba dependerán de las condiciones bajo las cuales se aplicará el proyecto y con ello se pueden distinguir diferentes pruebas: Sin Drenaje, Consolidado - Sin Drenaje (CU) y Consolidado - Drenado (CD); Este último permite conocer parámetros como el ángulo de fricción y cohesión, sin embargo, los parámetros aparentes obtenidos en los anteriores se aplican cuando el proyecto producirá una carga en obra, es decir, cuando se aplica un terraplén o cimentación. Ahora bien, las características de aplicación de este proyecto nos llevan a realizar la prueba triaxial en condiciones de drenaje consolidado (CU), utilizando las buenas prácticas estandarizadas en la norma ASTM D7181.

Por otro lado, Cho et al. (2024) estudiaron mecanismos de falla en modelos físicos de taludes sometidos a infiltración de lluvia y observaron que el aumento de la presión del agua en los poros produce una reducción progresiva de la resistencia al corte y del factor de seguridad del suelo, ya que el aumento de la presión de poro reduce las tensiones internas

efectivas, facilitando el colapso del talud bajo cargas transitorias como lluvia intensa o saturación del suelo Figura 2.

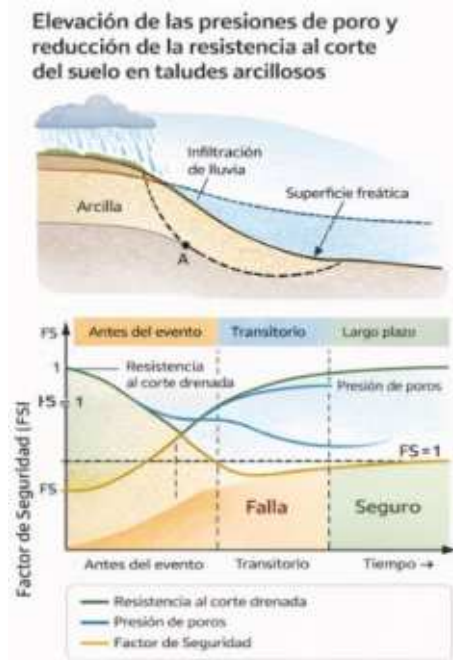


Figura 2. Evolución de las condiciones de estabilidad de un talud de excavación a lo largo del tiempo.

Fuente: Adaptado de Cho et al. (2024).

Respecto a la compactación de un suelo, Cetin et al. (2007) lo definen como la densificación del suelo causada por la expulsión de aire mediante la aplicación de energía mecánica. En este sentido, Das (2015) determina que, para la compactación en campo, los rodillos lisos son adecuados para el acabado de rellenos en suelos arenosos y arcillosos.

## 1.2 Efecto del contenido de agua en suelos arenosos

- Compacidad y humedad óptima

Según Ahmad et, al. (2023) analizan arenas silíceas (sin finos y con un 20 % de finos), se observó que las muestras compactadas al contenido de agua óptimo alcanzaron la mayor resistencia al corte al ser sometidas a humedad residual; en contraste, compactar al contenido residual e

incrementar la humedad resultó en menor resistencia, por lo tanto, el contenido de agua en la compactación determina la densidad relativa, que a su vez influye sensiblemente en la resistencia.

- Humedad y parámetros de corte

En arenas corralinas/gravas arenosas, se demostró que, al aumentar la humedad hasta cierto punto, la cohesión aparente aumenta casi linealmente (debido al agua capilar), mientras que el ángulo de fricción interna varía muy poco (< 1 %) y luego disminuye levemente, datos concretos: al pasar de 6 % a 24 % de humedad, la cohesión aumentó de ~17 kPa a ~69 kPa, mientras que  $\phi$  se mantuvo cerca de 38–40°, con cambios menores según Wu et, al. (2020).

- Mezclas arena–arcilla

Según Herrin et, al. (1962) en mezclas arenosas con pequeñas proporciones de arcilla, el contenido para lograr la máxima resistencia está en el lado más seco del óptimo de densidad. Dicho de otro modo, para suelos dominados por arena, se requiere una humedad menor que para el óptimo de densidad, además, una proporción del 75 % arena–25 % arcilla resulta eficaz tanto para densidad como resistencias máximas.

Tabla 2. Análisis de suelos arenosos:

Aspecto	Observaciones
Humedad en compactación	Compactar cerca del contenido óptimo mejora densidad y fuerza.
Cohesión aparente	Aumenta con humedad (agua capilar), hasta casi saturación.
Fricción interna	Cambia poco; puede disminuir si hay exceso de agua.
Grano fino o arcilla	Incluso un 20–25 % de finos afecta significativamente la relación agua–fuerza.

Fuente: Elaboración propia con información de los autores.

### [1.3 Comportamiento mecánico de suelos arenosos frente a cargas externas.](#)

considerando la influencia de factores clave como humanidad, la densidad, y el comportamiento.

- Determinación precisa de parámetros de resistencia

Se obtienen directamente el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y, si aplica, la cohesión aparente ( $c$ ). Estos parámetros son esenciales para análisis de estabilidad de taludes, capacidad de carga, y presión de tierras por Budhu, M. (2011).

- Simulan condiciones reales de carga

Según Das et, al. (2018) esta prueba permite aplicar diferentes presiones de confinamiento, replicando situaciones de campo como la profundidad o sobrecarga.

A diferencia de otros ensayos (como el corte directo), el triaxial puede simular condiciones drenadas y no drenadas, lo cual es crítico en suelos arenosos.

- Análisis del efecto del contenido de agua.
- Analizado por Head, K. H. (1992) en suelos arenosos, donde la cohesión natural es baja o nula, el contenido de agua puede afectar significativamente la fricción y la densidad relativa, el ensayo triaxial permite observar cómo la resistencia varía con el grado de saturación, algo vital en suelos como la arena de Fujian, utilizada en ensayos geotécnicos.
- Caracterización del tipo de falla

Muestra si la falla es **frágil** (ocurre de forma súbita, sin deformaciones previas importantes típicas del fenómeno de licuefacción) o **dúctil** (presenta deformaciones progresivas antes de colapsar), lo que influye en el diseño sísmico o de cimentaciones, permite visualizar si ocurre licuefacción (sucede debido a la vibración sísmica, aumenta la presión de poros del agua contenida en el suelo, provocando una disminución drástica de la resistencia al esfuerzo cortante; como consecuencia, el suelo pierde

temporalmente su comportamiento sólido y se comporta como un fluido, siendo incapaz de soportar cargas, las partículas tienden a acomodarse, el agua atrapada entre los poros no puede drenar rápidamente), un fenómeno típico en arenas saturadas bajo cargas cíclicas según Wu et al. (2020).

- Permite pruebas drenadas y no drenadas (CD, CU, UU)

Ahmad, W., & Uchimura, T. (2023) analizan que para suelos arenosos las condiciones consolidated drained (CD) son las más comunes, permiten evaluar cómo el suelo se comporta cuando el agua drena lentamente (lo cual es típico en arenas por su alta permeabilidad) generando que la carga que se aplica permita que el agua tenga tiempo suficiente para drenar y no se genere presión de poro excesiva.

#### **1.4 Compactación de un suelo**

Cetin et al. (2007) lo definen como la densificación del suelo causada por la expulsión de aire mediante la aplicación de energía mecánica. En este sentido, Das (2015) determina que, para la compactación en campo, los rodillos lisos son adecuados para el acabado de rellenos en suelos arenosos y arcillosos; al respecto, Hu et al. (2010) en su experimentación propone un rodillo liso para la compactación de un suelo cohesivo.

Por otro lado, Umesh et al. (2011) en su investigación cuantifica el esfuerzo de compactación necesario para un suelo expansivo al 35%; donde observa que, la fuerza del suelo disminuye abruptamente con el aumento del contenido de agua en el modelo y concluyendo que más allá de determinar el contenido de agua óptimo, el suelo reduce fuertemente su capacidad de esfuerzo al aumentar el contenido de agua, tal como se muestra en la Figura 3.

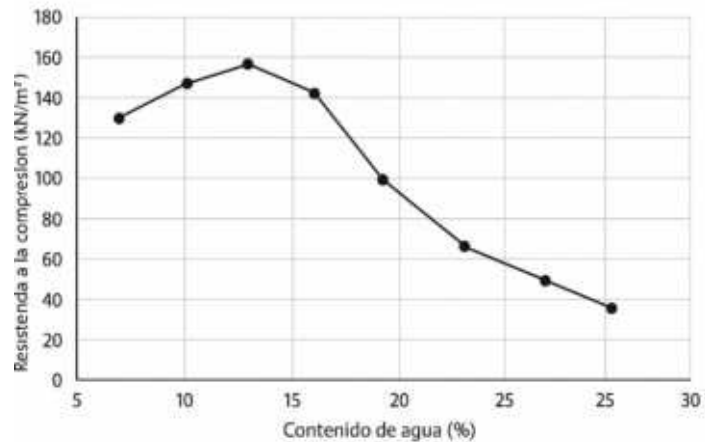


Figura 3. Efecto del contenido de agua en la fuerza del suelo expansivo (35%)

Fuente: Adaptado de Umesh et al. (2011).

Por otro lado, Alfaro (2008) en su investigación considera a la relación entre la succión y la humedad, como una característica de alta importancia en suelos no saturados, la cual puede ser definida mediante la curva de retención del agua en el suelo (Figura 4) y la define como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macros y microporos del suelo.

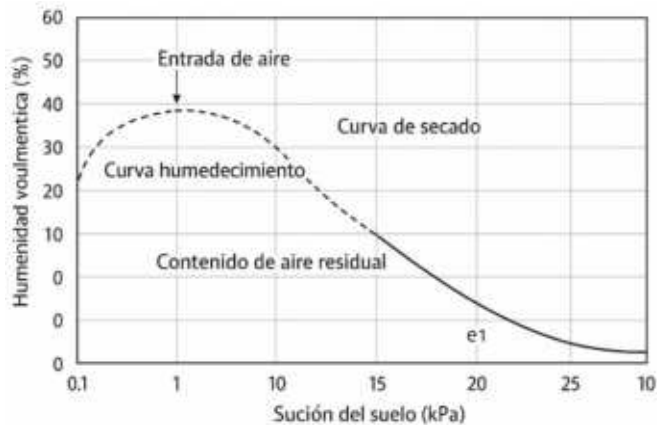


Figura 4. Elementos de la curva de retención

Fuente: Adaptado de Alfaro (2008).

## 1.6 Factor de seguridad

Ocasionado por la diversidad de las características del suelo, en la construcción o diseño de proyectos de ingeniería será posible encontrar suelos que no reúnen las características requeridas por éstos. De tal manera que los suelos podrán tener particularidades geotécnicas tales como baja resistencia al corte, baja rigidez, alta compresibilidad, baja permeabilidad, alta plasticidad, alta salinidad, suelos contaminados, entre otros, aunque muchas veces estos materiales son propicios a mejorarse para ser utilizados con el fin que les compete, es por ello que Das (2015) menciona que el mejoramiento del suelo muchas veces es denominado estabilización del suelo.

No obstante, la Real Academia de la lengua española (RAE) (2017) define que la estabilidad es “la cualidad de un objeto o situación de permanecer estable, es decir, mantenerse sin peligro de cambiar o caer”. Así que, con el objeto de definir la estabilidad de un suelo, Jansen et al. (2009) puntualiza cuatro tipos de indicadores a considerar: a) Físicos: Retención y transmisión de agua, estructura del suelo; b) Químicos: capacidad de intercambio catiónico, pH, niveles de nutrientes; c) Biológico: diversidad, fauna, concentración microbiana, profundidad de enraizamiento, contenido de materia orgánica; d) Archivos computacionales: Modelos regionales de bases de datos de los estudios de suelos.

Uno de los ejemplos más comunes de proyectos de ingeniería en vías terrestres es el talud, definido por Juárez y Rico (2006) como cualquier superficie inclinada respecto al horizonte adoptada permanentemente por las estructuras de la tierra, ya sea por acción humana o de forma natural. Das (2015) precisa que, para entender los taludes, es necesario conocer los principios de la resistencia a la cizalla o cortante del suelo (tensión

máxima que soporta el suelo antes de deslizarse o fallar), función que involucra la cohesión entre partículas, la resistencia a la fricción entre partículas sólidas, el contenido de humedad y la presión del agua intersticial en la masa del suelo. Terzaghi (1943) categoriza la falla de un talud bien definido y producida por un cizallamiento como deslizamiento.

Por lo tanto, para que Das (2015) verifique la seguridad de taludes naturales, taludes de excavación y/o terraplenes compactados, se debe realizar un análisis de la estabilidad del talud, lo que implicaría la determinación de un factor de seguridad, el cual se compone de la relación entre la resistencia cortante promedio del suelo y el esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla. A su vez, Duncan et al. (2014) establecen que al análisis de pendientes se pueden aplicar métodos como ecuaciones simples, tablas, software de hojas de cálculo y programas de computadora para la estabilidad de taludes o una combinación de los anteriores; que se utilizan para calcular un Factor de Seguridad (FS). Las regulaciones de la Asociación Estadounidense de Funcionarios de Transporte por Carreteras Estatales (AASHTO) dictan que para evaluar una estructura de terreno a largo plazo, se debe garantizar un factor de seguridad mínimo contra el deslizamiento rotacional de 1.25.

En el diseño de muros estabilizados mecánicamente y taludes reforzados, organismos como la Administración Federal de Carreteras (FHWA) establecen que el análisis debe considerar mecanismos potenciales de falla como estabilidad general, capacidad portante, deslizamiento, vuelco y estabilidad interna, cada uno con factores mínimos de seguridad generalmente iguales o mayores a 1.3, tanto en condiciones estáticas como sísmicas (FHWA-NHI-00-043, 2001; FHWA-NHI-10-024, 2009). Además, guías técnicas especializadas señalan que el factor de seguridad cumple la función de garantizar un margen suficiente frente a las incertidumbres inherentes al comportamiento del suelo, la variabilidad de las cargas, las condiciones de humedad y el desempeño de los sistemas

de refuerzo, por lo que su determinación debe integrar tanto la resistencia a los esfuerzos cortantes como los efectos de la interacción agua y suelo-refuerzo (MaccaFerri, 2015). Por lo tanto, el uso del factor de seguridad permite establecer proyectos robustos y confiables, asegurando que la estabilidad de la estructura supere los requisitos esperados durante su vida útil.

Por otro lado, derivado de las diversas propiedades de los suelos, surge la necesidad de reforzarlos con otros materiales, tal como lo afirma Ziegler (2016) la retención de suelos se ha realizado desde hace más de 3,500 años, cuando los sumerios utilizaban tiras de caña para estabilizar los cimientos y las paredes de sus construcciones. Asimismo, en Roma se utilizaban troncos sumergidos en diferentes tipos de suelo para construir muros de contención. Además, se produjo la construcción de la Gran Muralla China (2000 a.C.), cuya construcción tomó más de 20 siglos, donde los emperadores buscaron proteger sus dominios de los invasores, construyendo la línea defensiva más grande del mundo, utilizando el principio de suelo reforzado en su construcción.

De manera similar, otro grupo de materiales de refuerzo surgió en 1926, cuando el Departamento de Carreteras de Carolina del Sur utilizó bloques de algodón como refuerzo para pavimentos asfálticos. A partir de entonces, en 1940 con el inicio de la fabricación de polímeros sintéticos y en 1970 con el desarrollo de las industrias petroquímicas, se fortalecieron las técnicas de producción de geotextiles. Según Das (2015), los geotextiles, junto con las geomallas, geomembranas, geofom y geocompuestos, conforman los geosintéticos, materiales compuestos por polímeros no biodegradables.

En este sentido, Liu et al. (2012) afirman que, aunque el ángulo de pendiente típico en una pendiente está limitado por las características naturales de la resistencia al corte del suelo. Por otro lado, las soluciones

que utilizan geosintéticos permiten la construcción de taludes con ángulos más pronunciados que un talud de suelo natural mediante refuerzo de tracción. Por otro lado, Raisinghani y Viswanadham (2011) en sus investigaciones plantean que se utilizan materiales de relleno con permeabilidad relativamente baja para retener materiales en taludes, pero esto puede llevar a situaciones en las que el muro inicialmente diseñado para funcionar en condiciones drenadas realmente funcione en condiciones no drenadas, generando pérdida de resistencia del suelo, principalmente en la interfaz del suelo y el suelo de refuerzo; Debido a esto, se ha incrementado el uso de geosintéticos como sistema de refuerzo en taludes al ser materiales flexibles, de fácil instalación y de bajo costo.

### **1.7 Espaciamiento Vertical en Geosintéticos**

Los taludes de suelo reforzado (RSS) son una forma de suelo reforzado que incorpora elementos de refuerzo en estructuras construidas con taludes de tierra con pendientes de cara menores a 70 grados, utilizando geosintéticos que engloban materiales poliméricos flexibles utilizados en ingeniería geotécnica, como geotextiles, geomembranas, georedes y geomallas.

Por un lado, el Instituto Mexicano del Transporte, en su publicación “Proyecto de muros reforzados con geosintéticos” publicada en el año (2008), considera que el revestimiento es un componente del sistema de suelo reforzado que se utiliza para evitar el desgaste del suelo entre las hileras de refuerzos, pero a la vez el análisis de estabilidad interna juega un papel indispensable en el comportamiento del terraplén, por lo que el refuerzo en esta zona es fundamental y se propone que el espaciamiento vertical de estos refuerzos aquí en México no supere 800 mm. Altura entre capas. Por otro lado, la Norma Técnica ABNT NBR 11682:2008 que lleva por título “Estabilidad de taludes utilizando geosintéticos”. Esto confirma que el espaciamiento vertical en las capas de relleno no debe exceder 1

metro hasta que un espaciamiento de 1,20 sea una práctica recomendada. Sin embargo, investigaciones técnicas realizadas por la Administración Federal de Carreteras han demostrado que el espaciamiento reducido, típicamente entre 0,20 y 0,40 m, aumenta la rigidez interna del terraplén y reduce las deformaciones bajo carga, proporcionando una mayor interacción y confinamiento entre el suelo y el refuerzo (FHWA, 2003; FHWA, 2009).

Es necesario resaltar que en los caminos terrestres, la formación de terraplenes es una de las obras necesarias para poder construir cualquier vía, ya sean obras nuevas, proyectos de rehabilitación, modernización o ampliación; La mayoría de los taludes están formados por suelos con diferentes características, las cuales deben ser comprendidas y analizadas antes de su uso. Sin embargo, existen suelos problemáticos o inestables que por sus características complejas en condiciones de parcialmente saturación durante la construcción y una vez en operación hidratados, pueden generarse fenómenos en la masa del suelo como dispersión, colapso, expansión y, por tanto, pueden verse afectadas sus propiedades de resistencia frente al ingreso de agua, especialmente en terraplenes contruidos con suelos delgados.

### **1.8 Geotextiles como Refuerzo**

Por un lado Moreno et al., (2015) interpreta que para los refuerzos en terraplenes se usan materiales como geotextiles no tejidos a los cuales se les denominan geosintéticos y que son fabricados mediante la transformación industrial de sustancias químicas denominadas polímeros más conocido como plásticos, que su forma elemental, de polvos o gránulos, son convertidos mediante uno o más procesos, en láminas, fibras, perfiles, películas, tejidos, mallas, etc., o en compuestos de dos o más de ellos, existiendo también algunas combinaciones con materiales de origen vegetal". En la estabilización de los suelos blandos que se caracterizan por

la presencia de suelos tropicales, con altos grados de meteorización y presencia excesiva de humedad, se derivan en bajas resistencias de corte, no aptas para la cimentación de estructuras y mediante el uso de geosintéticos es posible la estabilización de los suelos blandos, logrando plataformas de trabajo y niveles aceptables de reacción a nivel de subrasante para la conformación de vías. Estos materiales se han usado a través del tiempo, siendo esta una alternativa económica, técnicamente viable y de facilidad constructiva para la conformación de capas granulares sobre suelos blandos, especialmente cuando los suelos de apoyo con baja capacidad portante y parámetros geomecánicos diferentes.

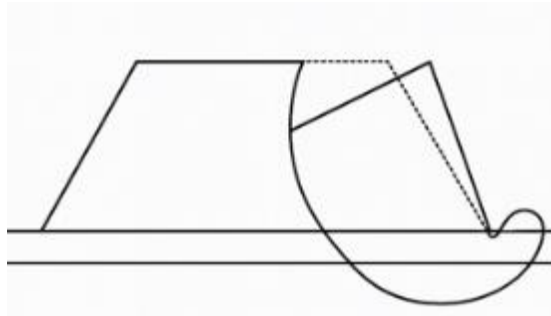


Figura 5. Falla de fondo típica por rotación, en terraplenes sobre suelos blandos.

Fuente: (Moreno et al., 2015)

El uso de geotextil tejido para el control de fallas de fondo en el caso de los terraplenes de sobre suelos extremadamente blandos (Figura 5), este geotextil actúa como un elemento de refuerzo a nivel de la base, funciona generando fuerzas de control ante los momentos inestables generado por el peso propio de estructura; esto impide la típica falla de fondo cuando excede la resistencia al corte no drenado de los suelos saturados.

La optimización y simulación son dos áreas donde la inteligencia artificial (IA) ha tenido un impacto significativo en los análisis de estabilidad de taludes. Estas técnicas ayudan a mejorar la precisión, eficiencia y

efectividad de las evaluaciones y diseños geotécnicos. Por otro lado, el mismo Moreno et al., (2015) nos habla de la capacidad hidráulica del geotextil tejido, se convertirá en una barrera hidráulica, generando excesos de presión de poro granulares y subrasante, lo que se traduce en ahuellamientos prematuros, incluso durante la fase de construcción. Se recomienda la permeabilidad del geotextil en función de la permeabilidad del suelo:

$$K_{\text{Geotextil}} > K_{\text{Suelo}}$$

Actualmente, la normativa mexicana no define el uso de las geomallas o geotextiles considerando las características de los materiales. En este sentido, la Norma N-CTR-CAR-1-01-012/01 tiene por objeto definir las opciones de recubrimiento de taludes para proteger los suelos de la erosión; por el contrario, como se ha definido previamente, la erosión no es el único problema que puede conllevar el uso de suelos en la construcción de las vías terrestres. En todo caso, la norma N-CTR-CAR-1-01-014/100 considera el abatimiento de taludes para mejorar la estabilidad en cortes y terraplenes, mediante el corte y remoción de material para obtener un talud con menor inclinación que resulte estable; pero como ya se ha mencionado los costos de esta decisión aumentan al ejecutarse y sin solucionar la situación. Sin embargo, en el apartado de características de los materiales se incluye la norma N-CMT-6-01-001/13, en la que se define que los geotextiles en terracerías pueden usarse para evitar la pérdida de finos, la mezcla de capas adyacentes, así como para reforzar las propiedades mecánicas de las capas y estabilización de suelos; en todo caso, esta norma contiene las características que deben cumplir los geotextiles, pero no proporciona las características de los suelos para su uso.

Por otro lado, la investigación de Chen et al (2007) afirmó que la principal razón por la que se reduce del esfuerzo cortante en un relleno de arcillas ante el incremento del contenido de agua es un mal drenaje y es por esto que colapsan estas estructuras.

En cuanto a la longitud de refuerzo Chen et al. (2007) define que existe una longitud crítica al ser rebasada no produce ninguna mejora; en cambio, cuando se disminuye el espaciamiento vertical si se reduce esta distancia. Ahora bien, específicamente ante propiedades como arcillas, el diseño del espaciamiento de refuerzo calculado disminuye cuando la humedad rebasa el 41% o cuando se encuentra cercano al límite líquido.

De acuerdo con Nicholson (2015), los geotextiles deben cumplir con dos criterios al ser seleccionados: inicialmente, el tamaño de la apertura entre hilos debe ser menor que el de las partículas, en este caso, el primero se determina por medio de ASTM D 4751 y el segundo mediante ASTM D 422; después, el filtro debe ser lo suficientemente grueso permitiendo que pase adecuadamente el flujo.

Tabla 3. Características del geosintético/geomalla

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>15 S</b>	<b>20 S</b>	<b>30 S</b>	<b>40 S</b>
Resistencia a tensión MD (ASTM D 6637)	kN/m	15	20	<b>30</b>	40
Resistencia a tensión al 2% def. MD	kN/m	5	7	10.5	14
Resistencia a tensión al 5% def. MD	kN/m	7	14	21	28
Deformación MD	%	13	13	13	13
Resistencia a tensión CD (ASTM D 6637)	kN/m	15	20	30	40
Resistencia a tensión al 2% def. CD	kN/m	5	7	10.5	14
Resistencia a tensión al 5% def. CD	kN/m	7	14	21	28
Deformación CD	%	10	10	10	10
Eficiencia de resistencia en la unión	% (GRI GG2/GG1)	95	95	95	95

Fuente: Elaboración propia con información de MaccaFerri de México (2025)

Tabla 4. Características del material de relleno (arena tipo Fujian)

<b>Parámetro</b>	<b>Valor / Descripción</b>
Tipo de suelo	Arena estándar de Fujian
Gravedad específica (Gs)	2.64
Densidad relativa	70 % (ensayos triaxiales realizados a 65 %)
Ángulo de fricción interna ( $\phi$ )	44° (determinada por pruebas triaxiales)
Tamaño medio de grano ( $d_{50}$ )	0.7 mm
Coefficiente de Uniformidad (Cu)	7.32
Relación de vacíos (emin-emax)	0.32 – 0.71
Material de Refuerzo	Geogrilla biaxial de polipropileno
Tamaño de malla del geogrid	38 mm × 38 mm
Espesor / ancho de nervadura	2 mm
Resistencia a tracción (máx.)	9 kN/m
Resistencia a 2 % y 5 % deform.	4 kN/m (2 %) y 8 kN/m (5 %)
Método de prueba	Pruebas triaxiales y ensayos de tracción (según GB/T 17689-2008)
Condiciones de carga	Carga cíclica sinusoidal de hasta 30 kPa a 0.4 Hz
Configuración estructural	Muros de contención con 0–4 capas de geogrid, colocadas en ubicaciones variables

Fuente: Elaboración propia con información de Autores.

### 1.9 Prototipo Geotécnico

De acuerdo con Byrne (2014) un modelo geotécnico es una herramienta importante en el tema de la ingeniería, tanto él, como Robinson et al. (2019) describen que este elemento permite adentrarnos en el comportamiento de los suelos y podrían ayudar en los procesos de diseño de estructuras de tierra para mitigar los posibles riesgos en los elementos de escala real; coincidiendo con Vaughan (1994) quien opina que, en sí, la experimentación de prototipos es una guía para un mejor entendimiento y una mejor predicción de la conducta del suelo en el medio.

Con respecto a las dimensiones, en la bibliografía consultada se encontraron prototipos con objetivos similares, por ejemplo, en suelos reforzados los trabajos de Benjamim *et al.* (2007), Hu *et al.* (2010), Chen *et al.* (2007) y Koelewijn *et al.* (2014); sin embargo, las dimensiones de sus modelos fueron distintas: el primero utilizó dimensiones mucho mayores que los otros. Por otro lado, en trabajos con otros objetivos, los prototipos fueron creados restringiendo las medidas, con excepción del equipo diseñado por Islam y Gnanendran (2012), pues este puede adaptarse de acuerdo con las dimensiones que se requieran. Aun en ese caso, deberán reconstruirse las paredes y refuerzos. De lo anterior, es posible destacar que no se tienen medidas máximas o mínimas para el diseño de prototipos a escala.

Por otro lado, en cuanto a la forma del modelo, Dulcey *et al.* (2018) recomienda una cuadrangular, pues en su documento determina que la compactación de los materiales en un prototipo se facilita con márgenes de este tipo y, de igual manera, se observa que, en su mayoría, los sistemas siguen un patrón de vértices lineales.

Ahora, respecto a los materiales en prototipos geotécnicos, se ha encontrado que los utilizados son incluidos en los clasificados como estructurales por Askeland *et al.* (2013), por lo que principalmente buscan dar soporte a todos los componentes del sistema, contener las muestras y que la fricción entre las paredes y el material sea mínima para que no afecte los resultados obtenidos. Las estructuras se han formado de aluminio, madera, acero y acrílico; los primeros dos tienen en común ser materiales que no contaminan tanto, pues uno es un recurso natural renovable y el otro puede ser reutilizado con sólo el 5% de energía que se ocupa para su producción; sin embargo, las diferencias entre ellos resultan de las aportaciones al sistema, ya que la madera, por su textura, genera más fricción que el aluminio, independientemente si se encuentra en una aleación.

Por otro lado, los resultados presentados en la investigación de Benjamin et al. (2007) respecto al monitoreo de campo de rellenos sanitarios mostraron que el desplazamiento de las paredes laterales aumentó con el tiempo, y más aún durante las épocas de lluvias; Sin embargo, esto no impidió el seguimiento de desplazamientos horizontales mediante extensores mecánicos frontales mediante mediciones topográficas y asentamientos verticales con extensores magnéticos.

Respecto a los altos costos de los materiales y equipos generados, se desarrollaron prototipos como el propuesto por Islam y Gnanendran (2012), que reducen significativamente los costos respecto a otros similares; Además, este prototipo no genera reacción en el suelo donde se coloca, por lo que no requiere inversión extra en su cimentación; Otra ventaja es la inclusión de transductores que generan una simulación de carga sin necesidad de gatos hidráulicos; aunque la magnitud de la carga es limitada.

De igual forma, para verificar la funcionalidad de su modelo físico, Dulcey et al. (2018) compararon sus resultados con mediciones computacionales, mediante evaluaciones de prueba t para muestras con menos de 30 observaciones, y así obtuvieron los valores de dispersión de los resultados y determinaron que el modelo propuesto es capaz de reproducir la filtración en capas de suelo granular.

Con el objeto de comprobar su teoría, Hu *et al.* (2010) realizaron pruebas con el mismo suelo, primero sin refuerzo y después con un refuerzo, 4 cm de geosintéticos espaciados verticalmente por 5 cm entre cada uno; los resultados de Hu *et al.* (2010) mediante el análisis fotográfico de los desplazamientos demostraron que en la prueba realizada sin refuerzo una grieta había ocasionado la falla, debido a que el incremento de la fuerza centrífuga causó que esa se propagará; sin embargo, cuando el autor analizó el mismo sistema añadiendo el refuerzo de geosintéticos concluye que éste influyó al retrasar los deslizamientos horizontales, a su vez, estos

los verticales.

En resumen, la literatura indica que no todos los comportamientos del suelo pueden determinarse mediante la construcción y experimentación sobre prototipos (2015); En este sentido, Fang y Li (2016) denotan que a escala macroscópica, el suelo presenta un comportamiento ventajoso como medio continuo; Esto se debe a que en la microescala y mesoescala influye el tamaño, estado y superficie de las partículas; Por ello, sugieren establecer primero la relación teórica a escala micro-meso y, por tanto, obtener resultados correctos respecto al comportamiento macroscópico. Por otro lado, la bibliografía consultada determina qué prototipos se pueden utilizar para obtener resultados docentes; Asimismo, dicta una variedad de prototipos construidos con diferentes objetivos, entre ellos analizar el comportamiento del suelo en diferentes situaciones. Así, será posible realizar experimentos didácticos sobre modelos físicos, pero no es posible afirmar que los resultados a macroescala sean equivalentes.

Ahora bien, los materiales utilizados en prototipos deberán atender lo mencionado por Askeland et al. (2013), es decir, en la selección regirán las condiciones en las que será utilizado, con el objeto de que no influya el su comportamiento ante ciertas exposiciones físicas, químicas o biológicas; además, como afirman Islam y Gnanendran (2012) deberá cumplir económicamente con el diseño. Por otro lado, la utilización de cubos de hormigón como elementos de confinamiento en el modelo físico se basa en que el Manual M·MMP·2·02·063/24 establece procedimientos y dimensiones estandarizados para la preparación de probetas cúbicas de hormigón, permitiendo tamaños reducidos siempre que mantengan proporcionalidad y calidad en su fabricación. Esto asegura que los cubos mantengan una rigidez y un comportamiento mecánico representativos, lo que los hace adecuados para funcionar como paredes confinantes en modelos a escala. Dado que los cubos utilizados (7,5, 10 y 30 cm) cumplen los criterios del manual, su uso es técnicamente válido para reproducir las

condiciones de confinamiento dentro del terraplén.

Mientras tanto, Esmaeili et al. (2018) construyeron 5 terraplenes a escala (240 x 235 x 220 cm), de los cuales uno se formó sin refuerzo y los siguientes se reforzaron con una a cuatro capas de geomalla. Al final compararon los resultados de la resistencia que brinda cada estructura; Es de destacar que entre las propiedades de la geomalla describen un material de polipropileno con aberturas rectangulares, con un espaciamiento máximo de 41 mm. Luego de construir los modelos, se realizaron pruebas de carga utilizando un gato hidráulico de 30 toneladas sobre una viga IPE220 colocada en la cresta del terraplén para ejercer una carga uniforme. La fuerza así impuesta al modelo en cada etapa fue igual a 2.5 KN y a su vez se continuó la carga de cada modelo hasta que se produjo la falla, que normalmente se presentó con la reducción de la carga en respuesta al aumento en el asentamiento de la cresta del terraplén; Según Zhang et al. (2010) la intensidad e inclinación de las precipitaciones no tienen efecto sobre la capacidad de infiltración del suelo, excepto en zonas donde existen fisuras por las que el agua penetra más profundamente.

### **1.10 Inteligencia Artificial (IA)**

La inteligencia artificial (IA) es un área de la informática que se centra en el desarrollo de sistemas capaces de realizar tareas que, en condiciones normales, requerirían inteligencia humana, como el aprendizaje, la toma de decisiones y la identificación de patrones complejos (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016).

En el campo de la ingeniería geotécnica, la IA ha ganado relevancia debido a la naturaleza inherentemente compleja del comportamiento del suelo, que depende de múltiples variables que interactúan de forma no lineal, como la cohesión, el ángulo de fricción, el peso volumétrico y las condiciones geométricas del sistema. Estas interacciones hacen que sea difícil representarlas utilizando modelos deterministas tradicionales, como

los métodos de equilibrio límite.

En este contexto, la IA se integra en esta investigación como una herramienta complementaria que permite analizar, modelar y predecir el comportamiento de los sistemas geotécnicos, particularmente en fases donde la variabilidad de los datos y la complejidad del sistema requieren enfoques más flexibles.

Kumar y Singh (2019) analizaron el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA) para predecir el factor de seguridad en taludes, utilizando como base datos obtenidos mediante el método clásico de Bishop Simplificado. En su investigación, se generaron varios escenarios de pendientes considerando parámetros geotécnicos como la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso volumétrico del suelo, la altura de la pendiente y las condiciones del agua. A partir de estos datos, los autores desarrollaron un modelo de inteligencia artificial entrenado mediante el algoritmo Backpropagation, obteniendo estimaciones del factor de seguridad con alta precisión. Los resultados demostraron que las redes neuronales son capaces de representar adecuadamente las complejas relaciones entre los parámetros del suelo y la estabilidad de las pendientes, reduciendo significativamente el tiempo de análisis en comparación con los métodos de cálculo geotécnico tradicionales.

Mientras que Pradhan, B., et al. (2010) analizaron la constante evolución de la ingeniería geotécnica y la integración de la Inteligencia Artificial (IA) en programas informáticos como Matlab, imprescindible para complementar y simplificar la interpretación de análisis de suelos complejos. A través de métodos como el análisis de equilibrio límite, esta integración facilita la obtención de datos precisos y el cálculo de factores de seguridad. La aplicación de IA busca mejorar la predicción de comportamientos geotécnicos, principalmente en aspectos como la estabilidad de taludes y la predicción de asentamientos. Matlab destaca por facilitar la implementación de algoritmos inteligentes y análisis de datos

complejos en este ámbito. Sin embargo, la implementación exitosa de la inteligencia artificial en la ingeniería geotécnica depende de la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros y expertos en IA, superando desafíos como la calidad de los datos y la interpretación confiable de los resultados.

En el campo de la ingeniería geotécnica, la aplicación de la inteligencia artificial no sólo se limita a predecir el comportamiento del suelo, sino que también contribuye a optimizar el diseño de soluciones de estabilización. Al permitir evaluar múltiples escenarios de manera eficiente y reducir la necesidad de iteraciones sobre modelos tradicionales o pruebas físicas, se reducen los recursos y el tiempo requerido en la etapa de análisis. Esto se traduce en menores costos indirectos, facilitando una toma de decisiones más precisa y evitando grandes proyectos (Zhang et al., 2020).

- Aplicaciones en Vertederos: Se espera que la IA automatice tareas rutinarias, mejore la eficiencia en proyectos geotécnicos y ofrezca simulaciones en tiempo real para predecir posibles fallos y recomendaciones.

#### **1.10.1 El Aprendizaje Automático**

Machine Learning es una subdisciplina de la inteligencia artificial que permite a los sistemas aprender patrones a partir de datos sin necesidad de ser programados explícitamente para cada caso particular (Mitchell, 1997).

En el desarrollo de esta investigación se utiliza el aprendizaje automático en la etapa de procesamiento y análisis de datos, donde se busca identificar relaciones entre variables geotécnicas como:

- cohesión ( $c$ )
- ángulo de fricción ( $\phi$ )
- peso volumétrico ( $\gamma$ )
- geometría del sistema

A través de este proceso, el modelo puede reconocer tendencias y comportamientos que luego se utilizarán para modelar y predecir el desempeño del sistema analizado.

### 1.10.2 Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Las redes neuronales artificiales son una de las principales herramientas de aprendizaje automático y se inspiran en el funcionamiento del cerebro humano. Estas redes están formadas por neuronas artificiales organizadas en capas, que procesan información asignando pesos a las variables de entrada.

El funcionamiento básico de una neurona artificial se expresa por:

$$y = f(\sum_{i=1}^n w_i x_i + b)$$

donde  $x_i$  representa las variables de entrada,  $w_i$  los pesos asociados,  $b$  el sesgo y  $f$  la función de activación.

Dentro del flujo de esta investigación, las redes neuronales se utilizan en la etapa de **modelado del comportamiento geotécnico**, permitiendo establecer relaciones entre los parámetros de entrada y variables de salida, como el factor de seguridad.

Este enfoque es particularmente útil en geotecnia, ya que permite modelar fenómenos complejos sin necesidad de simplificaciones excesivas, mejorando la capacidad predictiva del análisis (Pradhan et al., 2010; Bui et al., 2016).

### 1.10.3 IA generativa y modelos de lenguaje

La IA generativa corresponde a un tipo de inteligencia artificial capaz de producir nuevos contenidos a partir de datos previamente aprendidos. Dentro de esta categoría se encuentran herramientas como ChatGPT, Gemini y GitHub Copilot, que se basan en modelos de lenguaje tipo Transformer (Vaswani et al., 2017).

En esta investigación, estas herramientas no participan

directamente en el cálculo geotécnico, sino en la etapa de desarrollo computacional, donde se utilizan para:

- asistir en la escritura de códigos
- automatizar procesos repetitivos
- estructurar algoritmos de cálculo

Esto permite mejorar la eficiencia en la implementación del modelo sin sustituir el criterio ingenieril.

#### 1.10.4 Entorno de desarrollo e implementación (Visual Studio Code y Python)

La implementación práctica del modelo se realiza utilizando Visual Studio Code, que funciona como un entorno de desarrollo que permite integrar en una misma plataforma la programación, el análisis de datos y la inteligencia artificial en la plataforma (Microsoft, 2023)

Dentro de este entorno, el lenguaje de programación utilizado es Python, debido a su amplia aplicación en ingeniería y ciencia de datos, así como a la disponibilidad de bibliotecas especializadas para análisis numérico y modelación computacional (Python Software Foundation, 2023)

Python permite:

- Realizar cálculos matemáticos complejos
- Procesar grandes volúmenes de datos
- Implementar modelos de aprendizaje automático
- Automatizar procedimientos de análisis

Para realizar esta investigación se utilizan varias extensiones dentro de Visual Studio Code, entre las que destacan las siguientes:

- **Python (Microsoft):** permite ejecutar código y gestionar el entorno de programación (Microsoft, 2023)
- **Pylance:** proporciona análisis de código estático,

autocompletado y detección de errores (Microsoft, 2023)

- **Depurador de Python:** facilita la identificación y corrección de errores durante el tiempo de ejecución (Microsoft, 2023)
- **NumPy Pilot:** permite trabajar con funciones matemáticas y matrices numéricas.

Estas herramientas permiten transformar datos geotécnicos en resultados computacionales de manera eficiente, asegurando precisión y trazabilidad en los cálculos, lo cual es fundamental en el análisis ingenieril.

#### 1.10.5 Flujo de implementación de la IA en la investigación

La integración de la inteligencia artificial en esta investigación se desarrolla a través de una secuencia estructurada que permite organizar el análisis desde la recolección de datos hasta la interpretación de resultados, asegurando coherencia metodológica y trazabilidad en el proceso (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016; Mitchell, 1997).

Recopilación de datos:

Se consideran parámetros geotécnicos obtenidos de literatura especializada, pruebas de laboratorio o simulaciones numéricas, como la cohesión ( $c$ ), el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), el peso volumétrico ( $\gamma$ ), la geometría del sistema y las condiciones de carga (Das & Sobhan, 2014).

Procesamiento de datos (aprendizaje automático)

En esta etapa se realiza la organización, depuración y preparación de los datos, permitiendo identificar patrones y relaciones entre variables mediante técnicas de aprendizaje automático (Mitchell, 1997).

Modelado (Redes Neuronales)

Se utilizan modelos basados en redes neuronales artificiales para representar matemáticamente el comportamiento del sistema geotécnico, estableciendo relaciones entre variables de entrada y salida, como el factor de seguridad (FS) (Goodfellow et al., 2016; Bui et al., 2016).

Implementación computacional (Python + VS Code)

El modelado se implementa a través de herramientas computacionales que permiten ejecutar algoritmos, procesar datos y generar resultados reproducibles (Python Software Foundation, 2023; Microsoft, 2023).

#### Optimización de parámetros (Algoritmos genéricos)

Dentro del flujo de implementación, se incorporan algoritmos genéticos como técnica de optimización complementaria, basados en principios de evolución natural como selección, cruce y mutación. Estos algoritmos permiten explorar de forma automatizada múltiples combinaciones de variables geotécnicas y de diseño, con el objetivo de identificar configuraciones que mejoren el rendimiento del sistema, como aumentar el factor de seguridad o reducir las deformaciones (Mitchell, 1997; Goldberg, 1989).

En esta investigación su aplicación se centra en la evaluación de diferentes escenarios asociados a parámetros como altura del sistema, espaciamiento de geomallas y propiedades del suelo, facilitando la búsqueda de soluciones eficientes dentro de un amplio rango de posibilidades. Es importante resaltar que su uso es complementario y no reemplaza los métodos tradicionales ni criterios de ingeniería, sino que funciona como una herramienta de apoyo para optimizar el proceso de análisis.

#### Optimización y soporte (IA generativa)

Se utilizan herramientas de inteligencia artificial generativa, como ChatGPT y GitHub Copilot, para apoyar la estructuración de código y la automatización de tareas, sin reemplazar los criterios de ingeniería (OpenAI, 2023; GitHub, 2023).

#### Análisis de resultados

Finalmente, los resultados obtenidos se interpretan desde un enfoque ingenieril, validando su coherencia con el comportamiento esperado del sistema y contrastándolos con los métodos tradicionales.

### 1.10.6 Ventajas y Limitaciones

El uso de inteligencia artificial en el análisis geotécnico tiene varias ventajas, incluida su capacidad para modelar relaciones no lineales complejas entre variables, mejorar la precisión de las predicciones y automatizar procesos de cálculo que tradicionalmente requieren múltiples iteraciones (Goodfellow et al., 2016; Bui et al., 2016).

Asimismo, la implementación de estas herramientas permite optimizar el tiempo de procesamiento de datos, facilitando el análisis de múltiples escenarios y combinaciones de parámetros, lo que resulta especialmente útil en problemas donde intervienen numerosas variables (Mitchell, 1997).

Sin embargo, también existen limitaciones importantes que deben tenerse en cuenta. Entre ellos está la dependencia de la calidad y cantidad de los datos utilizados, ya que los modelos mal potenciados pueden generar resultados poco fiables. Además, es necesario validar los resultados obtenidos utilizando métodos tradicionales de ingeniería geotécnica para asegurar su consistencia (Das & Sobhan, 2014).

Por otro lado, algunos modelos de inteligencia artificial pueden presentar dificultades en su interpretación, lo que limita la comprensión directa de los procesos internos que conducen a un determinado resultado, situación conocida como “caja negra” (Goodfellow et al., 2016).

En este sentido, la inteligencia artificial debe entenderse como una herramienta complementaria que apoya el análisis, pero en ningún caso sustituye el criterio técnico del especialista, a quien le corresponde interpretar, validar y aplicar los resultados obtenidos.

## 1.11 Métodos de análisis y estabilización de taludes

Abramson et al., (2001) mencionan que los métodos de estabilización de taludes generalmente reducen las fuerzas impulsoras, aumentan las fuerzas de resistencia o ambas. Las fuerzas impulsoras se pueden reducir excavando material de la parte apropiada del suelo inestable y drenando el agua para reducir las presiones hidrostáticas que actúan sobre la zona inestable. Las fuerzas de resistencia se pueden aumentar mediante:

1º Drenaje que aumenta la resistencia al corte del suelo.

2º Eliminación de estratos débiles u otras zonas de potencial fracaso.

3º Construcción de estructuras de retención u otros soportes.

4º Suministro de refuerzo in situ.

5º Tratamiento químico (mejora del suelo para aumentar la resistencia al corte del suelo).

Como alternativa a la estabilización, se pueden evitar pendientes inestables adaptando el lugar de construcción o eligiendo un lugar completamente diferente.

La Tabla 5 resume los principales métodos de estabilización de taludes. Antes de poder seleccionar el mejor método, se deben determinar las causas reales o potenciales de la inestabilidad de la pendiente. A menudo hay múltiples factores que contribuyen que causan o pueden causar deslizamientos de tierra o inestabilidad de pendientes. No identificar las causas que contribuyeron a la falla puede hacer que el trabajo de estabilización sea ineficaz y que la inestabilidad de la pendiente sea recurrente. En este capítulo se analizan varios métodos de estabilización de pendientes.

Tabla 5. Resumen de los métodos para corregir y prevenir deslizamientos de tierra

Método de tratamiento y su efecto sobre la estabilidad	Tratamiento	Uso general		Frecuencia de éxito			Posición del tratamiento Relacionado con el real o masa móvil Potencial	Posibilidades y Limitaciones
		Corrección de prevención		Colapso	Diapositiva	Torrente		
Evitación/avoidance	Planificación y diseño de prevención de riesgo desde el inicio	x	x	2	2	2	Fuera de los límites	El método es económico
Sin efecto	Construcción del viaducto	x	x	3	3	3	Fuera de los límites	Aplicable a tramos cortos de laderas inclinadas
Movimiento de la tierra Reducción de las tensiones de corte	Traslado construcción del viaducto	x	x	N	1	N	Parte superior y cabeza	Más efectivo en rellenos de tierra en suelos de fricción.
	Extracción de la cabeza	x	x	1	1	1	En taludes de corte o terraplén	En masas superficiales relativamente pequeñas de material en movimiento
	Aplanamiento de la pendiente	x	x	1	1	1	Encima de la corona	Esencial en todo tipo
	Terrazas en pendientes	x	x	2	2	2	Sobre la superficie de una masa deslizante	Cubierta de roca permeable para controlar el flujo
Drenaje	Superficie	x	x	1	1	1	En todas partes, de la corona al desplante	Beneficioso en todos los tipos
Reducción de las tensiones de corte y	Zanjas	x	x	3	3	3	En todas partes, de la corona al desplante	Beneficioso en todos los tipos

aumento de la resistencia al corte del suelo	Tratamiento de pendientes	x	x	1	1	1	Sobre la superficie de una masa deslizante	Aplicable a formaciones rocosas
	Recorte de subrasante	x	x	2	2	2	Ubicado para interceptar y desviar agua subterránea	Grandes masas de suelo con flujo subterráneo.
	Sellado de grietas	x	x	3	3	N		Masas de suelo relativamente superficiales con flujo subterráneo
	Sellado de planos de juntas y fisuras	x	x	N	2	2		
	Drenajes horizontales subdrenaje	x	x	N	1	3		
	Trampas estabilizadoras de subdrenaje	x	x	N	3	3		
	Galerías de drenaje	x	x	N	3	3		
	Pozos de drenaje verticales	x	x	N	3	3		
	Sifón continuo	x	x	N	2	3		
	Estructuras de contención Aumenta la resistencia al deslizamiento	Soporte en el relleno de roca base	x	N	1	1		
Relleno de tierra		x	N	1	1		Base	Como contrapeso en la puntera proporciona

								fuerza adicional.
	Pilotes de muros de contención comunes o de cuna	x	3	3	3		Base	Masas en movimiento relativamente pequeñas
	Fijado en la superficie de deslizamiento	x	N	3	N		Base	La resistencia de la superficie de falla aumenta por la cantidad de tensión requerida para hacer que los pilotes fallen.
	Anclajes en roca	x	N	3	N		Base	Roca estratificada
	Anclajes cortos en pendientes	x	3	3	N		Cuesta arriba desde la carretera o estructura (cortes)	Pendiente erosionada protegida por una pantalla anclada a una formación subyacente del suelo
Otros métodos principalmente un aumento en la resistencia al corte	Endurecimiento de la masa deslizante cementación o tratamiento químico en la base	x	3	3	3		Cuesta arriba desde la carretera o estructura	Suelos sin cohesión
	Durante toda la masa	x	N	3	N		Base	Suelos sin cohesión

	Congelación	-	N	3	3		A lo largo de la masa deslizante	Para evitar el movimiento temporal de grandes masas
	Electro-Osmosis	-	N	3	3		A lo largo de la masa deslizante	Endurece el suelo reduciendo el contenido de agua.
	Uso de explosivos	x	N	3	N		En la parte inferior	Masa cohesiva relativamente superficial que recubre una masa de roca
								Superficie de deslizamiento fragmentada
								Los explosivos también pueden permitir que el agua se drene de la masa deslizante.

Fuente: (Abramson *et al.*, 2001)

### 1.12 Algoritmos Genéticos

Pablo et al., (2011) analizó que ubicar la superficie de falla crítica de un talud de suelo se torna tediosa y se cometen errores debido a la existencia de mínimos locales. En el caso de grandes taludes de suelo, los ingenieros se enfrentan con un espacio de búsqueda muy grande para emplear métodos de prueba y error de manera computacionalmente eficiente. Se propone un algoritmo genético para localizar la superficie crítica bajo condiciones y restricciones generales. Con el algoritmo se logró

un grado de convergencia prescrito y ha demostrado ser computacionalmente superior a otras rutinas de optimización, como el método de Monte Carlo y la aproximación por grilla de puntos. La determinación de la superficie de falla potencial (superficie de deslizamiento) y las correspondientes fuerzas tendientes a causar deslizamiento y a restaurar o estabilizar la masa deslizante, y el cálculo del margen de seguridad disponible son pasos esenciales en el análisis de estabilidad. El margen de seguridad del Fs para una superficie de falla se calcula como la relación entre la fuerza de contención (resistencia al corte) sobre la fuerza de deslizamiento (esfuerzo de corte). Por lo tanto, la determinación de la superficie crítica de falla (una superficie de falla para la cual el Fs es mínimo) es central para un análisis de estabilidad de taludes. Un algoritmo genético es una técnica de búsqueda utilizada para encontrar soluciones aproximadas a problemas de búsqueda y optimización.

Rado et al., (2009) menciona como función objetivo el factor de seguridad de las superficies de deslizamiento propuestas, la cual se obtiene utilizando un programa de Elementos Finitos desarrollado específicamente para suelos (FECCUND, por sus siglas en inglés) junto a un módulo para la determinación de Factores de seguridad (FS). Se basa en la teoría del aprendizaje estadístico, utilizando técnicas de regresión y clasificación. Así como también el Factor de Seguridad (FS) del talud se ha modelado como un problema de regresión, mientras que el estado de estabilidad del talud se ha modelado como un problema de clasificación. Los parámetros de entrada son: peso unitario( $\gamma$ ), cohesión( $C$ ), ángulo de fricción interna( $\phi$ ), ángulo de pendiente( $b$ ), altura( $h$ ) y coeficiente de presión de agua de poro ( $r_{tu}$ ). Estos Algoritmos han desarrollado una salida probabilística y también se han desarrollado ecuaciones para el análisis de estabilidad de taludes. Se ha llevado a cabo un estudio comparativo entre el LSSVM desarrollado y una red neuronal artificial (ANN). Este estudio muestra que el LSSVM desarrollado es un modelo robusto para el análisis de estabilidad de

taludes.

Funcionamiento: los algoritmos genéticos (AG) son métodos de optimización inspirados en la evolución biológica. Utilizan procesos como la selección, el cruce y la mutación para encontrar soluciones óptimas a problemas complejos.

- Aplicación en Taludes: En el contexto de la estabilidad de taludes, los AG se pueden usar para optimizar el diseño de taludes, considerando múltiples variables y restricciones. Esto incluye la geometría del talud, los materiales de construcción, y las condiciones ambientales.

- Beneficios: Los AG permiten explorar un amplio espacio de soluciones posibles, identificando aquellas que minimizan el riesgo de falla y optimizan costos de construcción y mantenimiento.

### **1.13 Simulación**

Jiménez (2021) Respalda la simulación basada en agentes

- Funcionamiento: Este enfoque modela el comportamiento de cada partícula o agente individual dentro del talud. Cada agente sigue reglas simples, pero la interacción colectiva produce un comportamiento complejo que puede simular procesos de falla.

- Aplicación en Taludes: Modelar la dinámica del talud bajo diferentes condiciones (lluvia, sismos, etc.) para prever el comportamiento del terreno y diseñar medidas de mitigación efectivas.

- Beneficios: Permite una comprensión detallada de los mecanismos de falla y la influencia de factores individuales, lo que ayuda en el diseño de intervenciones específicas.

### **1.14 Elementos Finitos y Diferencias Finitas**

Tardeo y Zanabria (2016) Utilizaron el método determinístico con fines de cálculo del factor de seguridad de talud en el sector de estudio,

basándose específicamente en el análisis estático y análisis dinámico, por lo que este primero emplea los métodos de equilibrio límite y el método de elementos finitos.

- Funcionamiento: Estos métodos numéricos dividen el talud en una malla de elementos pequeños y resuelven las ecuaciones que describen el comportamiento del terreno en cada elemento.

- Aplicación en Taludes: Simular el comportamiento del talud bajo diversas condiciones de carga y evaluar la distribución de tensiones y deformaciones.

- Beneficios: Alta precisión en la predicción del comportamiento estructural y geotécnico, lo que permite diseñar taludes más seguros y eficientes.

En la presente investigación se desarrolla el análisis de estabilidad utilizando el software Rocscience Slide, el cual se basa en métodos de equilibrio límite (LEM). Estos métodos permiten evaluar la estabilidad de taludes mediante el cálculo del factor de seguridad (FS), considerando el equilibrio de fuerzas que actúan sobre posibles superficies de falla (Duncan & Wright, 2005).

El enfoque del equilibrio límite ha sido ampliamente utilizado en ingeniería geotécnica debido a su confiabilidad, simplicidad y eficiencia computacional para análisis de estabilidad en suelos y estructuras de contención. En este sentido, el Slide permite analizar múltiples condiciones geométricas y geomecánicas, facilitando la evaluación de escenarios bajo diferentes configuraciones de carga y propiedades del terreno.

Por otro lado, existen métodos numéricos avanzados como el Método de los Elementos Finitos (MEF) y el Método de Diferencias Finitas (FDM), que permiten modelar el comportamiento del suelo con mayor detalle a través de la discretización del dominio y la resolución de ecuaciones diferenciales que representan condiciones reales de tensión y deformación (Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2005). Sin embargo, estos

métodos implican una mayor complejidad en su implementación, así como mayores requisitos computacionales y una definición precisa de las condiciones de contorno.

En contraste, la presente investigación adopta un enfoque basado en métodos de equilibrio límite complementados con herramientas de inteligencia artificial, con el objetivo de optimizar el análisis sin aumentar significativamente la complejidad del modelo. En este contexto, la inteligencia artificial se incorpora como herramienta de apoyo al procesamiento de datos, la identificación de patrones y la evaluación eficiente de múltiples escenarios (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016; Mitchell, 1997).

Adicionalmente, se integran algoritmos genéticos como técnica de optimización en el ambiente computacional, implementados a través del lenguaje de programación Python, el cual permite explorar combinaciones de variables geotécnicas y de diseño con el fin de identificar configuraciones que mejoren el desempeño del sistema, particularmente en términos del factor de seguridad (Goldberg, 1989).

Asimismo, el desarrollo e implementación de modelos se realiza en el entorno Visual Studio Code, donde se ejecutan algoritmos y se procesan datos de forma reproducible (Microsoft, 2023; Python Software Foundation, 2023). Las herramientas de inteligencia artificial generativa, como ChatGPT y GitHub Copilot, se utilizan exclusivamente para soportar la estructuración de código y la automatización de tareas, sin intervenir directamente en los cálculos ni sustituir criterios de ingeniería (OpenAI, 2023; GitHub, 2023).

De esta manera, la investigación integra un enfoque híbrido en el que los métodos tradicionales de la ingeniería geotécnica, representados por el equilibrio límite, se complementan con herramientas de inteligencia artificial para mejorar la eficiencia del análisis, manteniendo siempre la validez técnica y el control del proceso a criterio del especialista.

### **1.15 Teoría de la Estabilidad de Taludes**

Fundamentos de Geotecnia según Ávila (2021) La estabilidad de taludes se basa en el análisis del equilibrio entre las fuerzas resistentes del suelo y las fuerzas actuantes que tienden a provocar falla. Este análisis permite determinar la condición de estabilidad mediante el cálculo del factor de seguridad (FS), que representa la relación entre las fuerzas mencionadas (Ávila, 2021).

Entre los métodos más utilizados para el análisis de estabilidad se encuentran los métodos de equilibrio límite (LEM), que permiten evaluar el comportamiento del talud considerando superficies potenciales de falla y condiciones de equilibrio estático. Estos métodos constituyen la base de los análisis desarrollados en esta investigación, debido a su amplia aplicación en ingeniería geotécnica y su eficiencia en la evaluación de escenarios (Duncan & Wright, 2005).

Por otro lado, existen métodos numéricos avanzados, como el análisis de elementos finitos (FEA), que permiten modelar con mayor detalle la distribución de tensiones y deformaciones en el suelo. Sin embargo, su implementación implica una mayor complejidad computacional y no forma parte del enfoque metodológico adoptado en este estudio, siendo considerado sólo como un referente teórico (Zienkiewicz et al., 2005).

En este sentido, los métodos clásicos de estabilidad, particularmente el equilibrio límite, sirven de base para la calibración y validación de los resultados obtenidos, así como para la integración de herramientas complementarias como la inteligencia artificial, que se utiliza para optimizar el análisis sin sustituir los fundamentos geotécnicos tradicionales.

### **1.16 Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático**

La inteligencia artificial (IA) se puede clasificar en diferentes categorías según el tipo de aprendizaje que utilice, siendo las más relevantes el aprendizaje supervisado, el aprendizaje no supervisado y el

aprendizaje profundo. Estas categorías permiten abordar problemas complejos a través del análisis de datos, identificando patrones y relaciones que no son fácilmente detectables mediante métodos tradicionales (Goodfellow et al., 2016).

El aprendizaje supervisado se basa en el uso de datos etiquetados para entrenar modelos capaces de predecir resultados, y es ampliamente utilizado en la estimación del factor de seguridad en taludes en función de parámetros geotécnicos como la cohesión, el ángulo de fricción y el peso volumétrico. Por otro lado, el aprendizaje no supervisado permite identificar patrones ocultos en los datos sin necesidad de etiquetas, lo que resulta útil en la clasificación de suelos y el análisis del comportamiento geotécnico. Por su parte, el aprendizaje profundo utiliza redes neuronales con múltiples capas que permiten modelar relaciones de alta complejidad, siendo especialmente útil en problemas donde intervienen múltiples variables, como el análisis combinado de drenaje, cargas y condiciones del suelo (Zhang et al., 2020).

En el campo de la ingeniería geotécnica, estas categorías de inteligencia artificial han demostrado ser herramientas efectivas para mejorar la precisión en la predicción del comportamiento del suelo y la estabilidad de las pendientes. Su aplicación permite optimizar procesos de análisis, reducir la incertidumbre en los modelos y apoyar la toma de decisiones en el diseño de estructuras terrestres, integrando enfoques innovadores que fortalecen el desarrollo de soluciones seguras y eficientes (Bui et al., 2018).

Huang et al. (2023) desarrollaron un análisis comparativo entre diferentes algoritmos de aprendizaje automático aplicados a la predicción de la estabilidad de pendientes. Para ello utilizaron una base de datos compuesta por 188 casos reales de taludes procedentes de investigaciones geotécnicas internacionales. Los modelos evaluados incluyeron Gradient Boosting Machine (GBM), Support Vector Machine (SVM), Random Forest

y Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Las variables analizadas incluyeron parámetros geotécnicos como cohesión del suelo, ángulo de fricción interna, altura del talud, pendiente y condiciones del suelo. Los resultados indicaron que el modelo Gradient Boosting Machine presentó el mejor rendimiento predictivo, mostrando una alta correlación entre los valores estimados y los valores reales del factor de seguridad. El estudio destaca el potencial de los modelos de aprendizaje automático como herramientas eficientes para realizar evaluaciones rápidas y precisas de la estabilidad de taludes durante la fase de diseño geotécnico.

Conceptos Fundamentales según López (2024)

- Redes Neuronales Artificiales (ANN): Modelos que imitan el funcionamiento del cerebro humano para reconocer patrones y realizar predicciones. Las ANN son útiles para modelar comportamientos no lineales y complejos en la estabilidad de taludes.

- Algoritmos de Optimización: Algoritmos genéticos (GA), optimización de enjambres de partículas (PSO) y algoritmos de colonia de hormigas (ACO) son técnicas que buscan soluciones óptimas en grandes espacios de búsqueda, aplicables al diseño de taludes y la optimización de geosintéticos.

- Machine Learning Supervisado y No Supervisado: Los métodos supervisados utilizan datos etiquetados para entrenar modelos predictivos, mientras que los no supervisados identifican patrones en datos no etiquetados. Ambos son relevantes para la evaluación de riesgos y la detección de anomalías en taludes.

### **1.17 Simulación Semi - Numérica**

La presente investigación se basa en un método semi - numérico basado en equilibrio límite (LEM), complementado con herramientas computacionales e inteligencia artificial como apoyo. Este enfoque combina principios clásicos de ingeniería geotécnica con técnicas modernas de

procesamiento de datos, lo que permite análisis eficientes sin aumentar innecesariamente la complejidad del modelo (Duncan & Wright, 2005; Mitchell, 1997).

El análisis desarrollado corresponde a un método numérico basado en equilibrio límite, que utiliza procedimientos iterativos para determinar el factor de seguridad del talud a partir del equilibrio de fuerzas sobre superficies potenciales de falla. A diferencia de los métodos avanzados de simulación numérica, como el método de elementos finitos o de diferencias finitas, la discretización de dominios no se realiza ni se modela el comportamiento continuo del suelo utilizando ecuaciones diferenciales, sino que las condiciones de equilibrio estático se evalúan en configuraciones definidas (Duncan & Wright, 2005; Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2005).

En este sentido, aunque el procedimiento utilizado es de carácter numérico, al basarse en cálculos computacionales e iteraciones para obtener resultados, no corresponde a una simulación numérica avanzada. La principal diferencia es que el método utilizado no busca representar el comportamiento interno del material en términos de tensiones y deformaciones, sino que se centra en determinar la estabilidad global del sistema a partir del equilibrio de fuerzas (Duncan & Wright, 2005).

Asimismo, se incorporan herramientas computacionales e inteligencia artificial para apoyar el procesamiento de datos, la optimización de parámetros y la evaluación de múltiples escenarios. Sin embargo, estas herramientas no reemplazan los fundamentos teóricos del método, sino que funcionan como un complemento que mejora la eficiencia del análisis y facilita la toma de decisiones basadas en criterios de ingeniería (Goodfellow, Bengio & Courville, 2016; Mitchell, 1997).

### **1.18 Integración de Datos y Sensores**

En el desarrollo de este trabajo se realizó el monitoreo y recolección de datos a través de la instrumentación del prototipo físico, utilizando micrómetros ubicados estratégicamente a diferentes alturas del modelo. Estos dispositivos permitieron el registro continuo de los desplazamientos generados en el sistema de refuerzo del suelo cuando se aplicaron cargas, proporcionando información precisa sobre el comportamiento del talud. La medición directa de deformaciones mediante instrumentos mecánicos es una técnica ampliamente utilizada en estudios experimentales de ingeniería geotécnica, debido a su confiabilidad y precisión en la obtención de datos (Das & Sobhan, 2014).

A diferencia de sistemas más complejos como el Internet de las Cosas (IoT), que utilizan sensores interconectados para la adquisición automatizada de datos, en esta investigación se implementó un sistema de medición directa que garantiza control y estabilidad en las lecturas obtenidas. Sin embargo, ambos enfoques comparten el objetivo de monitorear variables críticas del comportamiento del suelo, siendo el registro continuo de datos un elemento fundamental para el análisis geotécnico y la evaluación de la estabilidad (López, 2022).

Asimismo, la integración de datos obtenidos en diferentes micrómetros permite una interpretación conjunta del comportamiento del prototipo, facilitando la comparación entre diferentes puntos del talud y la identificación de zonas con mayores deformaciones. Esta integración de información es fundamental en el análisis experimental y constituye la base para la validación de modelos analíticos y numéricos, así como para su posterior aplicación en modelos de inteligencia artificial destinados a predecir el comportamiento del suelo (Zhang et al., 2020).

### **1.19 Análisis de Riesgo y Toma de Decisiones**

El drenaje es un factor relevante en la estabilidad de taludes, ya que influye en la presión de poro y, por tanto, en la resistencia al corte del suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993). Sin embargo, en la presente investigación no se realiza un análisis hidráulico explícito dentro del modelo numérico, ya que el sistema estudiado considera condiciones de drenaje favorables derivadas de los materiales utilizados.

En particular, el uso de gaviones como elemento de confinamiento proporciona una alta permeabilidad, lo que facilita la disipación del agua y reduce la posibilidad de acumulación de presión de poro. Asimismo, el material de relleno utilizado tiene características granulares que favorecen el flujo del agua, contribuyendo al comportamiento drenante del sistema.

A su vez, las geomallas cumplen una función estructural proporcionando refuerzo y confinamiento del suelo, mejorando la estabilidad general del sistema, aunque no actúan directamente como elementos de drenaje.

En este contexto, el análisis de riesgos se centra en evaluar la estabilidad del sistema en condiciones predominantemente drenadas, utilizando el factor de seguridad como indicador principal. La interpretación de los resultados permite identificar configuraciones críticas y respalda la toma de decisiones de diseño.

Además, las herramientas de inteligencia artificial se pueden utilizar para apoyar la evaluación de múltiples escenarios y optimizar la interpretación de los resultados, facilitando la identificación de condiciones desfavorables sin reemplazar los criterios de ingeniería (Mitchell, 1997; Goodfellow et al., 2016).

### **1.20 Teoría de la Optimización**

Métodos de Optimización analizado por Dey et al., (2015)

- Optimización Multicriterio: Métodos que consideran múltiples

objetivos (estabilidad, costo, sostenibilidad) en el diseño y evaluación de taludes.

- Heurísticas y Metaheurísticas: Algoritmos como los genéticos y PSO que son especialmente útiles para problemas complejos y no lineales, comunes en la geotecnia.

### **1.21 Aportes en la Sostenibilidad**

La sostenibilidad es un concepto que busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, integrando de forma equilibrada aspectos ambientales, sociales y económicos. Este enfoque fue ampliamente difundido luego del Informe Brundtland, que estableció la importancia de un desarrollo responsable que considere el uso eficiente de los recursos naturales y la mitigación de los impactos negativos sobre el medio ambiente (Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 1987).

Desde una perspectiva integral, la sostenibilidad se estructura en tres dimensiones fundamentales: ambiental, social y económica. La dimensión ambiental se centra en conservar los recursos naturales y reducir los riesgos asociados a los procesos naturales; La dimensión social promueve la seguridad, la equidad y el bienestar de la población; mientras que la dimensión económica busca garantizar la viabilidad y eficiencia de las soluciones implementadas. Estas dimensiones permiten abordar problemas complejos, como los relacionados con la ingeniería geotécnica, desde un enfoque multidisciplinario (Naciones Unidas, 2015).

En el campo de la ingeniería geotécnica, la sostenibilidad cobra especial relevancia en el análisis y diseño de taludes, ya que permite integrar criterios de seguridad, eficiencia y reducción de riesgos. La incorporación de herramientas como la inteligencia artificial contribuye a optimizar la predicción del comportamiento del suelo y mejorar la toma de

decisiones, favoreciendo soluciones más seguras y sostenibles en el desarrollo de infraestructuras (Zhang et al., 2020).

Según el enfoque de sostenibilidad, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un marco global adoptado para guiar el desarrollo hacia un equilibrio entre crecimiento económico, inclusión social y protección ambiental. Estos objetivos forman parte de la Agenda 2030 y establecen 17 metas que buscan resolver problemas prioritarios en todo el mundo, promoviendo soluciones sostenibles en diversos sectores, entre ellos la ingeniería y la infraestructura (Naciones Unidas, 2015).

En el campo de la ingeniería geotécnica y el análisis de estabilidad de taludes, los ODS ganan relevancia al contribuir directamente a objetivos como el ODS 9, centrado en construir infraestructuras resilientes, el ODS 11, que apunta a lograr ciudades y comunidades sostenibles, y el ODS 13, relacionado con la acción climática. La adecuada evaluación y mitigación de los riesgos geotécnicos reduce la vulnerabilidad de la población ante deslizamientos y deslizamientos de tierra, lo que impacta positivamente en la seguridad y sostenibilidad de los entornos urbanos (Naciones Unidas, 2015).

Asimismo, la incorporación de herramientas de inteligencia artificial en el análisis geotécnico fortalece el cumplimiento de los ODS, optimizando la predicción de fallas, mejorando la toma de decisiones y reduciendo la incertidumbre en el diseño de las obras. Esto permite desarrollar soluciones más eficientes, seguras y sostenibles, alineadas con los principios de innovación tecnológica y gestión responsable de recursos, contribuyendo al desarrollo sostenible en el sector de la ingeniería civil (Zhang et al., 2020).

Es por esto que el uso de geomallas biaxiales en terraplenes y estructuras reforzadas representa una estrategia ampliamente documentada para mejorar la sostenibilidad de la infraestructura vial. Varios estudios confirman que estos refuerzos permiten reducir el uso de hormigón

y acero entre un 30% y un 50%, sustituyéndolos por sistemas de tierra armada más eficientes y con menor impacto ambiental (Palmeira et al., 2021). Esta disminución de materiales con alta huella de carbono está vinculada a la capacidad de las geomallas para proporcionar rigidez y confinamiento sin recurrir a elementos estructurales masivos.

Una contribución importante a la sostenibilidad está vinculada al uso de suelos locales y materiales reciclados. Investigaciones en muros reforzados y terraplenes han demostrado que es posible utilizar el 100% del suelo local e incluso incorporar hasta un 40% de materiales reciclados, manteniendo niveles adecuados de seguridad y rendimiento (Ekici, 2016). Esto reduce la extracción de materiales vírgenes, minimiza los impactos del transporte y promueve un enfoque alineado con la economía circular en las obras geotécnicas.

La sostenibilidad también se ve reforzada por el rendimiento hidráulico de los sistemas reforzados. La naturaleza abierta y permeable de las geomallas permite un mejor drenaje, una reducción de la acumulación de presión de poro y la mitigación de procesos como la erosión superficial y el hundimiento hidráulico. Las pruebas experimentales han demostrado reducciones de hasta un 50 % en la presión de poro y un 35 % en la erosión superficial cuando se utilizan sistemas reforzados con geosintéticos (Raisinghani & Viswanadham, 2010; Kim, 2019). Una mejora en la disipación hidráulica alarga la vida útil del terraplén y reduce la necesidad de intervenciones de mantenimiento.

Además, numerosos estudios indican que los geosintéticos contribuyen a la estabilidad de taludes en condiciones saturadas al mejorar el comportamiento del drenaje, aumentar la resistencia al corte y reducir las deformaciones (Bathurst & Hatami, 2006). Estos efectos no sólo fortalecen la seguridad estructural, sino que también reducen las fallas que históricamente han generado costos ambientales y económicos significativos.

El enfoque sostenible también se apoya en la modelización numérica, que permite evaluar múltiples escenarios sin recurrir a trabajo físico repetitivo. Herramientas como los métodos de equilibrio límite, el análisis de elementos finitos y las simulaciones avanzadas nos permiten optimizar los diseños, reducir la incertidumbre y evitar el sobreajuste (Zornberg y Gupta, 2009). Esto da como resultado un menor consumo de material y decisiones de diseño más eficientes.

Finalmente, la reciente incorporación de la inteligencia artificial (IA) a la geotecnia supone un avance importante para la sostenibilidad. La inteligencia artificial permite predecir fallos, optimizar configuraciones, mejorar el mantenimiento y reducir las intervenciones correctivas. Investigaciones recientes han demostrado que las redes neuronales artificiales pueden anticipar comportamientos críticos de taludes reforzados con alta precisión, lo que permite implementar estrategias de mantenimiento predictivo con menor impacto ambiental (Momeni et al., 2021).

En conjunto, la reducción del uso de materiales convencionales, el aprovechamiento de recursos locales, la mejora del drenaje, la reducción del mantenimiento y la incorporación de herramientas digitales avanzadas consolidan las geomallas biaxiales como una solución acorde con la ingeniería sostenible moderna.

## **II. METODOLOGÍA**

### **1. Identificación y Caracterización del Suelo**

Objetivo: Determinar las propiedades geotécnicas del suelo en las áreas de estudio.

Actividades:

- Recolección de muestras de suelo de diferentes sitios.
- Realización de pruebas de laboratorio para determinar

propiedades como Ángulo de fricción interna, Cohesión, permeabilidad, granulometría, límites de Límites de Atterberg mediante Copa de Casagrande (LL, PL e IP), peso volumétrico y su clasificación del suelo conforme al sistema SUCS.

## **2. Evaluación de Normativas**

Objetivo: Comparar la normativa ABNT NBR 11682:2008 de Brasil con la publicación técnica No. 382 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para determinar su aplicabilidad en el diseño de taludes reforzados con geomallas.

Actividades:

- Revisión detallada de los criterios de diseño considerados en ambas normativas.
- Análisis comparativo de las especificaciones técnicas y del espaciamiento vertical recomendado entre capas de geomalla.

## **3. Diseño y Simulación con Geomallas**

Objetivo: Diseñar y simular la estabilización de taludes mediante el uso de geomallas como refuerzo interno.

Actividades:

- Uso de software especializado Slide2 para modelar el comportamiento del suelo y el efecto del refuerzo con geomallas conforme a las normativas analizadas.
- Uso de software Slide 2 para modelar el Factor de Seguridad (FS) sin factores externos o de intemperie solo ante la gravedad y también modelos sometidos a sobrecarga.
- Evaluación de la estabilidad bajo condiciones sísmicas utilizando la zonificación establecida en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), donde las zonas sísmicas se clasifican en A, B, C y D siendo D la de mayor peligrosidad

sísmica del país, con aceleraciones pico del suelo cercanas a 0.40 g – 0.50 g. Es importante señalar que la aceleración máxima del suelo (PGA) definida en la zonificación sísmica de la CFE no se utiliza directamente como coeficiente sísmico en el análisis pseudoestático. En la práctica geotécnica, el coeficiente sísmico horizontal (Kh) se adopta como una fracción de la aceleración máxima esperada, con el fin de representar de manera simplificada los efectos dinámicos del sismo. Varios autores sugieren que Kh puede considerarse en un rango aproximado del 30% al 50% del PGA, dependiendo de las condiciones del sitio y del nivel de conservadurismo requerido (Seed & Whitman, 1970; Kramer, 1996). Siendo que los valores de Kh están asociados con diferentes niveles de intensidad sísmica así como los PAG, se consideran típicamente  $Kh \approx 0,05$  para terremotos leves,  $Kh \approx 0,10$  para condiciones moderadas y  $Kh \geq 0,15$  para escenarios sísmicos severos (Seed & Whitman, 1970; Kramer, 1996).

- Aplicación del método de equilibrio límite Spencer, complementado con el coeficiente sísmico estimado mediante el criterio de Lowe- Karafiath, registrando los valores del FS para su comparación con los parámetros establecidos por (AASHTO) que recomienda un FS de 1.25 para condiciones de estabilidad a largo plazo frente a deslizamientos rotacionales.

- Incorporación de geomallas como sistema de refuerzo interno con espaciamientos definidos por ambas normativas, así como el confinamiento del material mediante bloques de concreto con dimensiones equivalentes al espaciamiento vertical correspondiente, en 2 fases en la primera los modelos del 1 al 5 con escala de 1:10 y la segunda los modelos del 6 al 12 con escala de 1:1 reforzados con gaviones.

#### **4. Integración de Inteligencia Artificial**

Objetivo: Integrar herramientas de inteligencia artificial para apoyar el procesamiento, análisis y modelado de datos geotécnicos, con el fin de

agilizar tareas repetitivas, optimizar la adquisición de parámetros y mejorar la eficiencia en la evaluación del comportamiento del suelo, sin sustituir criterios de ingeniería.

Actividades:

- Definición de los datos de entrada (input) del modelo geotécnico a escala real 1:1, incluyendo parámetros como:

- cohesión ( $c$ )
- ángulo de fricción interna ( $\phi$ )
- peso volumétrico ( $\gamma$ )
- geometría del sistema
- condiciones de carga
- espaciamiento vertical del refuerzo interno ( $S_v$ )
- coeficiente sísmico ( $k_h$ )
- dimensiones del terraplén

- Identificación de datos de salida (output) del análisis, tales como:

- factor de seguridad (FS)
- desplazamientos del sistema ( $u_h$ )
- comportamiento mecánico del talud
- Recomendaciones técnicas derivadas del análisis, con el

objetivo de optimizar el proyecto (ajuste de espaciamiento, selección de materiales o mejora de la estabilidad).

- Usar herramientas de IA generativa como ChatGPT y Gemini para:

- Apoyo en generación de código
- Estructuración de algoritmos de cálculo
- automatización de procesos repetitivos

- Implementación de código en Visual Studio Code usando Python, soportado por extensiones como:

- Python (Microsoft): ejecución y gestión del entorno
- Pylance: análisis de código y autocompletar
- NumPy Pilot: soporte para cálculos numéricos y manejo de

funciones matemáticas lo cual permite:

- procesamiento y depuración de datos
- cálculo automatizado de parámetros geotécnicos
- generación de comparativas y análisis de resultados

- Integración de los resultados obtenidos mediante IA en el modelo geotécnico ya desarrollado en el Slide 2, considerando las simulaciones a escala real y condiciones de carga asociadas al tránsito vehicular con el fin de validar la consistencia de los resultados y su aplicabilidad en escenarios reales del proyecto.

La inteligencia artificial se utiliza como herramienta de apoyo para optimizar el procesamiento de la información, manteniendo siempre el control y validación bajo criterios de ingeniería geotécnica.

## **5. Prototipo físico**

Objetivo: Comprobar experimentalmente los resultados obtenidos en los modelos analíticos del 1 al 5 con escala 1:10.

Actividades:

- Construcción de un prototipo físico que reproduzca las condiciones del modelo analizado considerando los espaciamientos verticales establecidos por las normativas evaluadas.
- Aplicación de cargas cíclicas y sobrecargas sobre los prototipos confinados con bloques de concreto y reforzados internamente con geomallas, replicando las condiciones consideradas en los modelos analíticos desarrollados en Slide2.

## **6. Evaluación de Resultados**

Objetivo: Analizar y comparar los resultados obtenidos en los modelos analíticos, prototipos físicos y el artículo base de referencia, con el fin de evaluar el desempeño del sistema de refuerzo de geomallas, validar la metodología utilizada y determinar configuraciones óptimas de diseño.

#### Actividades:

- Comparación con el artículo de referencia, evaluando la concordancia entre los resultados obtenidos en esta investigación y los reportados en el estudio base, principalmente en términos de comportamiento mecánico, factor de seguridad y respuesta del sistema de refuerzo del suelo.
- Comparación de los modelos analíticos y físicos en escala 1:10 (modelos 1 a 5), desarrollados en Slide2 y en los prototipos experimentales, considerando que ambos representan las mismas condiciones geométricas y de carga. Se analizan similitudes y diferencias en:
  - factor de seguridad (FS)
  - desplazamientos ( $u_h$ )
  - mecanismos de falla
    - Evaluación de modelos a escala real (1:1) (modelos 6 al 12), confinados con gaviones y con diferentes espaciamientos verticales de geomallas, con el objetivo de:
      - identificar la configuración más eficiente
      - determinar el espaciamiento ideal del refuerzo
      - analizar el impacto en la estabilidad estructural y el rendimiento
    - Análisis de los resultados obtenidos a través de herramientas de IA, implementadas a través de Visual Studio Code, comparando:
      - resultados procesados computacionalmente
      - recomendaciones generadas automáticamente
      - con los resultados de los modelos analíticos y físicos, evaluando la congruencia, confiabilidad y aplicabilidad de las

recomendaciones antes mencionadas en el contexto geotécnico.

- Estimación de posibles ahorros de costos asociados con el uso de configuraciones optimizadas de espaciado de geomallas, comparando:

→ diseños convencionales

→ diseños optimizados derivados del análisis

→ considerando la reducción de la cantidad de refuerzo sin comprometer la estabilidad del sistema.

- Formulación de recomendaciones para la aplicación de la metodología en condiciones reales, definiendo:

→ ¿En qué casos es viable su uso?

→ limitaciones del modelo físico y analítico

→ consideraciones para la implementación en proyectos reales

- Identificación de futuras aplicaciones, relacionadas con:

→ Optimización de proyectos geotécnicos mediante IA.

→ uso de modelos híbridos (analítico-experimental-computacional)

→ Ampliación del estudio a otros tipos de suelos y condiciones de carga.

## **7. Desarrollo de Recomendaciones y Buenas Prácticas**

Objetivo: Proponer recomendaciones prácticas basadas en los resultados obtenidos.

Actividades:

- Elaboración de documento técnico con recomendaciones para el diseño y construcción de taludes reforzados con geomallas.
- Propuesta de posibles mejoras o actualizaciones a las normativas mexicanas basadas en los hallazgos del estudio.
- Difusión de los resultados y recomendaciones a través de

publicaciones técnicas y presentaciones en eventos académicos.

## 8. Aplicación Futura

Objetivo: Proponer lineamientos para la aplicación de las soluciones desarrolladas y evaluar su posible implementación.

Actividades:

- Identificación de posibles aplicaciones de las recomendaciones en proyectos piloto en colaboración con empresas y autoridades locales.
- Análisis del desempeño esperado de las soluciones propuestas a partir de los resultados obtenidos.
- Generación de información base para futuras investigaciones y mejoras en los criterios de diseño.

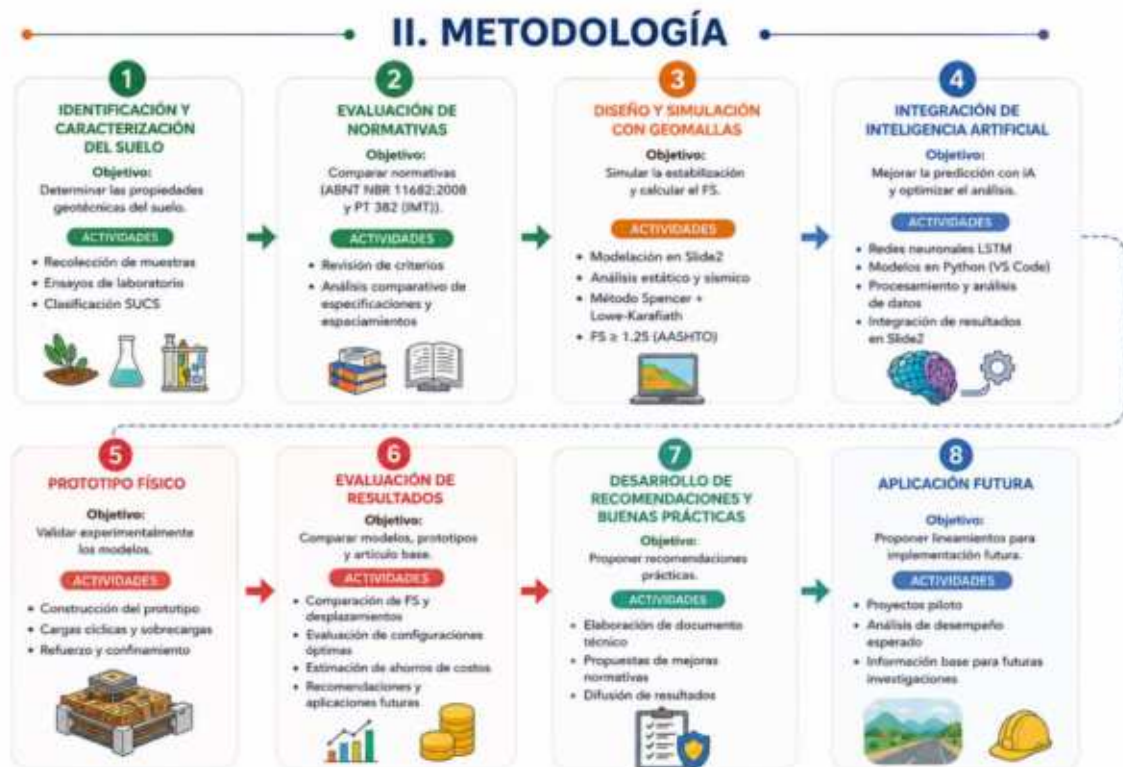


Figura 6. Resumen del procedimiento a seguir.

Fuente: Elaboración Propia.

## III. DISCUSIÓN y RESULTADOS

## 1. Identificación y caracterización del suelo:

La selección del del material de relleno se basó en la referencia del artículo “The long-term Mechanical Performance of Geogrid-Reinforced Soil Containing Walls Under Cyclic Footing Load”, en el que se utiliza arena tipo Fujian como material granular del estudio. Para mantener coherencia metodológica y permitir una adecuada comparación de resultados, esta investigación buscó replicar las condiciones del material utilizado en el estudio antes mencionado.

Asimismo, la elección de las geomallas biaxiales (geosintético) como sistema de refuerzo en la presente investigación se basa tanto en la referencia del artículo origen como en los antecedentes de la literatura que respaldan su capacidad de brindar resistencia en dos direcciones principales, lo que favorece una adecuada interacción suelo-refuerzo y mejora el comportamiento estructural del terraplén frente a cargas estáticas y cíclicas. Este tipo de refuerzo ha demostrado ser eficiente para estabilizar suelos granulares, permitiendo una mejor distribución de tensiones y aumentando la resistencia al corte del sistema compuesto (Koerner, 2012).

Sin embargo, como el desarrollo experimental se realizó en el estado de Querétaro, se realizó una adaptación del material, seleccionando una arena local con características granulométricas y propiedades mecánicas similares a la arena de Fujian reportada en la literatura. Esta decisión permitió preservar la validez técnica del modelo de referencia, asegurando al mismo tiempo la representatividad del comportamiento del suelo en condiciones reales en la región de estudio.

De esta forma, la combinación de geomallas biaxiales y un material granular análogo al utilizado en el artículo base permite establecer una metodología consistente, reproducible y técnicamente justificada, asegurando que los resultados obtenidos sean comparables con investigaciones anteriores y aplicables a las condiciones locales.

Con el objetivo de seleccionar el material se evaluarán las

características de 4 bancos diferentes en la ciudad de Querétaro, por lo que al extraer una muestra podemos conocer su estado y comportamiento mecánico en estado natural, así mismo, será necesario conocer distintas pruebas para determinar cuál de los 4 tiene las mejores condiciones.

Posterior mente el material en mejores circunstancias será colocarlo en el prototipo geotécnico que funcionará como modelo de pruebas, como se ha mencionado, por lo que el material seleccionado deberá ser usado en la etapa de experimentación.

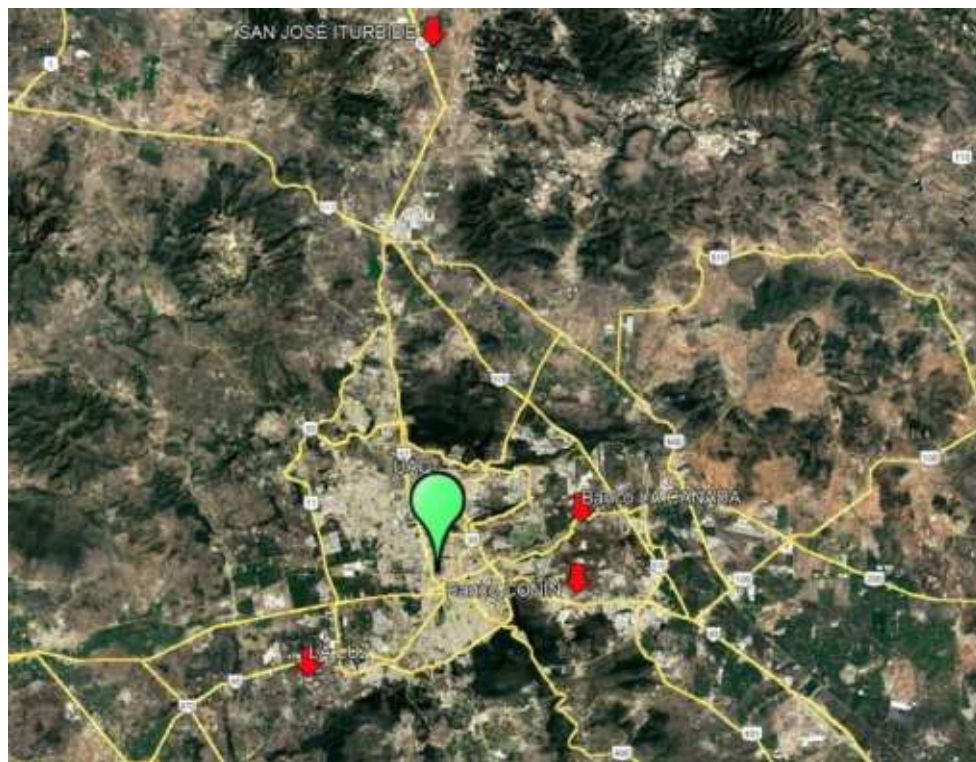


Figura 7. Ubicación de los bancos para extracción de muestras de suelo.

Se tomaron 4 muestras en la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro. con las coordenadas banco "CONIN" Latitud 2275773.00 m N - Longitud 363535.00 m E, Banco "LA CAÑADA" Latitud 2281063.00 m N - Longitud 363855.00 m E, Banco "LA LUZ" Latitud 2269732.00 m N - Longitud 343383.00 m E y Banco "San José Iturbide" Latitud 2316502.37 m N - Longitud 353076.10 m E mostrados en la Figura 7. En los 4 lugares se recolectaron 2 costales de arena y posteriormente se almacenaron en las

instalaciones de la UAQ, específicamente en el laboratorio de Geotecnia. Posterior a ello, se han llevado a cabo las pruebas para recaudar toda la información de los materiales y trabajar con el mejor, todo fue realizado sin dañar la estructura del material tal como se indica en el manual M-MMP-1-01/03 Muestreos para materiales de Terracerías.

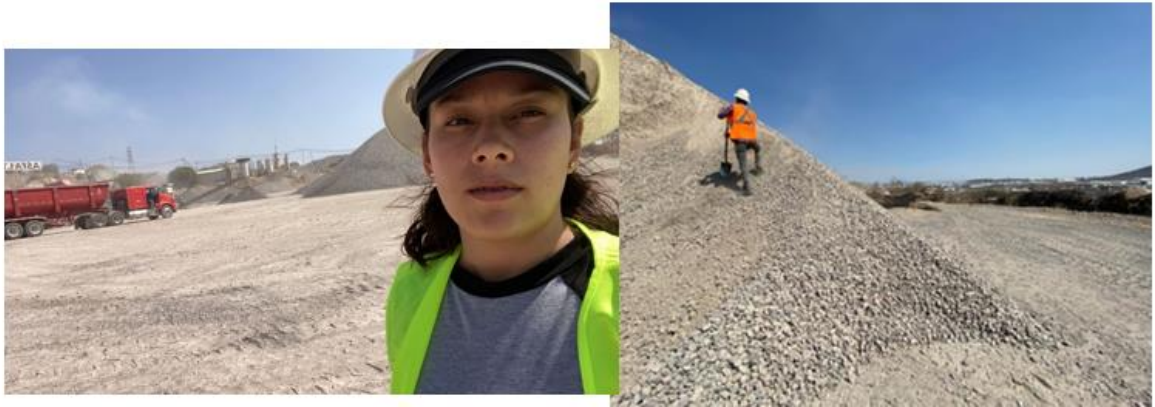


Figura 8. Muestreo en 4 bancos de materiales.



Figura 9. Almacenamiento de material en la Universidad UAQ.

### 1.1 Prueba de corte directo

La prueba de corte directo es una prueba geotécnica utilizada para determinar la resistencia al corte de un suelo en condiciones drenadas mediante la aplicación de una tensión normal y un desplazamiento

horizontal controlado entre dos mitades de una celda que contiene la muestra. Este ensayo permite obtener los parámetros fundamentales de la resistencia al corte – cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) – a través de la relación tensión de corte-tensión normal, según el criterio de Mohr-Coulomb (Head, 1994). Por su sencillez y reproducibilidad es uno de los ensayos más utilizados para el diseño de taludes, cimentaciones y terraplenes. Reproducibilidad es uno de los ensayos más utilizados para el diseño de taludes, cimentaciones y terraplenes.



Figura 10. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.

En el artículo de referencia se utilizaron ensayos triaxiales para obtener parámetros de resistencia al corte del suelo, debido a su capacidad para simular condiciones de tensión más cercanas al comportamiento real del suelo, incluido el control de la presión de poro. Sin embargo, en la presente investigación se optó por utilizar el ensayo de corte directo, ampliamente aceptado en la práctica geotécnica para determinar el ángulo de fricción interna y cohesión, principalmente en suelos granulares y parcialmente cohesivos (Das & Sobhan, 2014).

Esta elección se basa en el hecho de que el ensayo de corte directo

permite obtener de manera confiable los parámetros necesarios para el análisis de la estabilidad de taludes bajo enfoques de equilibrio límite, como el implementado en el software Slide2. Asimismo, su aplicación es consistente con el tipo de modelación utilizada en esta investigación, tanto en el análisis numérico como en el desarrollo del prototipo físico, donde se busca evaluar el comportamiento del sistema de refuerzo del suelo en condiciones controladas.

Por tanto, aunque el ensayo triaxial proporciona un análisis más completo del comportamiento del suelo, el uso del ensayo de corte directo en este estudio es técnicamente válido y adecuado a los objetivos planteados, garantizando la obtención de parámetros representativos para el análisis de estabilidad y su comparación con los modelos desarrollados.

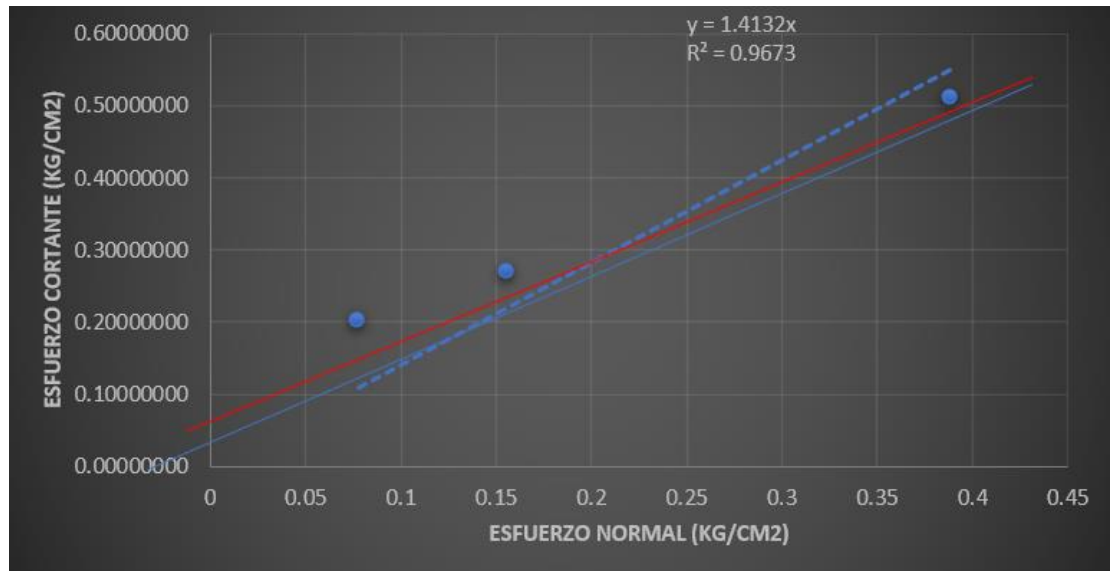
Los cuatro materiales extraídos de los 4 bancos se sometieron a la misma prueba de corte directo y se obtuvieron los siguientes resultados Tabla 6 y Figura 11.

Tabla 6. Concentrado de resultados de Prueba de corte directo.

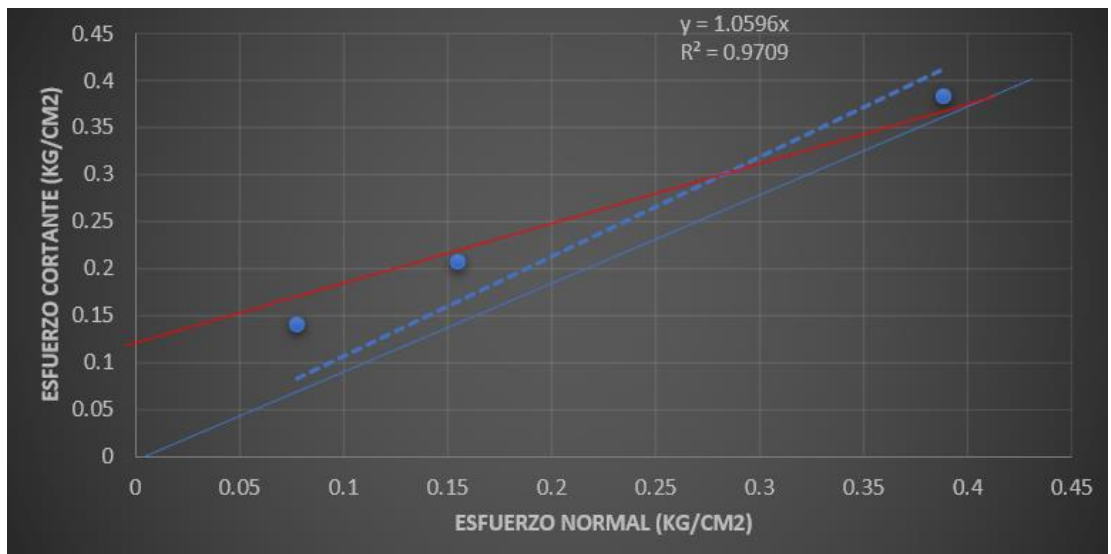
<b>Banco</b>	<b>Ángulo de Fricción</b>	<b>Cohesión (KN/m<sup>2</sup>)</b>
CONIN	42.11	8.82
CAÑADA	40.18	12.75
LA LUZ	44.78	15.69
SAN JOSÉ	43.58	10.79
ITURBIDE		

Fuente: Elaboración Propia

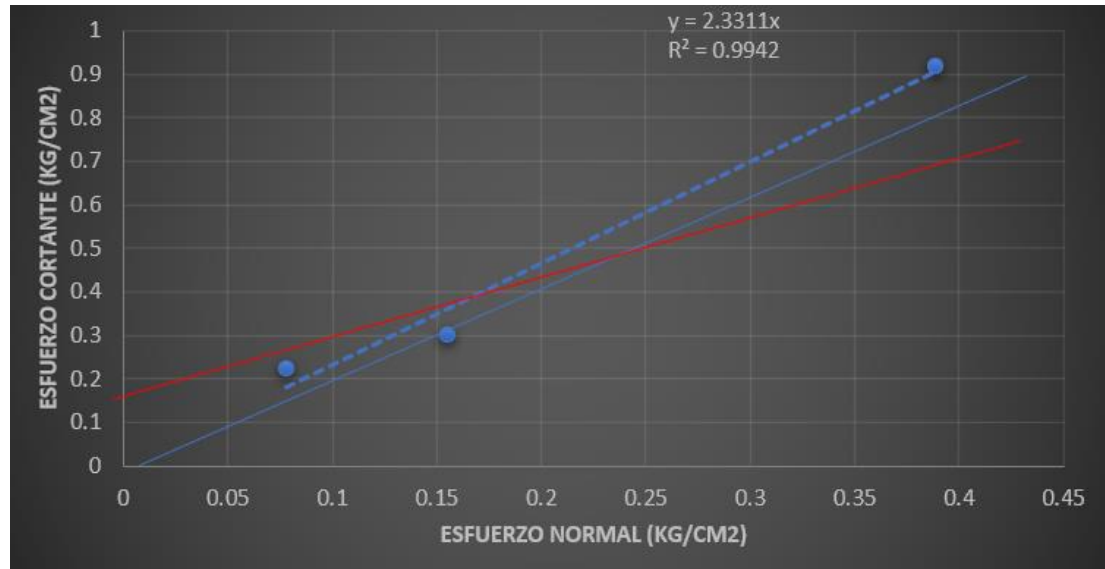
Banco Conín:



Banco La Cañada:



Banco La Luz:



Banco San José Iturbide:

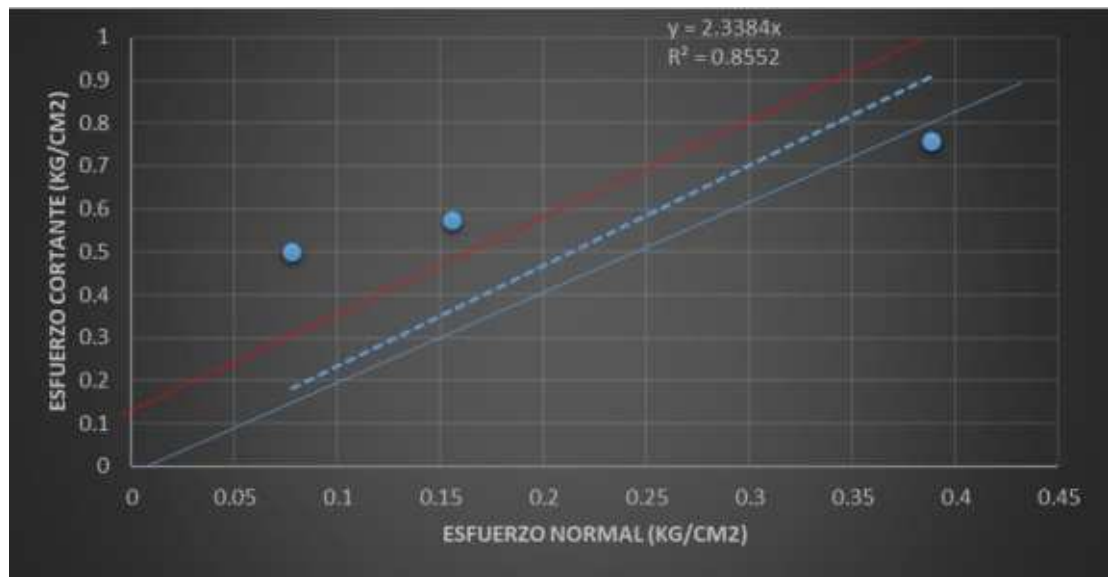


Figura 11. Graficas de Cohesión

Fuente: Elaboración Propia

## 1.2 Permeabilidad

La prueba de permeabilidad es una prueba que permite determinar la capacidad de un suelo para transmitir agua a través de sus poros bajo un gradiente hidráulico aplicado. Dependiendo del tipo de suelo, el flujo se

puede evaluar utilizando el método de carga constante para materiales de alta permeabilidad o el método de carga variable para suelos de baja permeabilidad. Este ensayo proporciona el coeficiente de permeabilidad (k), parámetro fundamental para analizar el drenaje, consolidación y comportamiento hidráulico de terraplenes y cimentaciones (Das, 2010).

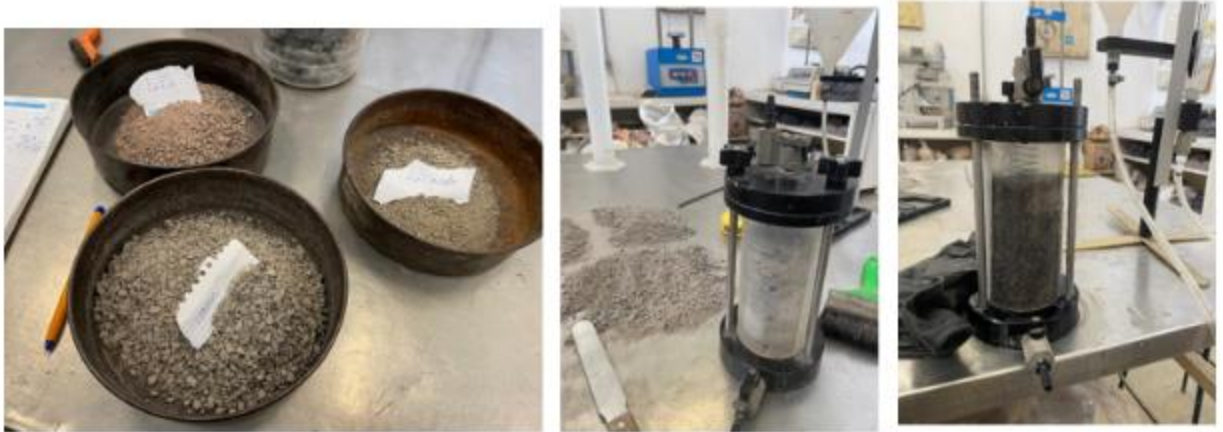


Figura 12. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.

Nuevamente las 4 muestras de material se sometieron a la prueba arrojando los siguientes resultados en la Tabla 7.

Tabla 7. Concentrado de resultados de Permeabilidad

Banco	Permeabilidad
CONIN	$9.61 \times 10^{-2}$ m/s
CAÑADA	$2.34 \times 10^{-2}$ m/s
LA LUZ	$3.43 \times 10^{-2}$ m/s
SAN JOSÉ ITURBIDE	$3.24 \times 10^{-2}$ m/s

Fuente: Elaboración Propia

### 1.3 Prueba de Granulometría

La prueba de tamaño de grano es un método utilizado para determinar la distribución del tamaño de grano de un suelo mediante análisis de tamiz para fracciones gruesas y el método del hidrómetro para fracciones finas. Esta prueba permite clasificar el material en función de su

textura y evaluar sus características como granulometría, uniformidad y comportamiento en obras geotécnicas. La distribución granulométrica es fundamental para el diseño de terraplenes y capas estructurales, ya que influye en propiedades como densidad, permeabilidad y resistencia al corte del suelo (ASTM D422, 2007).

A continuación, se descuartizó un saco de material desintegrado con un peso inicial de 41,230 kg, siguiendo lo establecido en el manual M-MMP-01-03/03 con el objetivo de obtener una porción representativa en su estado natural, como se indica en el apartado “F”, se descuartizó el material, para esto se formó un similar con la muestra inicial, luego se formó un cono truncado con la pala y se separó el material descuartizándolo y tomando cuadrantes. opuestos y así sucesivamente hasta que se extraigan muestras representativas de cada banco, como se muestra en las Tablas 9,10, 11,12 y Figura 13.

Tabla 8. Análisis de peso Volumétrico

<b>Banco</b>	<b>Peso Total (kg)</b>	<b>Peso de la Cubeta (kg)</b>	<b>Peso de la Muestra (kg)</b>	<b>Volumen (Lts)</b>	<b>Peso Volumétrico Seco (kg/L)</b>	<b>Peso Volumétrico compacto (kg/L)</b>
La Cañada	9.230	1.651	8.149	4.897	1.547	1.764
El Conín	9.800	1.651	8.149	4.897	1.664	1.900
La Luz	9.900	1.651	8.249	4.897	1.684	1.896
SAN JOSÉ ITURBIDE	9.976	1.651	8.323	4.897	1.693	1.916

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 13. Practica estándar para reducción de muestras de agregado al tamaño de prueba en la universidad UAQ.

Posteriormente, se realizó la prueba de Granulometría de materiales compactarles para terracerías conforme al manual M-MMP-1-06/03, por lo que se cribó el material dando los siguientes resultados:

Tabla 9. Análisis granulométrico Banco EL CONIN

<b>Malla</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Pasa (%)</b>		
3/8"	9.5	<b>100</b>	<b>G</b>	10.9
No. 4	4.75	<b>89.05</b>	<b>A</b>	89.1
No. 8	2.36	<b>51.76</b>	<b>F</b>	0.0
No. 10	2	<b>39.81</b>		
No. 16	1.18	<b>27.53</b>	<b>D-10</b>	0.151
No. 20	0.85	<b>25.77</b>	<b>D-30</b>	1.312
No. 30	0.6	<b>19.11</b>	<b>D-60</b>	2.754
No. 40	0.425	<b>17.51</b>		
No. 50	0.3	<b>13.52</b>	<b>Cu</b>	18.19
No. 60	0.25	<b>12.18</b>	<b>Cc</b>	4.13
No. 100	0.15	<b>9.96</b>		
No. 200	0.075	<b>6.46</b>	<b>D-50</b>	2.303
BASE	0.075			

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 10. Análisis granulométrico Banco LA CAÑADA

<b>Malla</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Pasa (%)</b>		
3/8"	9.5	<b>100</b>	<b>G</b>	0.6
No. 4	4.75	<b>99.37</b>	<b>A</b>	99.4
No. 8	2.36	<b>79.37</b>	<b>F</b>	0.0
No. 10	2	<b>64.45</b>		
No. 16	1.18	<b>44.53</b>	<b>D-10</b>	0.105
No. 20	0.85	<b>41.43</b>	<b>D-30</b>	0.622
No. 30	0.6	<b>28.68</b>	<b>D-60</b>	1.778
No. 40	0.425	<b>26.02</b>		
No. 50	0.3	<b>18.95</b>	<b>Cu</b>	16.92

No. 60	0.25	<b>16.83</b>		<b>Cc</b>	2.07
No. 100	0.15	<b>12.63</b>			
No. 200	0.075	<b>7.51</b>		<b>D-50</b>	1.364
BASE	0.075				

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 11. Análisis granulométrico Banco LA LUZ

<b>Malla</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Pasa (%)</b>			
3/8"	9.5	<b>100</b>		<b>G</b>	2.6
No. 4	4.75	<b>97.41</b>		<b>A</b>	97.4
No. 8	2.36	<b>69.21</b>		<b>F</b>	0.0
No. 10	2	<b>58.35</b>			
No. 16	1.18	<b>43.16</b>		<b>D-10</b>	0.089
No. 20	0.85	<b>40.99</b>		<b>D-30</b>	0.482
No. 30	0.6	<b>31.05</b>		<b>D-60</b>	2.051
No. 40	0.425	<b>29.39</b>			
No. 50	0.3	<b>23.09</b>		<b>Cu</b>	22.99
No. 60	0.25	<b>21.07</b>		<b>Cc</b>	1.27
No. 100	0.15	<b>16.89</b>			
No. 200	0.075	<b>7.7</b>		<b>D-50</b>	1.496
BASE	0.075				

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 12. Análisis granulométrico San José Iturbide

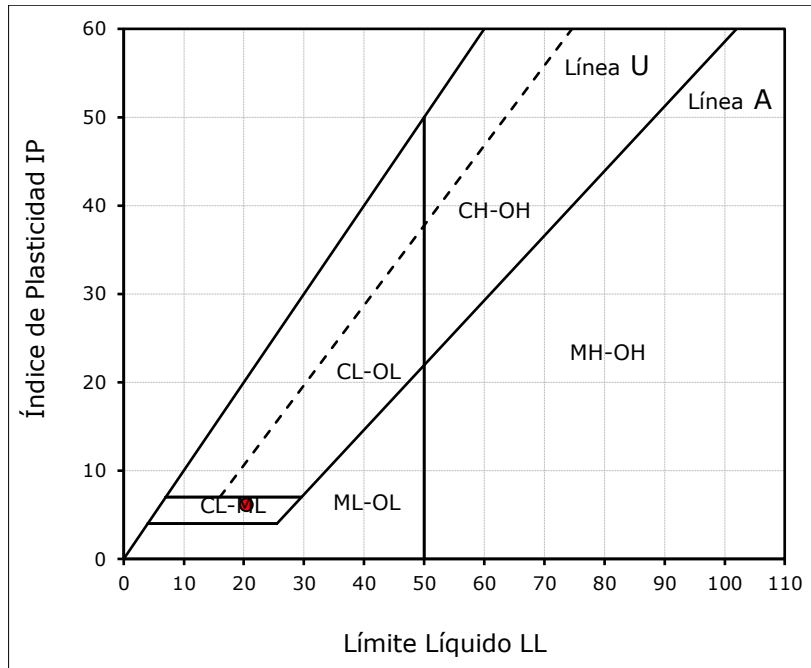
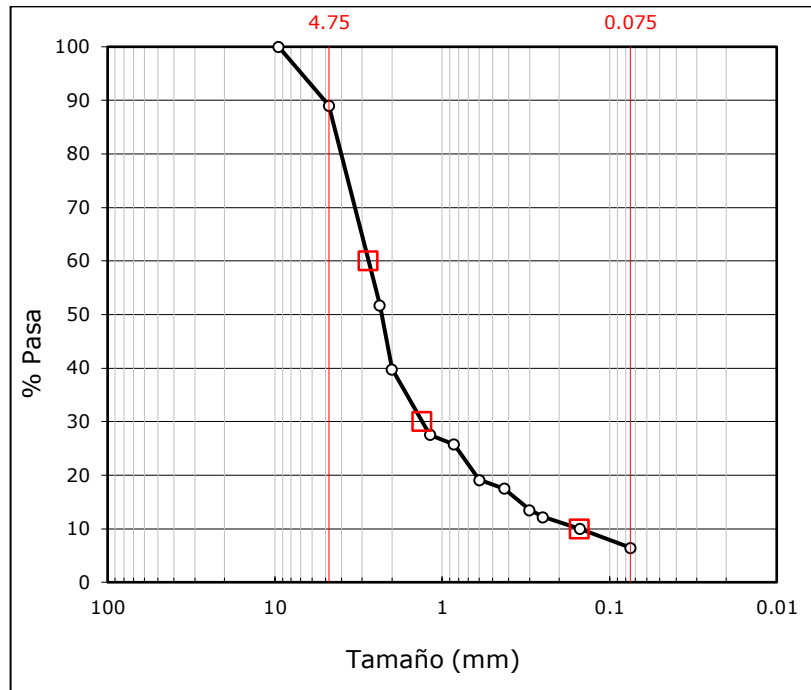
<b>Malla</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Pasa (%)</b>			
3/8"	9.5	<b>96.75</b>		<b>G</b>	6.9
No. 4	4.75	<b>93.06</b>		<b>A</b>	93.1
No. 8	2.36	<b>88.79</b>		<b>F</b>	0.0
No. 10	2	<b>77.66</b>			

No. 16	1.18	<b>52.33</b>	<b>D-10</b>	0.213
No. 20	0.85	<b>42.89</b>	<b>D-30</b>	0.492
No. 30	0.6	<b>31.63</b>	<b>D-60</b>	1.384
No. 40	0.425	<b>28.8</b>		
No. 50	0.3	<b>18.98</b>	<b>Cu</b>	6.50
No. 60	0.25	<b>11.80</b>	<b>Cc</b>	0.82
No. 100	0.15	<b>6.04</b>		
No. 200	0.075	<b>2.74</b>	<b>D-50</b>	1.088
BASE	0.075			

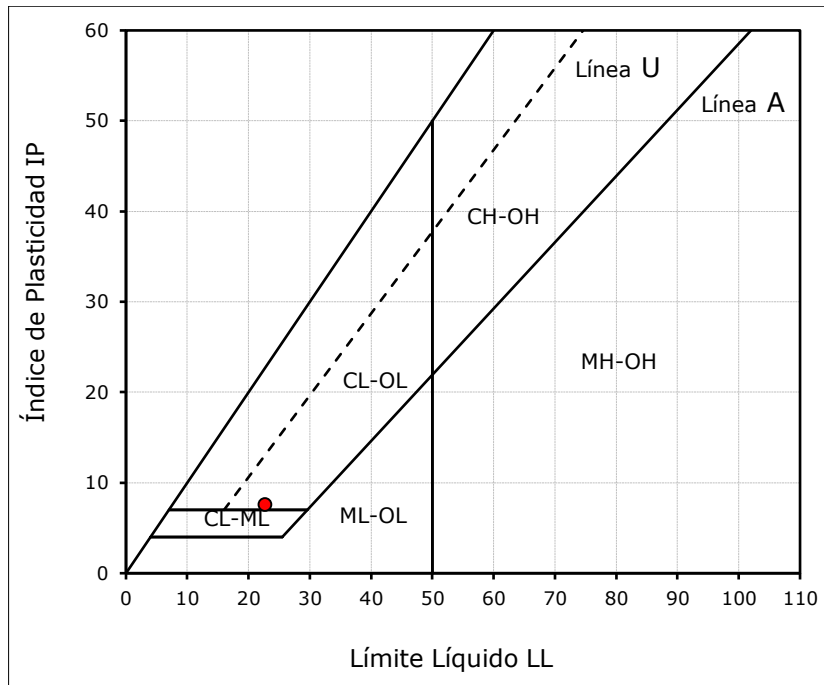
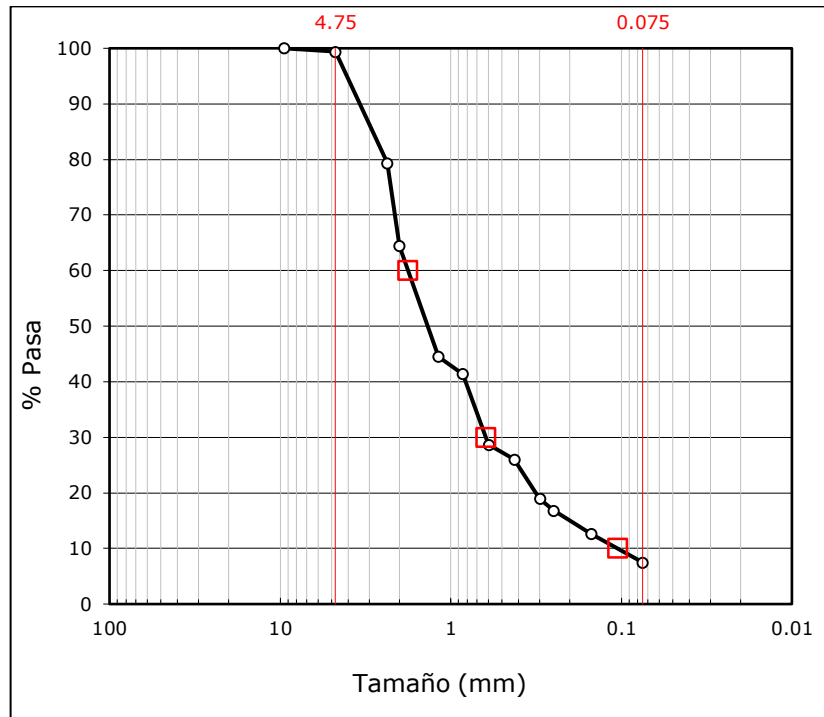
Tabla 13. Análisis granulométrico Arena Fujian (a partir de los datos reportados por Liu et al., 2022)

<b>Malla</b>	<b>Tamiz (mm)</b>	<b>Pasa (%)</b>		
3/8"	9.5	<b>96.75</b>	<b>G</b>	2.0
No. 4	4.75	<b>93.06</b>	<b>A</b>	93.0
No. 8	2.36	<b>88.79</b>	<b>F</b>	5.0
No. 10	2	<b>77.66</b>		
No. 16	1.18	<b>52.33</b>	<b>D-10</b>	0.098
No. 20	0.85	<b>42.89</b>	<b>D-30</b>	0.255
No. 30	0.6	<b>31.63</b>	<b>D-60</b>	0.600
No. 40	0.425	<b>28.8</b>		
No. 50	0.3	<b>18.98</b>	<b>Cu</b>	6.13
No. 60	0.25	<b>11.80</b>	<b>Cc</b>	1.11
No. 100	0.15	<b>6.04</b>		
No. 200	0.075	<b>2.74</b>	<b>D-50</b>	0.364
BASE	0.075			

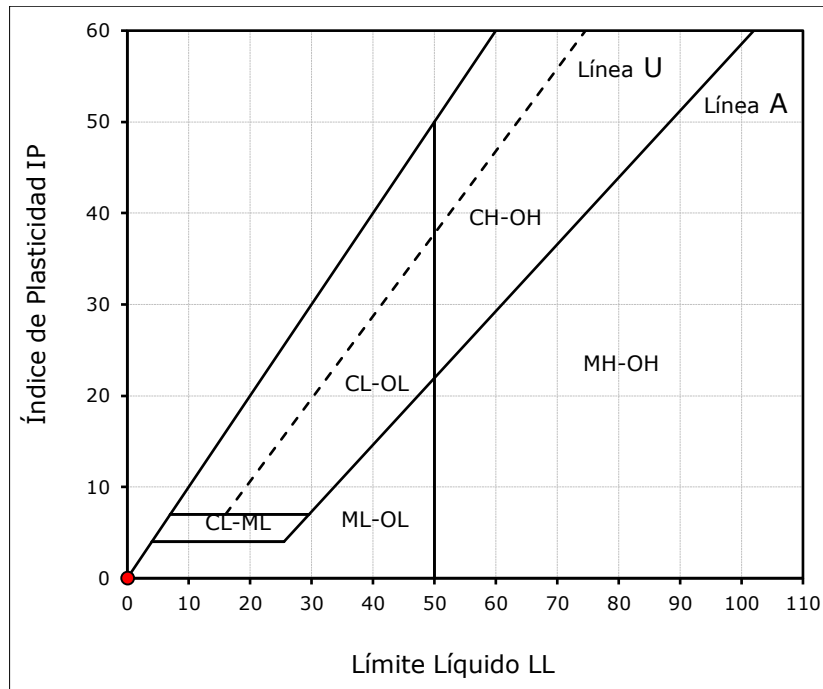
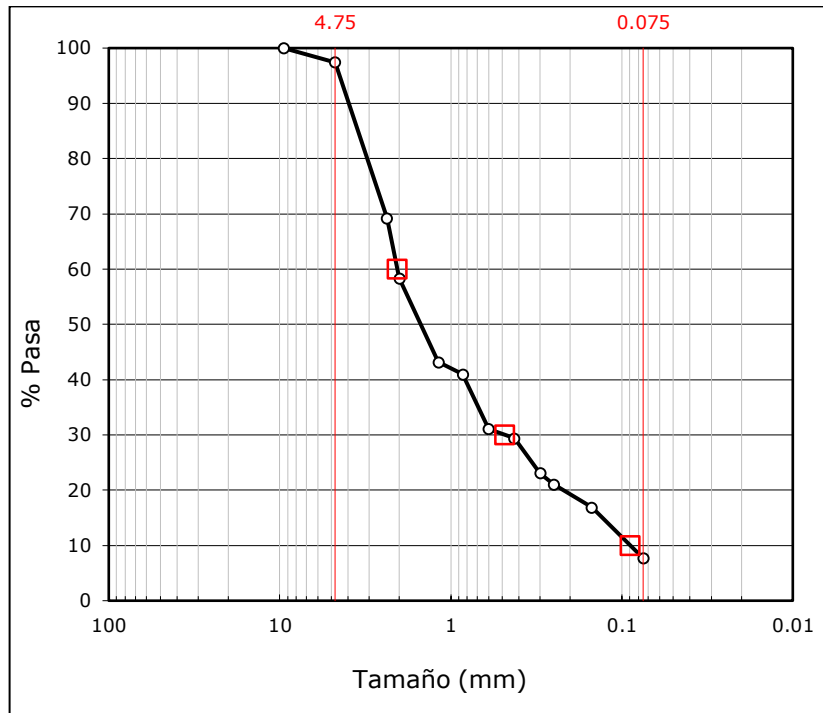
Banco Conín:



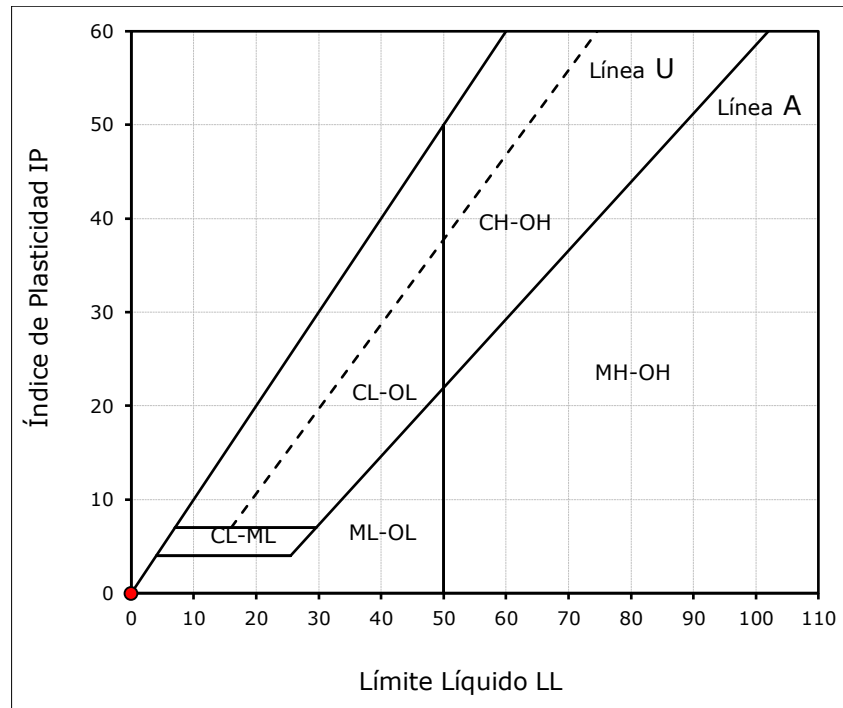
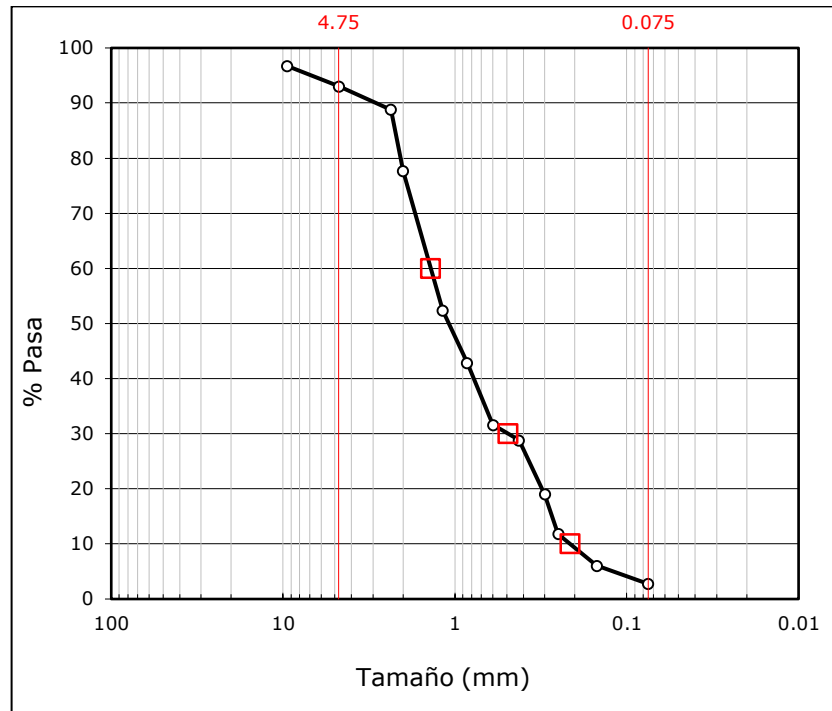
Banco La Cañada:



Banco La Luz:



Banco San José Iturbide:



Arena Fujian (representación a partir de los datos reportados por Liu et al., 2022)

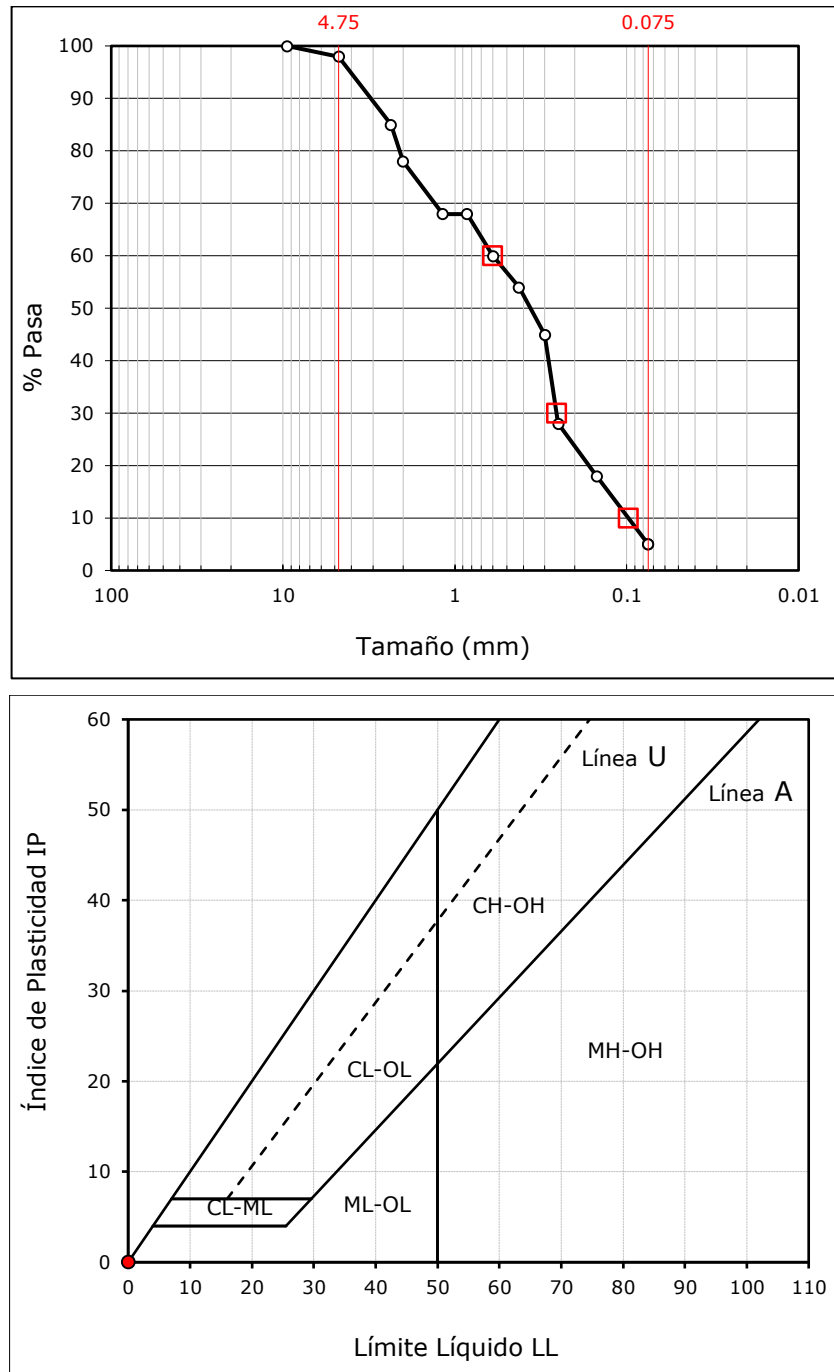


Figura 11. Graficas de Granulometría

Fuente: Elaboración Propia



Figura 12. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.

#### **1.4 Prueba de Límites de Atterberg con la Copa de Casagrande (LL, PL e IP)**

El ensayo límite de Atterberg permite determinar el comportamiento plástico de suelos finos cuantificando el límite líquido (LL), el límite plástico (PL) y el índice de plasticidad ( $IP = LL - PL$ ). El límite líquido se obtiene utilizando el vaso Casagrande, donde se determina el contenido de agua al cual el suelo pasa del estado plástico al estado fluido, siguiendo un número estándar de golpes. El límite plástico se determina amasando la tierra en rollos de 3 mm de diámetro antes de que comiencen a descomponerse. El índice de plasticidad describe la amplitud del rango plástico del suelo y es un parámetro clave para su clasificación y para predecir su comportamiento en terraplenes y caminos de terracería (ASTM D4318, 2017).



Figura 13. Laboratorio de Geotecnia en la UAQ.

Los cuatro materiales se sometieron a la prueba y estos fueron los resultados Tabla 14, 15, 16 y 17.

Tabla 14. Límites de Atterberg Banco CONIN

Lim. Plástico	<b>14.3</b>
Lim. Líquido	<b>20.4</b>
IP	<b>6.1</b>
Tamaños (mm)	
Grava - Arena	4.75
Arena - Finos	0.075

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 15. Límites de Atterberg Banco CAÑADA

Lim. Plástico	<b>15</b>
Lim. Líquido	<b>22.06</b>
IP	<b>7.6</b>
Tamaños (mm)	
Grava - Arena	4.75
Arena - Finos	0.075

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 16. Límites de Atterberg Banco La Luz

Lim. Plástico	<b>0</b>
Lim. Líquido	<b>0</b>
IP	<b>0</b>
Tamaños (mm)	
Grava - Arena	4.75
Arena - Finos	0.075

Tabla 17. Límites de Atterberg Banco San José Iturbide

Lim. Plástico	<b>0</b>
Lim. Líquido	<b>0</b>
IP	<b>0</b>
Tamaños (mm)	
Grava - Arena	4.75
Arena - Finos	0.075

Fuente: Elaboración Propia.

### 1.5 Clasificación SUCS (USCS)

La Clasificación Unificada de Suelos (USCS o SUCS) fue desarrollada originalmente por Casagrande en 1948 como un sistema estandarizado para clasificar suelos según su tamaño de grano y plasticidad. Su adopción formal fue para aplicaciones de ingeniería civil y militar y luego se incorporó a normas como la ASTM D2487. El sistema clasifica los suelos en grupos principales (gravas, arenas, limos y arcillas) utilizando parámetros como tamaño de partícula, límite de liquidez e índice de plasticidad, lo que permite evaluar su idoneidad para cimentaciones, terraplenes y obras geotécnicas (ASTM D2487, 2017).

Bajo estas condiciones se clasificaron los 4 materiales, como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 14. Clasificación SUCS

Banco	Clasificación USCS
CONIN	Arena mal gradada (SP)
CAÑADA	Arena bien gradada (SW)
LA LUZ	Arena bien gradada (SW)
SAN JOSÉ ITURBIDE	Arena mal gradada (SP)
ARENA FUJÍAN	Arena bien gradada (SW)

Fuente: Elaboración Propia.

## 2. Evaluación de Normativas:

Establecer una comparación técnica entre la norma brasileña ABNT NBR 11682:2008 y la Publicación Técnica 382 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para determinar su aplicabilidad en el diseño de terraplenes reforzados con geomallas biaxiales, con énfasis en el espaciamiento vertical óptimo entre capas de refuerzo y su impacto en la estabilidad y costos de construcción.

Se realizará el análisis exhaustivo de ambas normativas centrado en los siguientes pasos:

1. Revisión de la normativa ABNT NBR 11682:2008 centrada en:
  - a) Criterios de estabilidad para taludes naturales y contruidos.
  - b) Parámetros mínimos de resistencia de suelo.
  - c) Condiciones de diseño para refuerzos del suelo.
2. Revisión de la IMT- Publicación Técnica 382 enfocada en:
  - a) Diseño de muros y terraplenes reforzados con geosintéticos.
  - b) Procedimientos para definir la separación de capas de refuerzo.
  - c) Parámetros de diseño para terraplenes de baja resistencia.
3. Identificación de brechas Técnicas:
  - a) Diferencias en metodologías de cálculo.

- b) Ausencia o presencia explícita del parámetro de espaciamiento Vertical ( $S_v$ ).
- 4. Análisis económico en la incorporación de la geomalla biaxial como refuerzo interno en los dos escenarios de espaciamiento vertical.
- 5. Análisis económico en la incorporación de Arena como material de relleno en terraplenes:

## **2.1 Revisión de la norma ABNT NBR 11682:2008 centrada en:**

### **A) CRITERIOS DE ESTABILIDAD (TALUDES NATURALES Y CONSTRUIDOS):**

- Métodos de análisis: la norma permite el uso de métodos de equilibrio límite (métodos clásicos como Fellenius, Bishop y Janbu) para estimar la superficie crítica de falla y calcular el Factor de Seguridad (FS). También reconoce la necesidad de análisis complementarios (por ejemplo, de elementos finitos) cuando las condiciones geológicas o geométricas lo requieran (ABNT, 2008).
- Condiciones drenadas vs no drenadas: ABNT enfatiza la distinción entre casos (por ejemplo, variaciones estacionales o saturación), puesto que las fuerzas de presión de poro modifican sustancialmente la FS. Se recomienda incorporar escenarios de lluvias intensas y casos de diseño extremos para probar la resiliencia del talud.
- Evaluación de superficies críticas: La búsqueda de las superficies de falla más críticas se prioriza por el procedimiento elegido y por la verificación de los FS para diferentes longitudes y geometrías de los taludes; La norma permite flexibilidad metodológica siempre que la elección esté técnicamente justificada (ABNT, 2008).

- Aplicación práctica: ABNT permite optimizaciones (por ejemplo, mayor espaciamiento en refuerzo interno) siempre que el análisis demuestre el cumplimiento de FS y funcionalidad. Esto lo hace adecuado cuando se dispone de modelos y datos fiables (Jewell, 1996; Zornberg & Gupta, 2010).

#### B) PARÁMETROS MÍNIMOS DE RESISTENCIA DE SUELO.

- Caracterización requerida: la norma exige una caracterización geotécnica completa, es decir, cohesión efectiva ( $c'$ ), ángulo de fricción efectivo ( $\phi'$ ), peso unitario ( $\gamma$ ) y parámetros hidráulicos (permeabilidad, condiciones de drenaje). Estos parámetros deben derivarse de ensayos estandarizados (corte directo, triaxial, determinación de límites de Atterberg, tamaño de grano) y representarse según condiciones drenadas/no drenadas (ABNT, 2008).
- Uso de parámetros efectivos: para análisis a largo plazo y condiciones drenadas, ABNT recomienda utilizar parámetros efectivos ( $c'$ ,  $\phi'$ ); Para situaciones de corto plazo o sin drenaje, se considerarán parámetros sin drenaje o resistencia sin drenaje ( $c_u$ ).
- Controlar la variabilidad: La norma enfatiza la importancia de considerar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y realizar análisis de sensibilidad o parámetros conservadores cuando la información es limitada. Esto es particularmente relevante en suelos de baja resistencia, donde pequeños cambios alteran significativamente el FS (Bathurst & Allen, 2001).
- Aplicaciones prácticas: Garantizar una campaña de pruebas representativa (puntuaciones y pruebas suficientes) es una condición esencial para aplicar los criterios de la ABNT y justificar los diseños optimizados frente a criterios prescriptivos.

### C) CONDICIONES DE DISEÑO PARA REFUERZOS DEL SUELO.

- Reconocimiento de refuerzo: la ABNT contempla el uso de geosintéticos (geomallas, geotextiles) como refuerzo interno y establece que su inserción debe ser evaluada a través de la interacción suelo-refuerzo y el efecto sobre los FS (ABNT, 2008).
- Controles mínimos de diseño: Entre los controles técnicos que sugiere la norma se encuentran:
  - a) Resistencia a la tracción de refuerzo (comparada con esfuerzos inducidos).
  - b) Comprobación de arrastre (pullout): Verificar que el refuerzo no sea arrancado por el suelo circundante bajo las condiciones previas.
  - c) Comparación de deformaciones: asegurar que la rigidez y deformación del refuerzo sean compatibles con el régimen de carga y la distribución de esfuerzos.
  - d) Durabilidad y degradación: considerar la resistencia a la exposición química, térmica y la fluencia (creep) del polímero a lo largo del tiempo.
    - Espaciamiento y disposición: La norma no impone un solo Sv; en cambio, establece que el espaciado vertical entre las capas debe definirse con base en el análisis de la interacción y las necesidades del servicio. En la práctica, esto podría dar como resultado distancias mayores (por ejemplo, hasta ~1,0 m) si el modelado y las pruebas confirman el rendimiento (ABNT, 2008; Jewell, 1996).
    - Controles complementarios: ABNT recomienda comprobar la estabilidad global (FS), la estabilidad local de los taludes y la integridad a largo plazo del sistema (pruebas de envejecimiento, acción química) antes de reducir las capas o aumentar el Sv.
    - Aplicación práctica: El proyectista debe preparar un expediente técnico con la justificación (ensayos, modelado, controles de arranque y resistencia) para adoptar soluciones de refuerzo diferentes a las normas

prescriptivas.

## 2.2 Revisión de la IMT- Publicación Técnica 382 enfocada en:

### A) DISEÑO DE MUROS Y TERRAPLENES REFORZADOS CON GEOSINTÉTICOS.

La Publicación Técnica 382 establece procedimientos para el diseño de estructuras de suelo reforzado (GRS) utilizando geosintéticos, particularmente geomallas y geotextiles de refuerzo. Los criterios más importantes son:

#### 1. Consideraciones estructurales:

- Se define un enfoque de equilibrio límite, donde:

- Estabilidad externa (deslizamiento, volteo, capacidad de carga)
- Estabilidad interna (resistencia de refuerzo, pullout),
- Estabilidad global del talud o terraplén.

- La norma guía al diseñador en un procedimiento paso a paso para determinar tanto la longitud del refuerzo como el número de capas, en función de las cargas actuantes y el tipo de estructura (IMT, 2015).

#### 2. Limitaciones prácticas del proyecto:

- El IMT enfatiza la importancia de la compactación del suelo y el control de la construcción como factores clave del desempeño final del sistema.

- El documento destaca que la elección de los geosintéticos debe considerar la resistencia, la rigidez inicial, la interacción suelo-refuerzo y la durabilidad, especialmente bajo cargas de tráfico.

#### 3. Enfoque carretero:

- A diferencia de documentos internacionales más flexibles (como FHWA o ABNT), el IMT ofrece soluciones estandarizadas de acuerdo con las condiciones mexicanas:

- Suelos variables entre bancos,
- Condiciones climáticas intensas,
- Prácticas consecutivas típicas del sector transporte.

Aplicación:

La norma prioriza la confiabilidad y repetibilidad del diseño sobre la optimización económica.

#### B) PROCEDIMIENTOS PARA DEFINIR LA SEPARACIÓN DE CAPAS DE REFUERZO.

Aunque la IMT no siempre establece un valor matemático empírico explícito para el espaciamiento vertical ( $S_v$ ), si proporciona criterios y recomendaciones prácticas.

##### 1. Recomendación de espaciamiento operativo:

- Los diseños típicos en México utilizan  $S_v \approx 0.80$  m, ya que proporciona un equilibrio entre un confinamiento adecuado y un control de la deformación bajo cargas de tráfico.

- Estos datos derivan de la experiencia de campo acumulada en proyectos viales y no de una fórmula incluida directamente en la norma.

##### 2. Factores que afectan a $S_v$ :

Las IMT establecen que el espaciamiento vertical debe definirse en base a:

1. Altura del terraplén o muro,
2. Fuerza de refuerzo (tensión admisible),
3. Tipo de suelo de relleno (especialmente suelos de baja calidad),
4. Carga externa (tráfico, estructuras adyacentes),
5. Control de deformaciones permitidas.

Cuando los suelos tienen baja resistencia o alta variabilidad, el IMT indica que se debe reducir el espaciamiento vertical para mejorar la interacción y evitar un desplazamiento excesivo.

##### 3. Minimizar fallas internas:

Las IMT incorporan el segundo criterio de que una menor separación mejora significativamente la integridad del sistema, ya que:

- Aumentar el confinamiento,

- Reducir esfuerzos entre capas,
- Controla asentamientos,
- Disminuye deformaciones horizontales.

Estas recomendaciones están en línea con la literatura global que sugiere reducciones en Sv en suelos con baja rigidez (Bathurst & Allen, 2001; Zornberg & Gupta, 2010).

El IMT pone especial énfasis en los terraplenes construidos con suelos de baja resistencia, muy comunes en los proyectos viales mexicanos.

### C) PARÁMETROS DE DISEÑO PARA TERRAPLENES DE BAJA RESISTENCIA.

La IMT pone especial énfasis en los terraplenes construidos con suelos de baja resistencia, muy comunes en los proyectos viales mexicanos.

#### 1. Caracterización obligatoria:

Para suelos marginales, la norma solicita:

- Determinación de  $c$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$ ,
- Pruebas de compactación (Proctor modificado),
- Determinación de la humedad óptima,
- Granulometría y límites de Atterberg,
- Evaluación de la presión de poro y drenaje.

El objetivo es asegurar que el suelo cumpla con los requisitos mínimos de relleno estructural.

#### 2. Requisitos adicionales para baja resistencia:

La IMT recomienda:

- Mayor control de compactación en capas delgadas.
- Implementar drenajes internos (filtros, geocompuestos).
- Aumentar la rigidez de las primeras capas de refuerzo.
- Reduzca el espaciado Sv cuando:

- $\phi < 28^\circ$ ,

- $c < 5\text{kPa}$ ,
- permeabilidad reducida ( $k < 10^{-5} \text{ m/s}$ ).

### 3. Conservadurismo en el diseño:

Para este tipo de suelo, la IMT opta por un enfoque conservador debido al riesgo de:

- Asentamientos diferenciales,
- Pérdida de confinamiento,
- Inestabilidad global,
- Deformaciones excesivas que afecten a la vía.

Esto contrasta con ABNT, que permite una mayor flexibilidad si los parámetros están justificados y el rendimiento se demuestra mediante modelos.

## 2.3 Identificación de brechas Técnicas:

### A) DIFERENCIAS EN METODOLOGÍAS DE CÁLCULO

La ABNT NBR 11682:2008 permite el uso flexible de métodos de equilibrio límite y análisis numéricos avanzados, incluido FEM, para evaluar superficies críticas y optimizar la interacción suelo-refuerzo. Esto proporciona una mayor libertad de diseño, siempre que esté técnicamente justificado.

En contraste, las IMT-382 utilizan un enfoque más prescriptivo, basado casi exclusivamente en métodos tradicionales de equilibrio límite, priorizando criterios prácticos y conservadores adaptados a las condiciones típicas de construcción en México (IMT, 2015).

- Aplicación:

ABNT favorece proyectos optimizados a través de modelos detallados; IMT prioriza la confiabilidad y la repetibilidad incluso a costa de un mayor refuerzo. (Literatura relacionada: Jewell, 1996; Zornberg & Gupta, 2010).

## B) AUSENCIA O PRESENCIA EXPLÍCITA DEL PARÁMETRO DE ESPACIAMIENTO VERTICAL (Sv)

La ABNT NBR 11682 no establece un valor específico de Sv, pero indica que debe ser determinado en base al desempeño estructural obtenido a través de análisis y ensayos, pudiendo permitir espaciamientos de hasta 1,0 m o mayores si se comprueba su estabilidad (ABNT, 2008; Bathurst & Allen, 2001).

En cambio, la IMT-382 tampoco presenta una fórmula explícita, pero operativamente recomienda espaciamientos en torno a 0,80 m, basándose en la experiencia de las carreteras nacionales y la necesidad de controlar las deformaciones en suelos de baja resistencia (IMT, 2015).

Aplicación:

- ABNT = criterios flexibles y justificados → permite la optimización.
- IMT = criterio empírico-conservador → menor Sv para mayor control y seguridad.

Esta diferencia constituye el vacío normativo central: no existe un valor unificado ni un criterio internacional estandarizado que justifique el análisis comparativo y la propuesta de mi proyecto.

### **2.4 Análisis económico en la incorporación de la geomalla biaxial como refuerzo interno en los dos escenarios de espaciamiento vertical**

Con MacGrid® EG 30S (geomalla biaxial) para terraplén de 10,00 m de altura, comparando Sv = 0,80 m (IMT) y Sv = 1,00 m (ABNT).

Considere dimensiones comerciales típicas (rollo 3.95 × 50 m = 197.5 m<sup>2</sup>/rollo) y dos precios indicativos (Costo Bajo = 96 MXN/m<sup>2</sup> — ejemplo de mercado— y Costo Promedio = 150 MXN/m<sup>2</sup> como sensibilidad, ya que los precios están sujetos a cambios debido a diversos factores como proveedor, volumen de compra, ubicación, disponibilidad y costos de transporte, entre otros).

Este es el cálculo para un proyecto representativo de 100 m de largo x 10 m de ancho = 1.000 m<sup>2</sup> de planta.

Datos:

- Altura del terraplén: H = 10,00 m.
- Área de estudio: 1.000 m<sup>2</sup> (100 m × 10 m).
- Sv\_IMT = 0,80 m → práctica IMT.
- Sv\_ABNT = 1,00 m → Práctica ABNT.
- Rendimiento por capa: 1,00 m<sup>2</sup> de geomalla por 1,00 m<sup>2</sup> de planta.
- Rollo comercial: 3,95 m × 50 m = 197,5 m<sup>2</sup>/rollo.
- Precio unitario (ejemplos):
  - Bajo = 96 MXN/m<sup>2</sup> (ejemplo de mercado de rollos).
  - Promedio = 150 MXN/m<sup>2</sup> (valor de sensibilidad).

#### A) NÚMERO DE CAPAS REQUERIDAS

Sv = 0,80 m (IMT)

- $H \div Sv = 10,00 \div 0,80 = 12,5 \rightarrow \text{redondeo} \rightarrow 13 \text{ capas}$

Sv = 1,00 m (ABNT)

- $H \div Sv = 10,00 \div 1,00 = 10,0 \rightarrow \text{entero} \rightarrow 10 \text{ capas}$

#### B) ÁREA TOTAL DE GEOMALLA REQUERIDA (M<sup>2</sup>) PARA 1.000 M<sup>2</sup> DE PLANTA

- IMT: 13 capas × 1.000 m<sup>2</sup> = 13.000 m<sup>2</sup>
- ABNT: 10 capas × 1.000 m<sup>2</sup> = 10.000 m<sup>2</sup>

#### C) NÚMERO DE ROLLOS NECESARIOS (197,5 M<sup>2</sup>/ROLLO), REDONDEADOS

- IMT:  $13.000 \div 197,5 = 65,8228 \rightarrow 66 \text{ rollos}$ 
  - Cálculo dígito a dígito:  $197,5 \times 66 = (200 - 2,5) \times 66 = 13.200 - 165 = 13.035 \text{ m}^2$  (cobertura real, 35 m<sup>2</sup> restantes)
- ABNT:  $10.000 \div 197,5 = 50,6329 \rightarrow 51 \text{ rollos}$

- $197,5 \times 51 = (200 - 2,5) \times 51 = 10.200 - 127,5 = 10.072,5$   
m<sup>2</sup> (72,5 m<sup>2</sup> restantes)

**Nota:** El redondeo provoca exceso de material (tomar en cuenta si hay exceso de m<sup>2</sup>).

#### D) PRECIO POR ROLLO (SEGÚN PRECIO/M<sup>2</sup>) — CÁLCULOS

Precio por rollo = Área del rollo × Precio unitario

• Con 96 MXN/m<sup>2</sup>:

- Precio del rollo =  $197,5 \times 96 = (200 \times 96) - (2,5 \times 96) = 19,200 - 240 = 18,960$  MXN/rollo

• Con 150 MXN/m<sup>2</sup>:

- Precio del rollo =  $197,5 \times 150 = (200 \times 150) - (2,5 \times 150) = 30,000 - 375 = 29,625$  MXN/rollo

#### E) COSTO TOTAL DEL MATERIAL (GEOMALLA), POR ESCENARIO:

IMT (66 rollos):

• Bajo costo =  $66 \times 18,960 = (60 \times 18,960) + (6 \times 18,960) = 1,137,600$   
+ 113,760 = 1,251,360 MXN

• Costo promedio =  $66 \times 29,625 = (60 \times 29,625) + (6 \times 29,625) = 1,777,500 + 177,750 = 1,955,250$  MXN

ABNT (51 rollos):

• Bajo costo =  $51 \times 18,960 = (50 \times 18,960) + (1 \times 18,960) = 948,000$   
+ 18,960 = 966,960 MXN

• Costo promedio =  $51 \times 29,625 = (50 \times 29,625) + 29,625 = 1,481,250 + 29,625 = 1,510,875$  MXN

#### F) AHORRO AL ELEGIR SV = 1,00 M VS SV = 0,80 M (MATERIAL DE GEOMALLA)

• Ahorro (costo bajo) =  $1,251,360 - 966,960 = 284,400$  MXN

• Economía (costo promedio) =  $1,955,250 - 1,510,875 = 444,375$   
MXN

• Rollos ahorrados:  $66 - 51 = 15$  rollos (esto también reduce la logística/traslado/instalación asociada).

Tabla 15. Resumen de costos

Escenario	Capas	Área total (m <sup>2</sup> )	Rollos (197.5 m <sup>2</sup> )	Precio/rollo (Bajo)	Costo total (Bajo)	Precio/rollo (Medio)	Costo total (Medio)
IMT (Sv=0.80 m)	13	13000	66	18,960 MXN	1,251,360 MXN	29,625 MXN	1,955,250 MXN
ABNT (Sv=1.00 m)	10	10000	51	18,960 MXN	966,960 MXN	29,625 MXN	1,510,875 MXN
Ahorro	—	—	15 rollos	—	284,400 MXN	—	444,375 MXN

Fuente: Elaboración Propia.

#### G) CÁLCULO DE AHORRO DE PORCENTAJE

1) Fórmula utilizada

$$Ahorro(\%) = \left( \frac{(Costo_{IMT} - Costo_{ABNT})}{costo_{IMT}} \right) * 100$$

2) Caso de “precio bajo”

- Costo IMT: 1,251,360 MXN
- Costo ABNT: 966,960 MXN
- Ahorro: 284,400 MXN

Cálculo Precio Bajo:

$$284400 / 1251360 = 0.2273$$

$$0.2273 * 100 = 22.73\%$$

Ahorro porcentual (precio bajo): ≈ **22.7%**

3) Caso “precio promedio”

- Costo IMT: 1,955,250 MXN
- Costo ABNT: 1,510,875 MXN
- Economía: 444,375 MXN

Cálculo:

$$444375 / 1955250 = 0.2273$$

$$0.2273 * 100 = 22.73\%$$

Ahorro porcentual (precio medio):  $\approx$  **22.7%**

#### 4) Conclusión en Ahorro (Porcentaje)

Independientemente del precio por m<sup>2</sup> de geomalla, el ahorro porcentual de pasar de Sv = 0,80 m a Sv = 1,00 m en un terraplén de 10 m es aproximadamente:

Ahorro del 22,7% en material de geomalla biaxial

Este es un descubrimiento muy relevante porque:

- La reducción de 13 → 10 capas generan un ahorro constante proporcional al número de capas,
- Por eso el porcentaje sigue siendo prácticamente idéntico incluso si cambia el precio unitario.

Tabla 16. Resumen costos (porcentaje) y ahorros (\$)

Escenario	Capas	Área total (m <sup>2</sup> )	Rollos (197.5 m <sup>2</sup> )	Costo total (Bajo)	Costo total (Medio)
IMT (Sv=0.80 m)	13	13000	66	1,251,360 MXN	1,955,250 MXN
ABNT (Sv=1.00 m)	10	10000	51	966,960 MXN	1,510,875 MXN
Ahorro (\$)	—	—	15 rollos	284400 MXN	444375 MXN
Ahorro (%)	—	—	—	<b>22.7%</b>	<b>22.7%</b>

Fuente: Elaboración Propia.

Para terraplén de 10 m: pasar de Sv = 0,80 m (IMT) a Sv = 1,00 m (ABNT) reduce el número de capas de 13 a 10, ahorrando 15 rollos de MacGrid® EG 30S en el caso de 1.000 m<sup>2</sup>.

- El ahorro porcentual en el coste de la geomalla es  $\approx$  22,7%, válido tanto para el escenario de precio bajo como para el escenario de precio medio (debido a que la reducción de capa es proporcional).

- El ahorro absoluto depende del precio unitario: en el ejemplo varía entre 284,400 MXN y 444,375 MXN mostrados en la Figura 16.

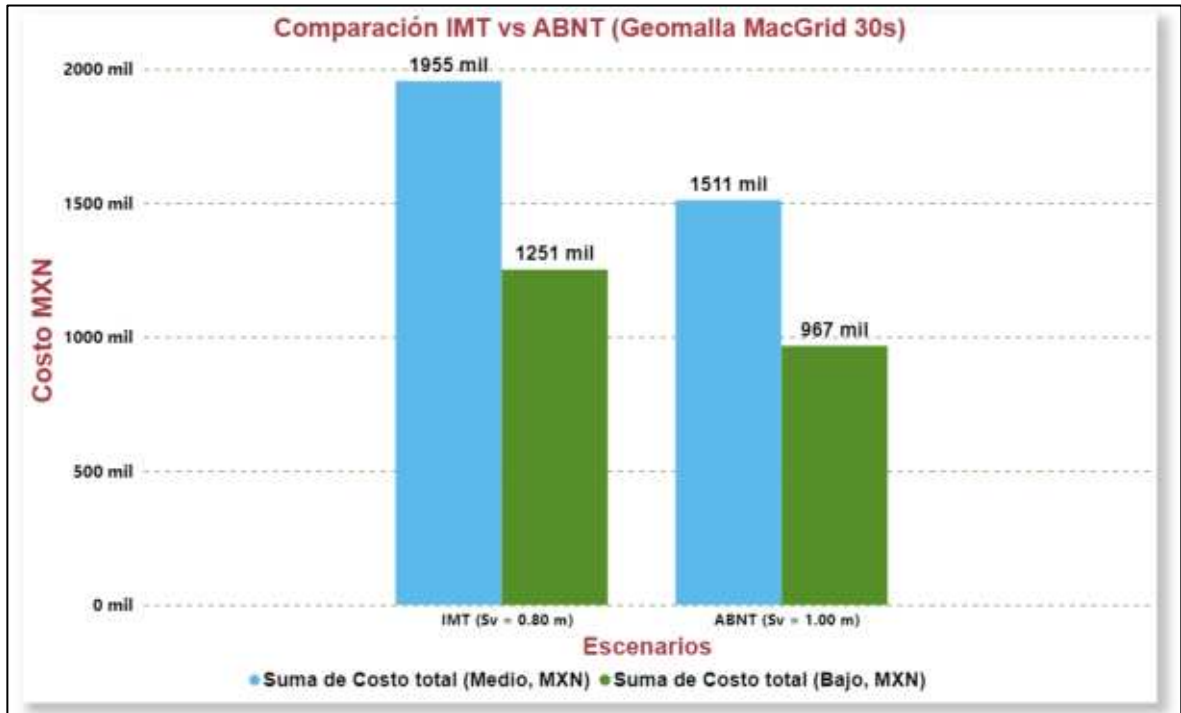


Figura 14. Gráfica de barras Elaboración propia

#### Recomendaciones metodológicas

**1. Sobre cobertura:** por embalaje en rollo, hay exceso (IMT:  $\sim 13.035 - 13.000 = 35 \text{ m}^2$ ; ABNT:  $\sim 10.072,5 - 10.000 = 72,5 \text{ m}^2$ ). Considere negociar recortes o utilizar detalles excesivos.

**2. Otros costos no lineales:** El ahorro de materiales no implica una reducción idéntica en los costos laborales totales; La mano de obra por rollo, superposiciones, anclajes, transporte y preparación pueden moderar los ahorros.

**3. Verificación técnica imprescindible:** antes de optar por Sv = 1,00 m (economía), validar el FS con Slide2 y comprobar el comportamiento en el prototipo físico (deformaciones, drenaje).

**4. Cotización formal:** estos precios son orientativos. Solicitar cotización a MaccaFerri México (modelo MacGrid® EG 30S) para precio

exacto por rollo, condiciones de entrega y ficha técnica (resistencia nominal kN/m en % deformación, fluencia, resistencia química).

Es importante resaltar que los ahorros económicos obtenidos en el presente análisis derivan directamente del uso de geomallas biaxiales como sistema de refuerzo, la optimización del número de capas y el espaciamiento vertical evaluado mediante modelos analíticos, lo cual ha sido ampliamente documentado como una estrategia eficiente en la estabilización de terraplenes (Koerner, 2012). Sin embargo, en etapas posteriores de la investigación, la incorporación de modelos de inteligencia artificial permitirá analizar de manera más eficiente los resultados obtenidos, facilitando la identificación de configuraciones óptimas de diseño. De esta forma, la inteligencia artificial contribuirá a la reducción de costes indirectos, al apoyar la toma de decisiones y evitar soluciones sobredimensionadas en futuros análisis (Zhang et al., 2020).

## **2.5 Análisis económico en la incorporación de Arena como material de relleno en terraplenes:**

El ejemplo consiste en la cotización del mismo terraplén del ejercicio anterior solo que se cotizara material de base o subbase usados en los terraplenes, así como la misma cotización, pero para arena ambos materiales de bancos locales y el desarrollo se llevara a cabo en un escenario de 10.00 m de alto, 100.00 m de largo y 10.00 m de ancho (área de planta = 1,000 m<sup>2</sup>)

### **A) PRECIOS DE MATERIALES:**

- Material de la encimera (base/subbase, banco local, ejemplo): 395 MXN/m<sup>3</sup>.
- Arena (encimera tipo Conín/arena de río local – ejemplo): 410 MXN/m<sup>3</sup>.

Datos geométricos:

- Longitud = 100.00m

- Ancho = 10.00m
- Área de planta = Largo × Ancho = 100 × 10 = 1.000 m<sup>2</sup>
- Altura H = 10,00 m
- Volumen aproximado (V) = Área de planta × H = 1.000 × 10 = 10.000 m<sup>3</sup>

#### B) CÁLCULOS SEGÚN EL MATERIAL:

##### 1) Costo del material de la encimera (base/subbase)

- Precio = 395 MXN/m<sup>3</sup>
- Costo total = 10.000×395
- 10.000 × 395 = 3.950.000
- Costo bancario = 3,950,000 MXN

##### 2) Costo de la arena (banco tipo Conín/arena local)

- Precio = 410 MXN/m<sup>3</sup>
- Costo total = 10.000×410
- 10.000 × 410 = 4.100.000
- Costo de arena (similar a Conín) = **4,100,000 MXN**

#### C) DIFERENCIAS Y AUMENTO PORCENTUAL EN EL MATERIAL DE RELLENO:

Fórmula:

$$\text{Incremento (\%)} = (\text{Costo\_Arena} - \text{Costo\_Banco}) / \text{Costo\_Banco} * 100$$

Arena local (410 MXN/m<sup>3</sup>) vs Banco base/súbase (395 MXN/m<sup>3</sup>)

- Diferencia absoluta = 4,100,000 - 3,950,000 = 150,000 MXN
- Incremento% = 150.000÷3.950.000=0.03797→ ≈ 3,80%

Tabla 17. Resumen costos arena vs base/súbase

Material	Precio (MXN/m <sup>3</sup> )	Costo total (10,000 m <sup>3</sup> )	Diferencia vs banco (MXN)	Incremento %
Banco local (base/subbase)	\$ 395.00	3,950,000.00	—	—
Arena (banco Conín)	\$ 410.00	4,100,000.00	150,000.00	3.8%

Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión:

Si la arena disponible en la región de Querétaro tiene un precio de 410 MXN/m<sup>3</sup>, el costo total de relleno aumenta poco (~3.8%) en comparación con utilizar el material del base/ súbbase (395 MXN/m<sup>3</sup>). **Este ligero aumento puede justificarse si la arena presenta ventajas geotécnicas (mejor granulometría, permeabilidad, comportamiento de drenaje).**

### 3. Diseño y Simulación con Geomallas

En esta sección es de suma importancia mencionar que se usó el software Slide 2, con un sistema de caja cerrada. Incluyendo el modelado tanto con espaciamientos normativos ( $S_v = 0,80$  m y  $S_v = 1,00$  m) para posteriormente llevar a cabo la validación con un prototipo físico.

El objetivo es realizar la simulación analítica de la estabilización de taludes mediante geomallas biaxiales, es comparar el desempeño frente a los escenarios de espaciamiento vertical y validar las soluciones mediante modelado en software. Se verifico principalmente el comportamiento de la geomalla el método de equilibrio límite seleccionando “Spencer” como el principal procedimiento de evaluación estática, y complementándolo con el enfoque sísmico Lowe-k, propuesto por Karafiath, para el análisis pseudoestático (Spencer, 1967; Karafiath, 1957).

Se seleccionó como base para el análisis de estabilidad el método

de equilibrio límite Spencer, ya que este método es considerado uno de los más rigurosos dentro de la ingeniería geotécnica, cumple simultáneamente con las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos en el sistema analizado (Spencer, 1967) Esto lo hace especialmente adecuado para el análisis de taludes reforzados con geotextiles, donde intervienen múltiples acciones como cargas externas, presiones de poro y fuerzas de refuerzo, permitiendo obtener un factor de seguridad único y consistente, representativo del estado real de estabilidad del talud (Spencer, 1967; Duncan et al., 2014). Esta característica nos permite obtener resultados más consistentes y confiables en comparación con métodos simplificados como el de Bishop, que sólo satisface el equilibrio de momentos, o el de Janbu, que introduce aproximaciones y factores de corrección en el análisis (Duncan & Wright, 2005).

La elección de un método riguroso es fundamental en la presente investigación, ya que busca evaluar con precisión la influencia del espaciamiento vertical de las geomallas, así como el efecto de las condiciones de carga y acción sísmica sobre el factor de seguridad. En este sentido, el uso del método Spencer permite reducir la incertidumbre en los resultados y garantizar una base de comparación homogénea entre los diferentes modelos analizados.

Asimismo, es importante señalar que en el análisis se consideró como modelo de resistencia del suelo el criterio de falla de Mohr-Coulomb; Sin embargo, este no es un método de estabilidad, sino más bien un criterio que define la relación entre los esfuerzos normales y cortantes en el momento de falla, el cual se integra en métodos de equilibrio límite como el utilizado en este estudio (Duncan & Wright, 2005).

Por su parte el análisis sísmico del talud reforzado con geotextiles se decidió utilizar un análisis pseudoestático (procedimiento simplificado en el que los efectos del sismo son representados por fuerzas estáticas equivalentes, aplicadas a través de un coeficiente sísmico horizontal que

simula las fuerzas inerciales inducidas por el movimiento del terreno, sin modelar explícitamente la propagación de ondas o la variación temporal de las aceleraciones) en lugar de un análisis dinámico completo para evaluar la estabilidad del talud reforzado con geomallas. Esta decisión se basa en el hecho de que el enfoque pseudoestático es ampliamente utilizado en la práctica geotécnica para el análisis de la estabilidad de taludes bajo condiciones sísmicas, debido a su simplicidad, eficiencia computacional y capacidad de proporcionar resultados conservadores en términos del factor de seguridad (Seed & Whitman, 1970; Kramer, 1996). Mientras que los análisis dinámicos requieren una caracterización más detallada del sitio, incluyendo registros acelerográficos representativos, propiedades dinámicas del suelo (módulos de deformación, amortiguamiento), así como modelos constitutivos avanzados, lo que aumenta significativamente la complejidad del análisis y el costo computacional (Kramer, 1996).

En este sentido, dado que el objetivo principal del presente trabajo es evaluar el comportamiento del sistema de refuerzo del suelo y comparar diferentes configuraciones de espaciamiento de geomallas, el uso del enfoque pseudoestático es suficiente y apropiado, permitiendo obtener resultados confiables bajo un enfoque conservador. Asimismo, este tipo de análisis es consistente con las metodologías utilizadas en las normas y prácticas de diseño geotécnico, donde el método pseudoestático continúa siendo una herramienta estándar para evaluar la estabilidad de taludes en zonas sísmicas (Seed & Whitman, 1970; Koerner, 2012).

Entonces para considerar el efecto de la acción sísmica, el análisis se complementó con el enfoque Lowe-k, que no constituye un método de equilibrio límite independiente, sino más bien una condición conservadora aplicada al análisis pseudoestático. Este enfoque se basa en la propuesta de Karafiath, que estableció que el escenario sísmico más desfavorable ocurre cuando el coeficiente sísmico horizontal efectivo es menor que el valor nominal, debido a la respuesta dinámica no uniforme del suelo

(Karafiath, 1957). En el software Slide, este enfoque se implementa junto con un método de equilibrio límite, ajustando el valor efectivo de  $K_h$  para obtener el factor mínimo de seguridad (Rocscience Inc., 2023).

El coeficiente sísmico horizontal ( $K_h$ ) representa una fracción de la aceleración debida a la gravedad y se utiliza para simular las fuerzas de inercia inducidas por un terremoto sobre la masa potencial de deslizamiento. En general, los valores de  $K_h$  están asociados con diferentes niveles de intensidad sísmica: terremoto leve ( $K_h \approx 0.05$ ), terremoto moderado ( $K_h \approx 0.10$ ) y fuerte terremoto ( $K_h \geq 0.15$ ), valores comúnmente recomendados en la literatura geotécnica para análisis pseudoestáticos (Seed & Whitman, 1970; Kramer, 1996). En el software Slide, el valor de  $K_h$  lo define el usuario según criterios regulatorios o estudios sísmicos específicos (Rocscience Inc., 2023).

El uso del enfoque Lowe-k conduce a obtener el factor de seguridad más bajo, ya que aplica el coeficiente sísmico horizontal de la forma más desfavorable posible, reduciendo los efectos estabilizadores y maximizando las fuerzas de deslizamiento. De esta manera, el factor de seguridad obtenido representa una condición límite conservadora, adecuada para evaluar la estabilidad del talud reforzado con geotextiles bajo un escenario sísmico crítico (Karafiath, 1957; Duncan et al., 2014).

En el software Slide2, el valor de  $K_h$  es definido en base a criterios regulatorios o condiciones del sitio, por lo que la adopción de un valor de  $K_h$  alto, en conjunto con el enfoque Lowe-k, permite evaluar el comportamiento del talud bajo el escenario más crítico, obteniendo así factores de seguridad representativos de una condición límite de estabilidad (Rocscience Inc., 2023).

Para el presente estudio se definió el uso de un coeficiente sísmico horizontal de  **$K_h = 0.15$** , el cual corresponde a un escenario de carga sísmica severa dentro del análisis pseudoestático. Esta selección se basa en la zonificación sísmica establecida en el Manual de Diseño de Obras

Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), donde la zona sísmica D representa el mayor nivel de peligrosidad en el territorio mexicano, con picos de aceleración del suelo del orden de 0.40 g a 0.50 g.

Esta condición se presenta principalmente en regiones con alta actividad tectónica, como los estados de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Colima, Michoacán y algunas zonas del sur de Jalisco, donde históricamente se han registrado grandes eventos sísmicos asociados a la subducción de la placa de Cocos. En este contexto, la adopción de un valor de  $K_h = 0.15$  es consistente con los rangos recomendados en la literatura geotécnica para representar condiciones sísmicas severas en análisis pseudoestáticos (Seed & Whitman, 1970; Kramer, 1996), permitiendo evaluar el comportamiento de los taludes bajo un enfoque conservador según las condiciones más críticas del país.

En conjunto, la aplicación del método Spencer para análisis estático y el enfoque Lowe-k para análisis sísmico pseudoestático permite una evaluación integral y confiable del comportamiento del talud reforzado con geotextiles, asegurando su desempeño tanto en condiciones normales de operación como ante eventos sísmicos, de acuerdo con prácticas ampliamente aceptadas en ingeniería geotécnica (Koerner, 2012; Rocscience Inc., 2023) a forma de resumen revisar la tabla 22.

Así mismo se observó el comportamiento del Factor de Seguridad (FS) según AASHTO ( $FS \geq 1,25$  a largo plazo).

Tabla 18. Resumen informativo de métodos para la evaluación de los modelos

analíticos

Aspecto	Método de Spencer	Lowe-k (condición sísmica)
Tipo	Método de equilibrio límite	Enfoque conservador para análisis pseudoestático
Finalidad	Evaluar la estabilidad del talud	Evaluar la estabilidad bajo sismo
Qué evalúa	Equilibrio de fuerzas horizontales, verticales y momentos	Efecto más desfavorable del coeficiente sísmico
Condición de equilibrio	Cumple equilibrio completo	No es método de equilibrio, modifica la carga sísmica
Resultado principal	Factor de Seguridad (FS) único y consistente	FS mínimo bajo acción sísmica
Superficie de falla	Circular o no circular, la más crítica	La misma superficie, pero con efecto sísmico
Tratamiento de fuerzas internas	Calcula fuerzas entre dovelas	Ajusta fuerzas por efecto de k
Uso de k	Puede usarse con o sin k	Requiere $k_h$
Tipo de k	—	$k_h = a / g$
Efecto sobre FS	FS más representativo	FS más bajo y conservador
Tipo de análisis	Estático o pseudoestático	Solo pseudoestático
Aplicación típica	Diseño final, análisis detallado	Revisión sísmica, diseño seguro
Geometrías complejas	✓ Sí	✓ Sí (junto con Spencer)
Cargas externas	✓ Sí (gaviones, sobrecargas)	✓ Sí
Presión de agua	✓ Sí	✓ Sí
Refuerzos (geomallas, anclajes)	✓ Sí	✓ Sí
Nivel de rigor	Alto	Conservador
Recomendado para	Proyectos formales y tesis	Zonas sísmicas
Uso en Slide	Define el método de cálculo	Opción adicional en análisis sísmico
Configuración en Slide	Analysis → Method → Spencer	Analysis → Seismic → Lowe-k
Valores típicos	—	$k_h = 0.05-0.20$

Interpretación física	Equilibrio real del bloque	Peor escenario sísmico
Frase técnica	“Se utilizó el método de Spencer por cumplir equilibrio completo.”	“Se aplicó la condición Lowe-k para obtener el FS más desfavorable.”

Fuente: Elaboración Propia.

La metodología desarrollada en esta investigación se sustenta de manera directa en los resultados y lineamientos presentados por (Miranda Sánchez *et al.*, 2025)

Este documento proporciona evidencia clave en cuatro aspectos esenciales que respaldan el marco metodológico de la presente tesis ya que ofrece datos experimentales y analíticos sobre el comportamiento de suelos granulares, la interacción suelo-refuerzo y la estabilidad de taludes reforzados.

Este artículo proporciona parámetros geotécnicos validados, tendencias superficiales críticas y variaciones del Factor de Seguridad (FS) bajo diferentes escenarios geométricos, que permiten establecer un punto de referencia técnico para la calibración y verificación de los modelos realizados en este trabajo.

Con base en los resultados del estudio, esta tesis adopta y consolida los criterios metodológicos para el diseño y simulación: la definición del perfil del terraplén, la selección del tipo de refuerzo, el análisis mediante métodos límite (Fellenius simplificado, Bishop y Janbu) y la evaluación del desempeño del refuerzo a través del espaciamiento vertical entre capas. Asimismo, el artículo proporciona evidencia clara sobre los mecanismos de falla predominantes en sistemas reforzados, permitiendo establecer parámetros comparativos entre desplazamientos críticos, configuraciones de refuerzo y condiciones de estabilidad a largo plazo que se replican en modelos realizados en Slide 2.

A continuación, se presentan en la tabla 23 y Figura 17 esenciales del estudio antes mencionado, que sirven como referencia metodológica

para justificar el dimensionamiento, el comportamiento esperado del material de relleno y la interacción suelo-geomalla.

Tabla 19. Análisis de modelos analíticos en Slide 2.

No	Escenario del Modelo Numérico	Carga	Distancia (Cm)	FS (Factor de Seguridad)			Observaciones
				Fellenius	Bishop	Janbu	
1	Modelo sin confinamiento y sin refuerzo			0.126	0.268	0.241	Falla general y local
2	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	690 KPa	3B es decir 48 cm	0.126	0.268	0.21	Falla general
3	Con refuerzo de geomalla y Con confinamiento	Gravedad		0.593			Falla local de base
4	Con refuerzo de geomalla y Con confinamiento de cubos de concreto	Gravedad y coeficiente sísmico Vertical de 0.1		0.031			Falla local de base
5	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	0.25 KPa	1B = 16	0.126	0.268	0.241	Falla local
6	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	0.25 KPa	2B = 32	0.126	0.268	0.241	Falla local
7	sin refuerzo, sin confinamiento y con una sobrecarga	0.25 KPa	3B = 48	0.126	0.268	0.241	Falla local
8	Con refuerzo, Con confinamiento y con sobrecarga	690 KPa	3B = 48	0.0445	0.679	0.59	sobrecarga paralela al refuerzo
9	Con refuerzo, Con confinamiento y con sobrecarga	690 KPa	3B = 48	0.0445	0.679	0.59	sobrecarga tangente al refuerzo

Fuente: Elaboración propia con datos de (Miranda Sánchez et al., 2025)

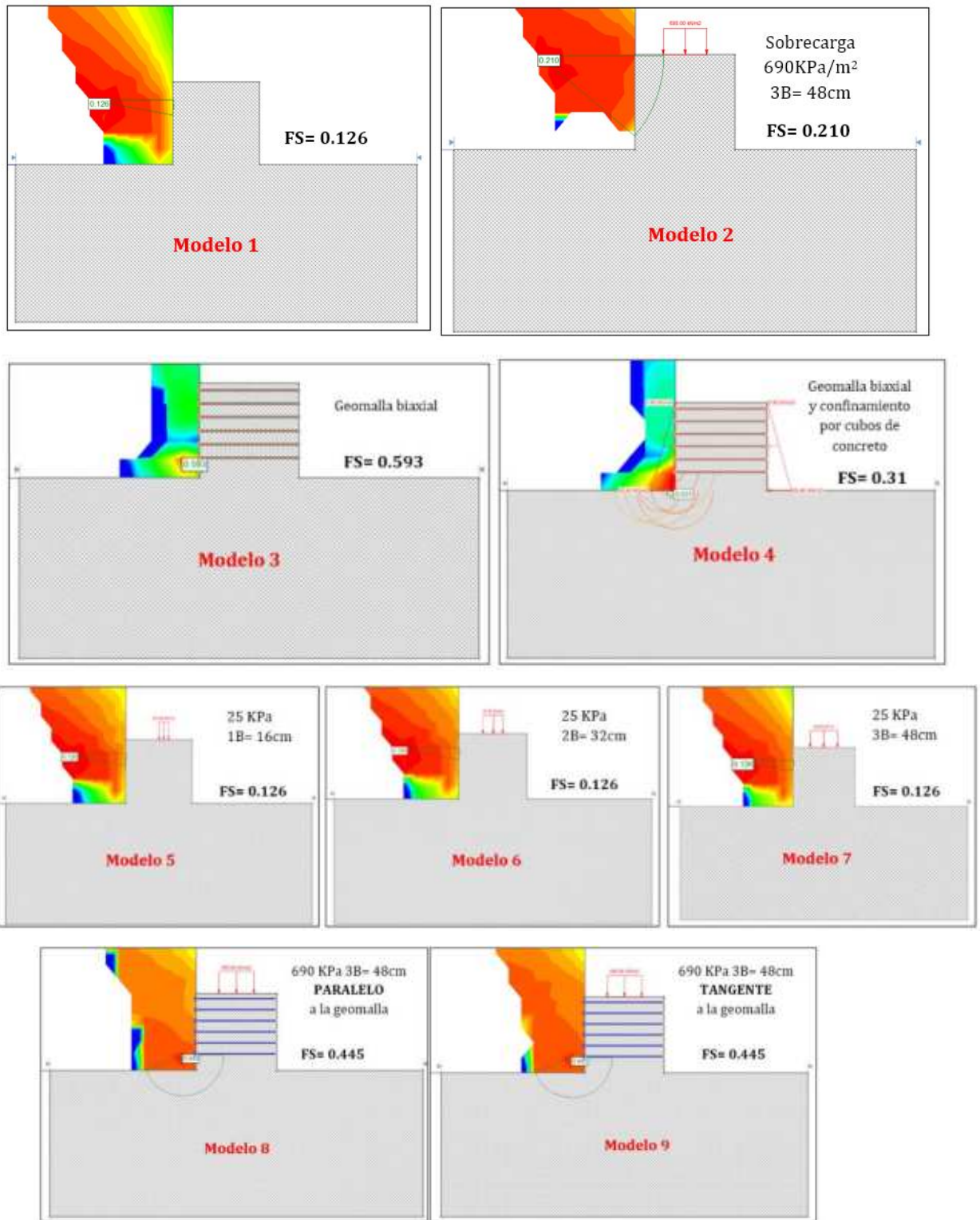


Figura 15. Escenarios gráficos analizados en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad.

Los resultados presentados en la tabla 23 y figura 17 del estudio de la CDMX muestran que, aunque la presencia de geomallas aumenta levemente el Factor de Seguridad (FS), la estructura continúa fallando porque el refuerzo no se colocó desde la base del terraplén. Esta condición, documentada en el artículo, hace que la geomalla no cruce la zona de mayor esfuerzo cortante, por lo que el mecanismo de falla global permanece activo y el FS resultante permanece por debajo del mínimo aceptable.

La superficie crítica ilustrada en el estudio confirma lo anterior: la trayectoria de ruptura se desarrolla por debajo del nivel donde comienza el refuerzo, haciendo que el aporte de la geomalla sea insuficiente para contener el movimiento. En otras palabras, la ruptura es inminente no porque el refuerzo sea inherentemente ineficiente, sino porque el diseño adoptado en el modelo no considera la necesidad de anclarlo en los niveles más profundos. Este error de diseño reproduce un escenario en el que el refuerzo sólo actúa sobre las capas superiores, dejando libre la región donde se producen las tensiones más altas.

Estos resultados son esenciales para la metodología del presente estudio, ya que demuestran que la posición del refuerzo y el espaciamiento vertical no sólo modifican el valor de FS, sino también su capacidad para interceptar o no la superficie crítica. Por esta razón, este proyecto incorpora una evaluación detallada del espaciamiento vertical ( $S_v$ ) y la distribución adecuada de las capas de geomalla para garantizar un diseño realista y funcional.

Así mismo otra aportación a este capítulo de la metodología es el artículo presentado en el XIX Coloquio "*Predicción de zonas críticas mediante análisis numérico en muro de contención reforzado y beneficios ecológicos*" (Miranda Sánchez *et al.*, 2025) constituye un referente fundamental para el eje sustentable de esta tesis, pues demuestra que el uso de geomallas no solo brinda beneficios estructurales, sino que también

genera impactos ambientales positivos al reducir la demanda de materiales convencionales, optimizar los recursos locales y reducir la huella de carbono en obras de infraestructura. Los enfoques reportados en el estudio antes mencionado confirman que las soluciones basadas en suelos reforzados representan alternativas más sostenibles que los sistemas rígidos tradicionales, ya que requieren menos procesos constructivos intensivos en hormigón, acero y energía.

El documento también destaca que la incorporación de geomallas facilita el uso de materiales locales y materiales reciclados, promoviendo prácticas de economía circular y reduciendo la extracción de recursos naturales. Además, los resultados del Coloquio muestran que estas técnicas contribuyen al control de la erosión, un mejor desempeño hidráulico del sistema y la reducción de impactos asociados al transporte y disposición de materiales.

En conjunto, las contribuciones sustentables del artículo respaldan metodológicamente la visión de esta tesis, en la cual no está de más mencionar su desempeño ambiental, alineándose con las estrategias contemporáneas de diseño geotécnico sustentable.

Tabla 20. Beneficios sustentables asociados al uso de geomallas biaxiales en muros de contención.

<b>Contribución</b>	<b>Beneficio Sustentable</b>	<b>Datos numéricos / estudio</b>
Reducción del uso de concreto y acero	Disminución del uso de materiales convencionales, así como de emisiones de CO <sub>2</sub> .	En pavimentos reforzados con geomalla, los estudios muestran reducciones del 7 % al 24 % en carbono incorporado (embodied carbón) comparado con pavimentos no reforzados. (TRID)

Posibilidad de emplear suelos locales o reciclados	Posibilita emplear suelos marginales o reciclados que normalmente serían desechados.	En el caso de un muro GRS de 42 m de altura se utilizó relleno marginal proveniente de excavaciones cercanas, reduciendo la necesidad de transporte y materiales importados. (SpringerLink)
Permeabilidad del refuerzo, favoreciendo el drenaje y reduciendo procesos erosivos	Favorece la filtración de agua, evitando acumulación de presión intersticial y erosión.	Ensayos pullout en arena limosa muestran que después de ciclos, la resistencia se reduce menos si hay buen drenaje efectivo; además, los desplazamientos laterales se reducen apreciablemente con refuerzo adecuado. (MCEJ)

Fuente: Elaboración propia con datos de (Miranda Sánchez et al., 2025)

La Tabla 24 muestra que el uso de geomallas constituye una alternativa con importantes beneficios ambientales en comparación con las soluciones tradicionales. Los resultados muestran que estas tecnologías permiten reducir el consumo de materiales de alto impacto, como el hormigón y el acero, lo que se traduce en una reducción directa de las emisiones y del consumo energético asociado a su producción. Asimismo, destaca la posibilidad de utilizar materiales locales o reciclados en el sistema de embalaje, lo que reduce tanto la extracción de recursos naturales como los efectos medioambientales del transporte.

También se destacan beneficios relacionados con la gestión del agua y el control de la erosión, ya que las geomallas mejoran la permeabilidad del sistema y favorecen la disipación de la presión interna, contribuyendo a la estabilidad y aumentando la durabilidad del terraplén. En su conjunto, los datos presentados confirman que el uso de geomallas no sólo mejora el desempeño estructural, sino que también se integra como una estrategia efectiva dentro del ámbito de la construcción sustentable, al minimizar los impactos ambientales y optimizar el uso de los recursos.

### 3.1 Desarrollo de simulaciones de modelos analíticos en Slide 2 en suelo granular reforzado con Geomalla Biaxial (Geogrid EG 30s)

#### A) JUSTIFICACIÓN DE LAS ESCALAS SELECCIONADAS EN LOS MODELOS:

Para la validación experimental y la comparación analítica, se aplicaron 2 configuraciones de espaciamiento vertical de refuerzo (Sv) en el prototipo con el objetivo de representar coherentemente tanto las recomendaciones regulatorias como las posibilidades prácticas de laboratorio. Ante esto **se desarrollaron 2 fases** de modelaciones **la primera:** La relación de escala adoptada en los prototipos es 1:10 (modelo: realidad). Los prototipos del 1 al 5 se manejaron bajo este criterio:

**Sv real = 1,00 m (ABNT) → Sv prototipo = 0,10 m (10 cm).**

**Sv real = 0,80 m (IMT) → Sv prototipo = 0,08 m (8 cm).**

**Mientras que en la segunda fase los prototipos del 6 al 12 se manejan a una escala de 1:1** con el propósito de analizar el comportamiento a escala real de distintos espaciamientos verticales, pero sin prototipos físicos; En cuanto a la justificación técnica hacer este modelado a una escala proporcional permite ensayar con mayor facilidad sin requerir una complejidad constructiva.

Estudios experimentales a escala han demostrado que los refuerzos de geomallas deben colocarse con espaciamientos reducidos para representar adecuadamente espaciamientos reales del orden de decenas de centímetros a un metro, manteniendo la distribución correcta de tensiones y deformaciones (Liu et al., 2023).

De manera similar, las pautas del International society for soil Mechanics and geotechnical Engineering (ISSMGE) sobre modelos físicos establecen que el espaciamiento vertical debe ajustarse utilizando un factor de escala geométrico para preservar los mecanismos de interacción suelo-

refuerzo y evitar modos de falla no representativos (Haeri et al., 2020).

La teoría general del escalamiento indica que espaciamentos muy grandes en modelos reducidos pueden producir fallas artificiales; Por lo tanto, utilizar valores como 8 cm, 10 cm, 0.80m y 1.0m es consistente con la práctica aceptada para asegurar similitud geométrica y un comportamiento mecánico comparable al del prototipo (Garnier et al., 2007).

### B) MODELOS ANALÍTICOS EN SLIDE 2:

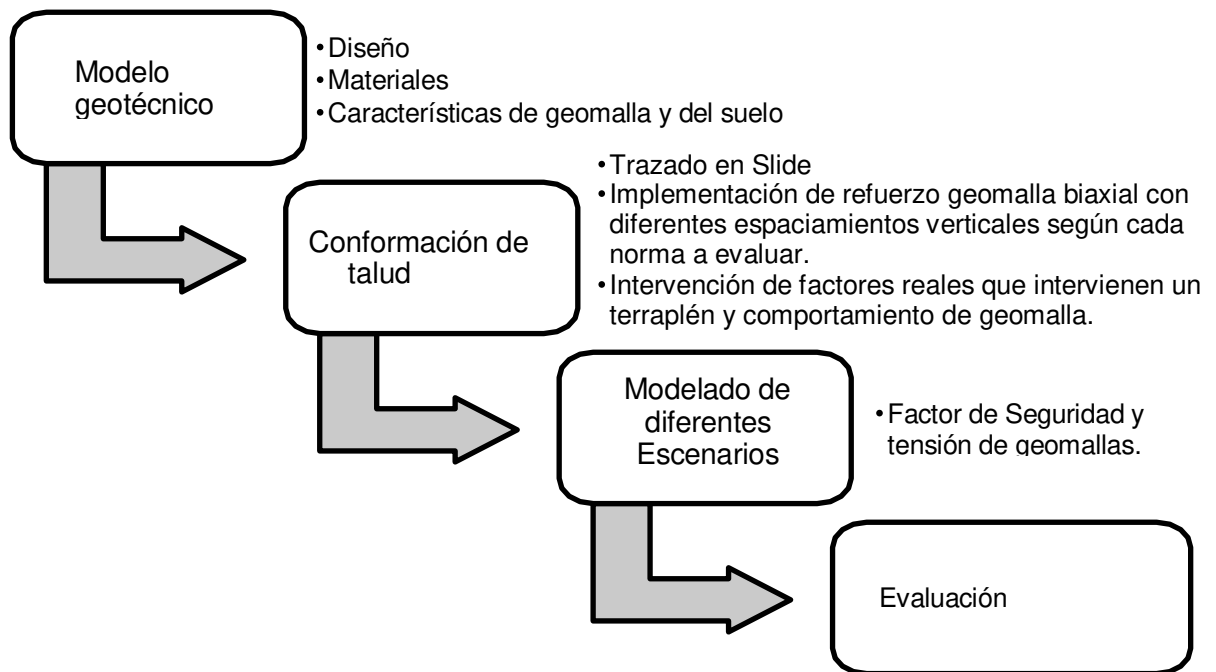


Figura 16. Esquema de uso del software Slide 2

### FASE 1 DE MODELACIÓN:

1. PROTOTIPO 1: **MODELO CONFINADO SOLO DE 1 LADO Y REFUERZO**  
INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN **SV DE 10 CM**:

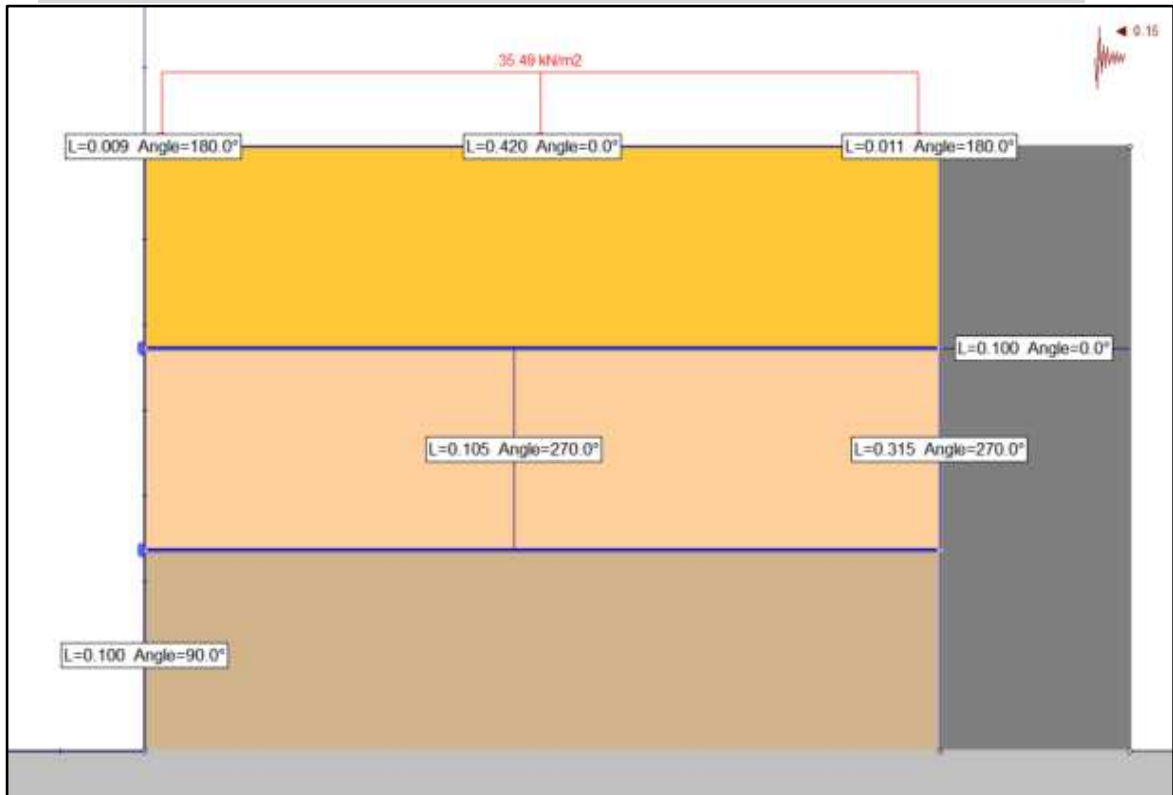


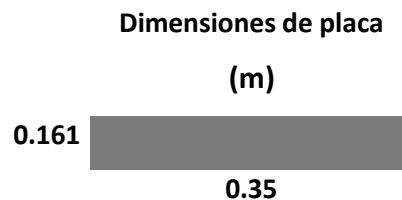
Figura 17. Escenario gráfico del prototipo 1 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

En la Figura 19 muestra el modelo numérico analizado que corresponde al prototipo 1 y representa un sistema de suelo reforzado con una geomalla, con unas dimensiones aproximadas de 31 cm de alto y 42 cm de ancho. El material utilizado en el modelo proviene del Banco San José Iturbide, caracterizado por un ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , cohesión de 10.79 kPa y propiedades mecánicas representativas de un material granular de alta resistencia.

El modelo se discretiza en tres capas de suelo, cuyos pesos volumétricos, contados de abajo hacia arriba, son  $18.78 \text{ kN/m}^3$  para la capa

inferior, 20.86 kN/m<sup>3</sup> para la capa intermedia y 22.05 kN/m<sup>3</sup> para la capa superior, con el fin de representar la variación de las condiciones de compactación y confinamiento a lo largo de la altura del sistema.

El refuerzo se realiza con una geomalla biaxial de la marca MaccaFerri, con una resistencia máxima a la tensión de 30 kN/m (30S), colocada horizontalmente con una separación vertical de 10 cm desde la base del modelo simulando la normativa de Brasil ABNT NBR 11682. Adicionalmente, el sistema está **confinado lateralmente en un solo lado** por bloques de concreto de 10 × 10 cm, que permiten simular condiciones de restricción lateral y mejorar el confinamiento del material durante la aplicación de carga transmitida a través de una **placa de acero de 0.161 cm por 0.35 cm de ancho**.



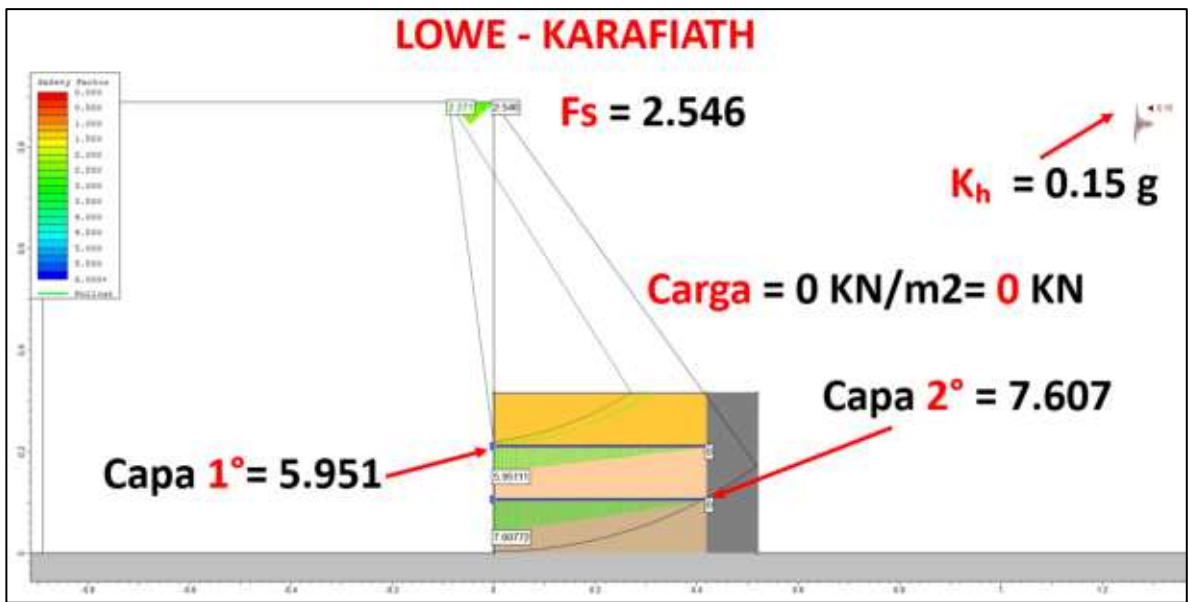
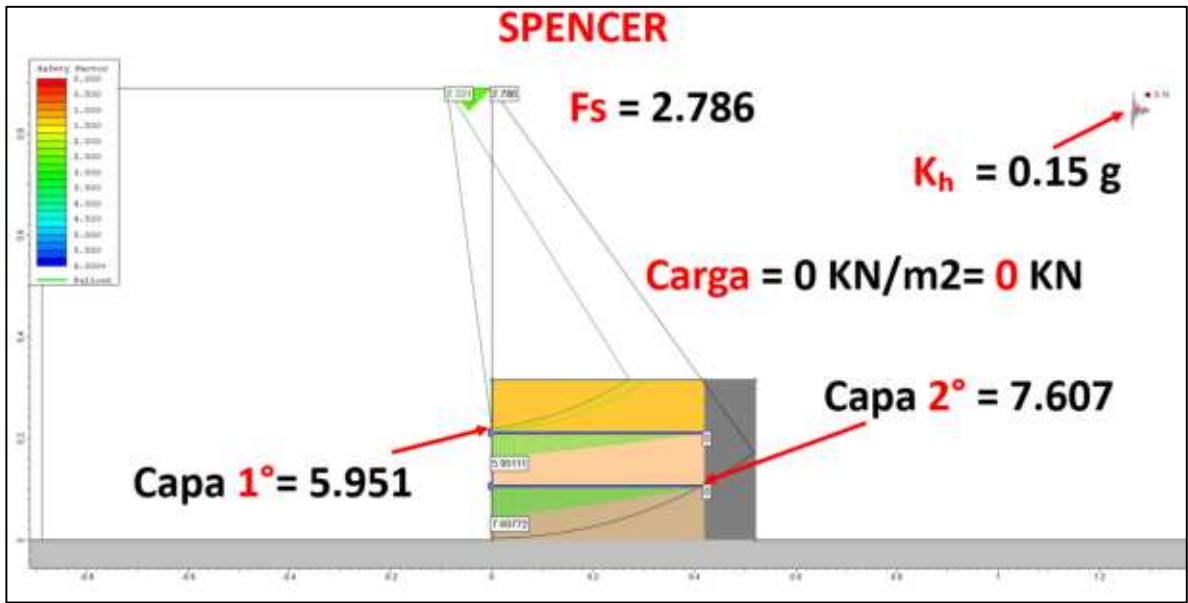
Esta configuración permite evaluar el comportamiento mecánico del sistema suelo-geomalla, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en el refuerzo bajo condiciones controladas de carga y confinamiento en un solo extremo; a continuación, se muestran los resultados tabla 25.

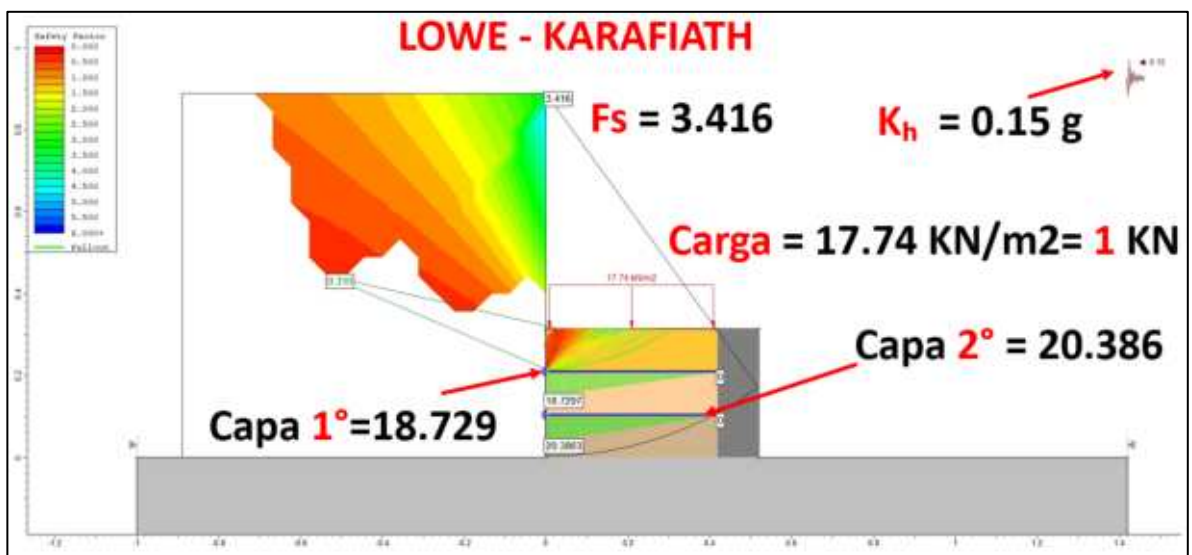
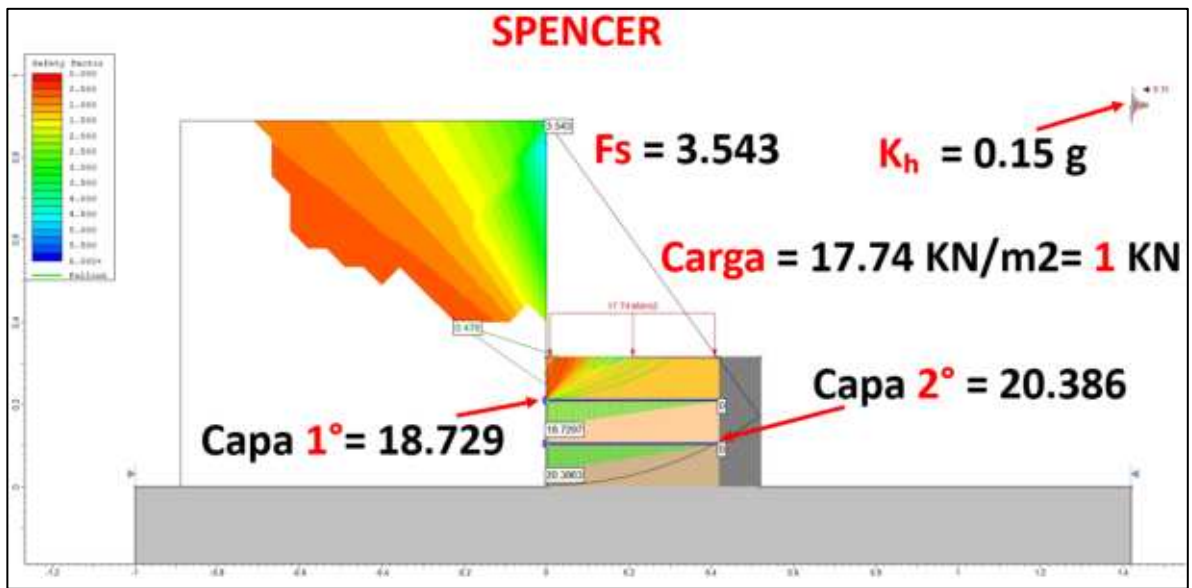
Tabla 21. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

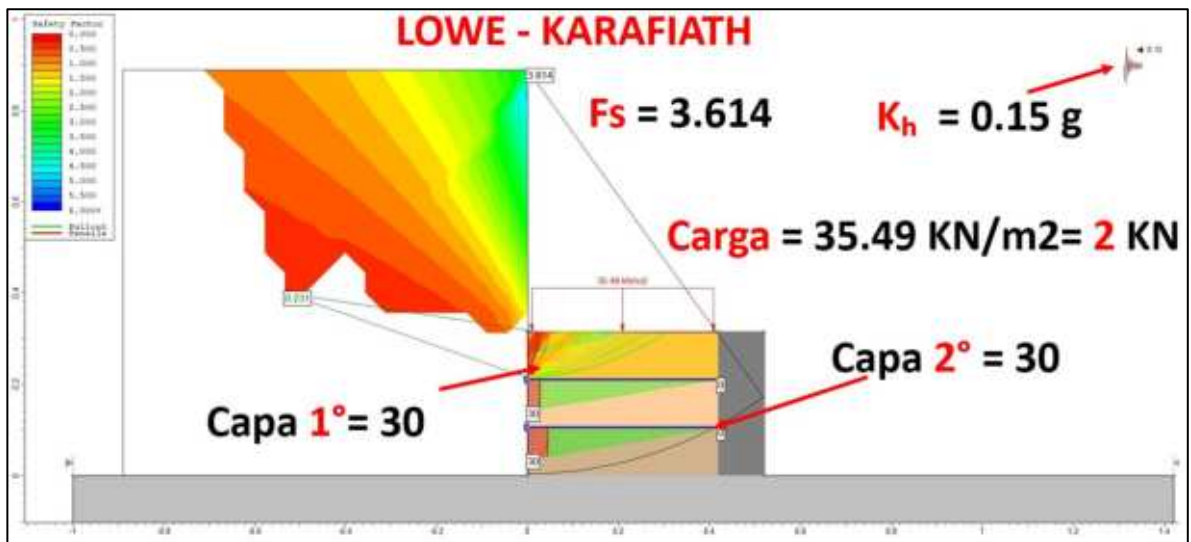
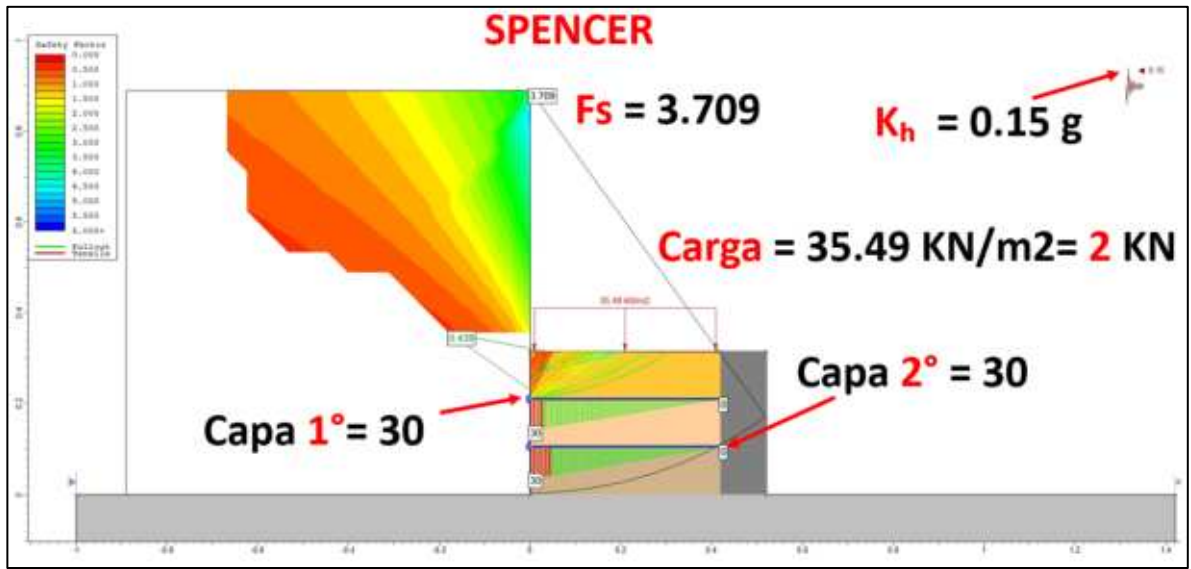
Área (m2)	P (kN)	Esfuerzo (kN/m2)	Spencer (FS)	1° capa de geomalla	2° capa de geomalla	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa de geomalla	2° capa de geomalla
	0	0	2.786	5.951	7.607	2.546	5.951	7.607
0.05635	1	17.746	3.543	18.734	20.390	3.416	18.734	20.390
	2	35.492	3.709	30	30	3.614	30	30
	3	53.238	3.778	30	30	3.701	30	30
	4	70.984	3.822	30	30	3.751	30	30
	5	88.730	3.849	30	30	3.782	30	30
	6	106.476	3.867	30	30	3.804	30	30
	10	177.460	3.904	30	30	3.851	30	30
	15	266.190	3.925	30	30	3.876	30	30
	20	354.920	3.935	30	30	3.888	30	30
	30	532.380	3.775	30	30	3.085	30	30
	40	709.840	2.984	30	30	2.613	30	30
	45	798.570	2.750	30	30	2.571	30	30
	50	887.300	1.746	30	30	2.484	30	30
	55	976.030	1.271	30	30	2.110	30	30
	60	1064.760	1.455	30	30	1.939	30	30
	65	1153.490	1.424	30	30	1.905	30	30
	70	1242.220	1.079	30	30	1.087	30	30

Fuente: Elaboración propia.

Para documentar el comportamiento del modelo numérico del prototipo 1 prototipo durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual de los modelos analíticos experimentales, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras, como un registro visual continuo. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.







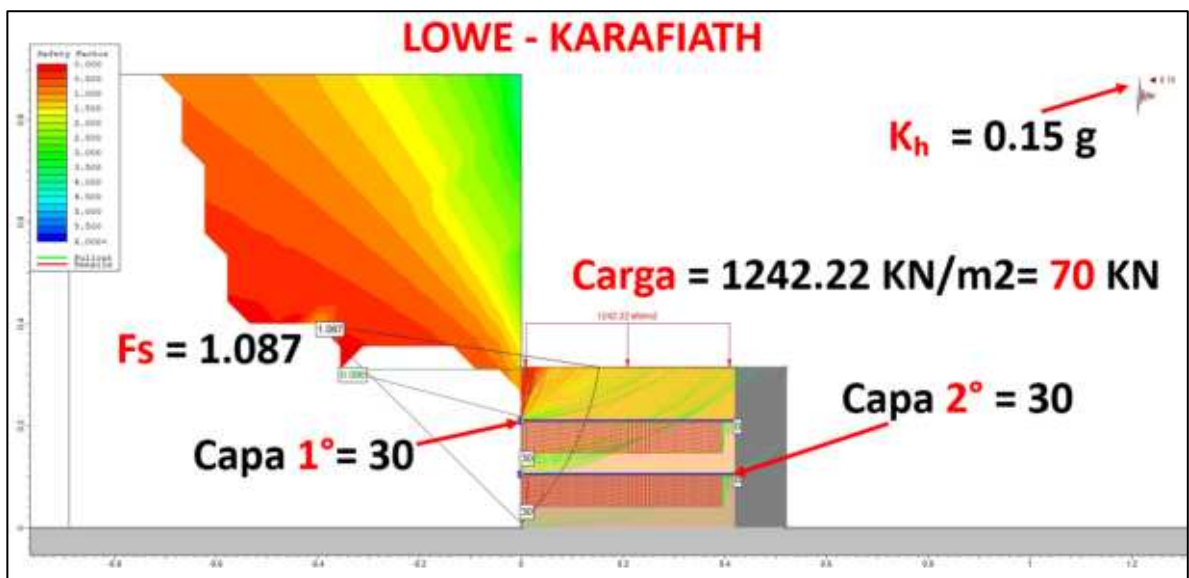
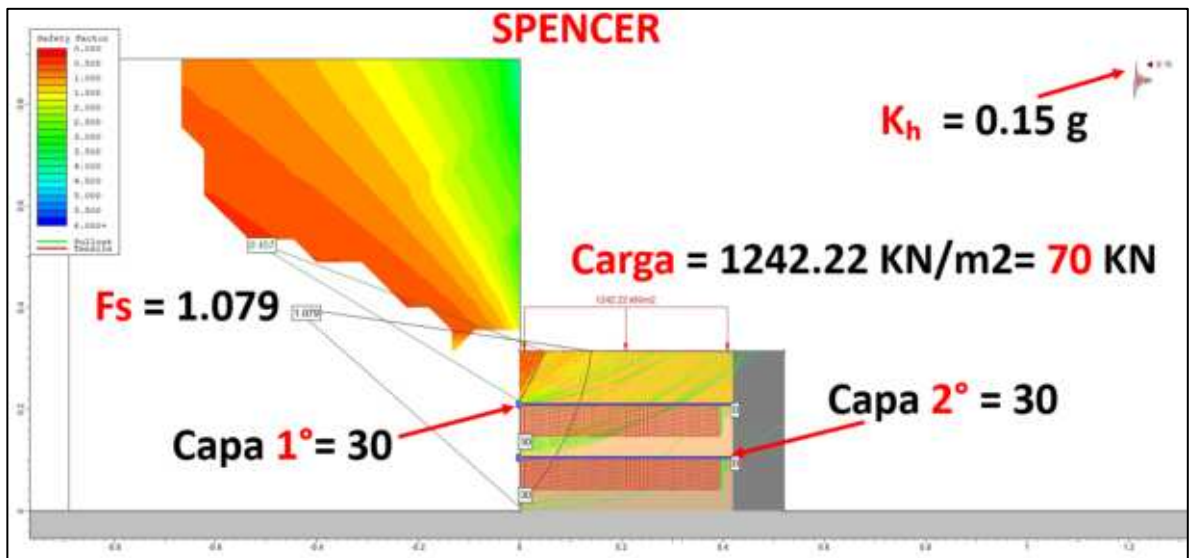


Figura 18. Escenario gráfico Prototipo 1 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La interpretación del comportamiento del sistema reforzado se basa en el análisis conjunto de los factores de seguridad globales y los esfuerzos de tracción movilizados en las geomallas, bajo diferentes niveles de carga aplicados en un área de  $0.05635 \text{ m}^2$ . Los resultados indican que, a medida que aumenta la carga vertical, la demanda estructural sobre las capas de

refuerzo aumenta significativamente, mientras que el factor de seguridad global del sistema muestra, en términos generales, una tendencia decreciente. Sin embargo, como el material de relleno presenta un comportamiento predominantemente de fricción ( $\phi = 43,58^\circ$ ,  $c \approx 0$ ), la aplicación de sobrecargas moderadas generó inicialmente un aumento en la resistencia al confinamiento y al corte, lo que produjo un aumento temporal en el factor de seguridad. El relleno armado corresponde a arena mal graduada (SP), material muy recomendado para muros estabilizados mecánicamente por su alta resistencia a la fricción, capacidad de drenaje y adecuada interacción con geomallas. Asimismo, la energía de compresión aplicada al prototipo fue de  $(6.05 \text{ kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3)$  equivalente a la prueba Proctor estándar ASTM D698, permitiendo reproducir adecuadamente las condiciones de compactación del relleno granular. Esta condición favoreció el aumento inicial del factor de seguridad debido al mayor confinamiento y resistencia al corte del material, observado en el análisis analítico. Sin embargo, a medida que la carga vertical continuó aumentando, predominaron los efectos desestabilizadores y la movilización de superficies de ruptura más profundas, provocando una reducción progresiva del factor de seguridad del sistema.

Para la condición sin carga aplicada, el sistema presenta factores de seguridad de 2.786 y 2.546, obtenidos por los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath, respectivamente, lo que indica un estado mayoritariamente estable. En esta condición, los esfuerzos de tracción movilizados en la geomalla son relativamente bajos, alcanzando valores de 5.951 tensión última en la primera capa y 7.607 tensión última en la segunda capa, reflejando un comportamiento elástico del sistema y una adecuada redistribución de esfuerzos dentro de la masa reforzada.

Al aplicar una carga de 1 kN, equivalente a una tensión vertical de  $17.746 \text{ kN/m}^2$ , se observa un notable aumento de la tracción movilizada en las geomallas, alcanzando valores de 18.734 de  $T_{ult}$  en la primera capa y

20.390 Tult en la segunda capa. A pesar de este aumento, los factores de seguridad generales siguen siendo altos ( $FS \approx 3.543$  para Spencer y  $FS \approx 3.416$  para Lowe-Karafiath), lo que sugiere que el sistema mantiene una condición estable, aunque la geomalla comienza a operar en un régimen cercano a su capacidad de servicio.

Para una carga de 2 kN, correspondiente a una tensión vertical de 35.492 kN/m<sup>2</sup>, ambas capas de la geomalla alcanzan el valor límite de tensión de 30 kN/m, de acuerdo con la resistencia máxima especificada por el fabricante MaccaFerri para la geomalla tipo 30S. Esta condición indica que el refuerzo ha alcanzado su capacidad de trabajo nominal, marcando el inicio del comportamiento no lineal del material. Al mismo tiempo, los factores de seguridad globales disminuyen ligeramente hasta valores de 3.709 (Spencer) y 3.614 (Lowe-Karafiath), sin comprometer la estabilidad global del sistema.

En este contexto, la denominada “ruptura” de la geomalla no debe interpretarse como una ruptura frágil o colapso inmediato, sino más bien como la superación del estado límite de servicio de la geomalla, asociada a altas deformaciones y concentración de tensiones en zonas con menor confinamiento del suelo.

Estos resultados resaltan la influencia directa del nivel de carga aplicado y las condiciones de confinamiento en el desempeño mecánico del sistema suelo-geomalla, así como la importancia de considerar criterios de servicio y seguridad al diseñar terraplenes reforzados. Para identificar la carga límite del modelo, se continuó con el modelado mediante aumentos progresivos de la carga vertical hasta obtener un factor de seguridad inferior al valor mínimo permisible de 1.25; condición que se logró con una carga aproximada de 70 kN, como se muestra en la tabla 25.

Es importante señalar que incluso cuando las capas de geomalla alcanzaron la tensión nominal máxima de diseño ( $T = T \text{ máx.} = 30\text{kN/m}$ ), el sistema conservó la estabilidad global para cargas anteriores a este límite.

Esto indica que la resistencia del conjunto no dependió exclusivamente del refuerzo, sino también del aporte de suelo granular compactado tipo SP (Arena mal gradada), caracterizado por su alta fricción interna, adecuado confinamiento e interacción mecánica favorable con las geomallas. En términos físicos, a medida que la capacidad de tracción del refuerzo está completamente movilizadada, la geomalla trabaja a la tensión máxima permitida y, a partir de ese momento, los incrementos de carga adicionales deben ser absorbidos principalmente por la masa de suelo reforzado. En estas condiciones, la estabilidad remanente del sistema proviene fundamentalmente de la resistencia interna del terraplén, el confinamiento lateral desarrollado, el peso propio estabilizador y la geometría general del terraplén. Por lo tanto, incluso cuando el refuerzo alcanzó su capacidad máxima de tensión, el sistema mantuvo valores aceptables del factor de seguridad en los pasos anteriores, un comportamiento típico de buena calidad y rellenos granulares correctamente compactados.

Sin embargo, alcanzar el trabajo de servicio máximo de la geomalla no implica necesariamente una falla inmediata, sino más bien una condición crítica de servicio en la que las deformaciones del sistema pueden comenzar a incrementarse, manifestadas por mayores desplazamientos laterales, asentamientos diferenciales, deformación del paramento del muro o estiramiento progresivo de la geomalla. Asimismo, se pueden desarrollar potenciales mecanismos de falla interna, como ruptura de refuerzo, arrancamiento (pullout) o falla entre capas, así como fallas externas asociadas a deslizamiento global, vuelco, pérdida de capacidad de carga o superficies de rotación profunda.

En consecuencia, la geomalla actuó como un elemento de refuerzo complementario, mientras que la masa de suelo estabilizada continuó proporcionando resistencia al corte y estabilidad general hasta que, a medida que aumentó la carga vertical, los efectos desestabilizadores

excedieron la capacidad de carga conjunta del sistema. Desde el punto de vista de diseño, si bien el modelo aún presenta factores de seguridad superiores al mínimo requerido luego de alcanzar la tensión máxima del refuerzo, esta condición indica que el sistema opera en una zona crítica y que no es aconsejable continuar incrementando cargas sin rediseñar el refuerzo o modificar geoméricamente el terraplén.

## 2. PROTOTIPO 2: MODELO CONFINADO EN LOS 2 LADOS Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 10 CM:

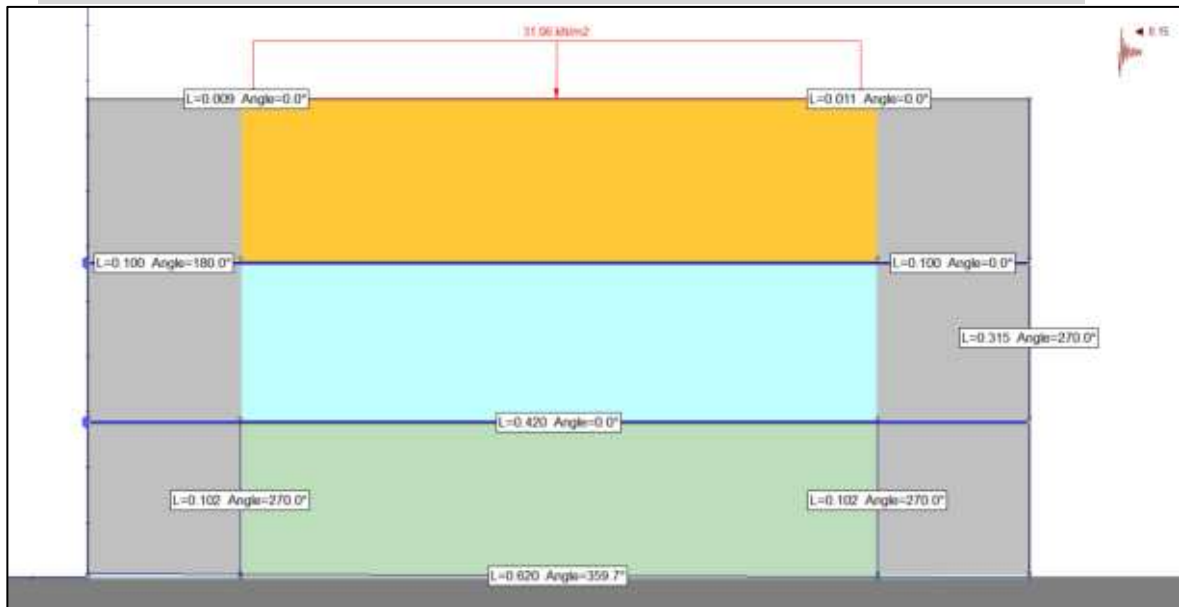


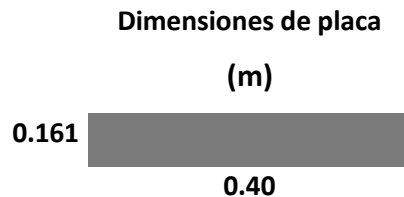
Figura 19. Escenario gráfico del prototipo 2 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

En la Figura 21 muestra el modelo numérico analizado que corresponde al prototipo 2 y representa el mismo sistema de suelo reforzado con una geomalla, con unas dimensiones aproximadas de 31 cm de alto y 42 cm de ancho. El material utilizado en el modelo proviene del Banco San José Iturbide, caracterizado por un ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , cohesión de 10.79 kPa y propiedades mecánicas representativas de un material granular de alta resistencia.

El modelo se discretiza en tres capas de suelo, cuyos pesos

volumétricos, contados de abajo hacia arriba, son 18.78 kN/m<sup>3</sup> para la capa inferior, 20.86 kN/m<sup>3</sup> para la capa intermedia y 22.05 kN/m<sup>3</sup> para la capa superior, con el fin de representar la variación de las condiciones de compactación y confinamiento a lo largo de la altura del sistema.

El refuerzo se realiza con una geomalla biaxial de la marca MaccaFerri, con una resistencia máxima a la tracción de 30 kN/m (30S), colocada horizontalmente con una separación vertical de 10 cm desde la base del modelo simulando la normativa de Brasil ABNT NBR 11682. Adicionalmente, el sistema está **confinado lateralmente en ambos lados por bloques de concreto de 10 × 10 cm**, que permiten simular condiciones de restricción lateral y mejorar el confinamiento del material durante la aplicación de carga transmitida a través de **una placa de acero de 0.161 cm por 0.40 cm de ancho**.



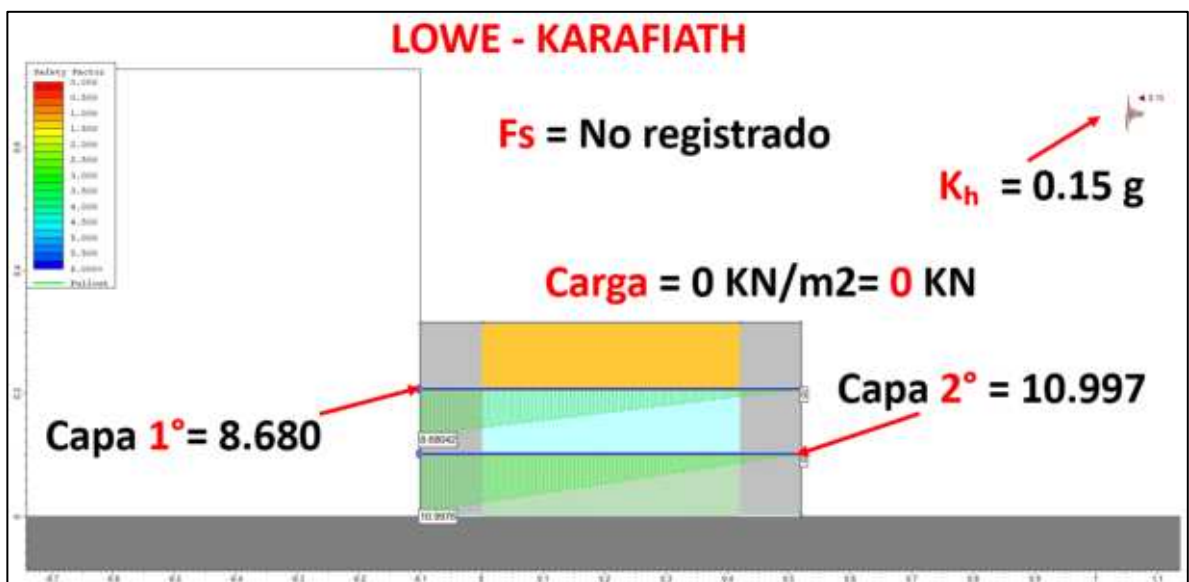
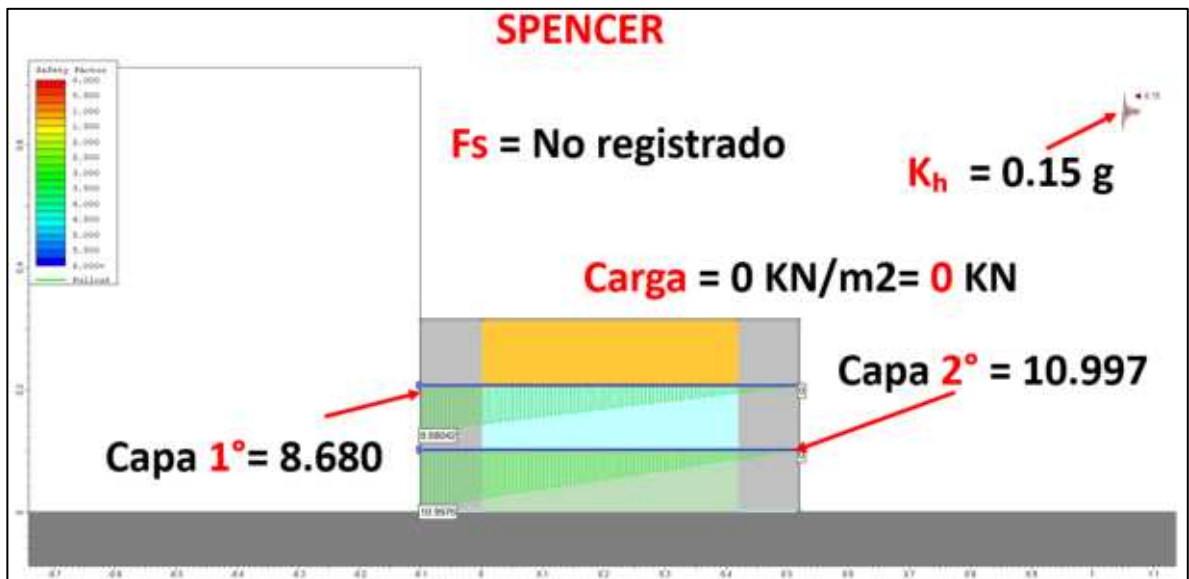
Esta configuración permite evaluar el comportamiento mecánico del sistema suelo-geomalla, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en el refuerzo bajo condiciones controladas de carga y confinamiento; a continuación, se muestran los resultados tabla 26.

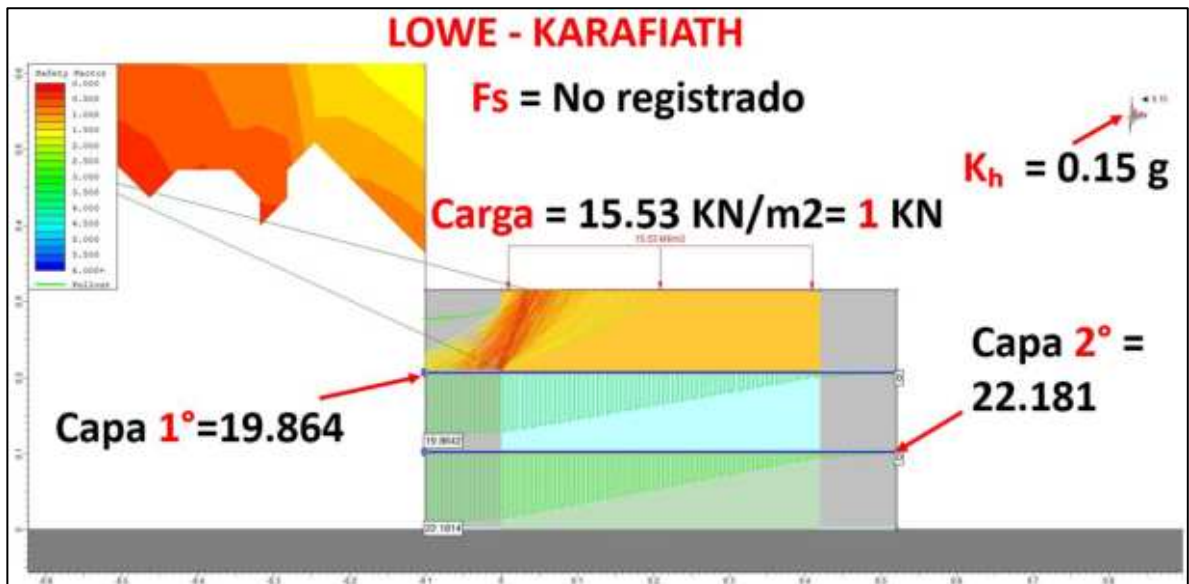
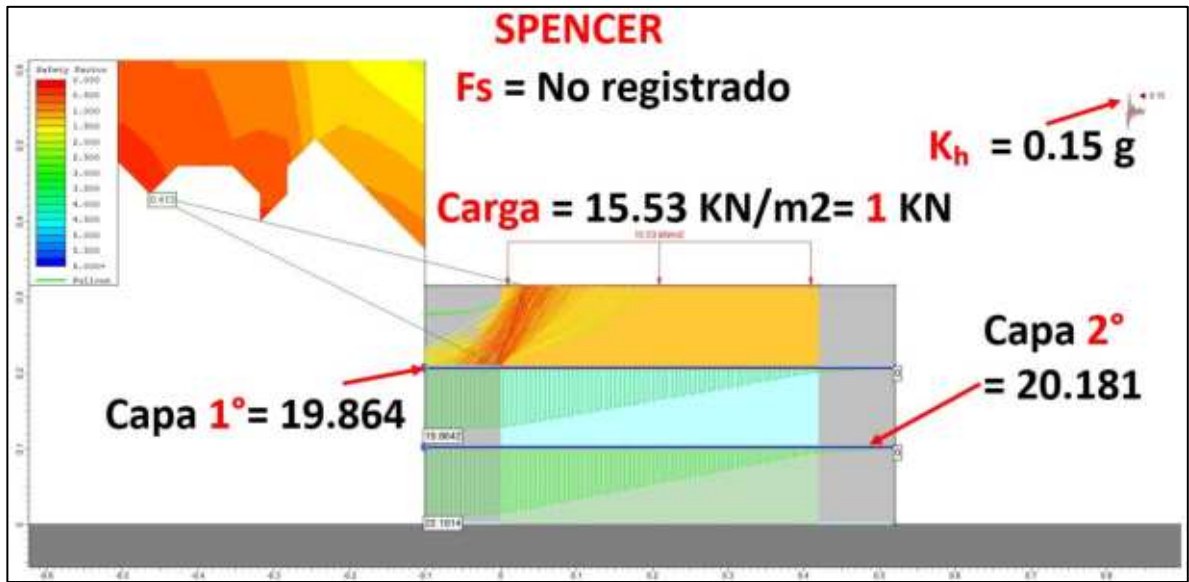
Tabla 22. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

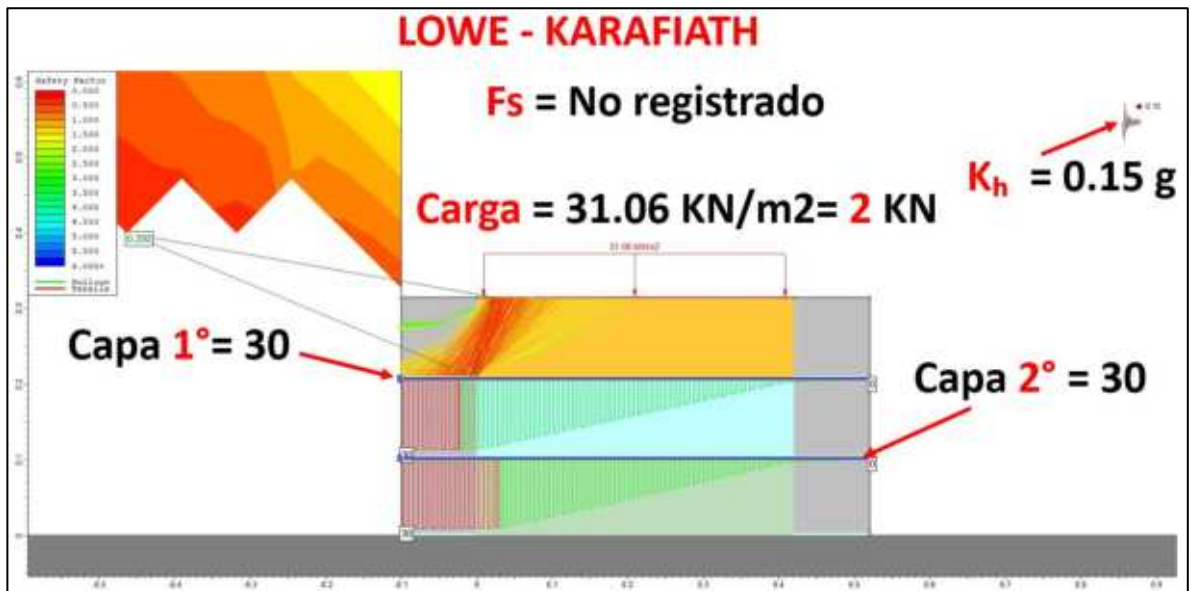
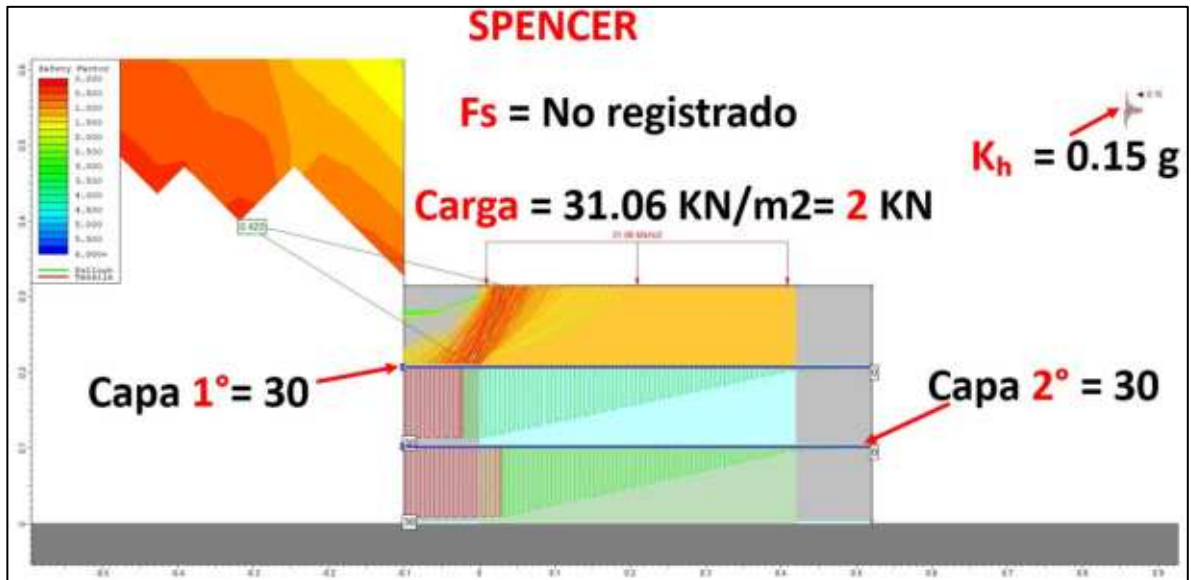
Área (m2)	P (kN)	Esfuerzo (kN/m2)	Spencer (FS)	1° capa de geomalla	2° capa de geomalla	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa de geomalla	2° capa de geomalla
	0	0	-	8.680	10.997	-	8.680	10.997
0.0644	1	15.528	-	19.864	22.181	-	19.864	22.181
	2	31.056	-	30	30	-	30	30
	3	46.584	-	30	30	-	30	30
	4	62.112	-	30	30	-	30	30
	5	77.64	-	30	30	-	30	30
	6	93.168	-	30	30	-	30	30
	7	108.696	-	30	30	-	30	30
	8	124.224	-	30	30	-	30	30
	9	139.752	-	30	30	-	30	30
	10	155.28	-	30	30	-	30	30
	45	698.76	-	30	30	-	30	30
	60	931.68	1.546	30	30	1.103	30	30
	70	1086.96	1.461	30	30	1.022	30	30
	75	1164.6	1.270	30	30	0.96	30	30
	80	1242.24	1.107	30	30	0.926	30	30

Fuente: Elaboración propia.

Para documentar el comportamiento del modelo numérico del prototipo 2 prototipo durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual de los modelos analíticos experimentales, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras, como un registro visual continuo. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.







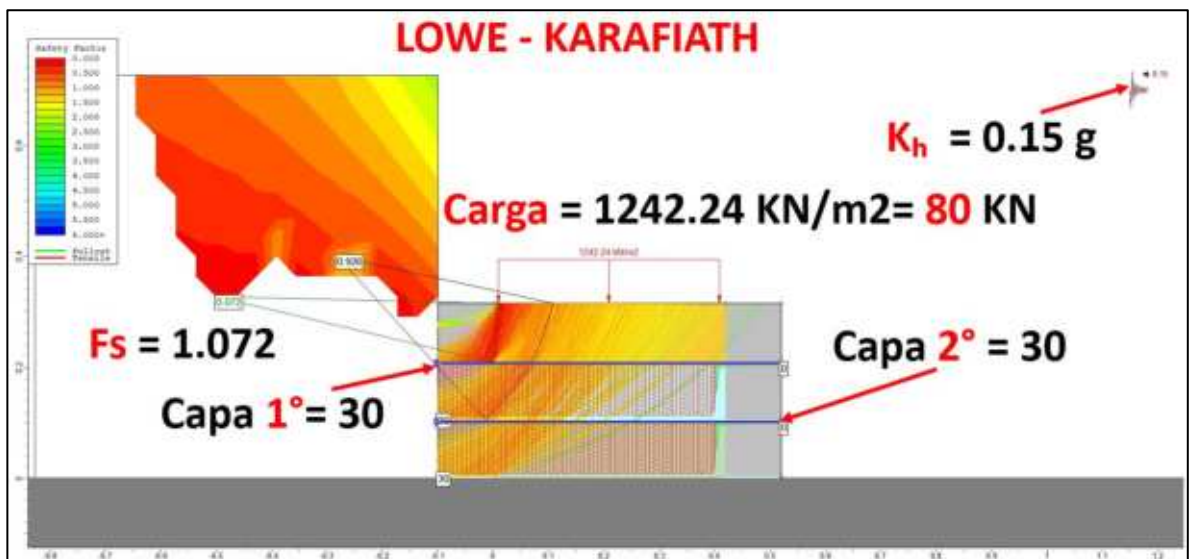
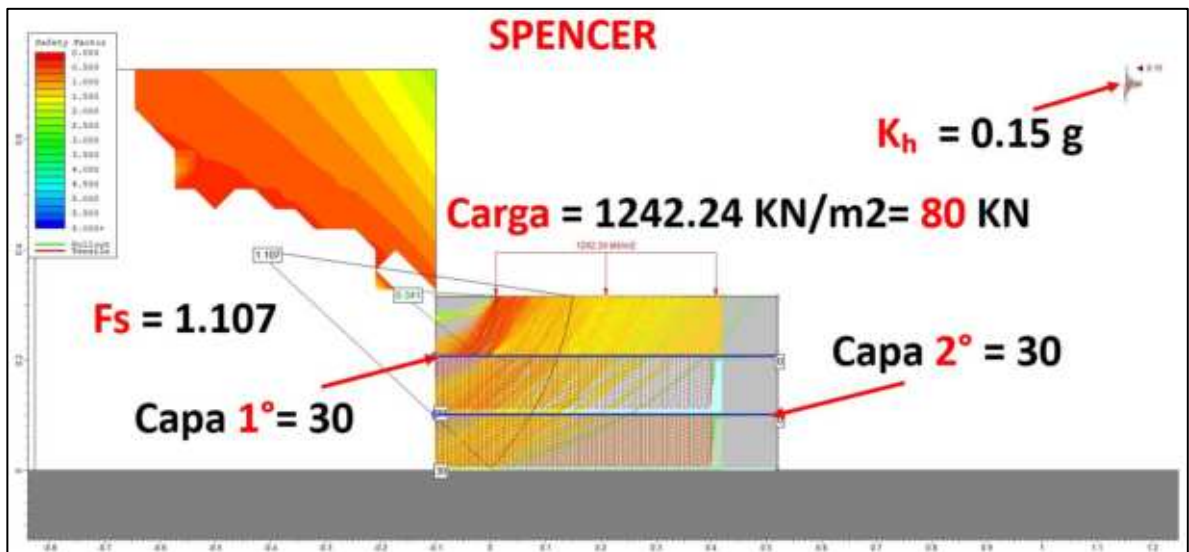


Figura 20. Escenario gráfico Prototipo 2 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La interpretación del comportamiento del sistema reforzado se basa en el análisis conjunto de los factores de seguridad globales y las fuerzas de tracción movilizadas en las geomallas, bajo diferentes niveles de carga aplicados en un área de 0,0644 m<sup>2</sup>. De los resultados se observa que, a medida que aumenta la carga vertical, la demanda estructural sobre las

capas de refuerzo aumenta significativamente, mientras que el factor de seguridad global presenta, en términos generales, una tendencia decreciente.

Es importante resaltar que en la tabla existen valores representados por “-”, lo cual no indica ausencia de resultados, sino que corresponde a condiciones donde el factor de seguridad es muy alto, por lo tanto, el software (Slide 2) no reporta un valor numérico porque no se identifica una superficie crítica de falla definida o cuando se exceden los rangos prácticos de salida. Esta situación es consistente con estados iniciales altamente estables.

Al igual que en el modelo anterior, el material de aportación juega un papel fundamental en el comportamiento del sistema. Al tratarse de un suelo granular con comportamiento predominantemente friccional, el aumento de carga genera inicialmente un aumento de confinamiento y resistencia al corte, lo que explica las condiciones de alta estabilidad observadas en los primeros aumentos de carga.

Para la condición sin carga aplicada, el sistema presenta esfuerzos de tracción relativamente bajos en las geomallas (8,680 kN/m en la primera capa y 10,997 kN/m en la segunda), lo que refleja un comportamiento elástico y una adecuada redistribución de esfuerzos. Al aplicar una carga de 1 kN (15.528 kN/m<sup>2</sup>), se observa un aumento significativo de la tracción movilizada (19.864 y 22.181 kN/m), manteniéndose aún en un rango estable, lo cual es consistente con los altos valores del factor de seguridad no reportados numéricamente.

A partir de 2 kN (31.056 kN/m<sup>2</sup>), ambas capas de la geomalla alcanzan el valor límite de 30 kN/m, correspondiente a su capacidad nominal. Esta condición marca el inicio del comportamiento del refuerzo no lineal, donde la geomalla trabaja a su máxima capacidad y los incrementos de carga posteriores deben ser soportados principalmente por la masa de suelo reforzado. En este contexto, la “ruptura” de la geomalla no representa

un fallo repentino, sino más bien la superación del estado límite de uso.

Para cargas superiores, principalmente a partir de 60 kN (931,68 kN/m<sup>2</sup>), se empiezan a registrar los valores de los factores de seguridad. Se obtiene un FS  $\approx$  1.546 utilizando Spencer y un FS  $\approx$  1.103 utilizando Lowe-Karafiath, lo que muestra una reducción significativa de la estabilidad. Esta tendencia continúa al aumentar la carga: para 70 kN, el FS disminuye a aproximadamente 1,461 (Spencer) y 1,022 (Lowe-Karafiath); para 75 kN, en 1.270 y 0.96; y finalmente, para 80 kN, en 1.107 y 0.926, respectivamente. Estos valores indican que el sistema alcanza condiciones críticas y excede el límite mínimo de estabilidad permisible (FS  $\approx$  1.25) en el rango de 70 a 75 kN.

Aunque la geomalla alcanza su máxima capacidad desde las etapas iniciales, el sistema mantiene la estabilidad general en cargas intermedias gracias al aporte del suelo granular, el confinamiento lateral y la interacción suelo-refuerzo. Sin embargo, a medida que la carga continúa aumentando, predominan los efectos desestabilizadores, desarrollando superficies de falla más profundas y reduciendo progresivamente la seguridad del sistema.

En resumen, el comportamiento observado confirma que la geomalla actúa como un elemento de refuerzo complementario, mientras que la estabilidad global depende en gran medida de las propiedades del material de relleno y del confinamiento generado. Sin embargo, una vez alcanzada la capacidad máxima del refuerzo y con factores de seguridad cercanos o inferiores al mínimo permitido, el sistema entra en una condición de servicio crítica, no siendo aconsejable aumentar las cargas sin rediseñar el sistema.

3. PROTOTIPO 3: MODELO CONFINADO EN LOS 2 LADOS Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 10 CM Y CORTE EN LAS 2 CAPAS DE GEOMALLA:

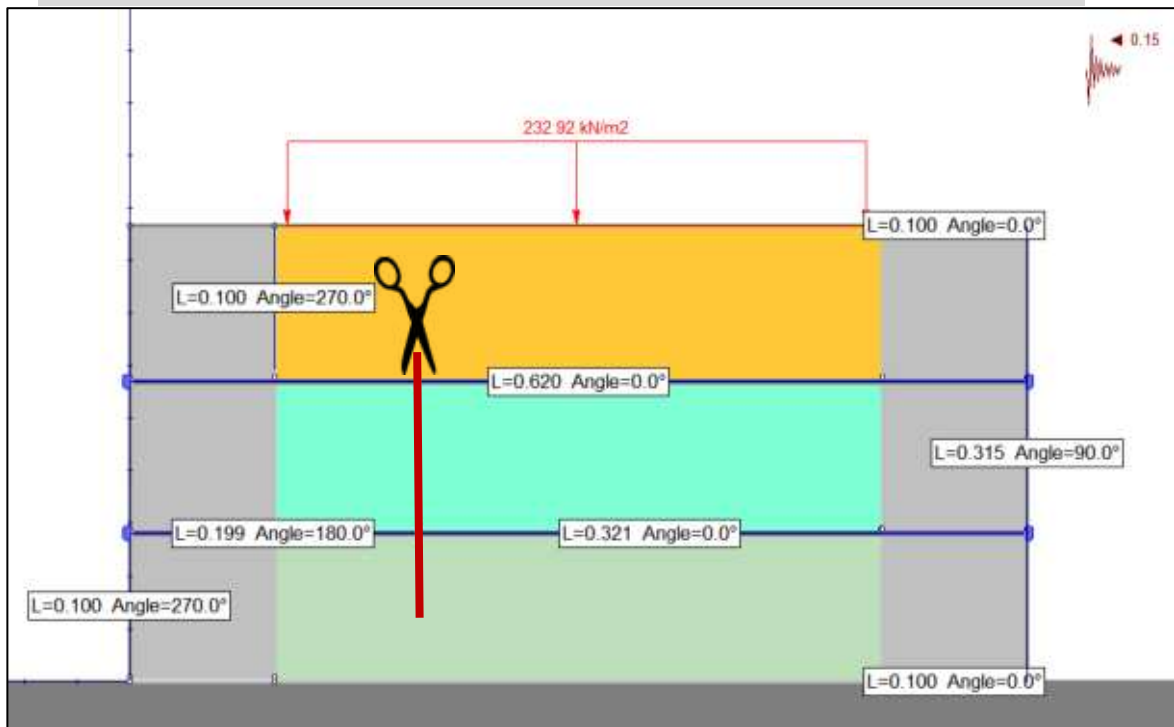


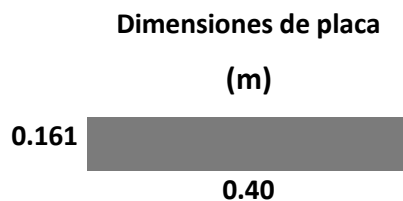
Figura 21. Escenario gráfico del Prototipo 3 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La Figura 23 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo 2, el cual representa un sistema de suelo reforzado con una geomalla, con unas dimensiones aproximadas de 31 cm de alto y 42 cm de ancho. El material considerado en el análisis proviene del Banco San José Iturbide y se caracteriza por un ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , una cohesión de 10.79 kPa, además de propiedades mecánicas propias de un material granular de alta resistencia.

El dominio del modelo se divide en tres capas de suelo, cuyos pesos volumétricos, contados de abajo hacia arriba, corresponden a  $18.78 \text{ kN/m}^3$  en la capa inferior,  $20.86 \text{ kN/m}^3$  en la capa intermedia y  $22.05 \text{ kN/m}^3$  en la capa superior, con el objetivo de reproducir la variación de las condiciones de compactación y confinamiento a lo largo de la altura del sistema.

El refuerzo se incorpora mediante una geomalla biaxial marca MaccaFerri, con resistencia máxima a la tracción de 30 kN/m (30S), dispuesta horizontalmente con una separación vertical de 10 cm de la base, de acuerdo con la norma brasileña ABNT NBR 11682. Asimismo, el sistema está **confinado lateralmente en ambos extremos por bloques de concreto** de 10 × 10 cm, que brindan restricción lateral adicional durante la aplicación del refuerzo. carga.

Cabe señalar que en este prototipo **se considera un corte en las dos capas de la geomalla, ubicadas a 10 cm del borde interior del elemento de contención**, con el fin de evaluar su influencia en la distribución de tensiones y el comportamiento global del sistema. La carga se transmite al modelo a través de una **placa de acero de 0.161 cm por 0.40 cm de ancho**, permitiendo una aplicación de fuerzas controlada y uniforme.



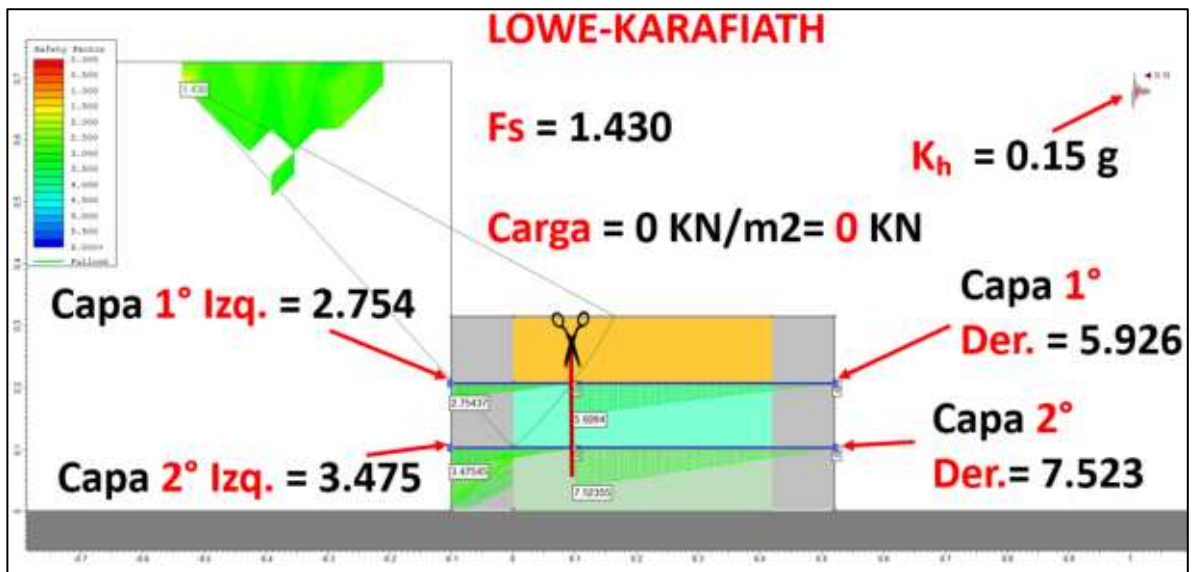
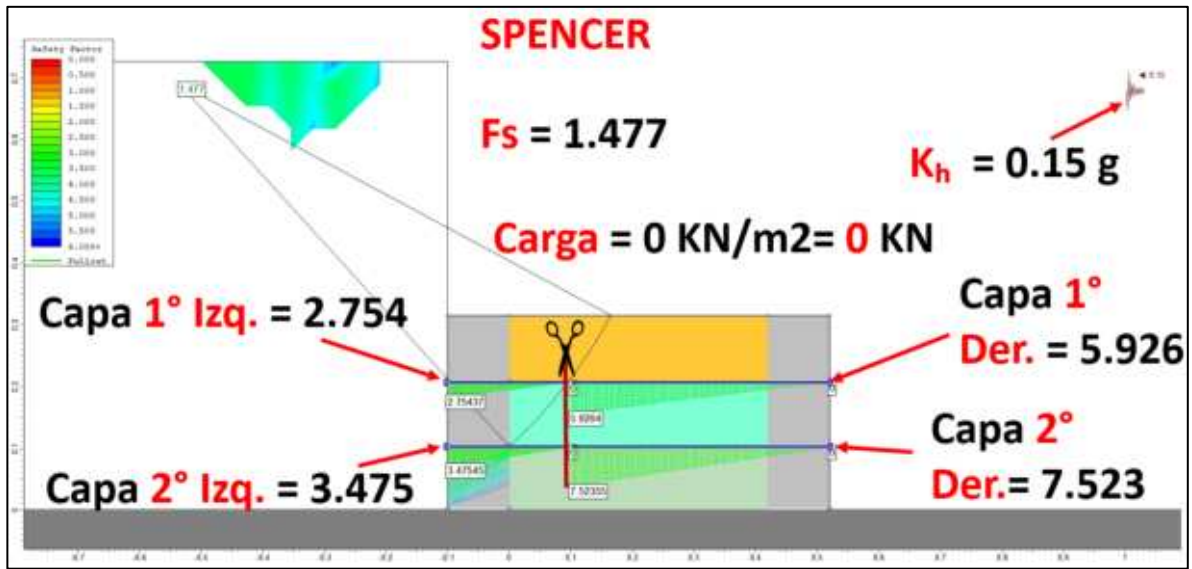
Esta configuración permite evaluar el comportamiento mecánico del sistema suelo-geomalla, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en el refuerzo bajo condiciones controladas de carga y confinamiento; a continuación, se muestran los resultados tabla 27.

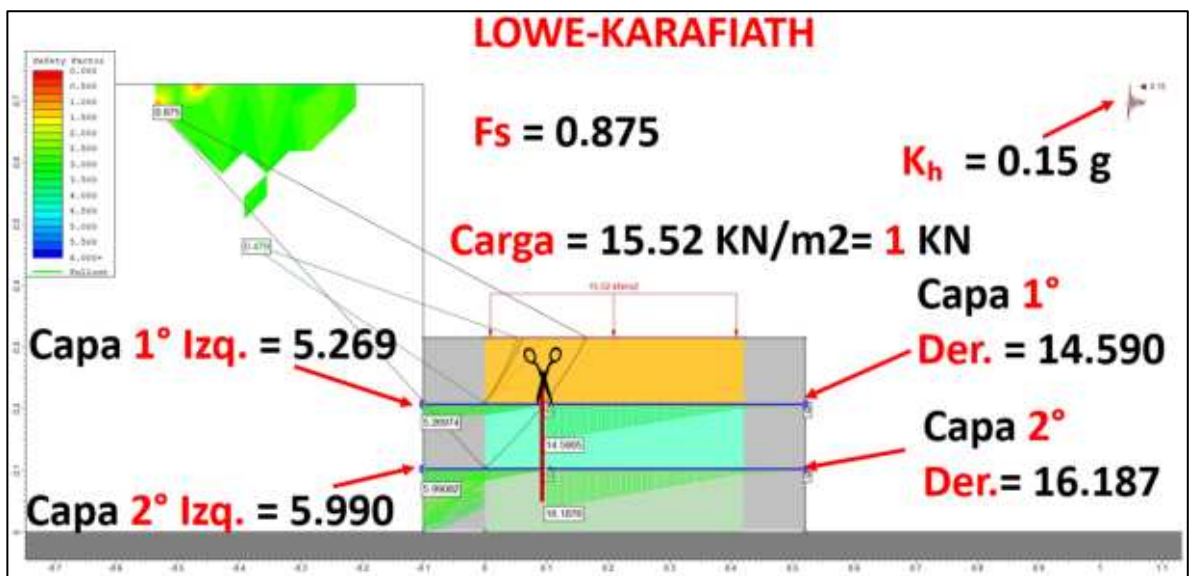
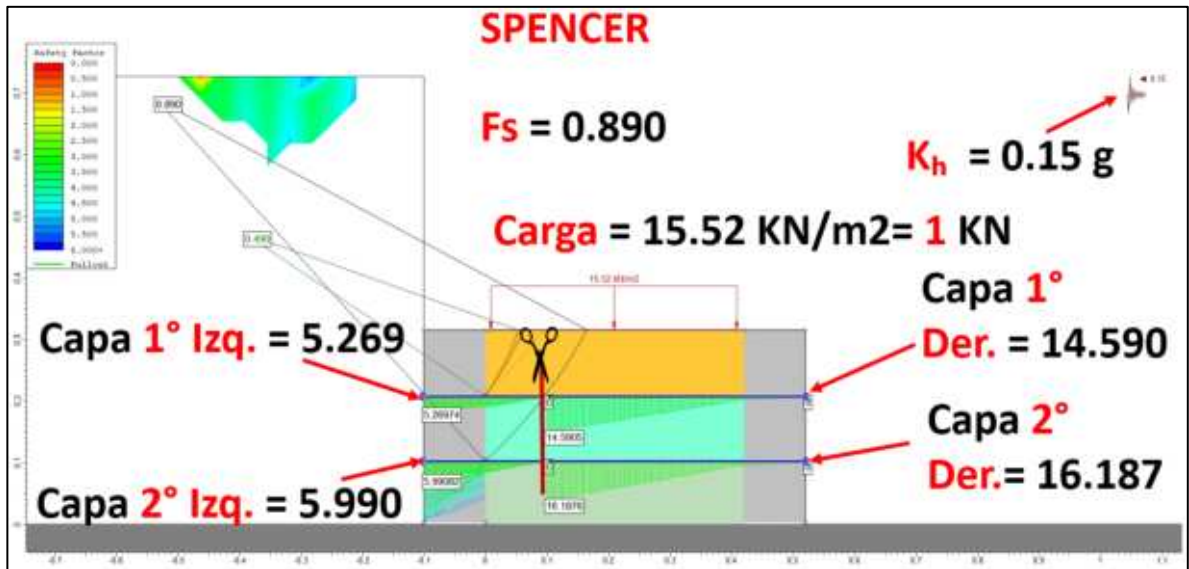
Tabla 23. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

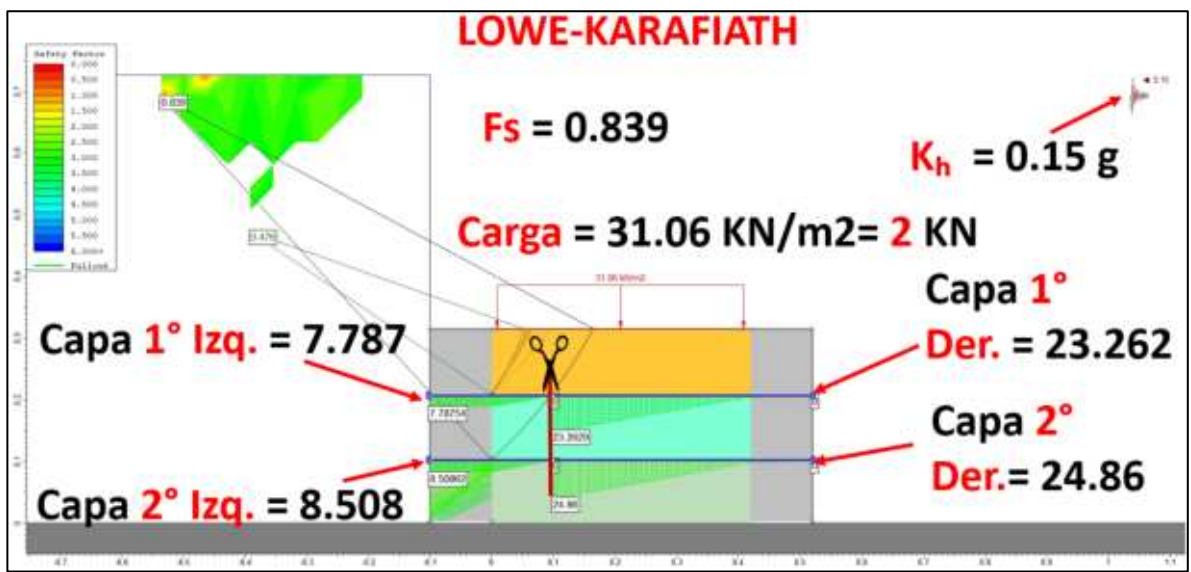
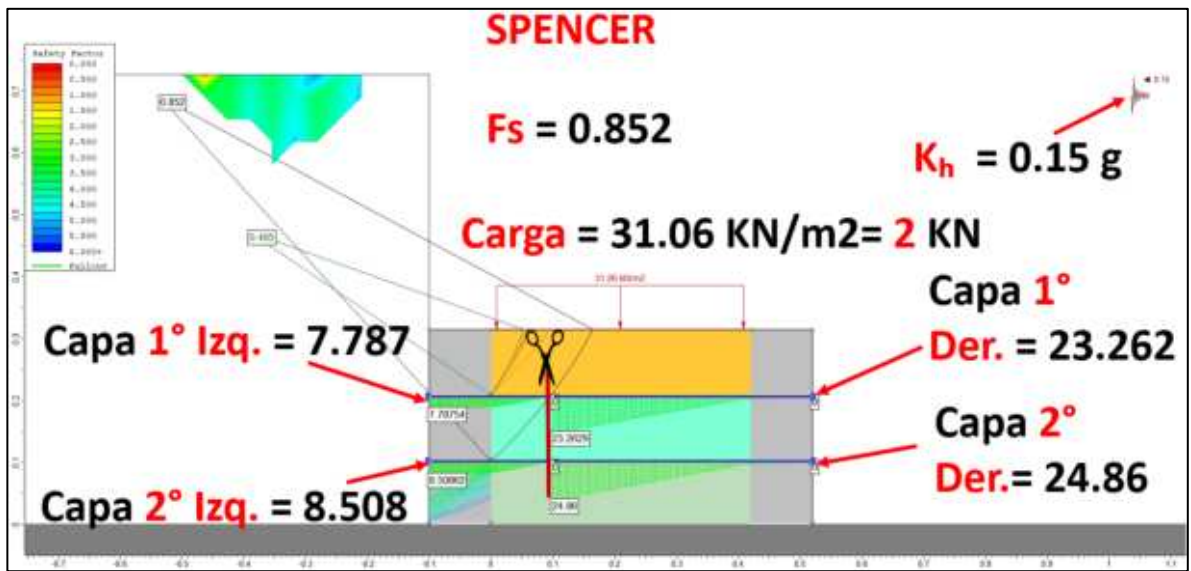
Área (m <sup>2</sup> )	P (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer (FS)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.
	0	0	1.477	2.75	5.93	3.48	7.52	1.430	2.75	5.93	3.48	7.52
0.0644	1	15.527	0.890	5.27	14.59	5.99	16.19	0.875	5.27	14.59	5.99	16.19
	2	31.055	0.852	7.79	23.26	8.51	24.86	0.839	7.79	23.26	8.51	24.86
	3	46.583	0.839	10.30	30	11.03	30	0.827	10.30	30	11.03	30
	4	62.111	0.832	12.82	30	13.54	30	0.820	12.82	30	13.54	30
	5	77.639	0.829	15.34	30	16.06	30	0.816	15.34	30	16.06	30
	10	155.28	0.819	27.92	30	28.64	30	0.808	27.92	30	28.64	30
	15	232.92	0.816	30	30	30	30	0.805	30	30	30	30

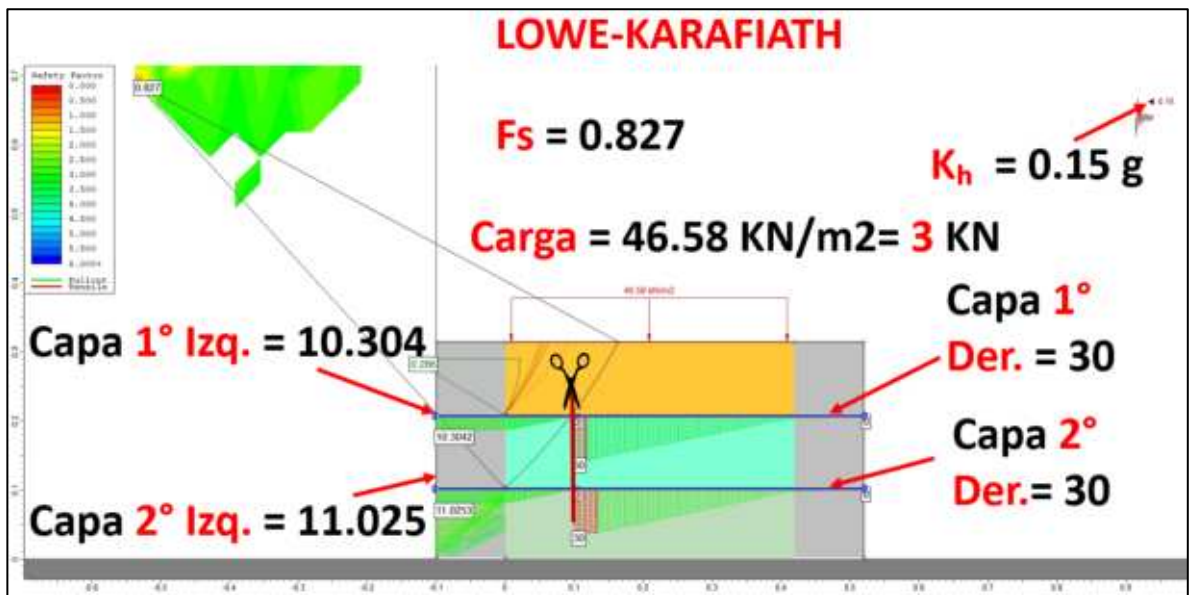
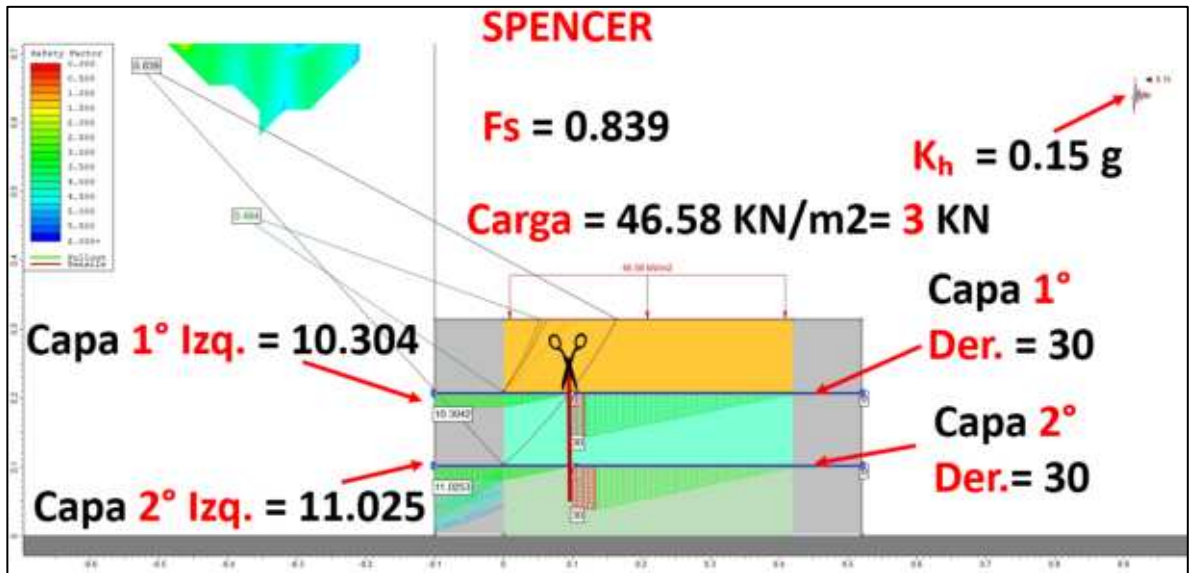
Fuente: Elaboración propia.

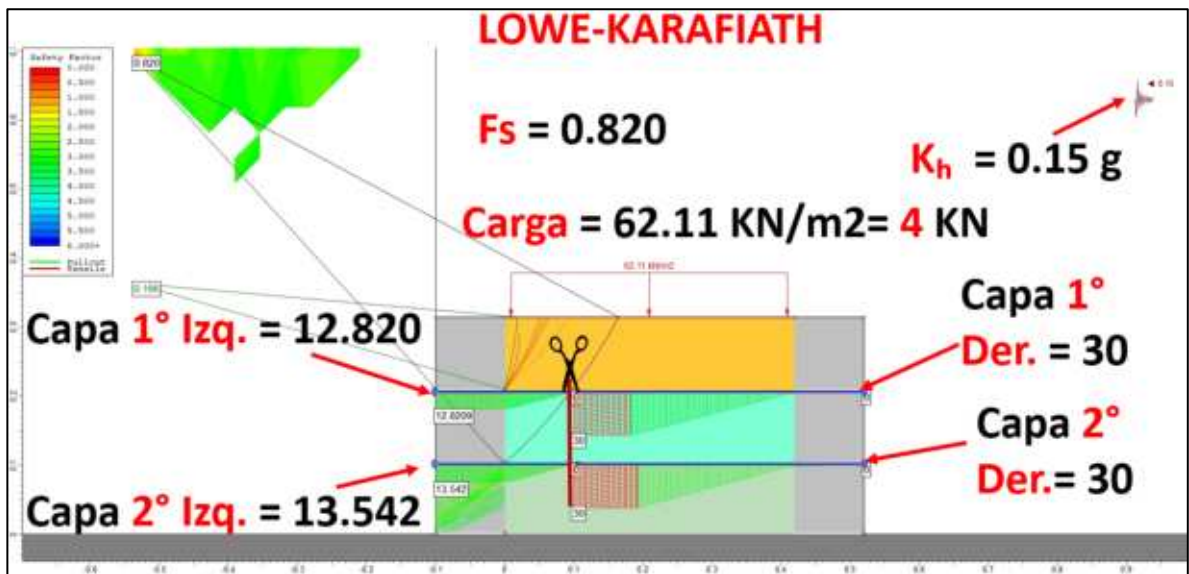
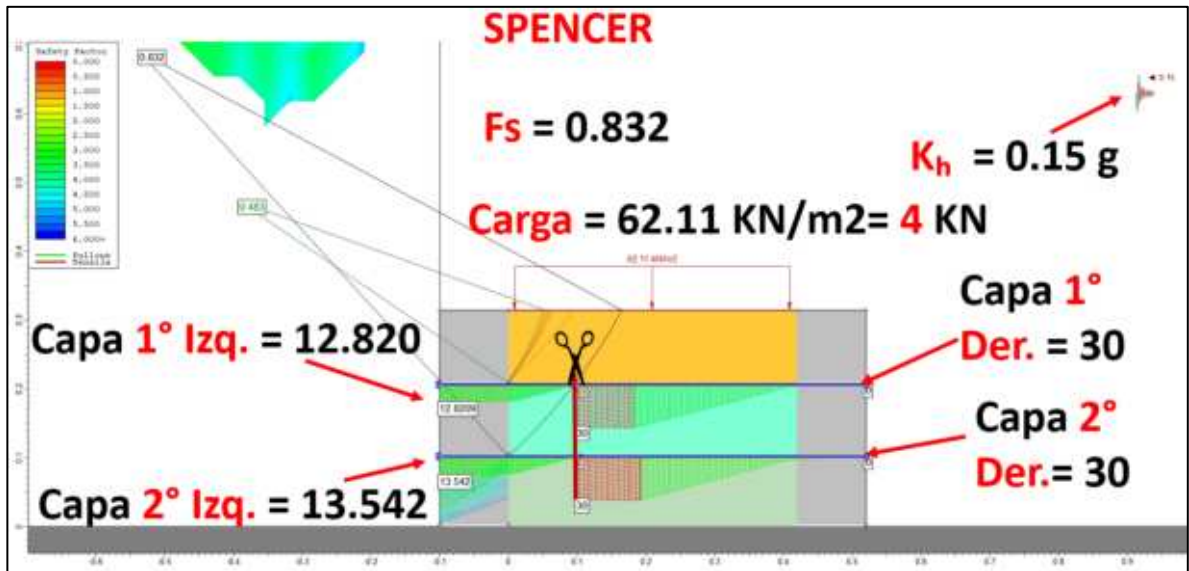
Para documentar el comportamiento del modelo numérico del prototipo 3 prototipo durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual de los modelos analíticos experimentales, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras, como un registro visual continuo. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.

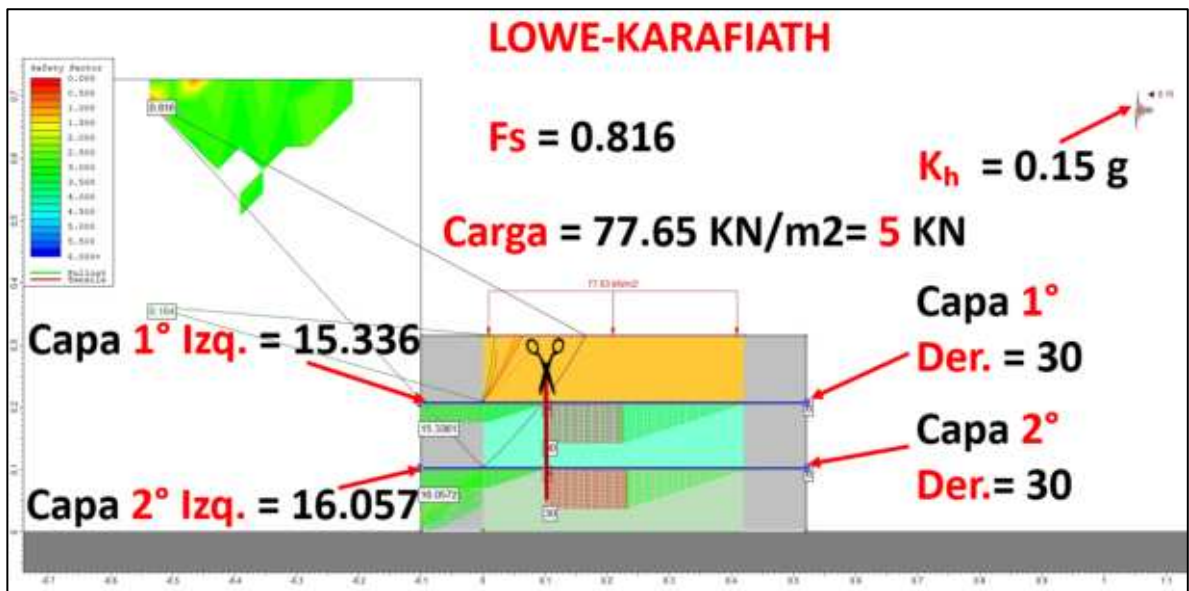
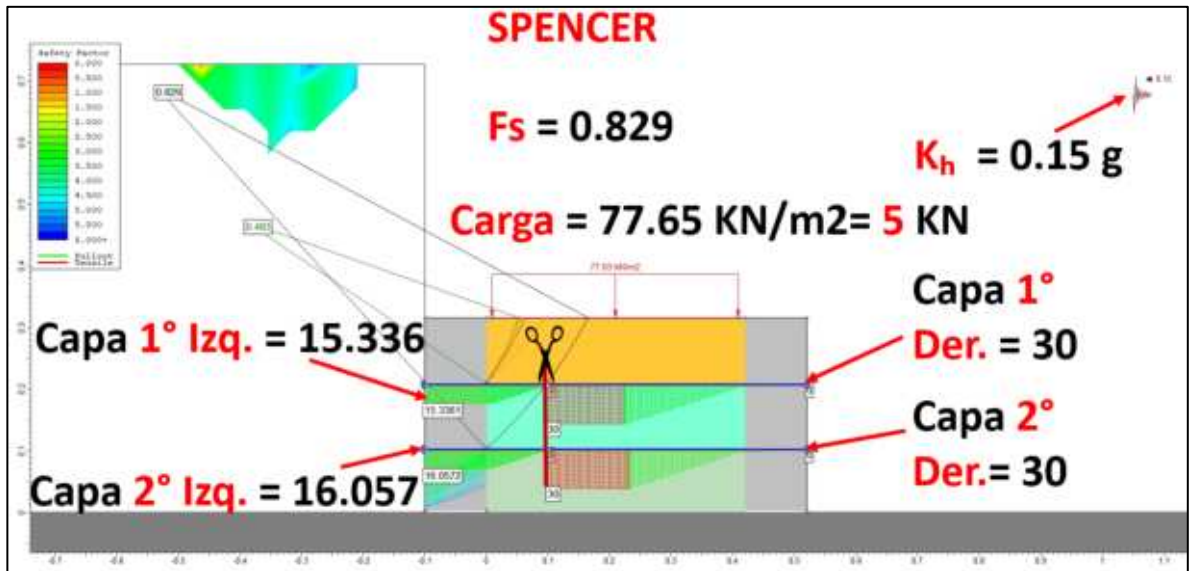


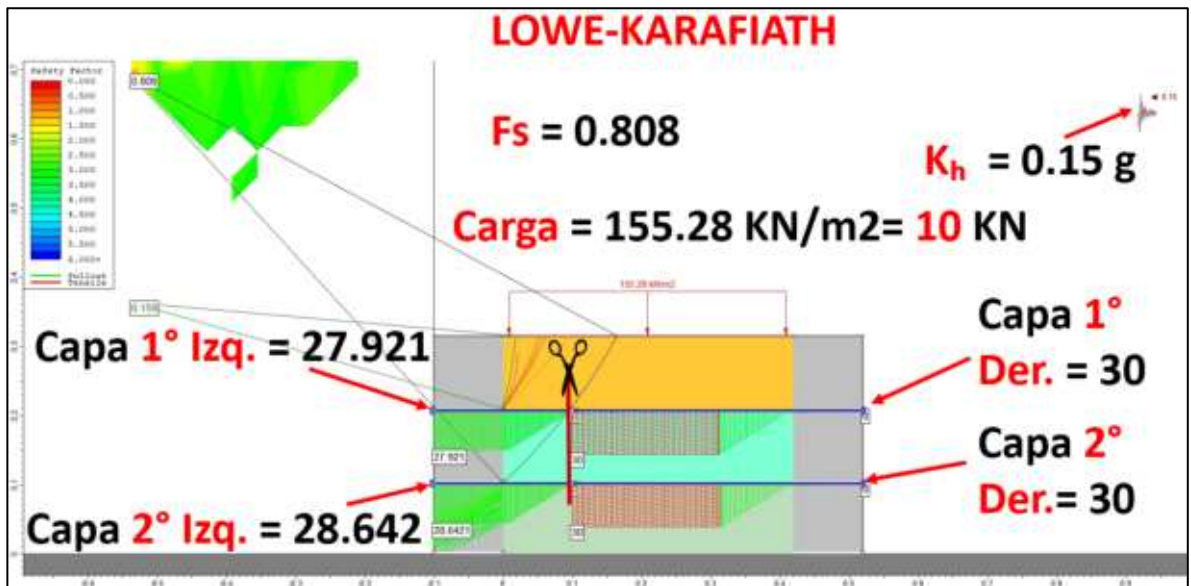
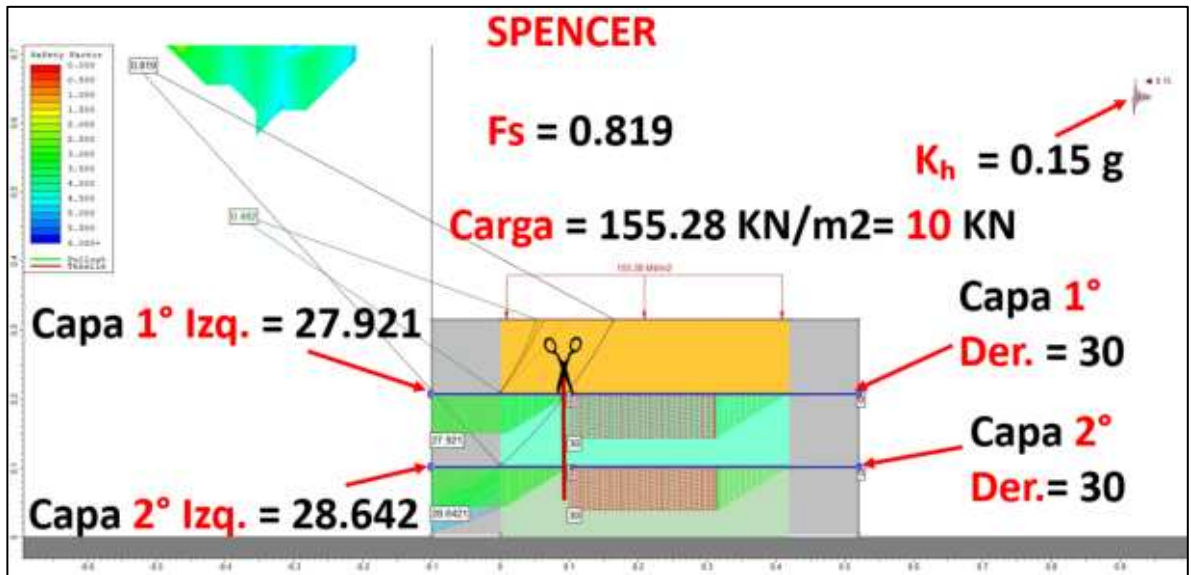












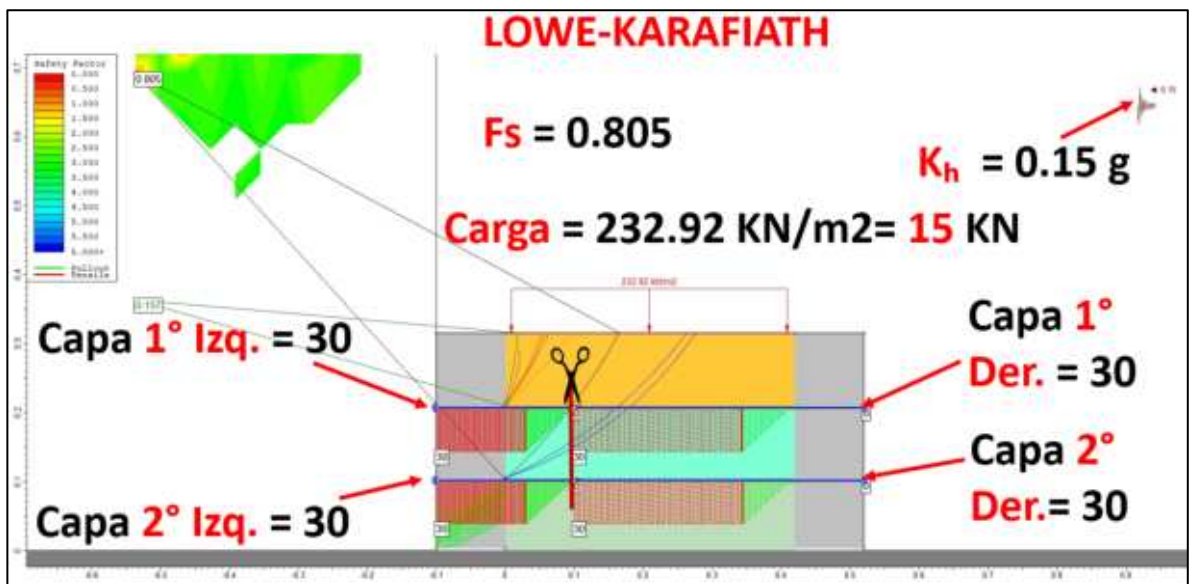
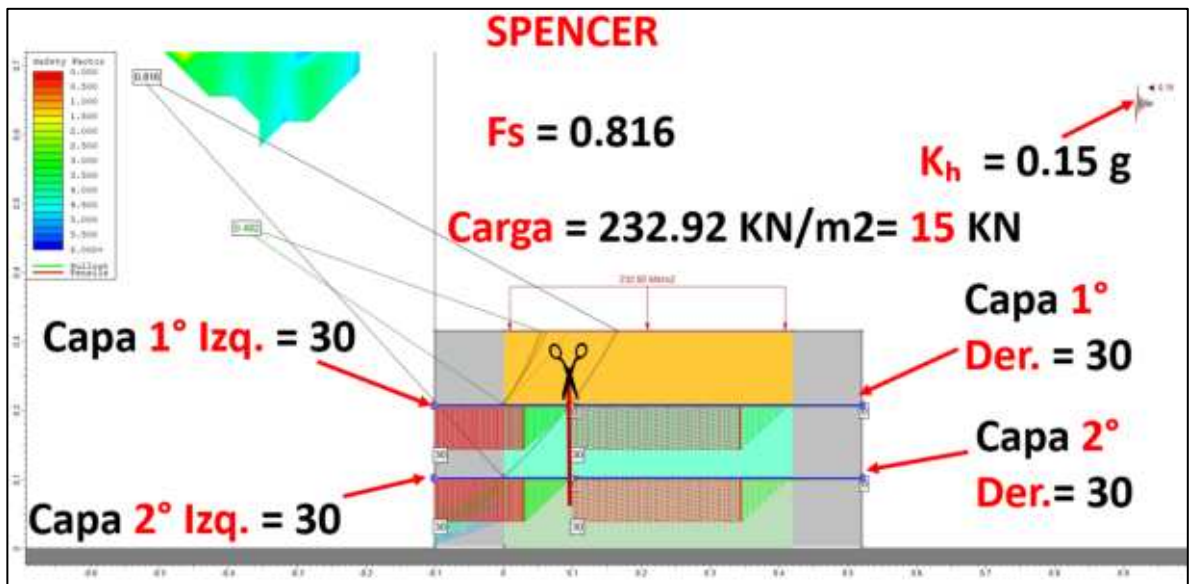


Figura 22. Escenario gráfico del Prototipo 3 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La interpretación del comportamiento del sistema de suelo reforzado se basa en el análisis conjunto de los factores de seguridad globales y la distribución de las fuerzas de tracción movilizadas en las geomallas, considerando explícitamente la respuesta diferenciada entre los extremos

izquierdo y derecho del modelo. Los resultados muestran que, a medida que aumenta la carga aplicada sobre un área de  $0,0644 \text{ m}^2$ , la demanda de tracción en ambas capas de la geomalla aumenta progresivamente, mientras que el factor de seguridad del sistema disminuye continuamente.

Para la condición sin carga (0 kN), el sistema presenta un estado estable, con  $FS = 1.477$  (Spencer) y  $FS = 1.430$  (Lowe-Karafiath). En esta etapa, los esfuerzos de tracción son bajos, variando entre 2,75 y 7,52 kN/m, lo que refleja un comportamiento esencialmente elástico y una adecuada interacción suelo-geomalla.

Al aplicar una carga de 1 kN ( $15.527 \text{ kN/m}^2$ ), el sistema experimenta una reducción significativa en su estabilidad, alcanzando  $FS \approx 0.890$  (Spencer) y  $0.875$  (Lowe-Karafiath), lo que indica que el modelo entra rápidamente en una condición cercana a la inestabilidad global. En este nivel se observa una marcada diferencia entre los extremos: el lado derecho moviliza mayores fuerzas (hasta 14,59 y 16,19 kN/m en la primera y segunda capa), mientras que el lado izquierdo presenta valores menores, mostrando una distribución no uniforme de fuerzas.

Para cargas de 2 y 3 kN ( $31.055$  y  $46.583 \text{ kN/m}^2$ ), el factor de seguridad continúa disminuyendo ( $FS \approx 0.852-0.839$  en Spencer y  $0,839-0,827$  en Lowe-Karafiath), lo que confirma un estado global inestable. En este rango, la geomalla del lado derecho alcanza su capacidad máxima de 30 kN/m a partir de 3 kN, mientras que del lado izquierdo la movilización de esfuerzos es progresiva ( $\approx 10.30-11.03 \text{ kN/m}$ ), lo que demuestra que la falla se desarrolla preferentemente en el lado derecho.

De 4 a 5 kN la tendencia se mantiene: el extremo derecho sigue trabajando a su máxima capacidad, mientras que el extremo izquierdo aumenta progresivamente sus esfuerzos (hasta 15.34-16.06 kN/m). Para cargas mayores, como 10 kN ( $155.279 \text{ kN/m}^2$ ), el extremo izquierdo se acerca a su capacidad ( $\approx 27.92$  y  $28.64 \text{ kN/m}$ ), mientras que el factor de seguridad sigue disminuyendo ( $FS \approx 0.819$  y  $0.808$ ).

Finalmente, para la carga máxima de 15 kN (232.919 kN/m<sup>2</sup>), ambas capas y ambos extremos alcanzan la tensión límite de 30 kN/m, lo que indica una movilización total del refuerzo interno, con factores de seguridad mínimos (FS  $\approx$  0.816 y 0.805), confirmando una condición completamente inestable.

Este comportamiento es consistente con el observado en el modelo anterior, donde el material de aportación granular juega un papel fundamental. Inicialmente, el suelo contribuye al confinamiento y a la resistencia al corte; Sin embargo, a medida que aumenta la carga predominan los efectos desestabilizadores y la capacidad del refuerzo se vuelve decisiva.

El análisis transversal indica que la falla se concentra en el extremo derecho, donde a pesar de tener una mayor longitud de geomalla, hay menor efectividad de anclaje, lo que favorece el deslizamiento relativo y la movilización temprana de máxima resistencia. Por otro lado, el extremo izquierdo, aunque más corto, presenta un comportamiento más progresivo debido a las mejores condiciones de confinamiento.

En este contexto, la “ruptura” de la geomalla debe entenderse como una superación del estado límite de uso, y no como una falla frágil del material. Los resultados resaltan que la condición de anclaje y confinamiento del refuerzo es un factor crítico, incluso más relevante que la longitud de la geomalla, en el desempeño general del sistema suelo-geomalla.

#### 4. PROTOTIPO 4: **MODELO CONFINADO EN LOS 2 LADOS Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 8 CM:**

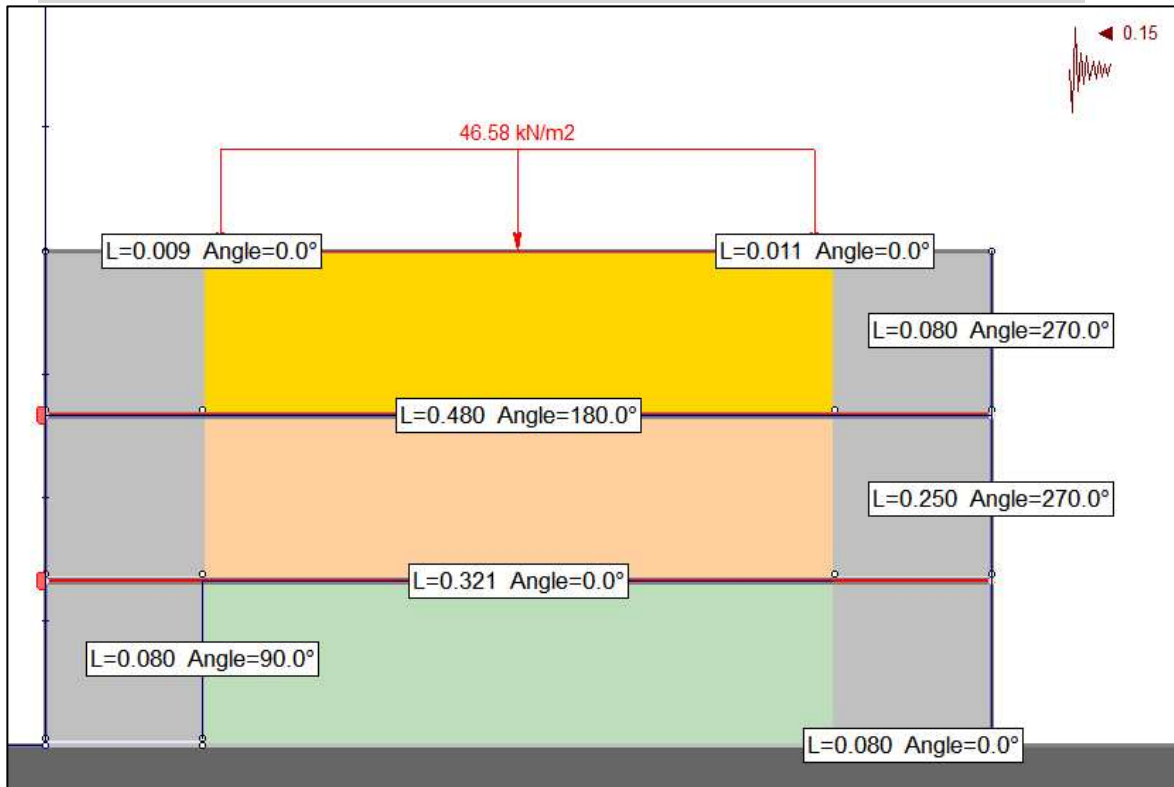


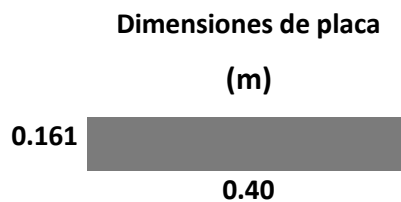
Figura 23. Escenario gráfico del prototipo 4 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La Figura 25 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo 2, el cual representa un sistema de suelo reforzado con una geomalla, con unas dimensiones aproximadas de 24 cm de alto y 32 cm de ancho. El material considerado en el análisis proviene del Banco San José Iturbide y se caracteriza por un ángulo de fricción interna de 43.58°, una cohesión de 10.79 kPa, además de propiedades mecánicas propias de un material granular de alta resistencia.

El dominio del modelo se divide en tres capas de suelo, cuyos pesos volumétricos, contados de abajo hacia arriba, corresponden a 21.6 kN/m<sup>3</sup> en la capa inferior, 22.1 kN/m<sup>3</sup> en la capa intermedia y 22.48 kN/m<sup>3</sup> en la capa superior, con el objetivo de reproducir la variación de las condiciones

de compactación y confinamiento a lo largo de la altura del sistema.

El refuerzo se incorpora mediante una geomalla biaxial marca MaccaFerri, con resistencia máxima a la tracción de 30 kN/m (30S), dispuesta horizontalmente con una separación vertical de 8 cm de la base, de acuerdo con la Publicación Técnica 382 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Asimismo, el sistema está **confinado lateralmente en ambos extremos por bloques de concreto** de 8 × 8 cm, que brindan restricción lateral adicional durante la aplicación del refuerzo.



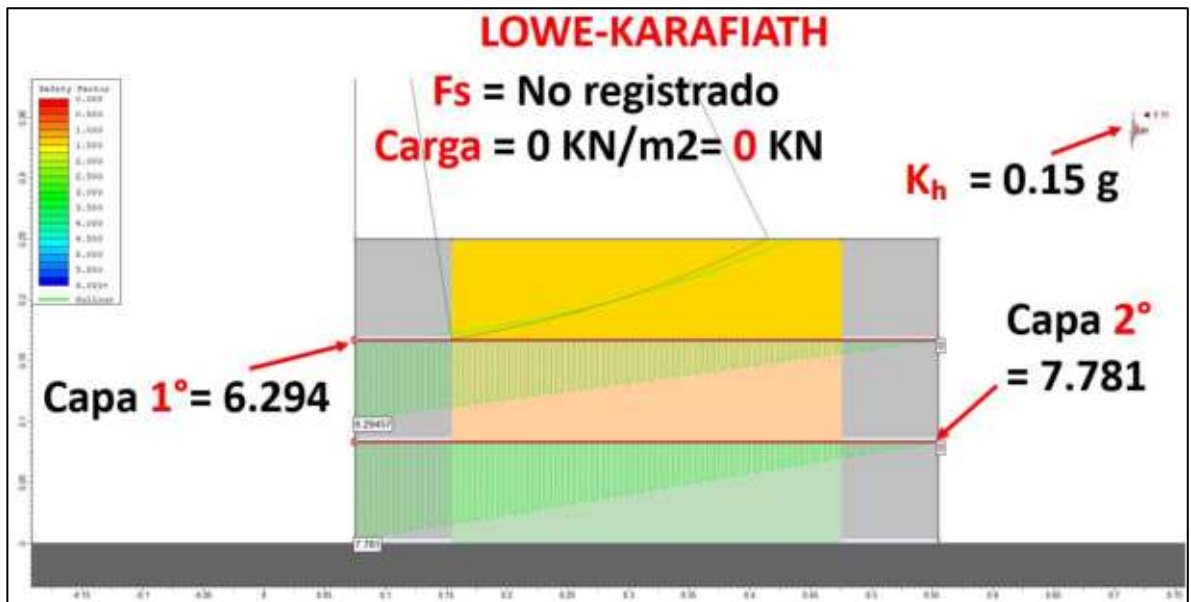
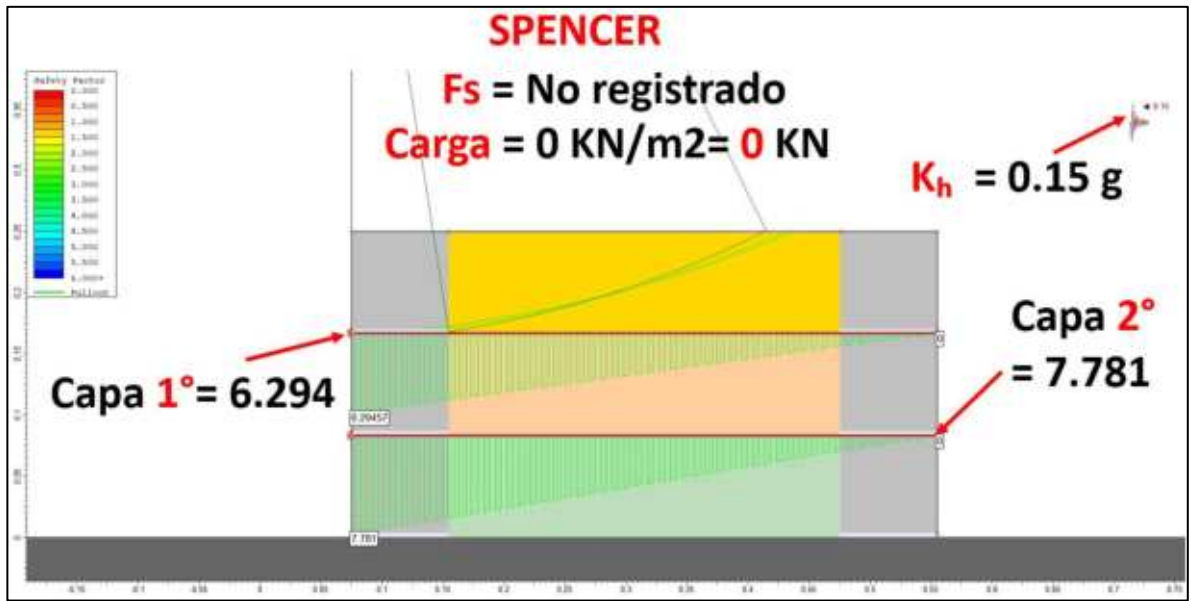
Esta configuración permite evaluar el comportamiento mecánico del sistema suelo-geomalla, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en el refuerzo bajo condiciones controladas de carga y confinamiento; a continuación, se muestran los resultados tabla 28.

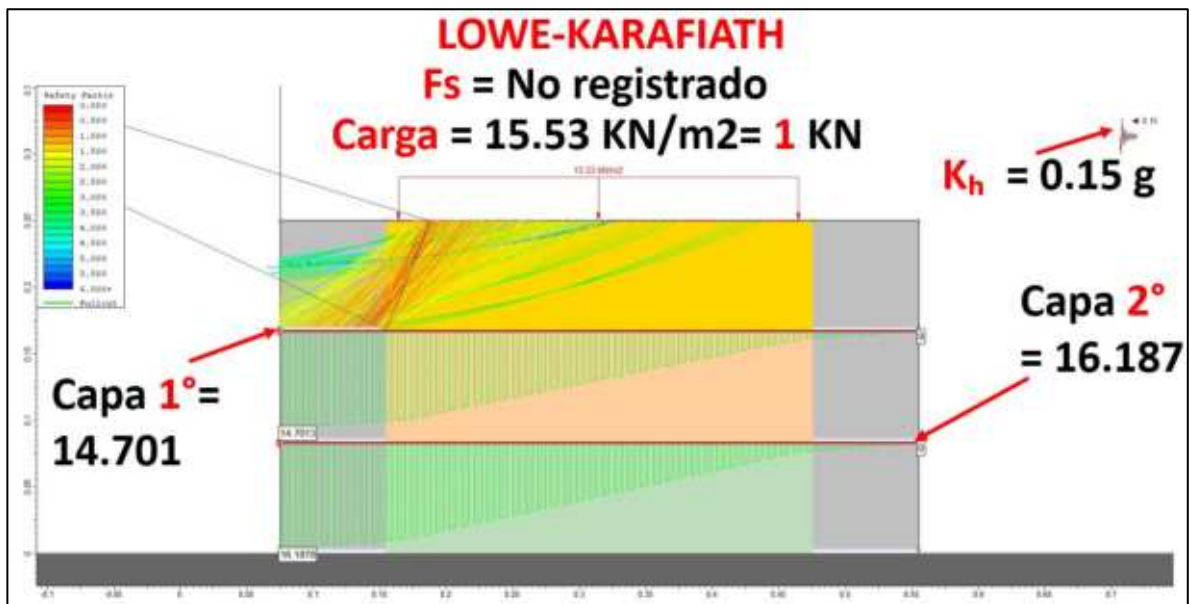
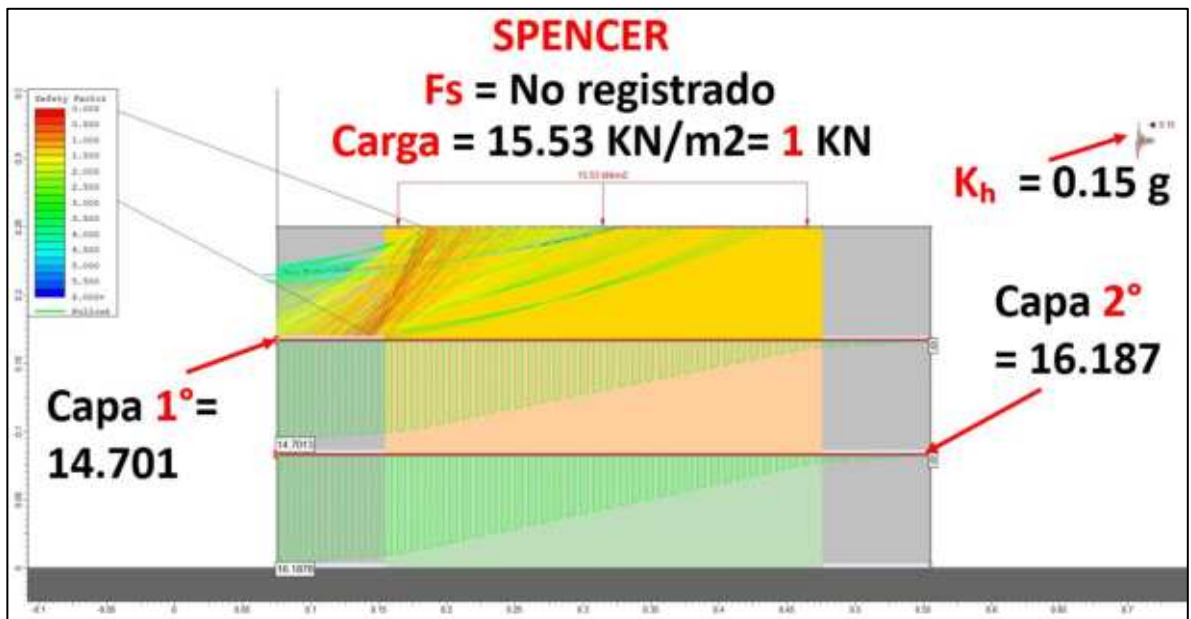
Tabla 24. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

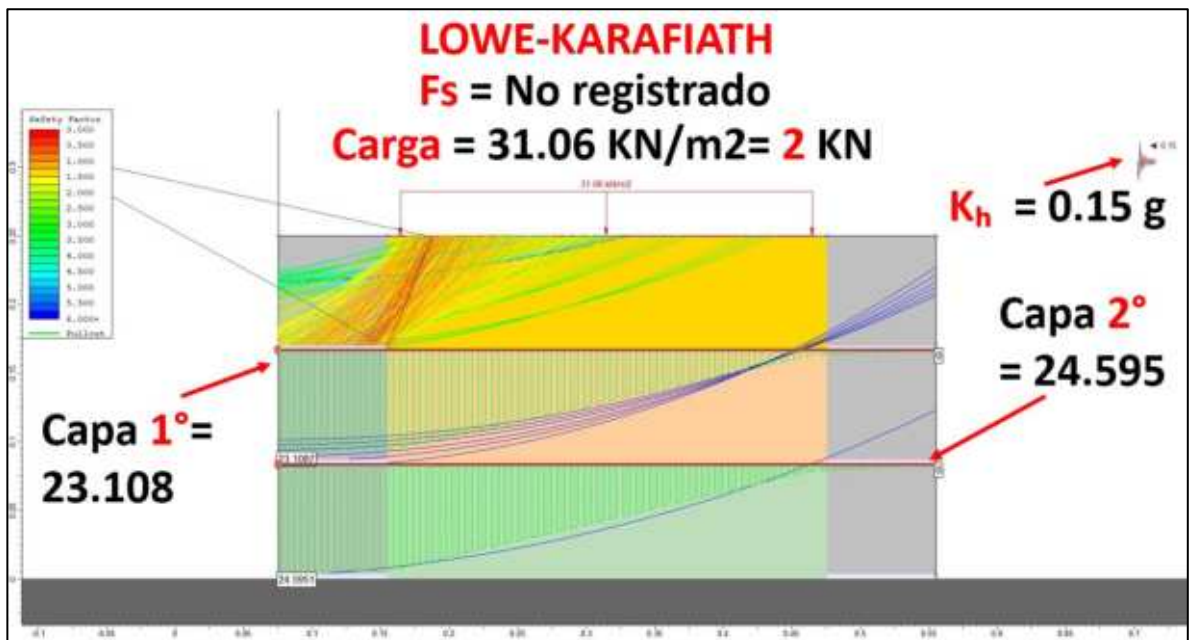
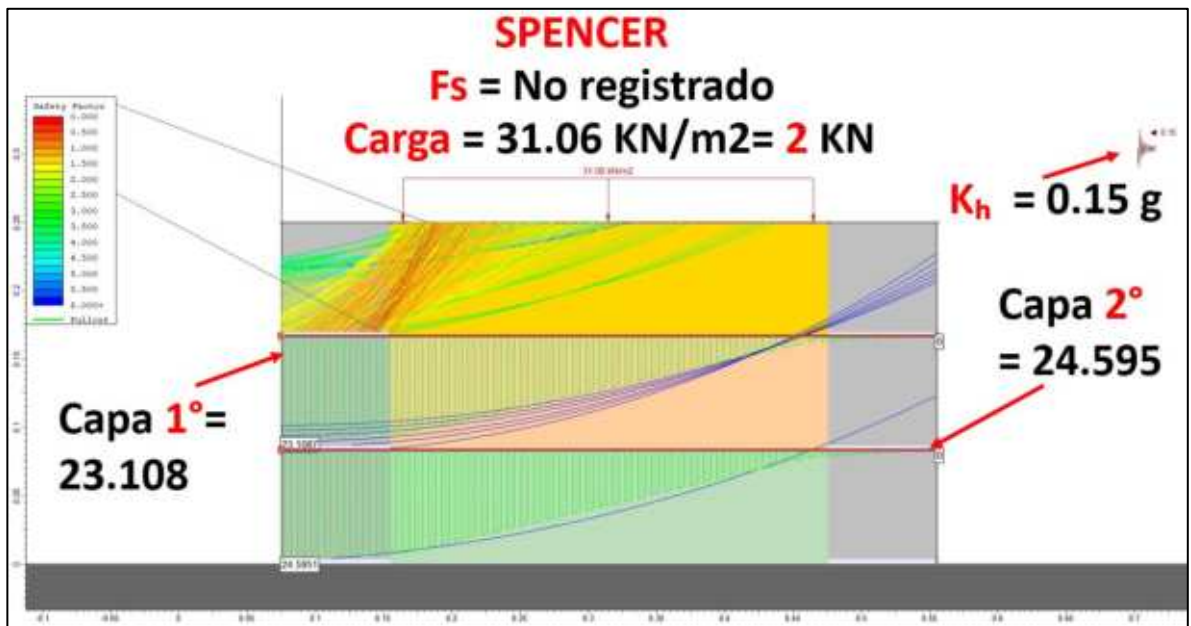
Área (m <sup>2</sup> )	P (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer (FS)	primera capa de geomalla	segunda capa de geomalla	Lowe-Karafiath (Fs)	primera capa de geomalla	segunda capa de geomalla
	0	0	-	6.294	7.781	-	6.294	7.781
0.0644	1	15.527	-	14.701	16.187	-	14.701	16.187
	2	31.055	-	23.108	24.595	-	23.108	24.595
	3	46.583	-	30	30	-	30	30
	10	155.27	-	30	30	-	30	30
	20	310.54	-	30	30	-	30	30
	30	465.81	5.935	30	30	5.339	30	30
	40	621.08	5.084	30	30	1.908	30	30
	50	776.35	4.272	30	30	1.504	30	30
	60	931.62	2.710	30	30	1.308	30	30
	70	1086.89	1.861	30	30	1.186	30	30
	80	1242.16	1.683	30	30	1.105	30	30
	85	1319.795	1.459	30	30	1.241	30	30
	88	1366.376	1.440	30	30	1.059	30	30
	89	1381.903	1.065	30	30	1.054	30	30
	90	1397.43	1.060	30	30	1.049	30	30

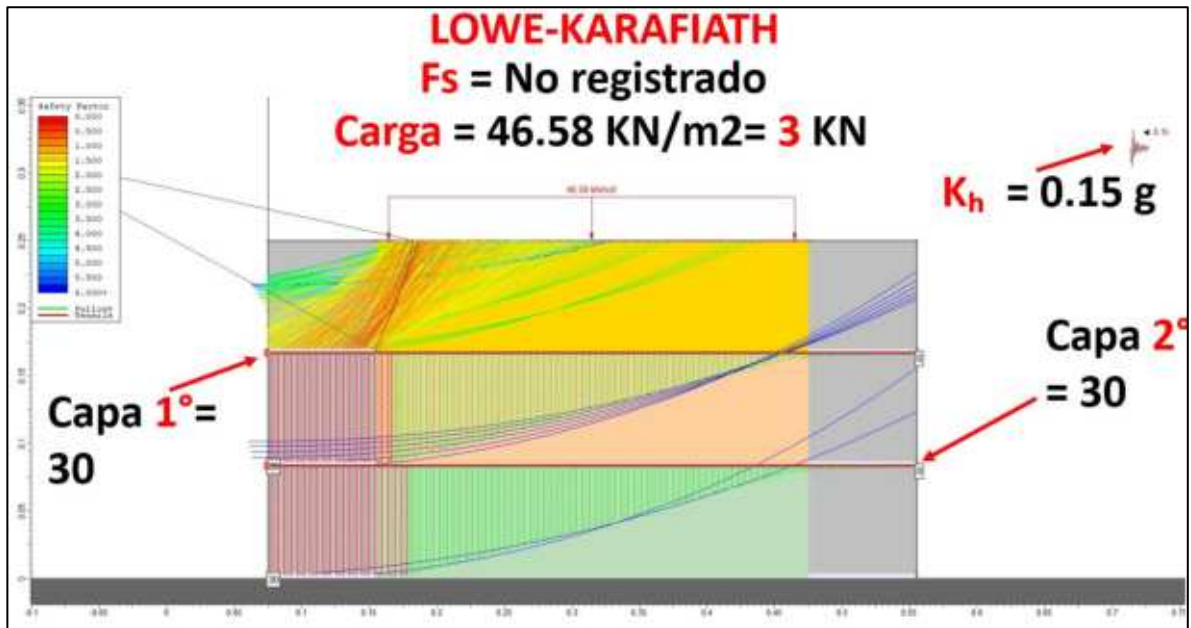
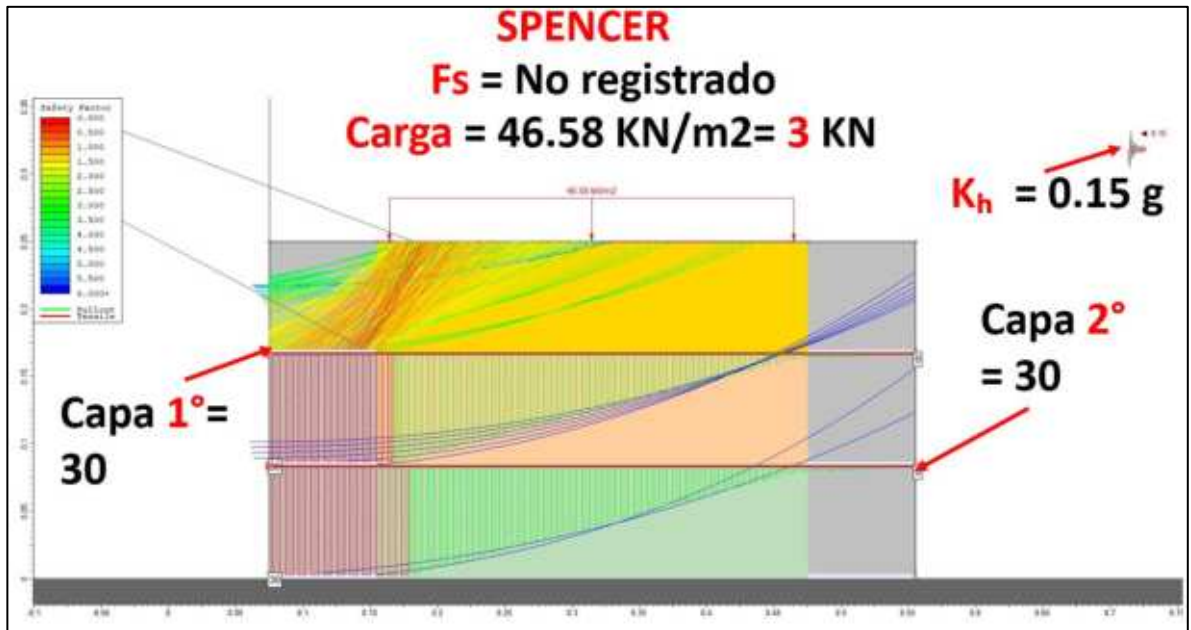
Fuente: Elaboración propia.

Para documentar el comportamiento del modelo numérico del prototipo 4 prototipo durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual de los modelos analíticos experimentales, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras, como un registro visual continuo. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.









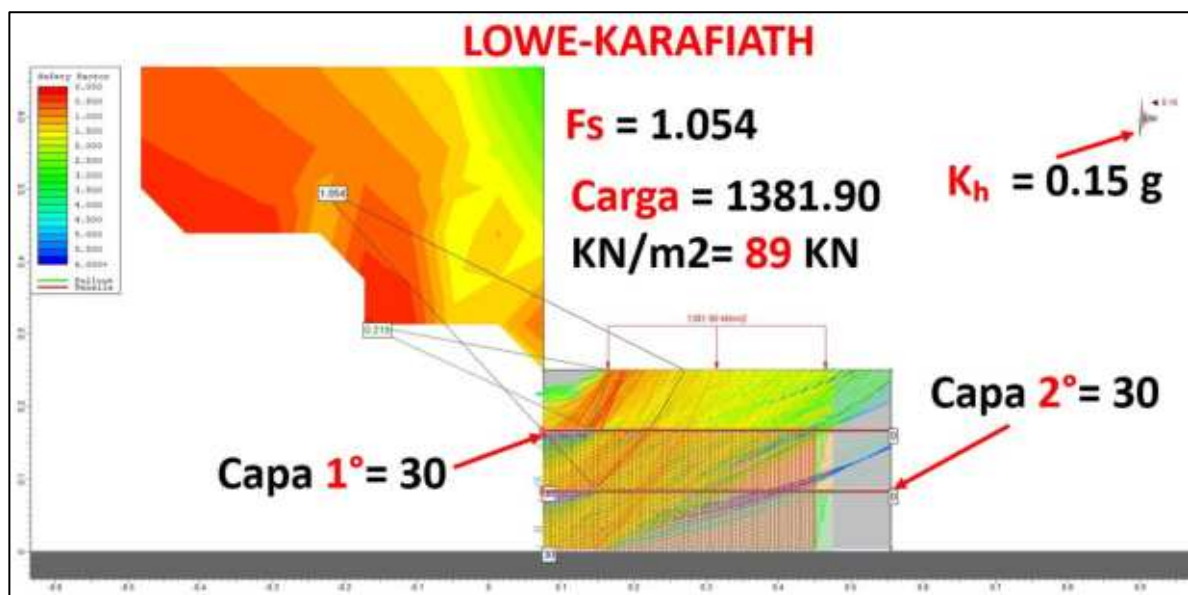
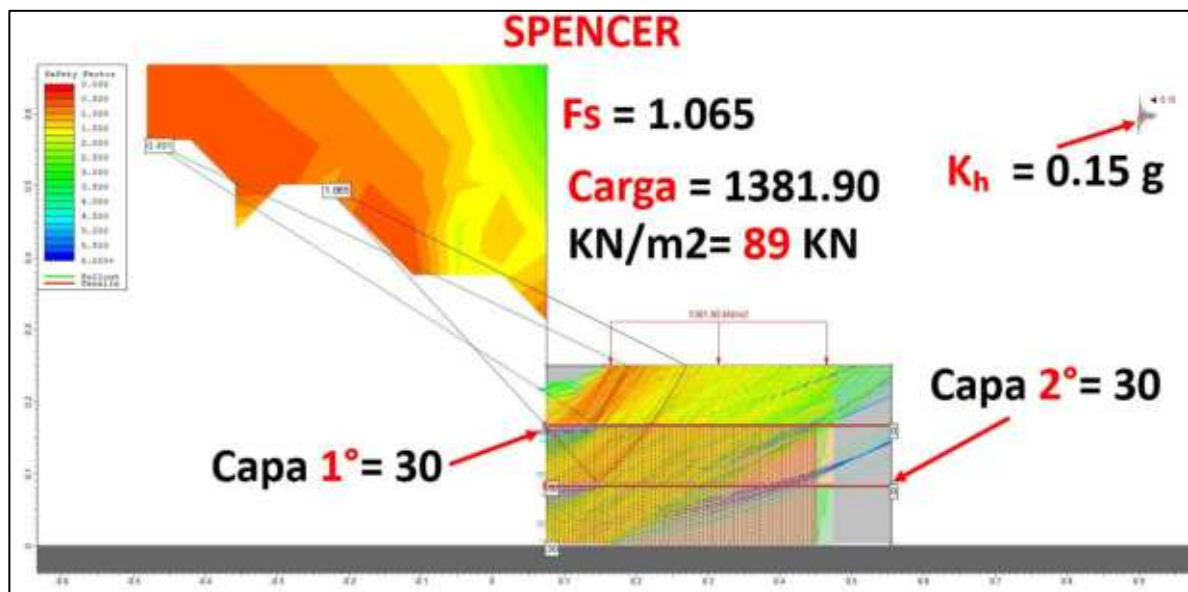


Figura 24. Escenario gráfico Prototipo 4 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La interpretación del comportamiento del sistema reforzado se basa en el análisis conjunto de los coeficientes de seguridad globales y las fuerzas de tracción movilizadas en las geomallas, bajo diferentes niveles de carga aplicados en un área de 0,0644 m<sup>2</sup>. De los resultados se observa

que, a medida que aumenta la carga vertical, la demanda estructural sobre las capas de refuerzo aumenta significativamente, mientras que el factor de seguridad global presenta, en términos generales, una tendencia decreciente.

Es importante resaltar que en la tabla existen valores representados por “—”, lo que no indica falta de resultados, sino que corresponde a condiciones donde el factor de seguridad es muy alto. En estos casos, el software Slide2 no informa un valor numérico porque no se ha identificado una superficie de falla crítica o porque el valor excede los rangos de salida prácticos. Esta situación es consistente con estados iniciales altamente estables.

Al igual que en el modelo anterior, el material de relleno granular tiene una influencia determinante en el comportamiento del sistema. Debido a su naturaleza friccional, el aumento de carga genera inicialmente mayor confinamiento y resistencia al corte, lo que explica las altas condiciones de estabilidad observadas en los primeros niveles de carga.

Para la condición sin carga (0 kN), el sistema presenta bajos esfuerzos de tracción, del orden de 6.294 kN/m en la primera capa y 7.781 kN/m en la segunda, lo que refleja el comportamiento elástico. Al aplicar 1 kN (15.527 kN/m<sup>2</sup>), la tracción aumenta a 14.701 y 16.187 kN/m, respectivamente, manteniéndose aún en un rango estable, consistente con los altos factores de seguridad no reportados.

Al aumentar la carga a 2 kN (31.055 kN/m<sup>2</sup>), las tensiones siguen aumentando (23.108 y 24.595 kN/m<sup>2</sup>), hasta que a partir de 3 kN (46.583 kN/m<sup>2</sup>) ambas capas alcanzan el valor límite de 30 kN/m, correspondiente a su capacidad nominal. A partir de este momento la geomalla opera a su máxima capacidad, marcando el inicio del comportamiento no lineal del refuerzo, donde los incrementos de carga posteriores deben ser resistidos principalmente por la masa de suelo reforzado. En este contexto, la “ruptura” de la geomalla debe interpretarse como una superación del estado

límite de uso y no como una falla repentina del material.

Para cargas superiores (10 y 20 kN), la geomalla permanece completamente movilizada sin que se registren factores de seguridad, lo que indica que el sistema continúa presentando una alta estabilidad global. Sin embargo, a partir de los 30 kN (465.81 kN/m<sup>2</sup>) comienzan a registrarse valores de FS  $\approx$  5.935 (Spencer) y 5.339 (Lowe-Karafiath), mostrando aún una condición muy estable.

A medida que aumenta la carga, el factor de seguridad disminuye progresivamente: para 40 kN, FS  $\approx$  5.084 y 1.908; para 50 kN, FS  $\approx$  4.272 y 1.504; y para 60 kN, FS  $\approx$  2.710 y 1.308. Esta tendencia continúa hasta alcanzar valores cercanos al límite permitido en 70 kN, con FS  $\approx$  1.861 (Spencer) y 1.186 (Lowe-Karafiath), lo que indica que el sistema entra en una zona crítica de diseño.

Para cargas mayores, como 80 kN, los factores de seguridad disminuyen a 1.683 y 1.105, respectivamente. Finalmente, en el rango de 88 a 90 kN, se alcanzan valores de FS  $\approx$  1.440–1.060 (Spencer) y 1.059–1.049 (Lowe-Karafiath), lo que confirma una condición cercana a la falla global del sistema.

En resumen, aunque la geomalla alcanza su máxima capacidad desde las etapas iniciales ( $\approx$  3 kN), el sistema mantiene la estabilidad global en cargas intermedias gracias al aporte del suelo granular, el confinamiento y la interacción suelo-refuerzo. Sin embargo, a medida que aumenta la carga, predominan los efectos desestabilizadores, desarrollando superficies de ruptura más profundas y reduciendo progresivamente la seguridad del sistema.

5. PROTOTIPO 5: MODELO CONFINADO EN LOS 2 LADOS Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 8 CM Y CORTE EN LAS 2 CAPAS DE GEOMALLA:

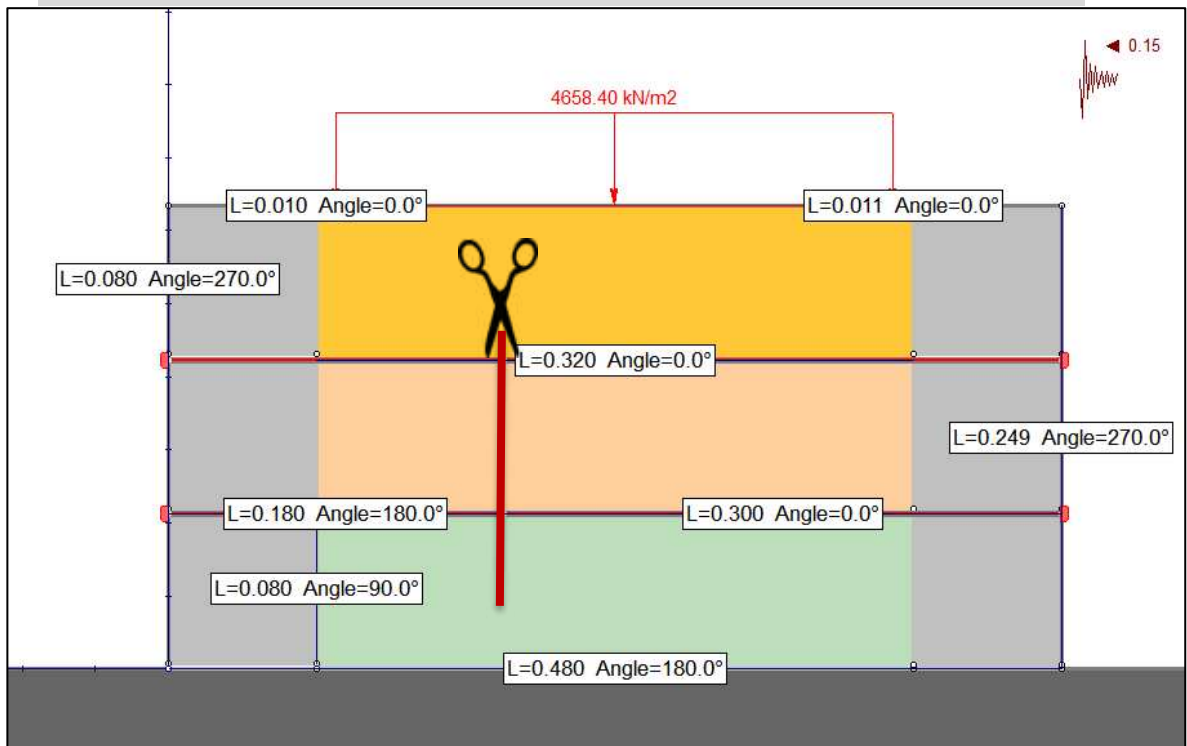


Figura 25. Escenario gráfico del prototipo 5 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

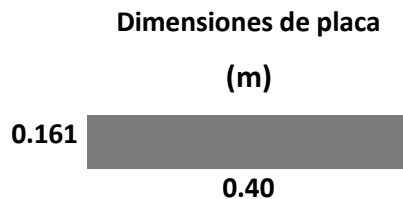
La Figura 27 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo 5, el cual representa un sistema de suelo reforzado con una geomalla, con unas dimensiones aproximadas de 24 cm de alto y 32 cm de ancho. El material considerado en el análisis proviene del Banco San José Iturbide y se caracteriza por un ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , una cohesión de 10.79 kPa, además de propiedades mecánicas propias de un material granular de alta resistencia.

El dominio del modelo se divide en tres capas de suelo, cuyos pesos volumétricos, contados de abajo hacia arriba, corresponden a  $21.6 \text{ kN/m}^3$  en la capa inferior,  $22.1 \text{ kN/m}^3$  en la capa intermedia y  $22.48 \text{ kN/m}^3$  en la capa superior, con el objetivo de reproducir la variación de las condiciones

de compactación y confinamiento a lo largo de la altura del sistema.

El refuerzo se incorpora mediante una geomalla biaxial marca MaccaFerri, con resistencia máxima a la tracción de 30 kN/m (30S), dispuesta horizontalmente con una separación vertical de 8 cm de la base, de acuerdo con la Publicación Técnica 382 del Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Asimismo, el sistema está **confinado lateralmente en ambos extremos por bloques de concreto** de 8 × 8 cm, que brindan restricción lateral adicional durante la aplicación del refuerzo. carga.

Cabe señalar que en este prototipo se **considera un corte en las dos capas de la geomalla**, ubicadas a 10 cm del borde interior del elemento de contención, con el fin de evaluar su influencia en la distribución de tensiones y el comportamiento global del sistema. La carga se transmite al modelo a través de **una placa de acero de 0.161 cm por 0.40 cm de ancho**, permitiendo una aplicación de fuerzas controlada y uniforme.



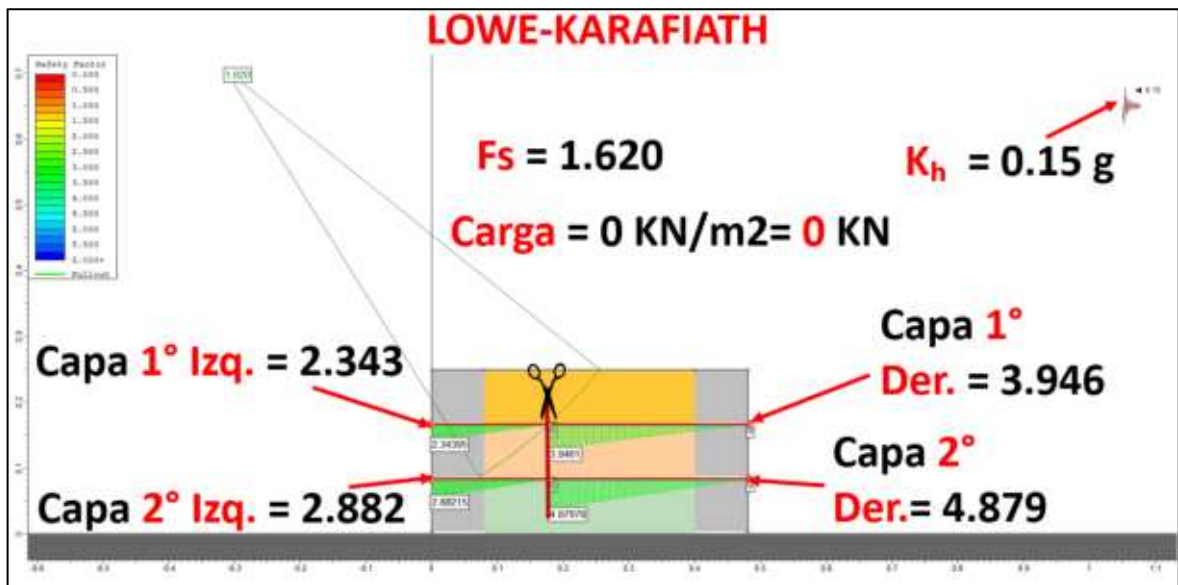
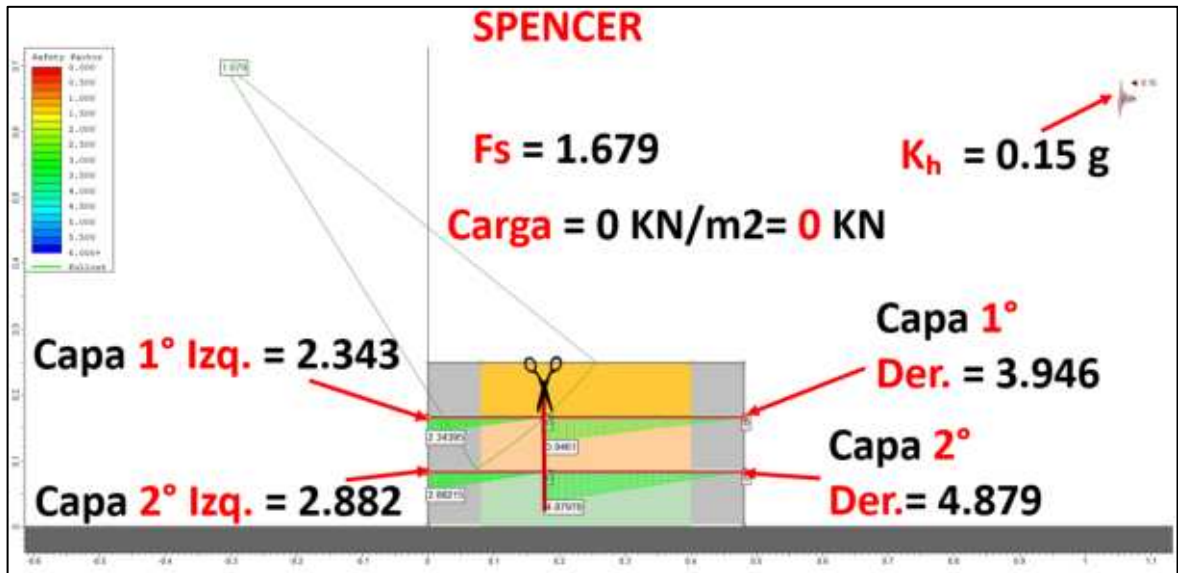
Esta configuración permite evaluar el comportamiento mecánico del sistema suelo-geomalla, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en el refuerzo bajo condiciones controladas de carga y confinamiento; a continuación, se muestran los resultados tabla 29.

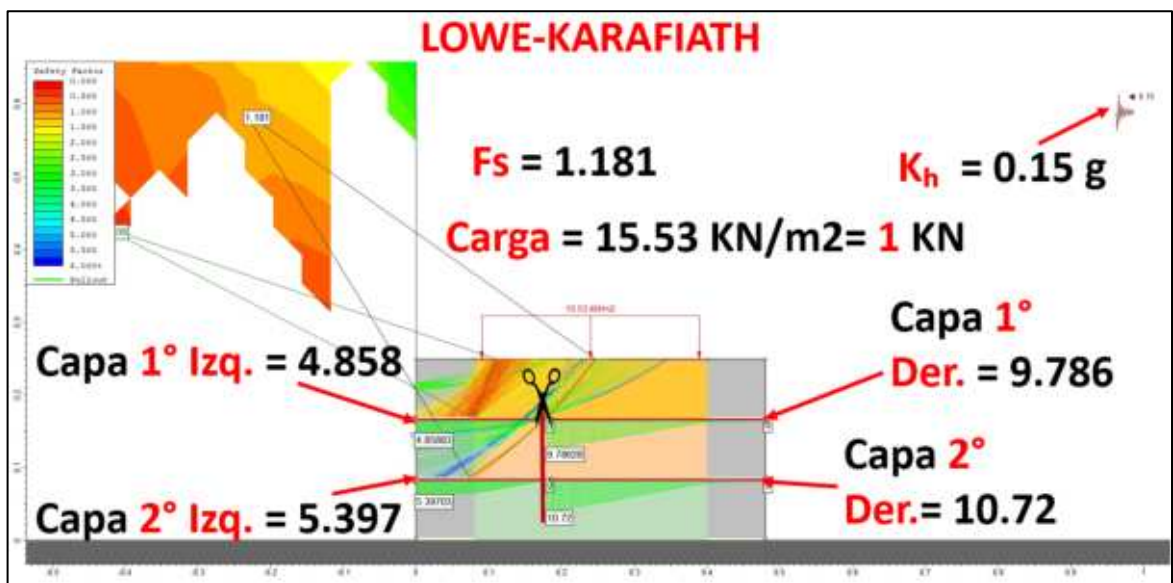
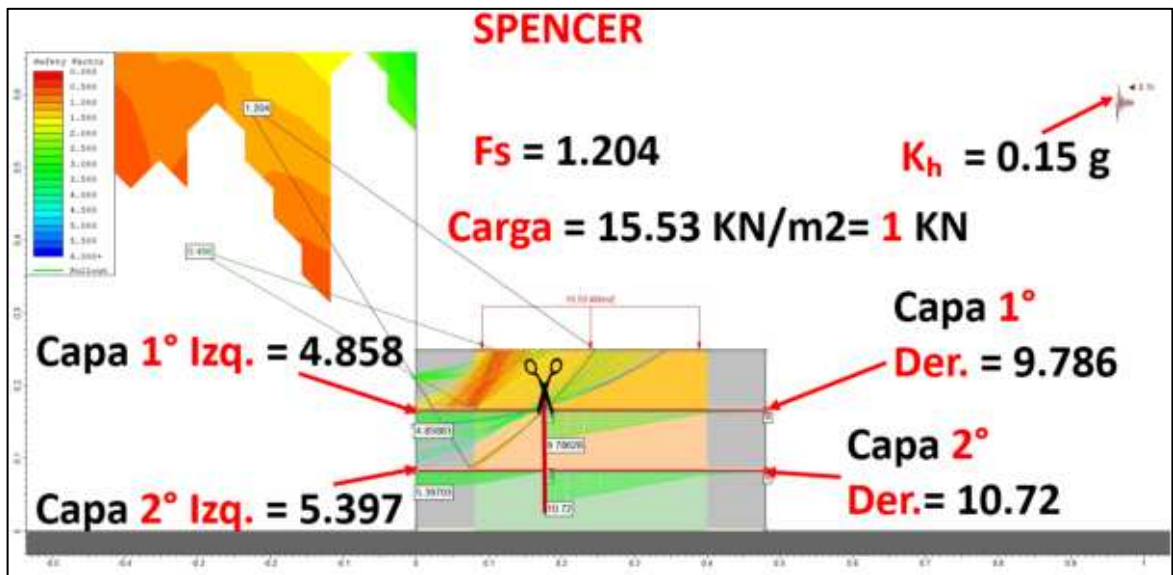
Tabla 25. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

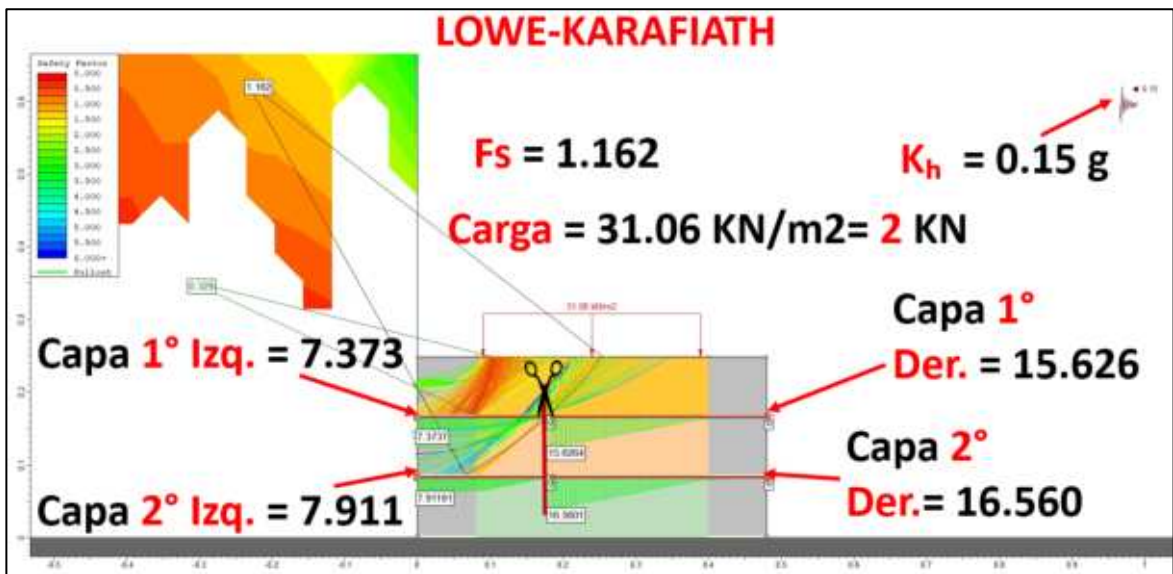
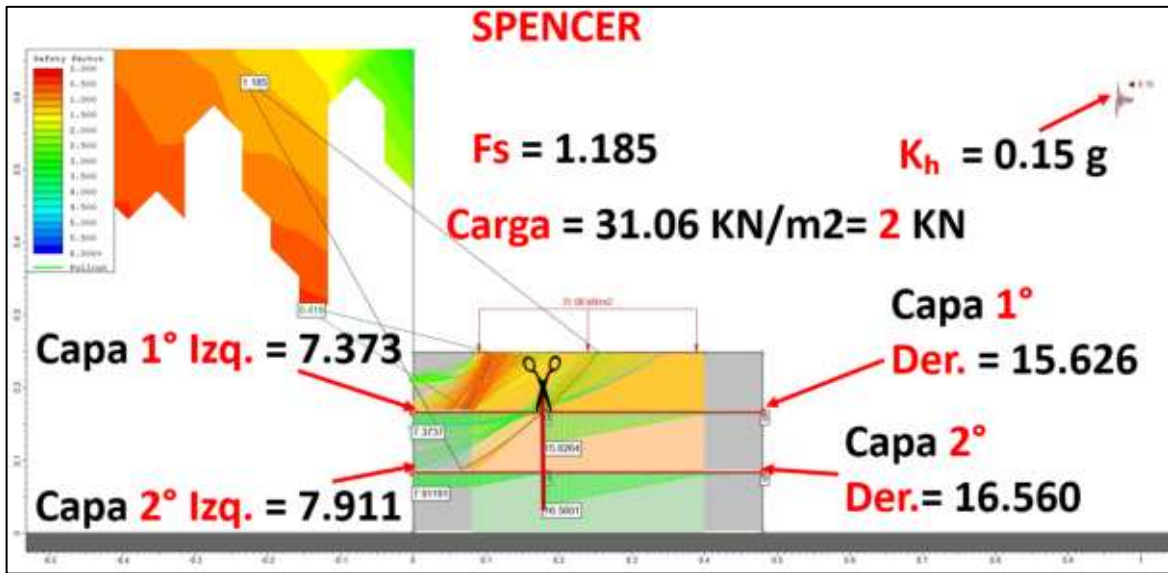
Área (m <sup>2</sup> )	P (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer (FS)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.
	0	0	1.679	2.34	3.95	2.88	4.88	1.62	2.34	3.95	2.88	4.88
0.0644	1	15.528	1.204	4.86	9.79	5.40	10.72	1.181	4.86	9.79	5.40	10.72
	2	31.056	1.185	7.37	15.63	7.91	16.56	1.162	7.37	15.63	7.91	16.56
	3	46.584	1.172	9.89	21.47	10.43	22.40	1.150	9.89	21.47	10.43	22.40
	4	62.112	1.164	12.40	27.31	12.95	28.24	1.144	12.40	27.31	12.95	28.24
	5	77.64	INVALIDO	14.92	30	15.46	30	1.140	14.92	30	15.46	30
	10	155.28	INVALIDO	27.49	30	28.03	30	INVALIDO	27.49	30	28.03	30
	15	232.919	INVALIDO	30	30	30	30	INVALIDO	30	30	30	30

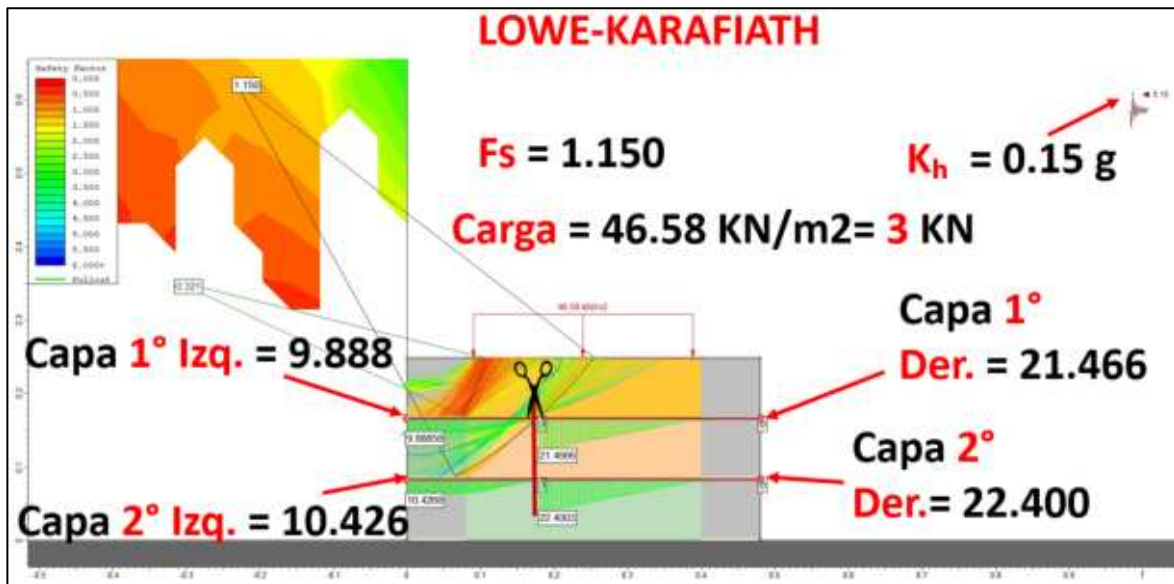
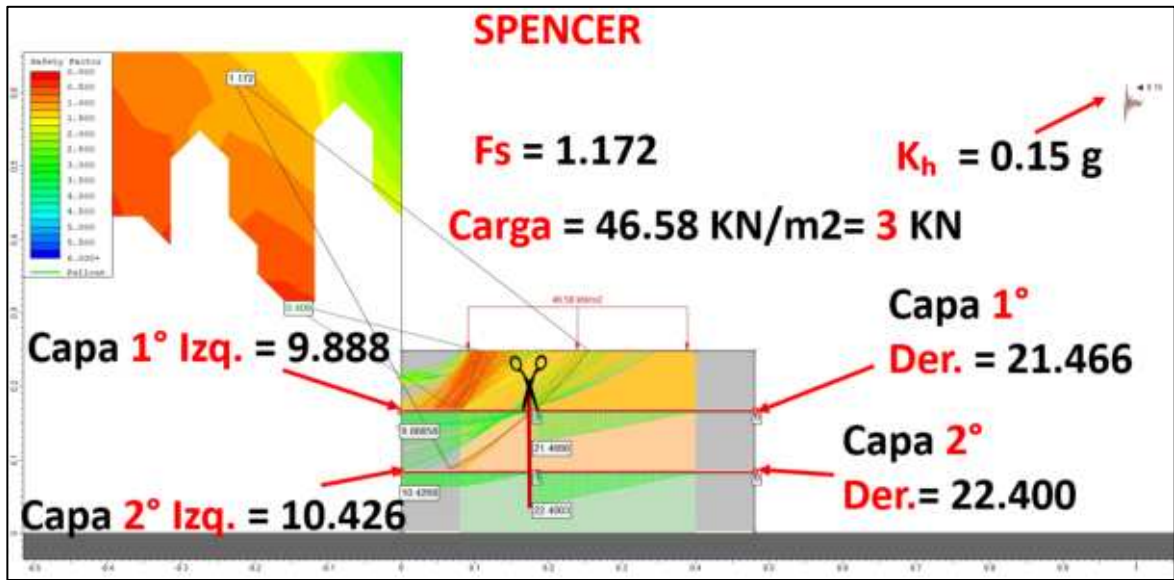
Fuente: Elaboración propia.

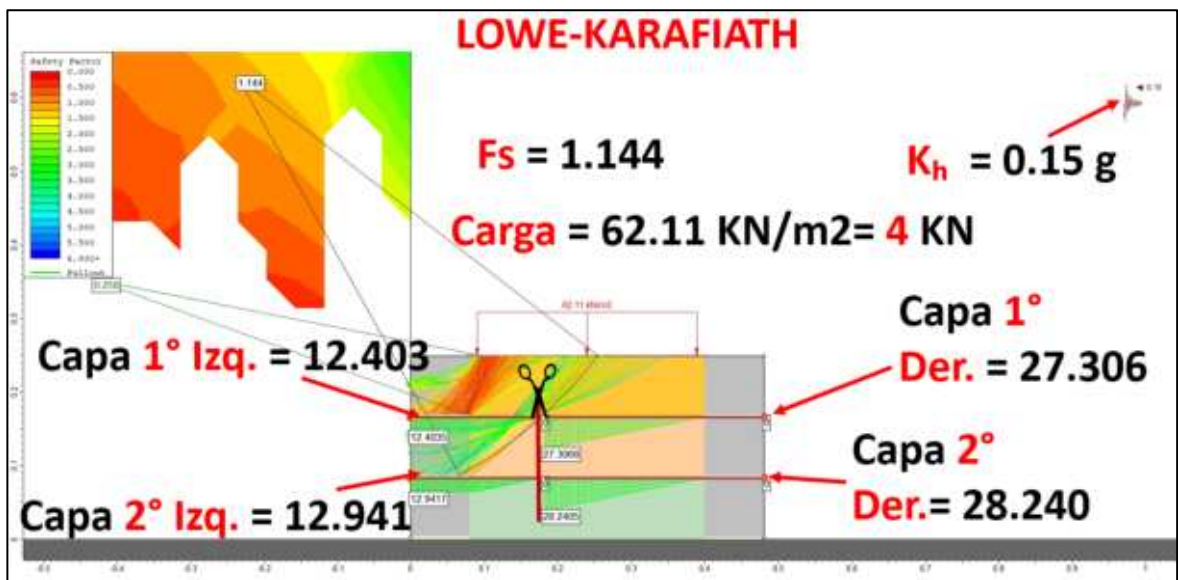
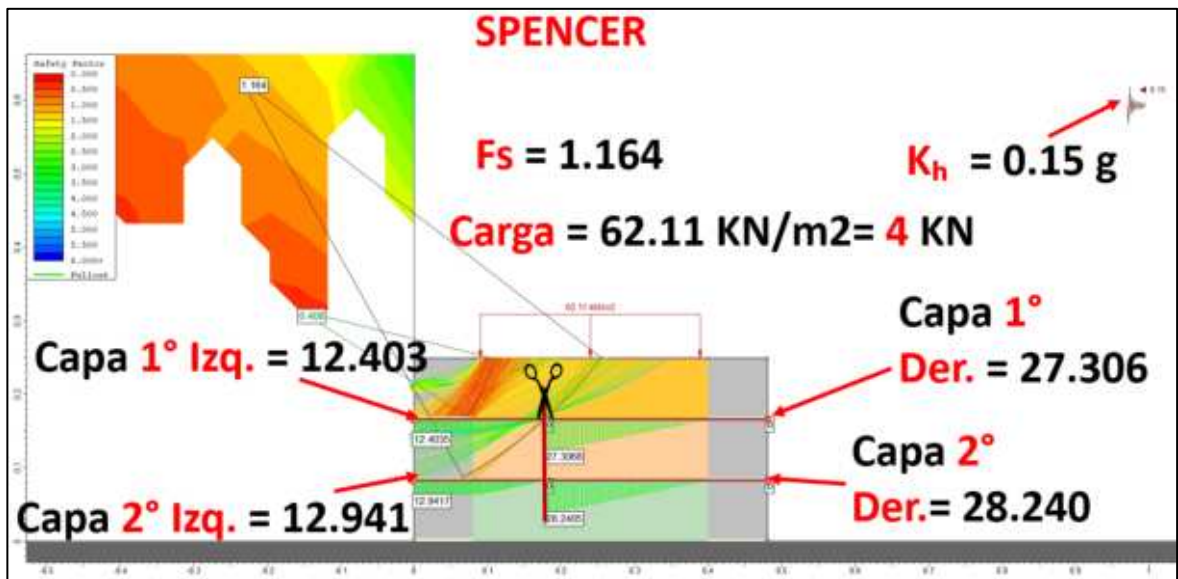
Para documentar el comportamiento del modelo numérico del prototipo 5 prototipo durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual de los modelos analíticos experimentales, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a la tesis en forma de figuras, como un registro visual continuo. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en este documento, sino que se presentan como material complementario en formato digital.

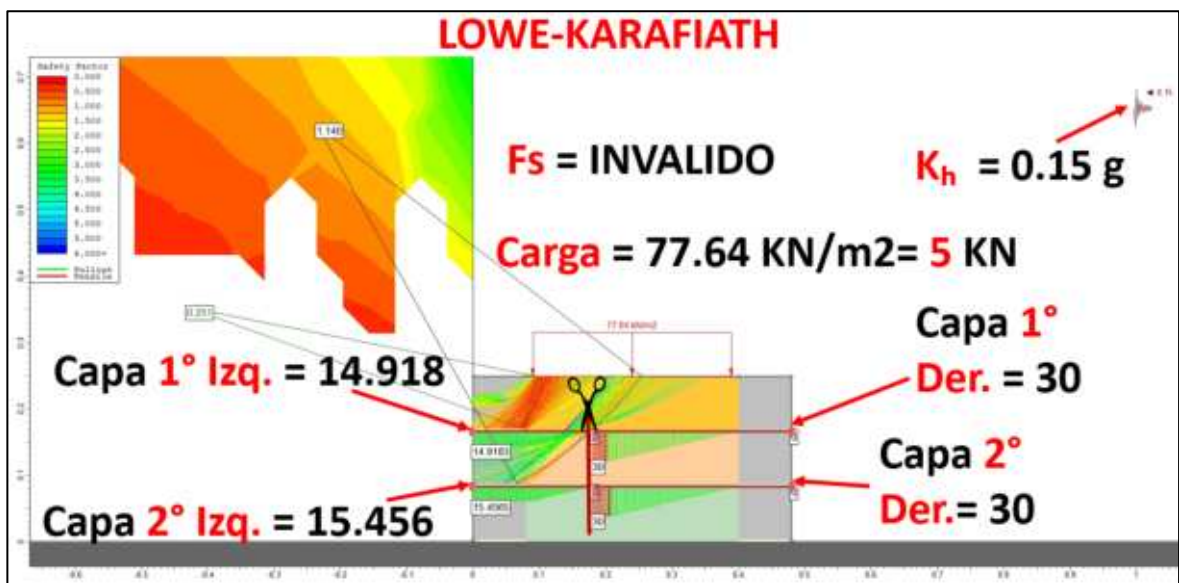
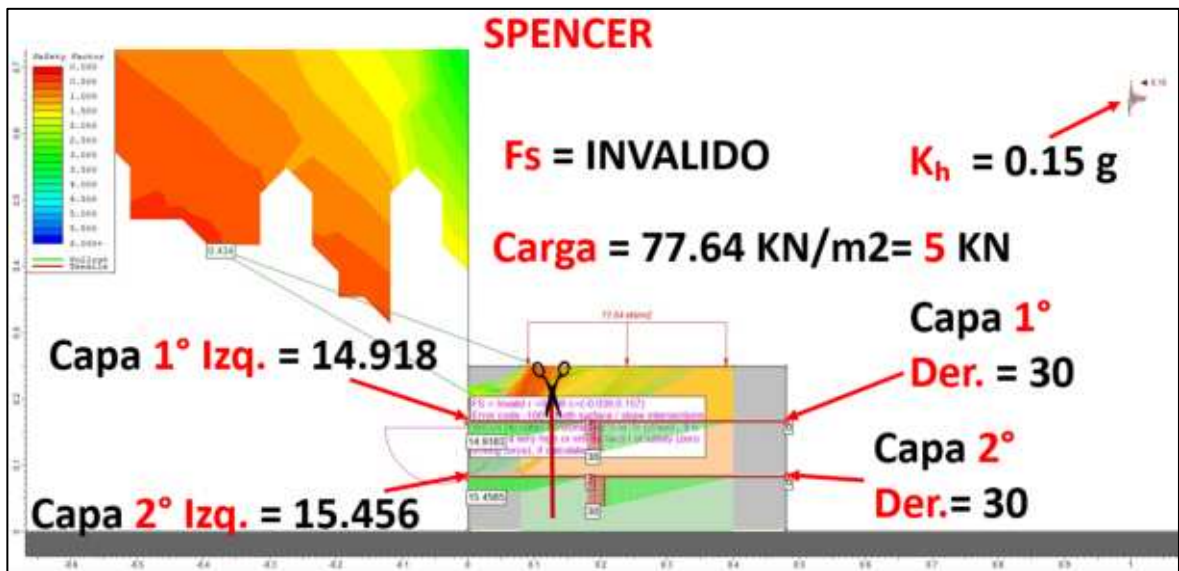


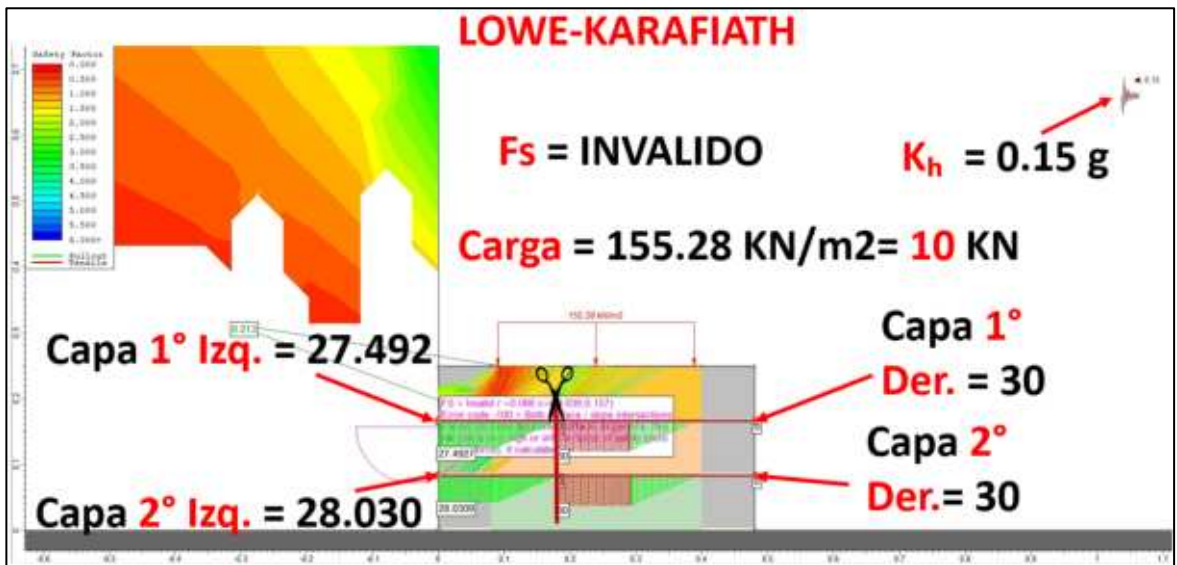
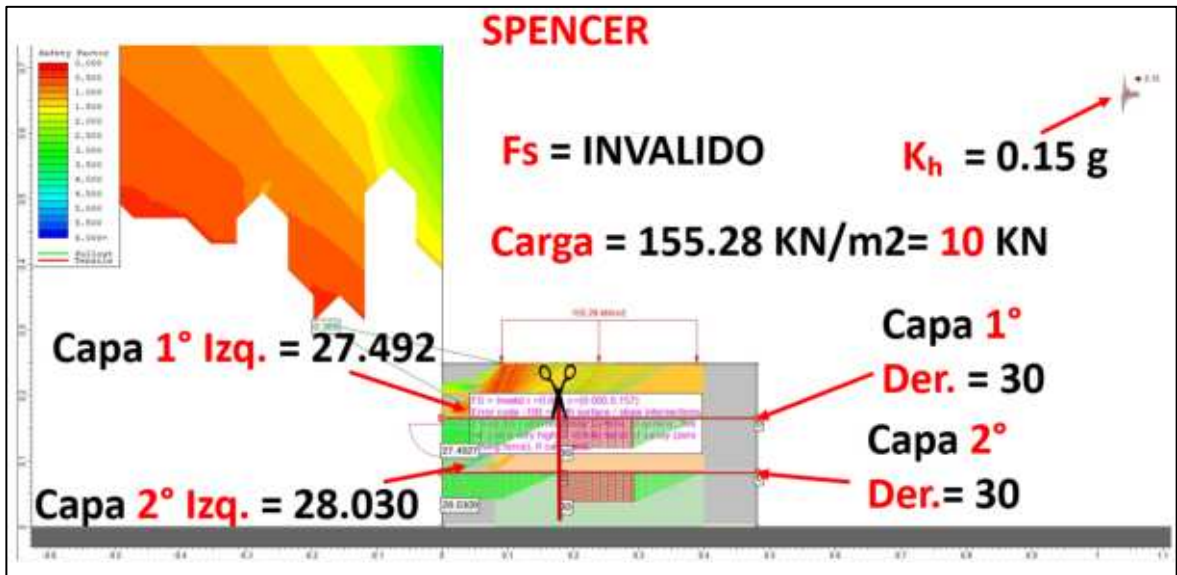












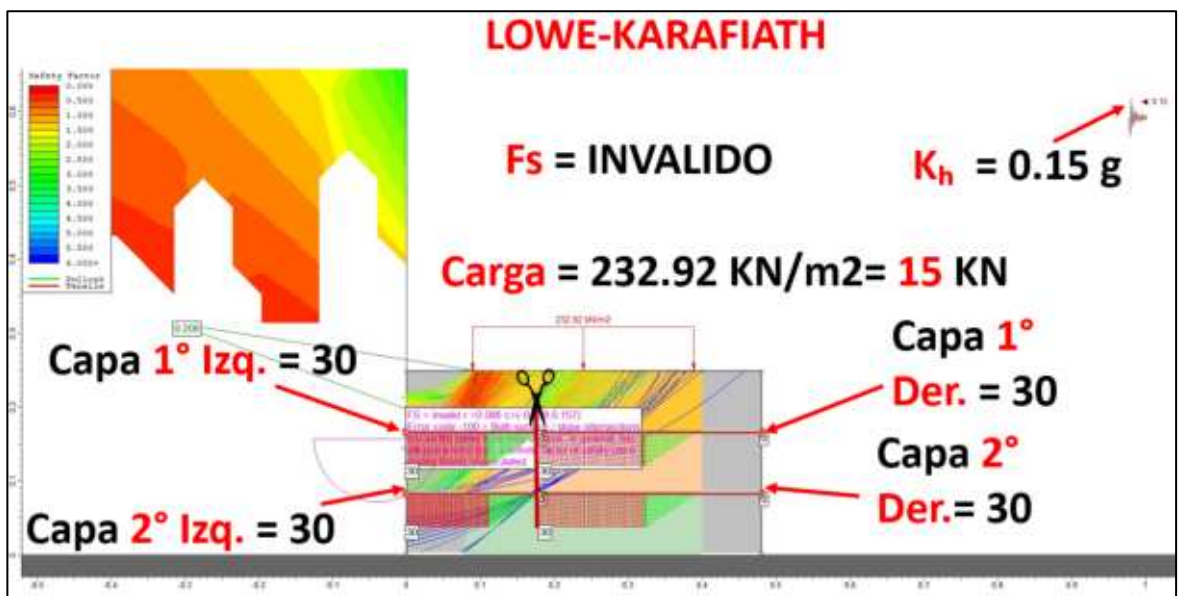
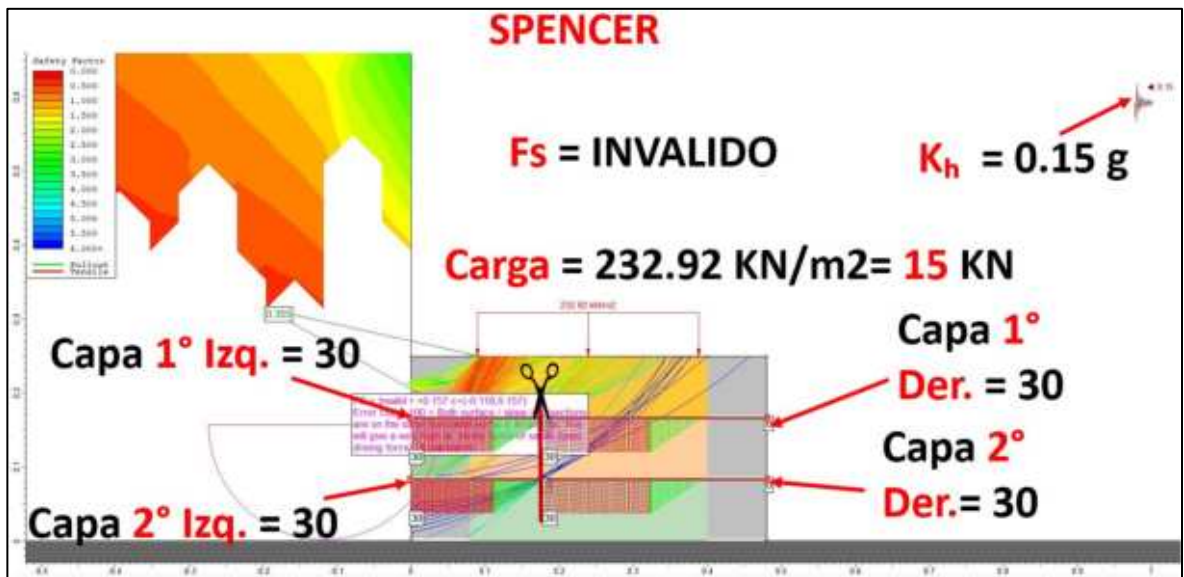


Figura 26. Escenario gráfico Prototipo 5 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

La interpretación del comportamiento del sistema de suelo reforzado se basa en el análisis conjunto de los factores de seguridad globales y la distribución de las fuerzas de tracción movilizadas en las geomallas, considerando explícitamente la respuesta diferenciada entre los extremos

izquierdo y derecho del modelo. Los resultados muestran que, a medida que aumenta la carga aplicada sobre un área de 0,0644 m<sup>2</sup>, el requerimiento de tracción en ambas capas de la geomalla aumenta progresivamente, mientras que el factor de seguridad del sistema disminuye continuamente.

Para la condición sin carga (0 kN), el sistema presenta un estado estable, con FS = 1.679 (Spencer) y FS = 1.620 (Lowe-Karafiath). En esta etapa, los esfuerzos de tracción son bajos, variando entre 2,34 y 4,88 kN/m, lo que refleja un comportamiento esencialmente elástico y una adecuada interacción suelo-geomalla.

Al aplicar una carga de 1 kN (15.528 kN/m<sup>2</sup>), el sistema sufre una importante reducción de su estabilidad, alcanzando FS ≈ 1,204 (Spencer) y 1,181 (Lowe-Karafiath), valores que ya se acercan al límite mínimo permitido. En este nivel se observa una clara diferencia entre los extremos: el lado derecho moviliza mayores fuerzas (≈ 9,79 y 10,72 kN/m), mientras que el lado izquierdo presenta valores menores (≈ 4,86 y 5,40 kN/m), mostrando una distribución no uniforme de cargas.

Para cargas de 2 y 3 kN (31,056 y 46,584 kN/m<sup>2</sup>), el factor de seguridad continúa disminuyendo (FS ≈ 1,185–1,172 en Spencer y 1,162–1,150 en Lowe-Karafiath), lo que indica que el sistema entra en una condición crítica cercana a la inestabilidad. En este rango, la movilización de esfuerzos sigue siendo mayor en la extrema derecha (hasta 21,47 y 22,40 kN/m), mientras que en la izquierda el aumento es progresivo (≈ 9,89–10,43 kN/m).

Para 4 kN (62,112 kN/m<sup>2</sup>), esta tendencia continúa, con valores de FS ≈ 1,164 (Spencer) y 1,144 (Lowe-Karafiath). En este punto, la geomalla del extremo derecho se acerca a su máxima capacidad (≈ 27,31 y 28,24 kN/m), mientras que el extremo izquierdo sigue aumentando sus tensiones (≈ 12,40 y 12,95 kN/m).

A partir de 5 kN (77,64 kN/m<sup>2</sup>), la geomalla del extremo derecho

alcanza su valor límite de 30 kN/m, mientras que el extremo izquierdo todavía muestra una movilización parcial ( $\approx 14,92$  y  $15,46$  kN/m). En esta condición, el método Spencer deja de reportar valores válidos (“INVÁLIDO” FS), mientras que Lowe-Karafiath aún registra  $FS \approx 1.140$ , destacando una condición crítica del sistema.

Para cargas mayores (10 y 15 kN), ambas capas de la geomalla en ambos extremos alcanzan una capacidad máxima de 30 kN/m, lo que indica la movilización total del refuerzo. **En estos niveles, los factores de seguridad se reportan como “INVÁLIDOS”, lo que refleja que el sistema ha excedido las condiciones de estabilidad evaluables a través del equilibrio límite, asociándose a un estado de falla o inestabilidad global.**

Este comportamiento es consistente con el observado en modelos anteriores, donde el material de relleno granular juega un papel fundamental. Inicialmente, el suelo contribuye al confinamiento y a la resistencia al corte; Sin embargo, a medida que aumenta la carga predominan los efectos desestabilizadores y la capacidad del refuerzo se vuelve decisiva.

El análisis transversal indica que la falla se desarrolla preferentemente en el extremo derecho, donde se movilizan mayores tensiones desde las etapas iniciales, lo que sugiere condiciones de anclaje menos eficientes y mayor susceptibilidad al deslizamiento relativo en la interfaz suelo-geomalla. Por otro lado, la extrema izquierda presenta un comportamiento más gradual, asociado a mejores condiciones de confinamiento.

En este contexto, la “rotura” de la geomalla debe interpretarse como una superación del estado límite de uso, y no como una falla frágil del material. Los resultados resaltan que la efectividad del anclaje y el confinamiento del refuerzo son factores críticos en el desempeño general del sistema, incluso más relevantes que la longitud total de la geomalla.

## FASE 2 DE MODELACIÓN:

6. **PROTOTIPO 6: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS** SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAXIAL A UN **SV DE 1 METRO NORMA BRASILEÑA ABNT NBR 11682:2008:**

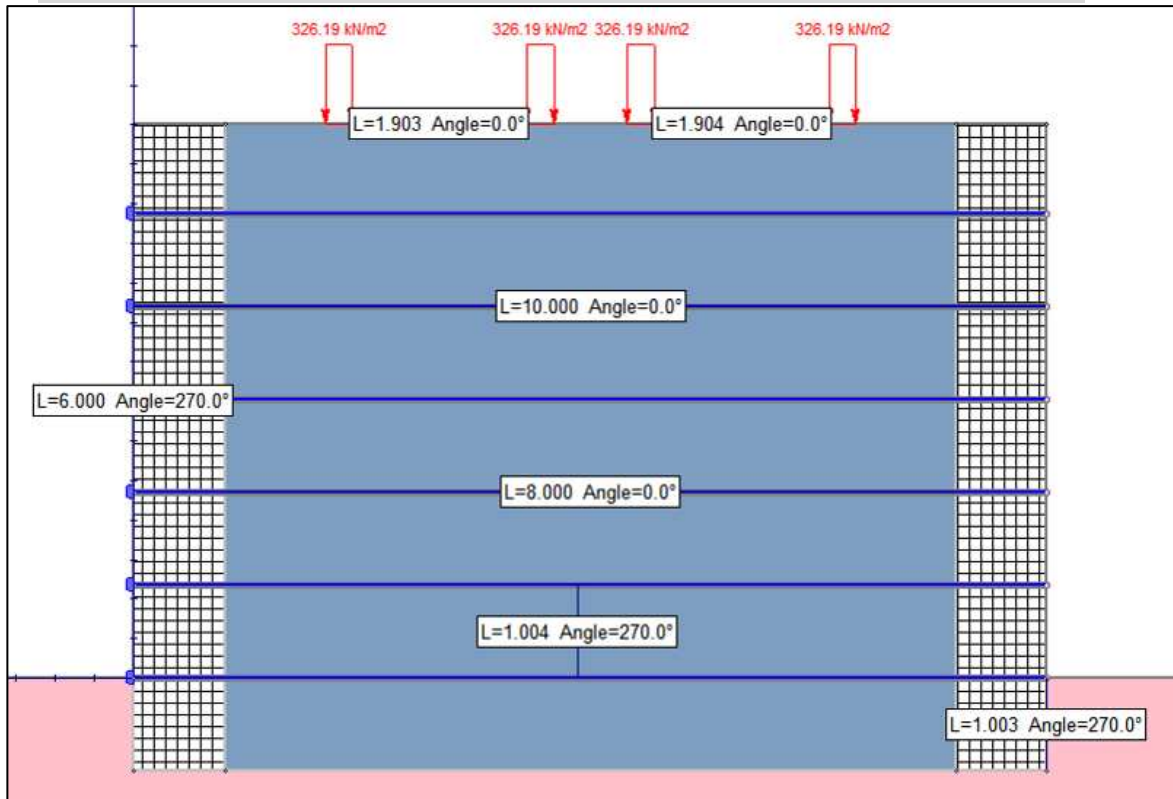


Figura 27. Escenario gráfico del prototipo 6 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 29 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 1 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 10 m, correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para

vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°, representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1 m. Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de 30 kN/m y 40 kN/m, respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos tienen 1 m de altura y un espesor equivalente a la separación vertical de las geomallas (1 m), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura, evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y

posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una **vía tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 1.50 m de cada lado, alcanzando un ancho de corona de 10 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 30.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista

el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

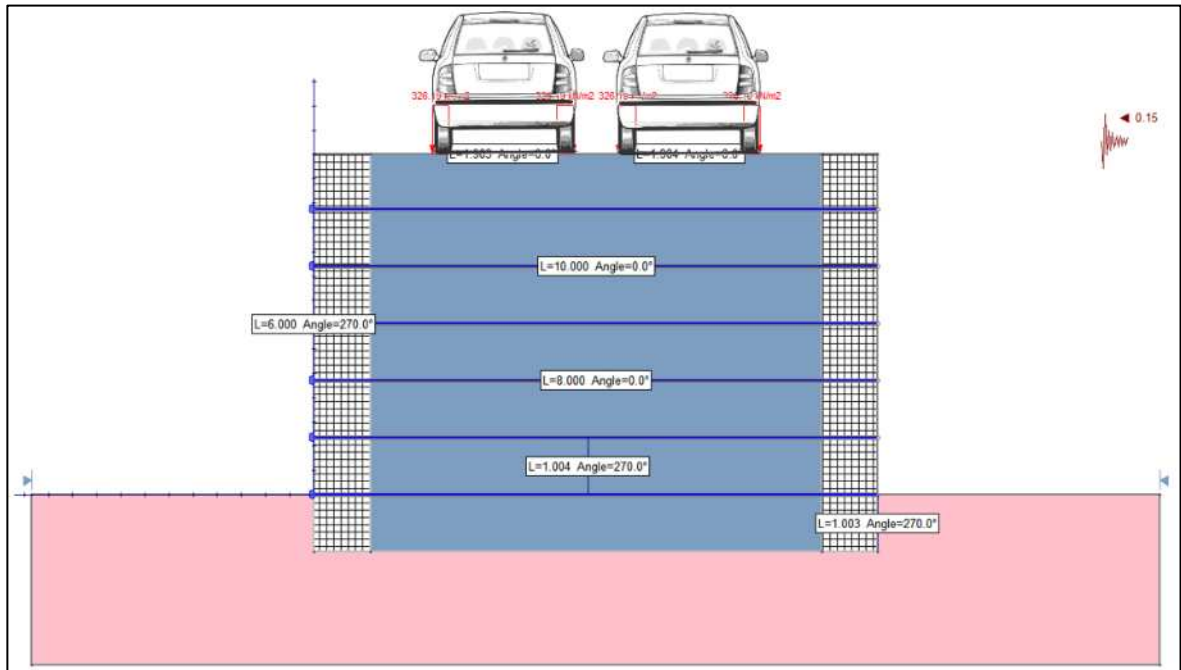


Figura 28. Representación de cargas en prototipo 6 a escala real Sv 1m. Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 30.

Tabla 26. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio límite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

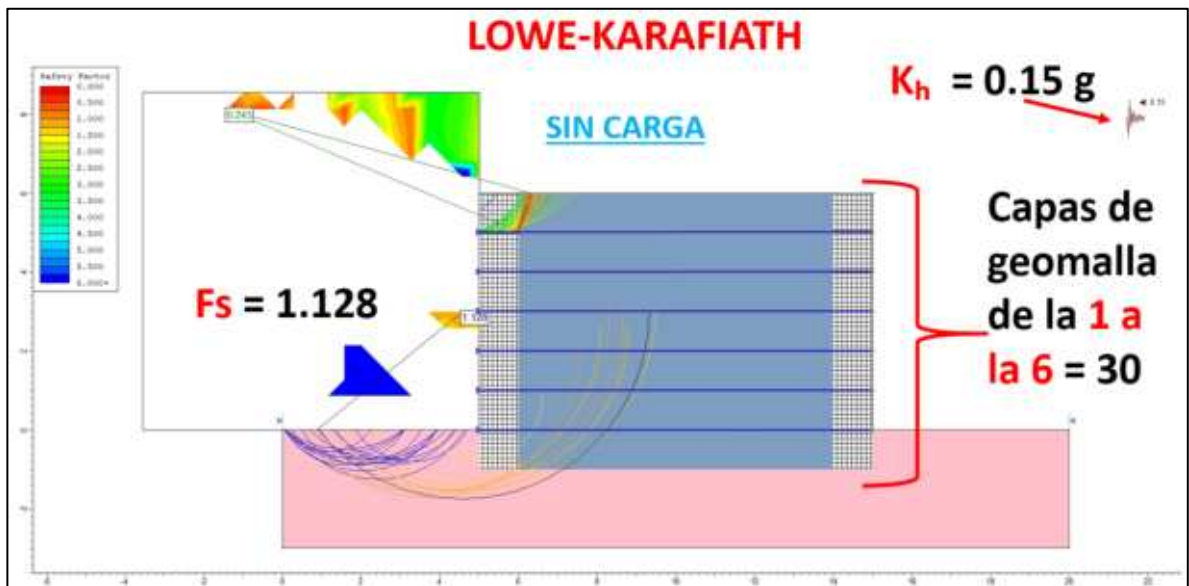
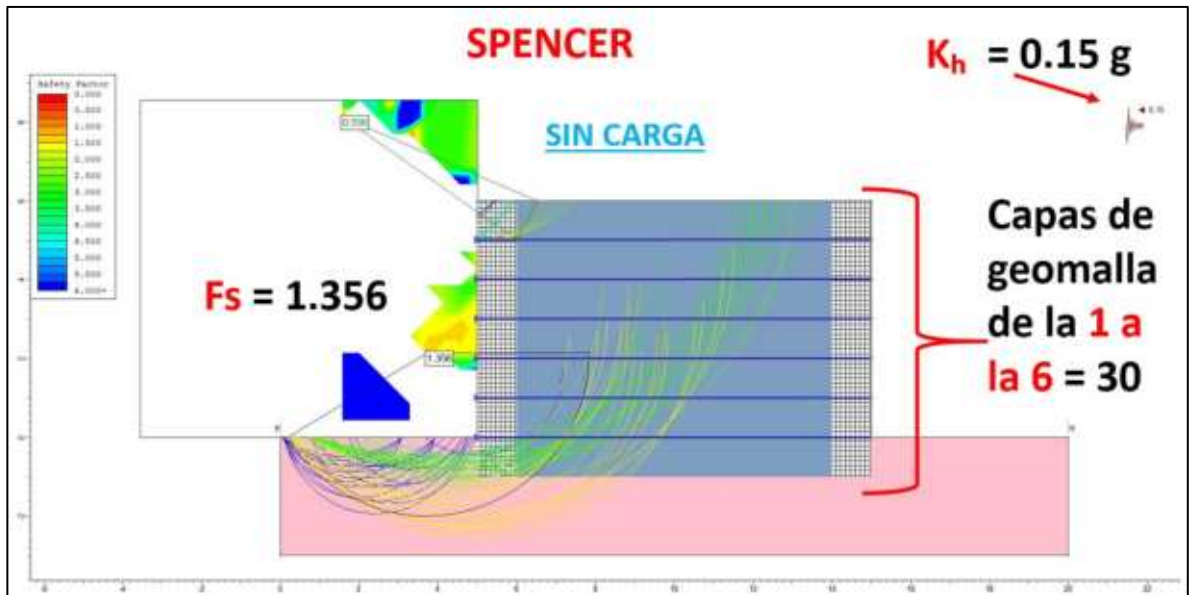
Norma ABNT a escala REAL 1m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 6	Lowe-Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 6	Spencer (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 6	Lowe-Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 6
SIN Carga	-			1.356	30	1.128	30	1.575	40	1.394	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.416	30	1.128	30	1.548	40	1.383	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.352	30	0.941	30	1.464	40	1.196	40
T2-S2 (tractocamión + semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.320	30	1.033	30	1.406	40	1.194	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.158	30	0.972	30	1.355	40	0.941	40

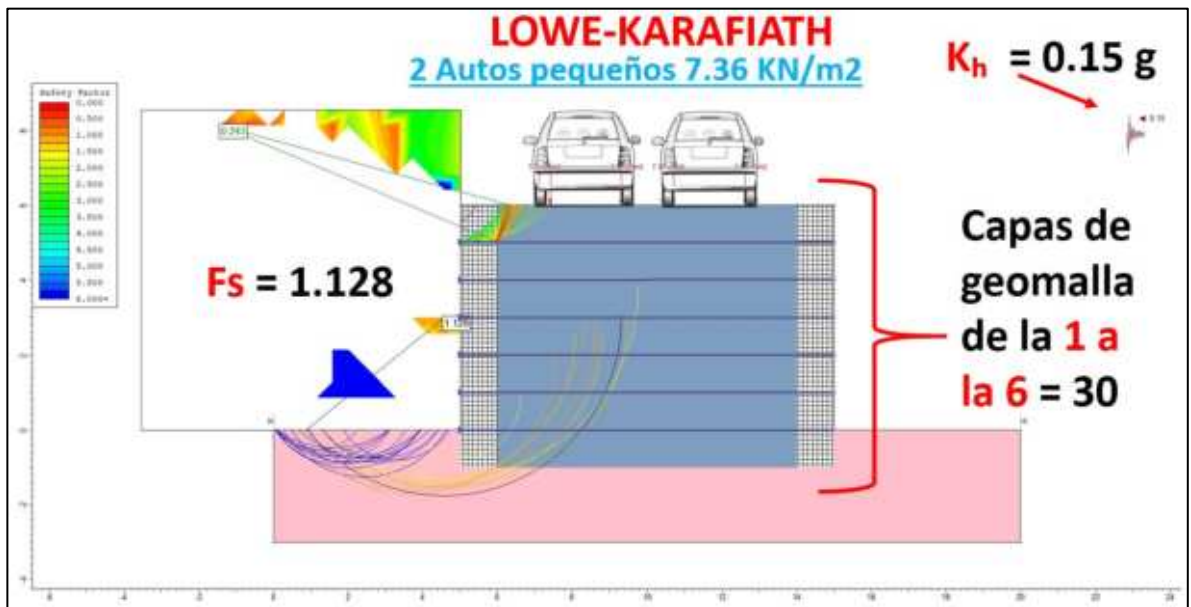
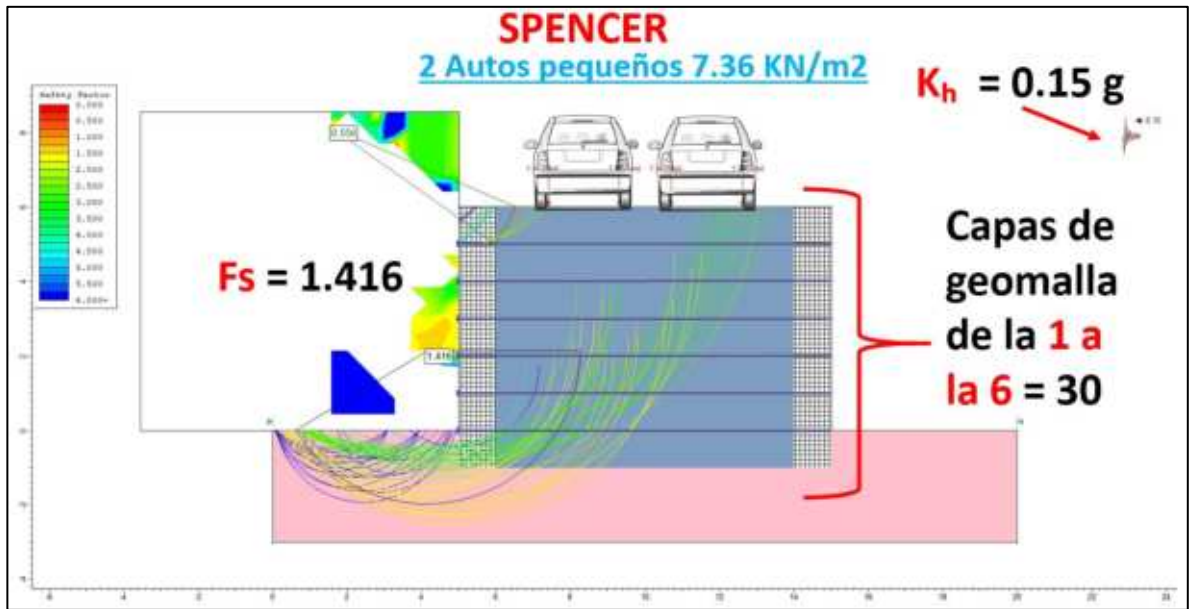
Fuente: Elaboración propia.

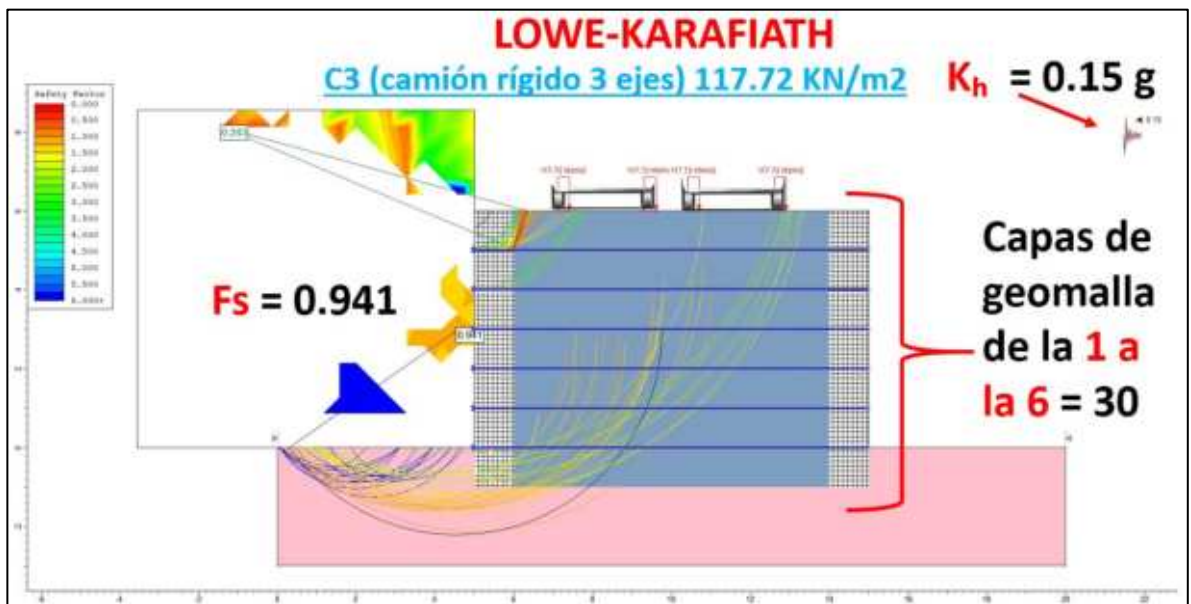
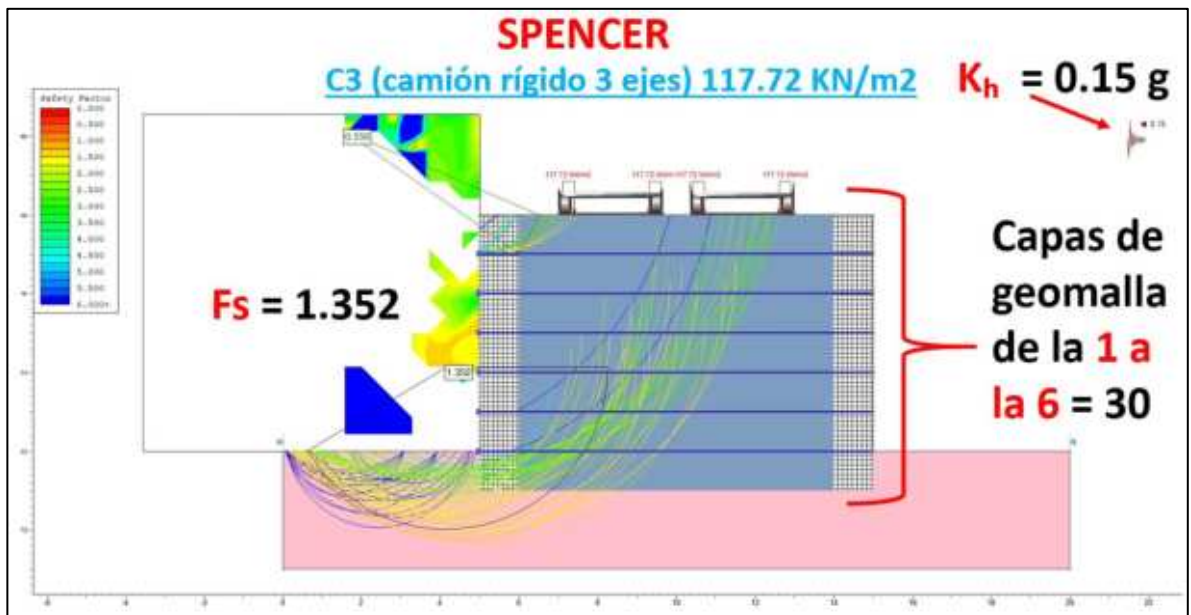
Los valores mostrados en el apartado  $T_{ult}$  corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 6 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el Fs muestra cifras positivas.

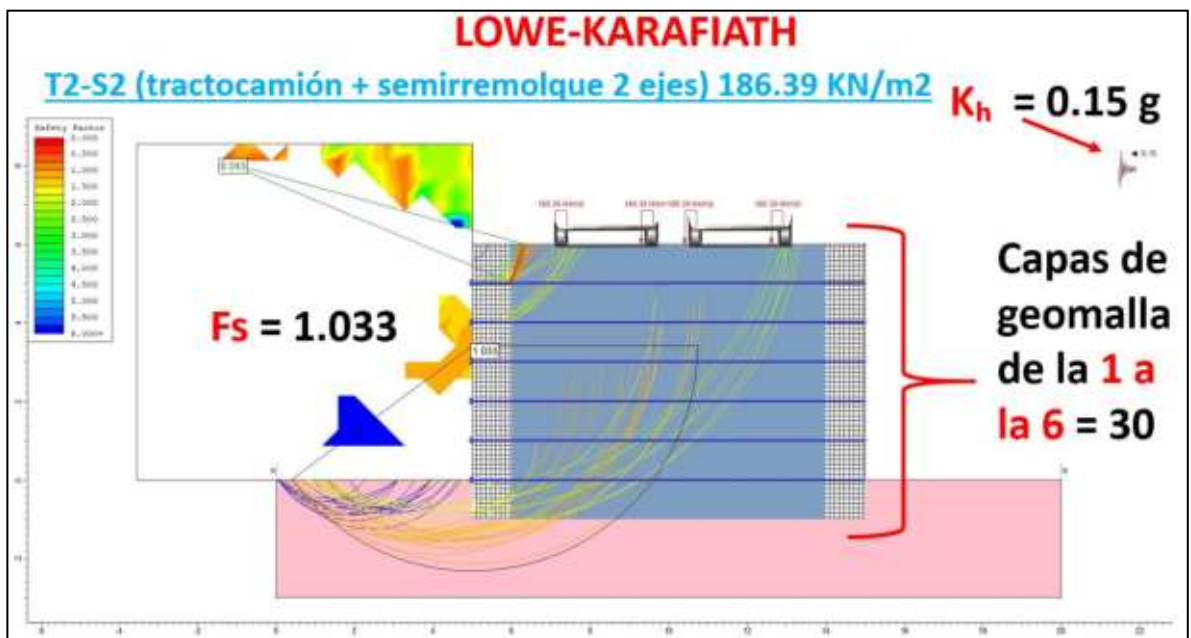
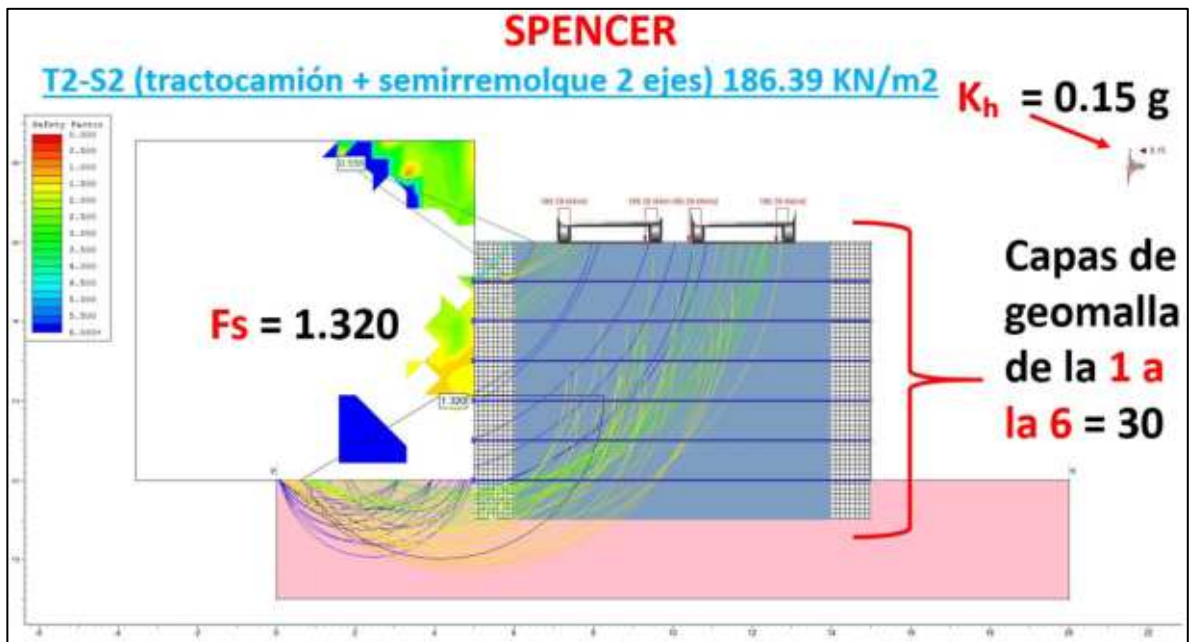
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 6 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las

imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.









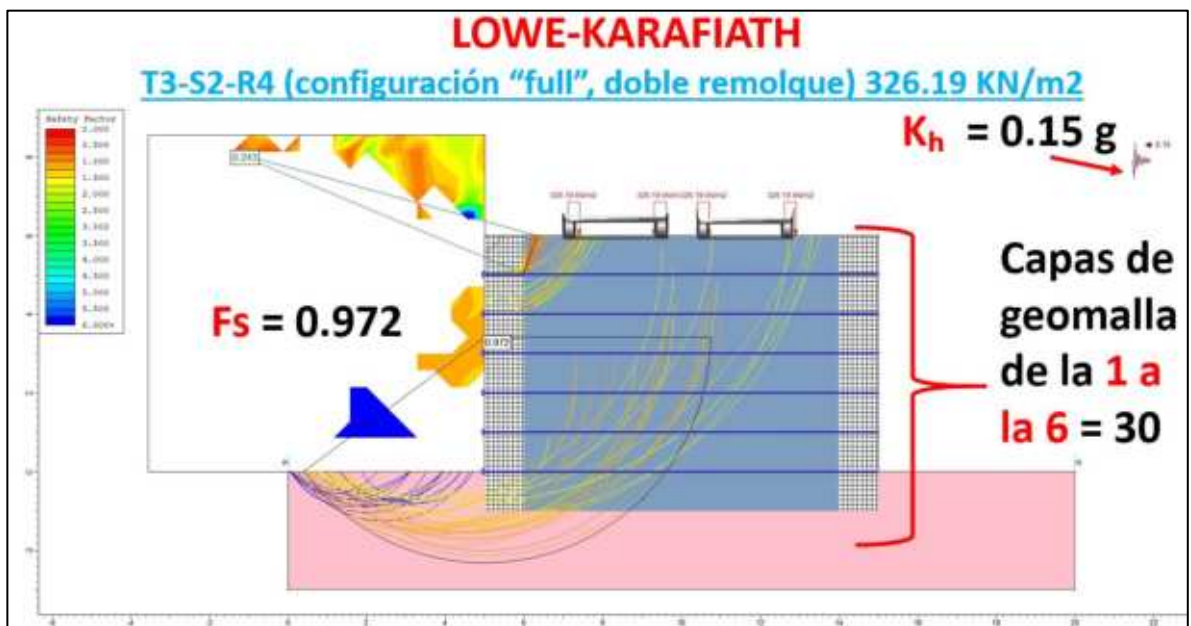
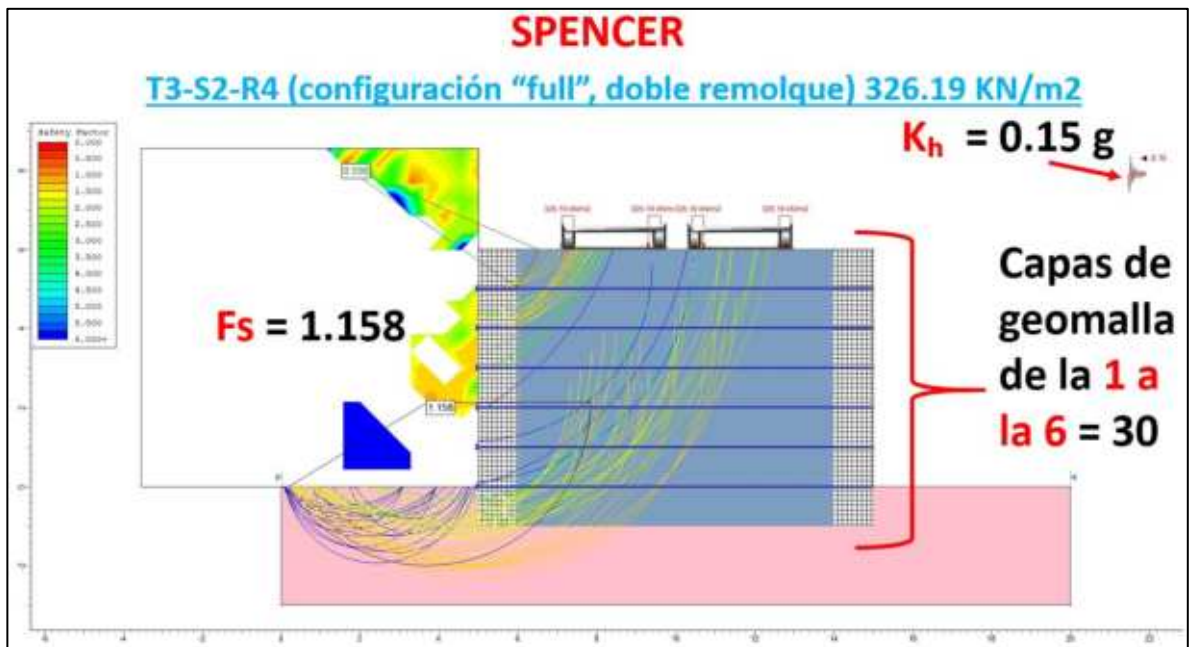


Figura 29. Escenario gráfico Prototipo 6 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

En consecuencia, los resultados sugieren que, incluso cuando la geomalla opera con altos niveles de estrés desde el inicio del análisis, el sistema suelo-geomalla presenta un comportamiento estable, robusto y confiable ante incrementos de carga significativos. Esto demuestra que la presencia de refuerzo y confinamiento lateral permite que el terraplén responda favorablemente en condiciones de tráfico intenso, sin comprometer la estabilidad general de la estructura.

De los resultados se observa que desde la condición de descarga las geomallas ya presentan valores de tensión iguales a su capacidad nominal (30 kN/m para geomalla 30S y 40 kN/m para geomalla 40S), lo que indica que el refuerzo entra en operación desde las etapas iniciales del sistema. Este comportamiento es consistente con estructuras de suelo reforzado, donde el refuerzo se activa por las condiciones de confinamiento y el propio peso del material, incluso en ausencia de cargas externas significativas.

En cuanto a los factores de seguridad (FS), se observa que para la condición sin carga el sistema presenta valores adecuados (FS  $\approx$  1.357 y 1.161 para una geomalla de 30 kN/m; FS  $\approx$  1.574 y 1.395 para una geomalla de 40 kN/m, según los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath, respectivamente), lo que indica una condición inicial estable. Asimismo, se puede observar que el uso de una geomalla de mayor resistencia (40 kN/m) proporciona sistemáticamente mayores factores de seguridad, mostrando una mejora en el rendimiento general del sistema.

Al introducir cargas al vehículo se analiza el efecto de diferentes configuraciones según la NOM-012. Para un automóvil pequeño, los factores de seguridad permanecen prácticamente constantes (FS  $\approx$  1.344–1.127 para 30 kN/m y 1.560–1.389 para 40 kN/m), lo que indica que este tipo de carga no representa una condición crítica para el sistema.

Sin embargo, al considerar vehículos de mayor capacidad, como el camión rígido C3, se observa una disminución significativa en el factor de

seguridad, especialmente con el método Lowe-Karafiath ( $FS \approx 0.941$  para 30 kN/m), lo que indica que el sistema comienza a acercarse a una condición inestable. Esta tendencia continúa con configuraciones más pesadas, como T2-S2, donde el FS nuevamente se aproxima a la unidad ( $\approx 1,032$  para 30 kN/m y  $\approx 1,199$  para 40 kN/m).

Para la condición más crítica correspondiente al vehículo tipo T3-S2-R4 (camión completo), los factores de seguridad alcanzan sus valores mínimos ( $FS \approx 1.294$  y  $0.972$  para geomalla de 30 kN/m;  $FS \approx 1.316$  y  $0.941$  para geomalla de 40 kN/m). Estos resultados muestran que, bajo cargas máximas, el sistema entra en una zona crítica de diseño, especialmente cuando se consideran métodos más conservadores como el de Lowe-Karafiath, donde los valores son menores que la unidad, lo que indica posibles condiciones de falla.

En términos generales, se confirma que, si bien las geomallas trabajan a su máxima capacidad desde las etapas iniciales, la estabilidad global del sistema depende en mayor medida del comportamiento del suelo reforzado y del nivel de carga aplicada. Además, aumentar la resistencia del refuerzo (de 30 a 40 kN/m) mejora el rendimiento general, aunque no evita por completo la reducción del factor de seguridad bajo cargas extremas.

En resumen, los resultados muestran que el sistema presenta un comportamiento estable para cargas ligeras y moderadas, pero a medida que la carga aumenta –principalmente bajo la acción de vehículos pesados de tipo completo- se alcanza una condición crítica, lo que resalta la importancia de considerar tanto la capacidad del refuerzo como las condiciones reales de carga al diseñar terraplenes reforzados.

7. **PROTOTIPO 7: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS** SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAXIAL A UN **SV DE 80 CENTÍMETROS** **Publicación Técnica 382 IMT MÉXICO:**

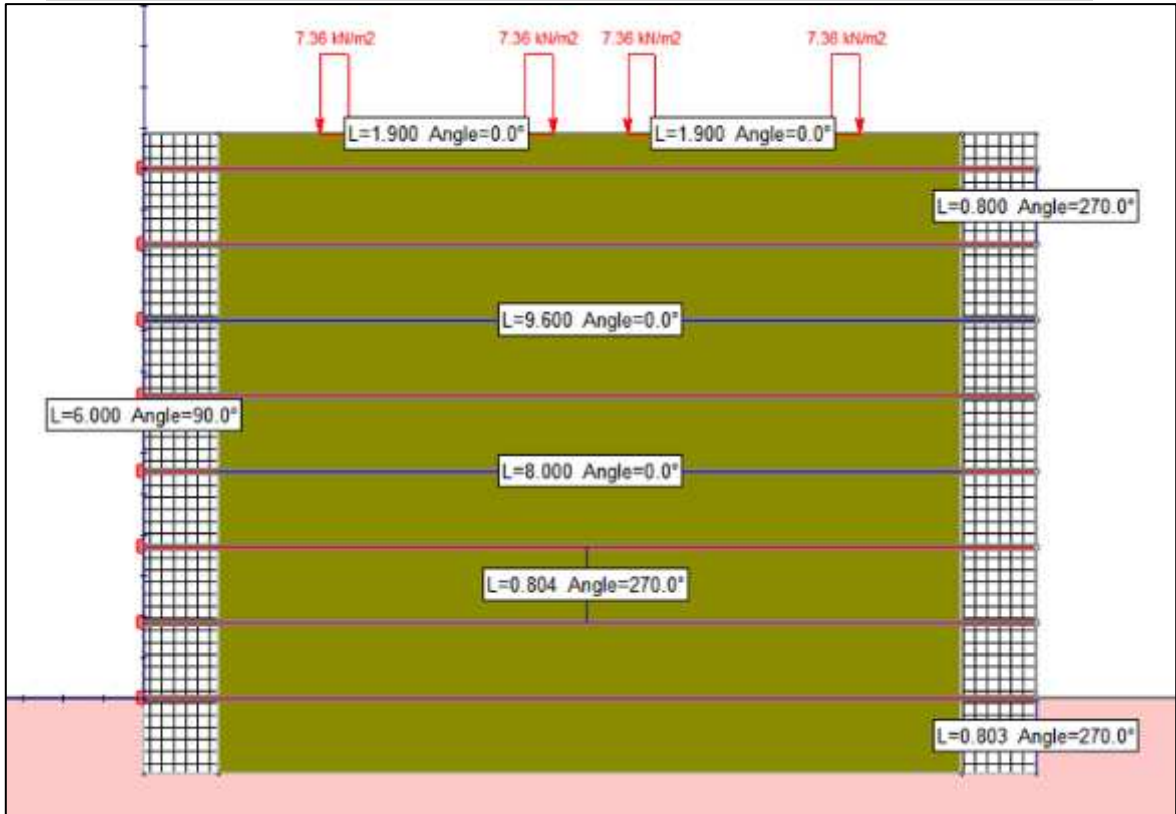


Figura 30. Escenario gráfico del prototipo 6 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 32 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 0.80 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 9.60

m, correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de  $19.16 \text{ kN/m}^3$ , cohesión de  $10.79 \text{ kPa}$  y ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de  $0.80 \text{ m}$ . Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de  $30 \text{ kN/m}$  y  $40 \text{ kN/m}$ , respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos tienen  $0.80 \text{ m}$  de altura y un espesor equivalente a la separación vertical de las geomallas ( $0.80 \text{ m}$ ), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura,

evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una vía **tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 1.30 m de cada lado, alcanzando un ancho de copa de 9.60 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 33.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

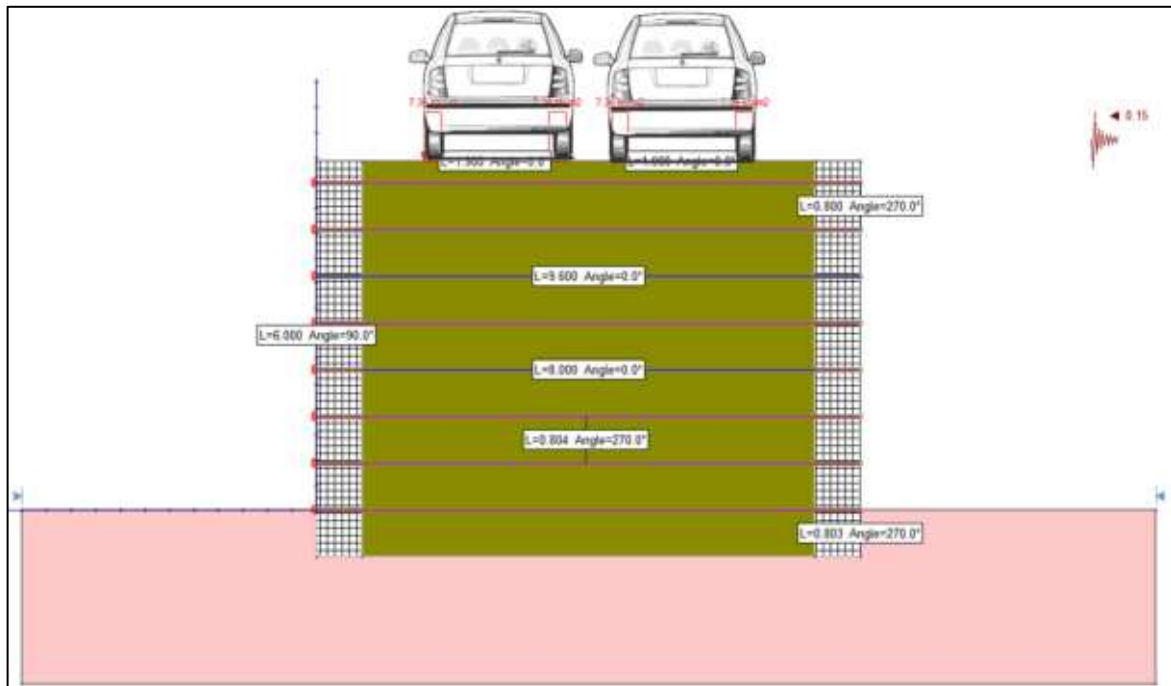


Figura 31. Representación de cargas en prototipo 6 a escala real Sv 1m. Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 31.

Tabla 27. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

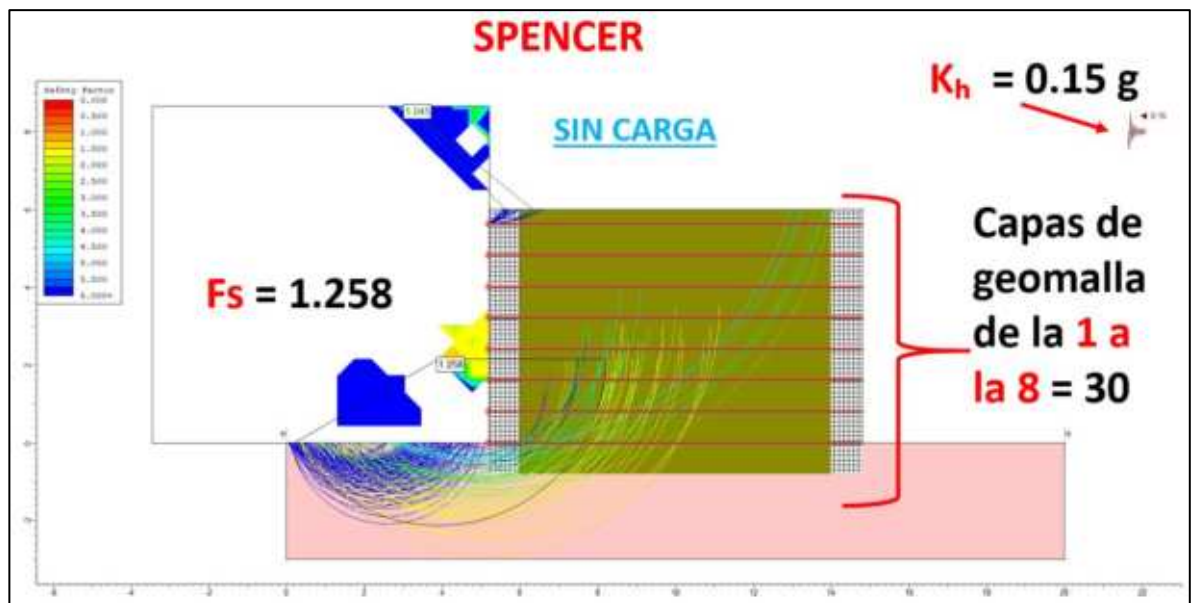
Publicación Técnica 382 IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 8	Lowe-Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 8	Spencer (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 8	Lowe-Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 8
SIN Carga	-			1.256	30	1.486	30	1.420	40	-	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.254	30	1.183	30	1.374	40	-	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.202	30	1.068	30	1.289	40	1.386	40
T2-S2 (tractocamión + semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.175	30	1.082	30	1.435	40	1.170	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.298	30	0.940	30	1.298	40	1.054	40

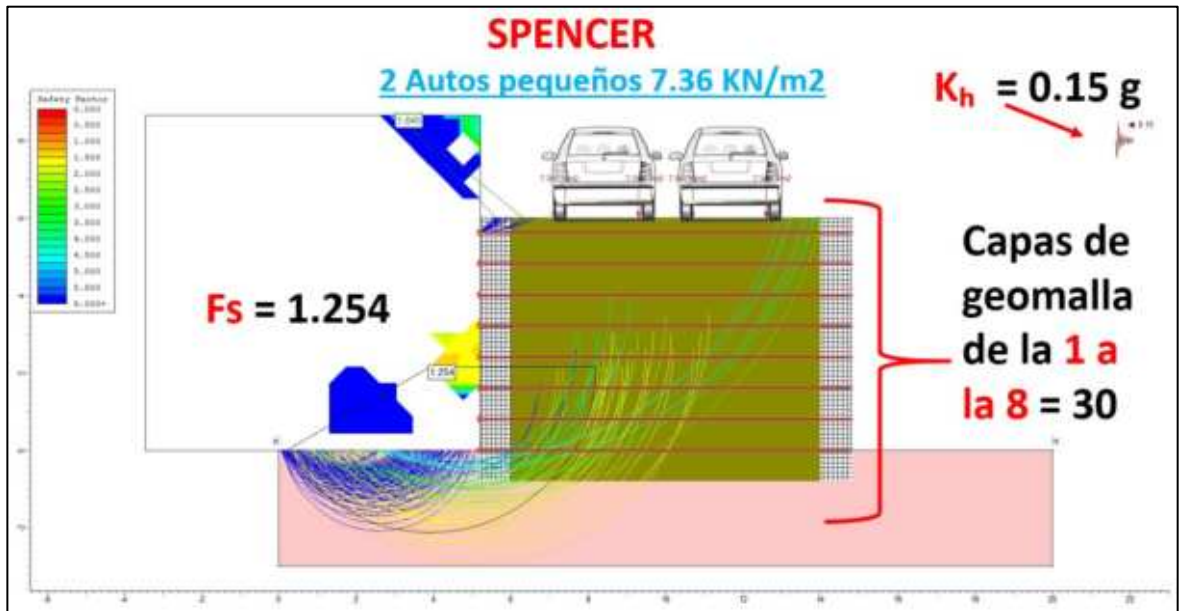
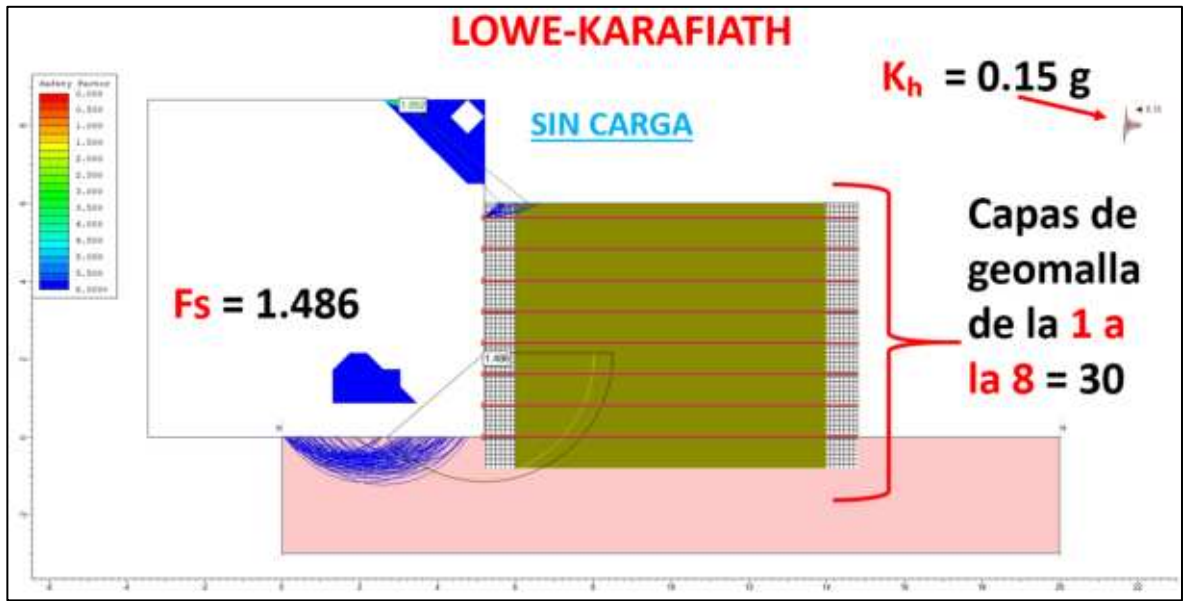
Fuente: Elaboración propia.

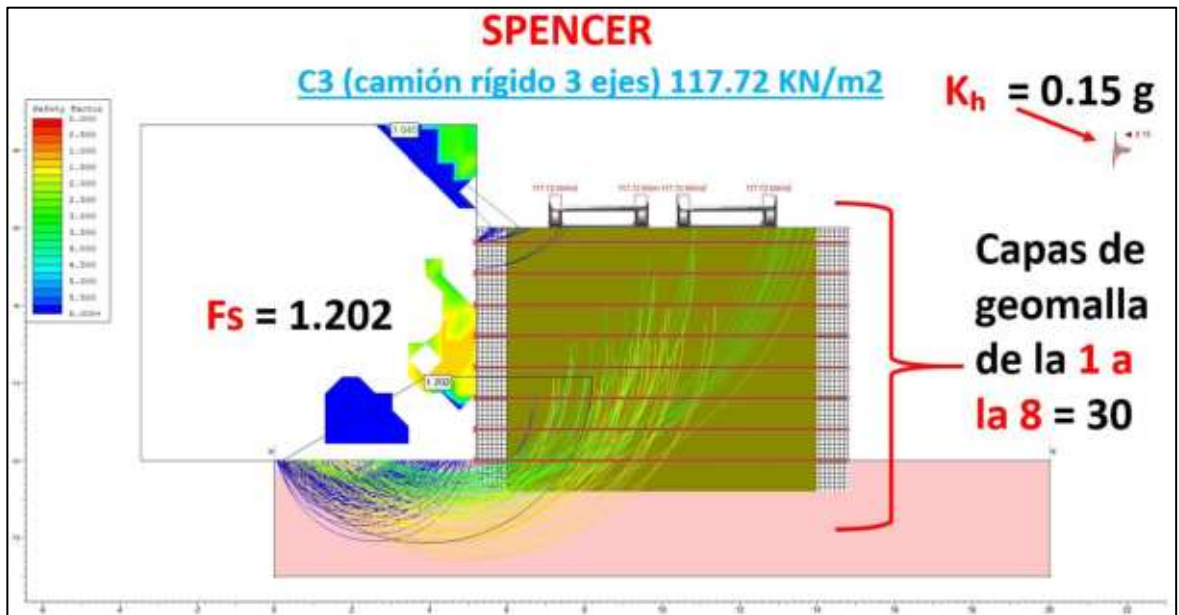
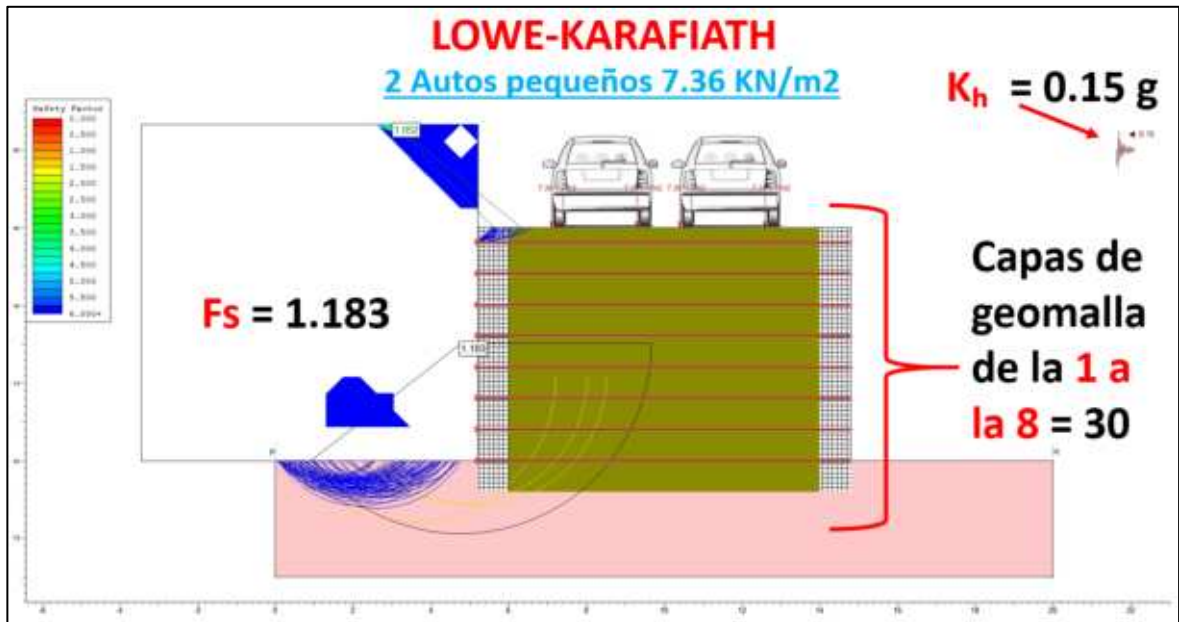
Los valores mostrados en el apartado T<sub>ult</sub> corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 8 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el Fs muestra cifras positivas.

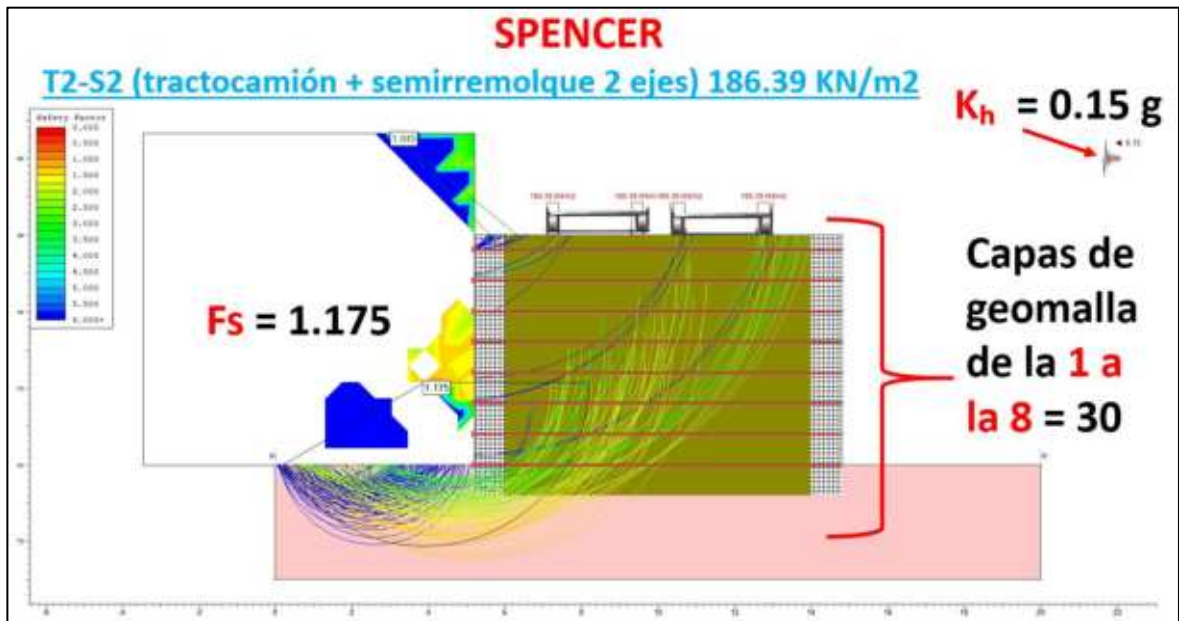
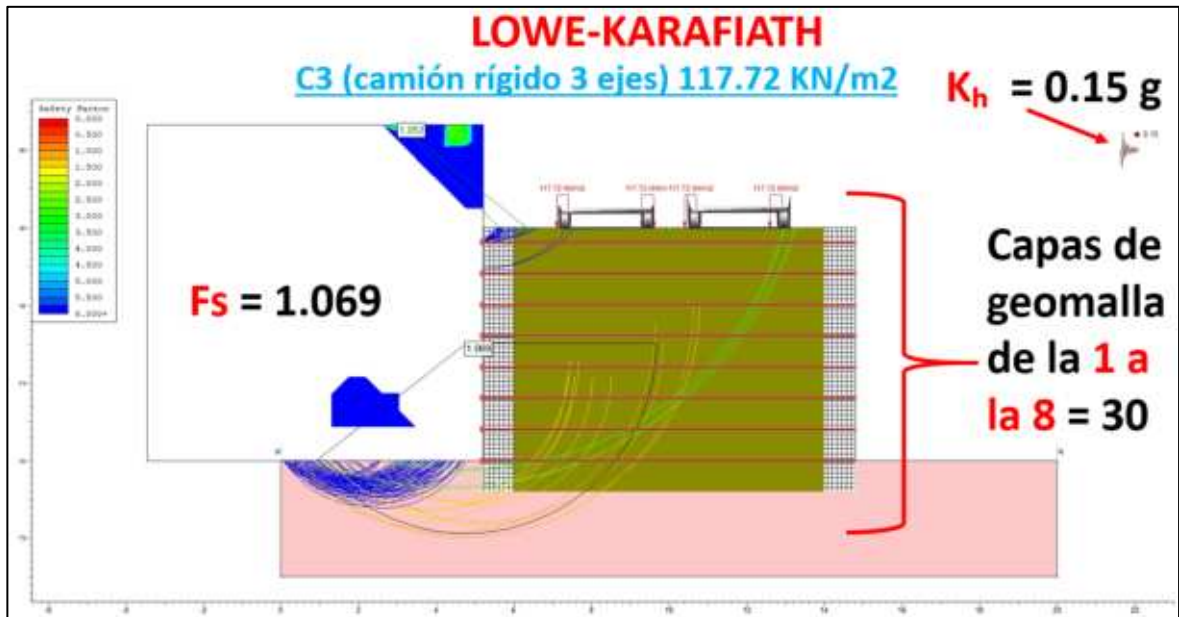
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 7 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo

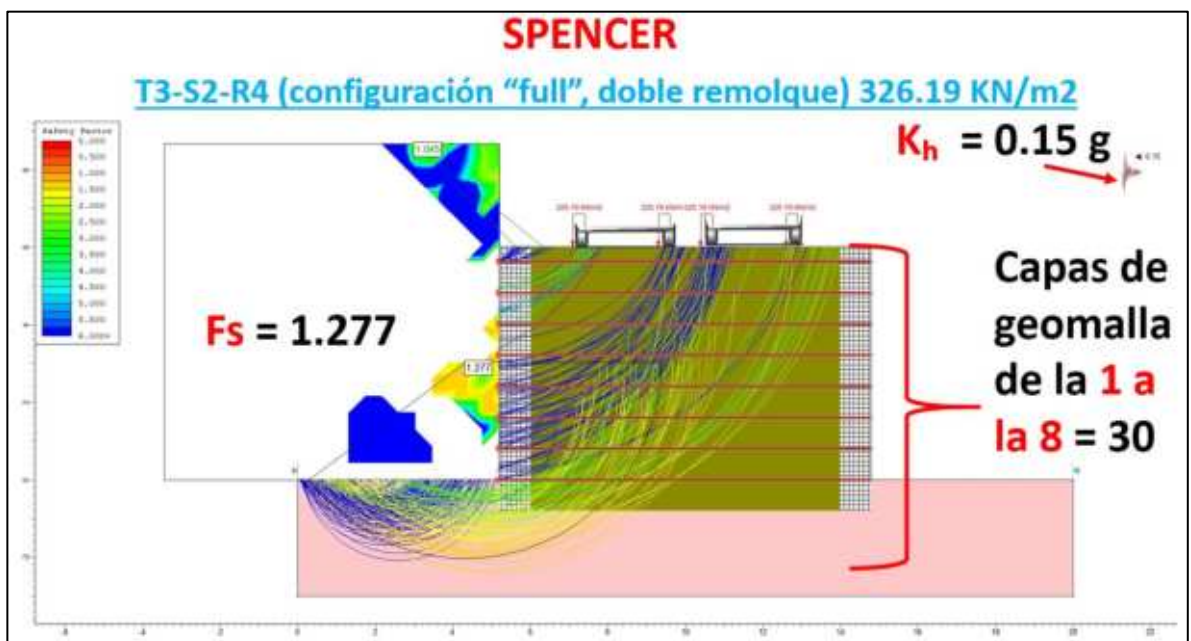
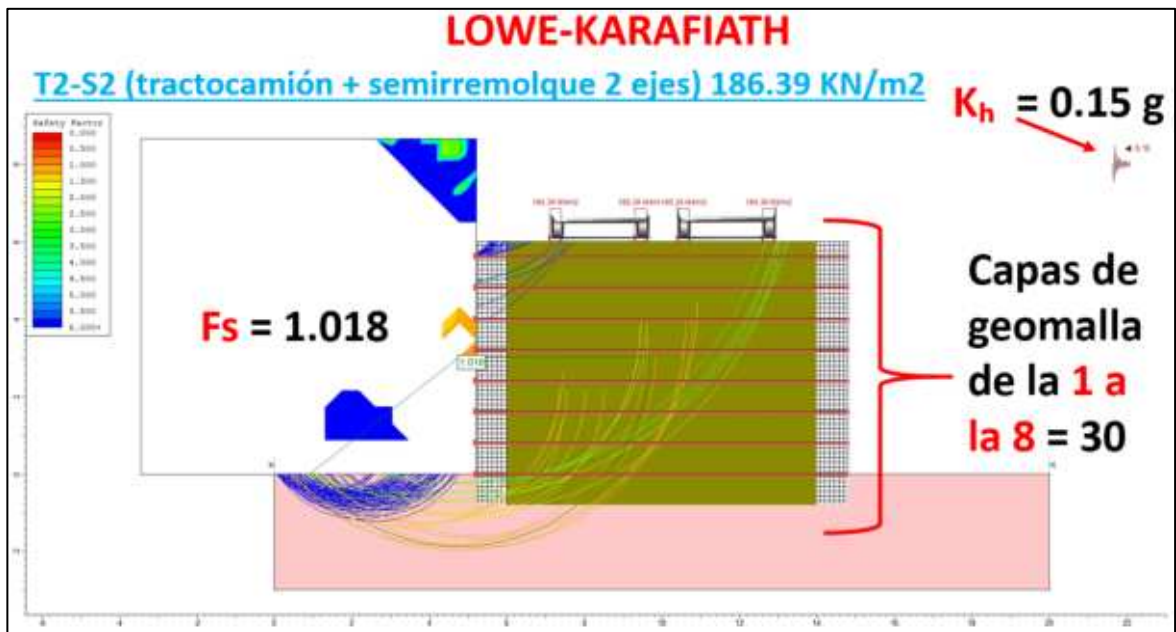
analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.











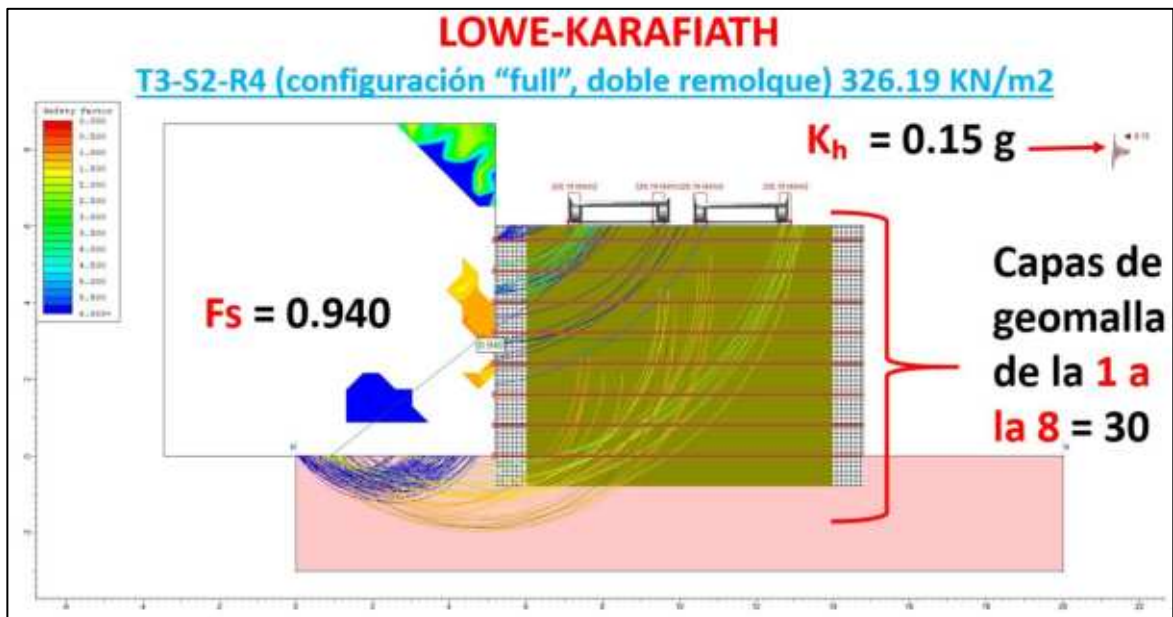


Figura 32. Escenario gráfico Prototipo 7 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

Los valores presentados en la sección Tult corresponden a las tensiones movilizadas en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, en este caso numeradas del 1 al 8, lo que permite identificar su posición dentro del terraplén reforzado. De los resultados del prototipo 7 (SV = 0.80 m), se observa que a partir de la condición descargada las geomallas alcanzan su nivel máximo de tensiones movilizadas (30 kN/m y 40 kN/m), lo que indica que el sistema de refuerzo funciona desde las etapas iniciales debido al confinamiento del suelo. Pese a esto, los factores de seguridad presentan valores mayores a la unidad, reflejando una condición estable del sistema.

Para la condición descargada se obtienen valores de FS = 1.256 (Spencer) y 1.486 (Lowe-Karafiath) para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se obtiene FS = 1.420 (Spencer). Al aplicar la carga correspondiente a un automóvil pequeño, los factores de seguridad se mantienen prácticamente constantes (FS = 1,254 y 1,183 para

30 kN/m; FS = 1,374 para 40 kN/m), lo que indica que este nivel de carga no genera un impacto significativo en la estabilidad.

En el caso del camión rígido C3 se observa una disminución en los factores de seguridad, alcanzando FS = 1.202 y 1.068 para 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se obtienen valores de FS = 1.289 y 1.386, mostrando una mejora en la estabilidad debido al aumento de la resistencia del refuerzo. Esta tendencia continúa con T2-S2, donde los factores de seguridad son FS = 1,175 y 1,082 para 30 kN/m, y FS = 1,435 y 1,170 para 40 kN/m, mostrando nuevamente un mejor desempeño del sistema reforzado con mayor capacidad.

Finalmente, para la condición más crítica correspondiente al tipo de vehículo T3-S2-R4 (camión completo), se obtienen valores de FS = 1.298 y 0.940 para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m los valores son FS = 1.298 y 1.054. Estos resultados muestran que el sistema se encuentra en un estado crítico, especialmente al considerar el método de Lowe-Karafiath, donde se presentan valores cercanos o inferiores al límite de estabilidad.

En términos generales, se observa que los factores de seguridad tienden a disminuir a medida que aumenta la carga aplicada, acercándose a condiciones críticas en configuraciones de carga pesada. Asimismo, el uso de geomallas de mayor resistencia (40 kN/m) mejora el comportamiento del sistema, aumentando los factores de seguridad y aportando una mayor estabilidad global, aunque sin eliminar por completo la influencia de las cargas más exigentes.

8. **PROTOTIPO 8: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS** SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN **SV DE HASTA 1.20 METROS MÁXIMO SEGÚN LA NORMA BRASILEÑA ABNT NBR 11682:2008:**

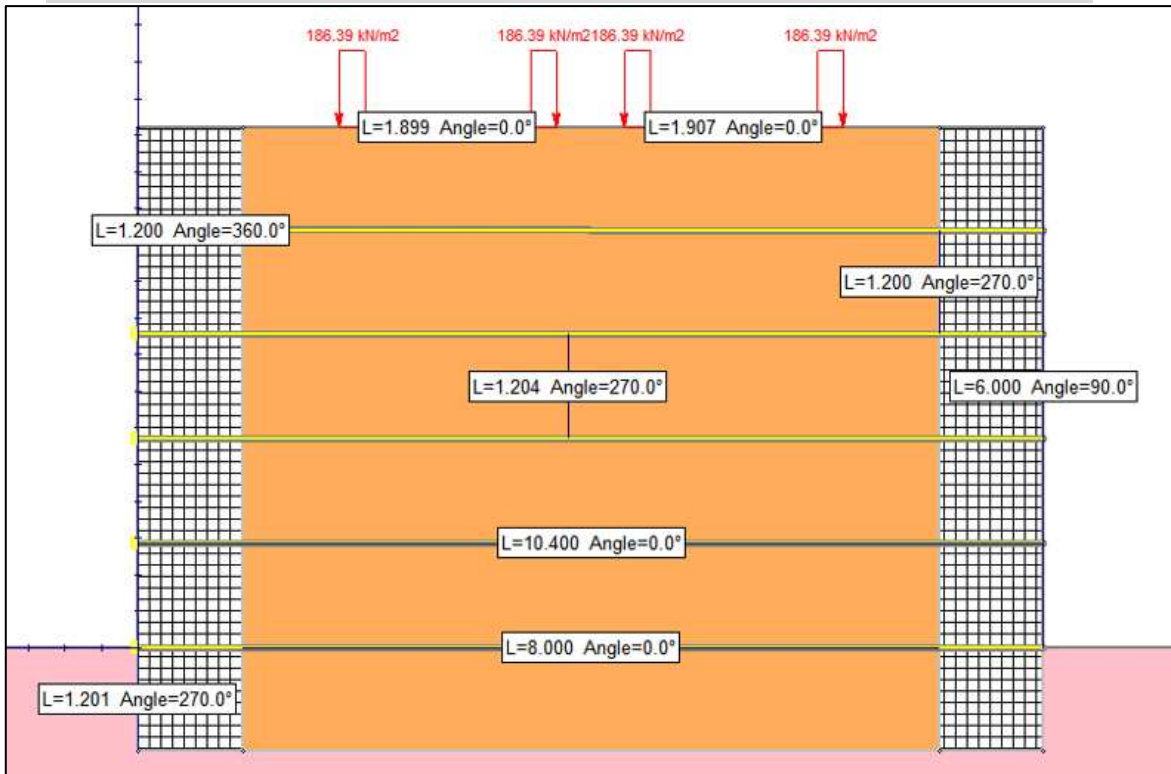


Figura 35. Escenario gráfico del prototipo 8 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 35 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 1.20 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 10.40 m, correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de

vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°, representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1.20 m. Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de 30 kN/m y 40 kN/m, respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos tienen 1.20 m de altura y un espesor equivalente a la separación vertical de las geomallas (1.20 m), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura, evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como

la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una **vía tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 1.70 m de cada lado, alcanzando un ancho de corona de 10.40 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 36.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo

de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

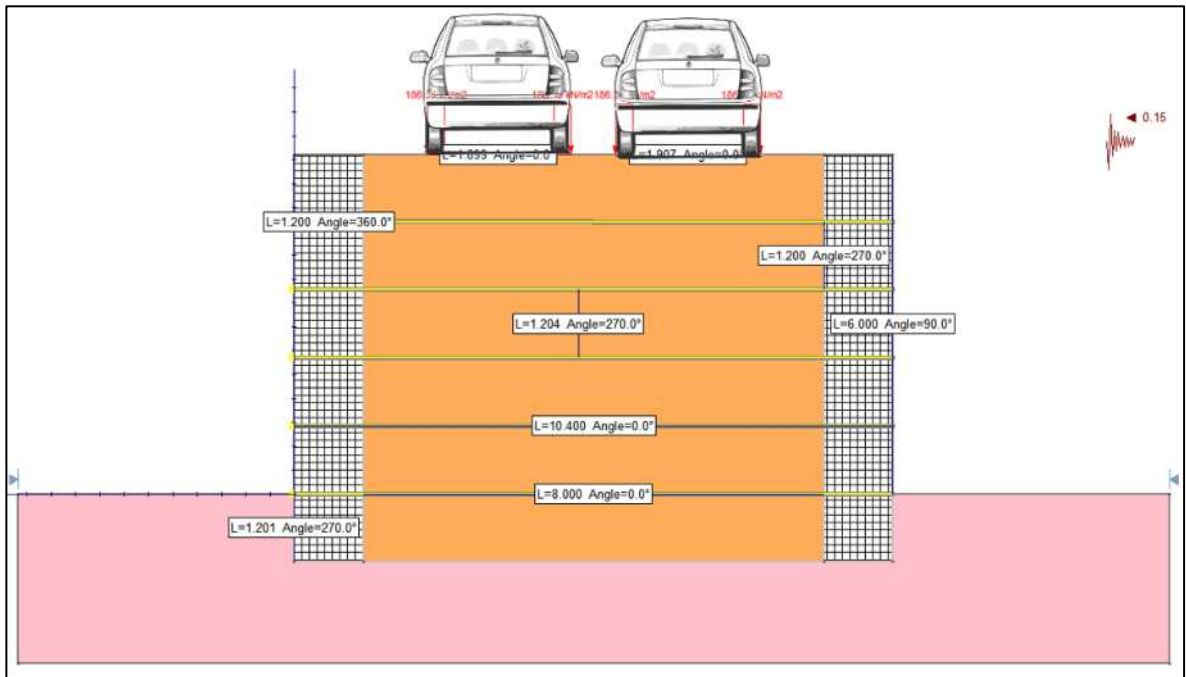


Figura 33. Representación de cargas en prototipo 8 a escala real Sv 1.20 m.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 32.

El análisis numérico desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 32.

Tabla 28. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

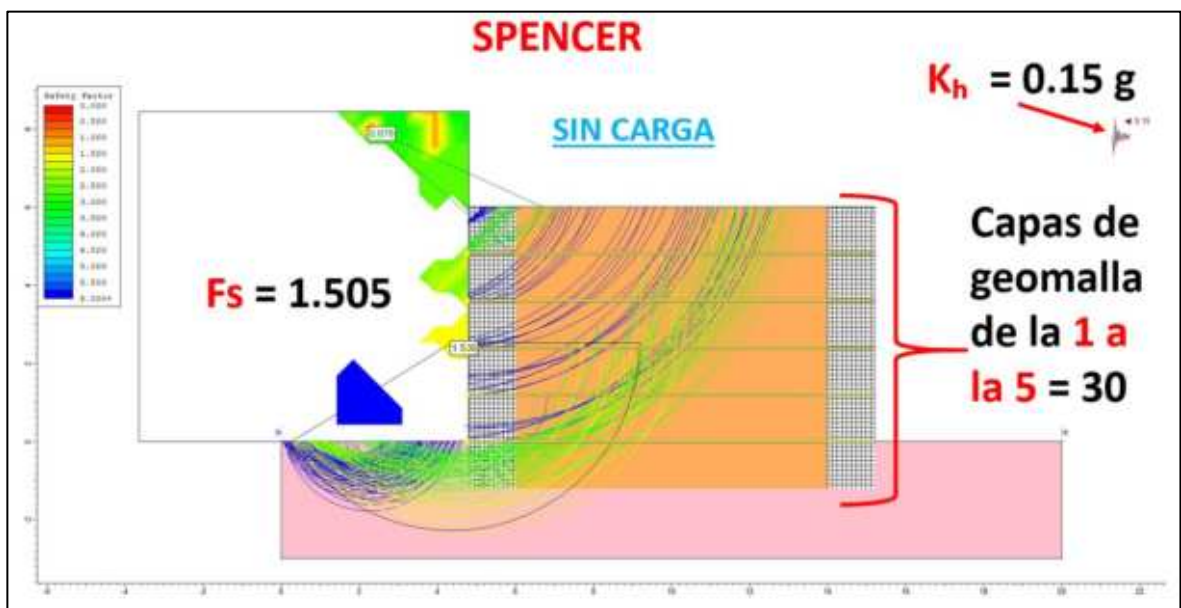
Norma ABNT a escala REAL hasta 1.20m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (Fs)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5	Spencer (Fs)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5
SIN Carga	-	-	-	1.504	30	1.092	30	1.633	40	1.236	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.499	30	1.079	30	1.712	40	1.227	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.427	30	1.082	30	1.516	40	1.177	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.399	30	1.000	30	1.463	40	1.162	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.361	30	0.955	30	1.450	40	1.011	40

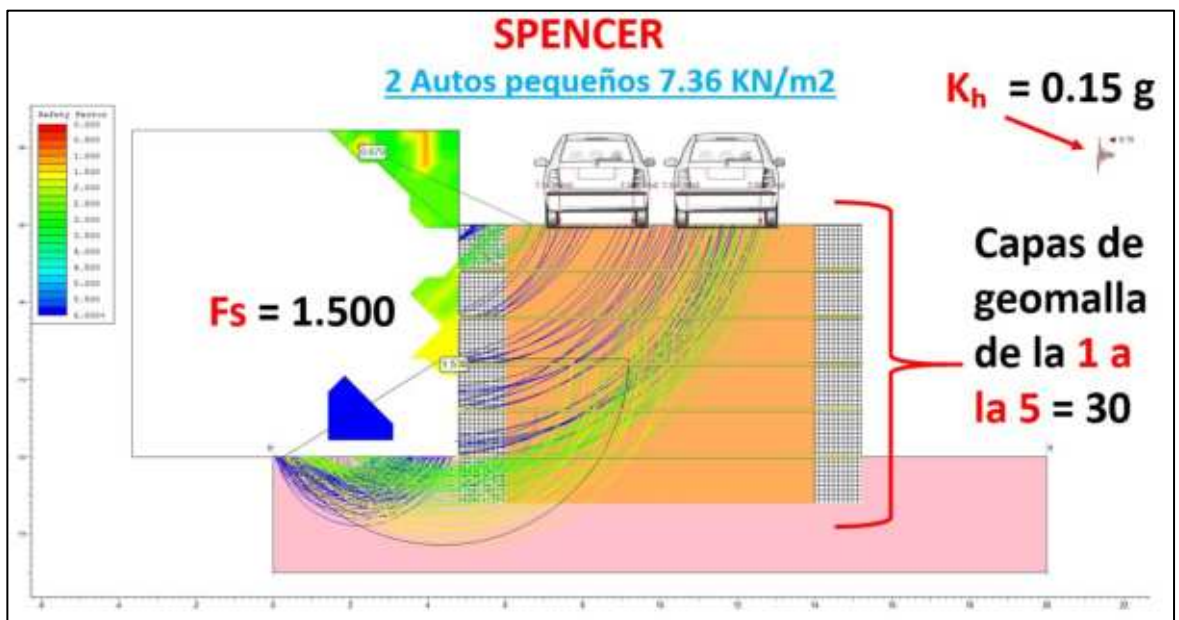
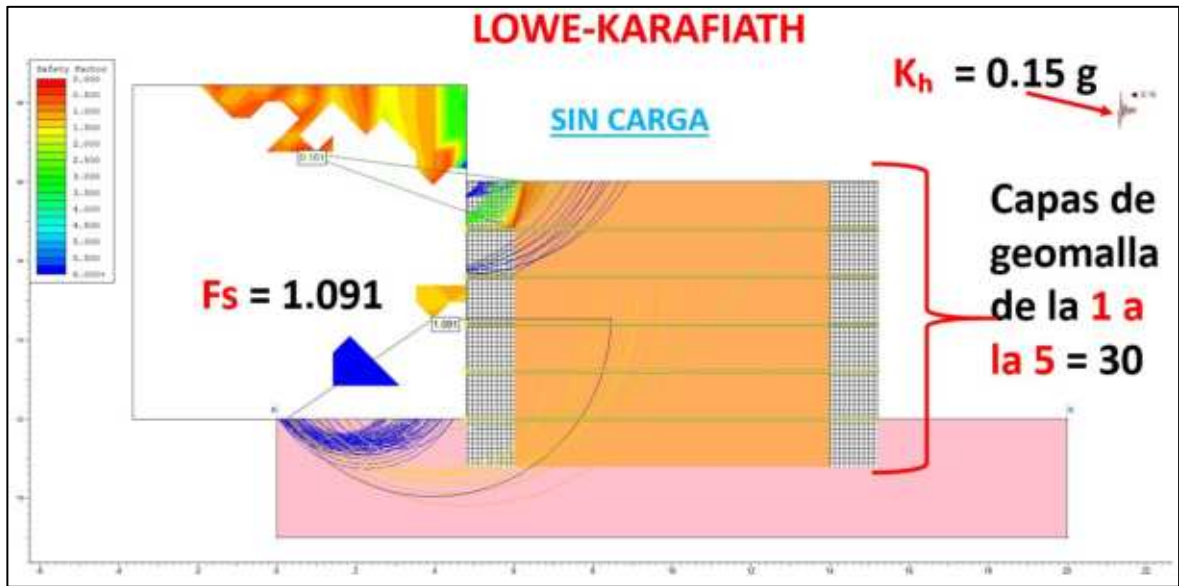
Fuente: Elaboración propia.

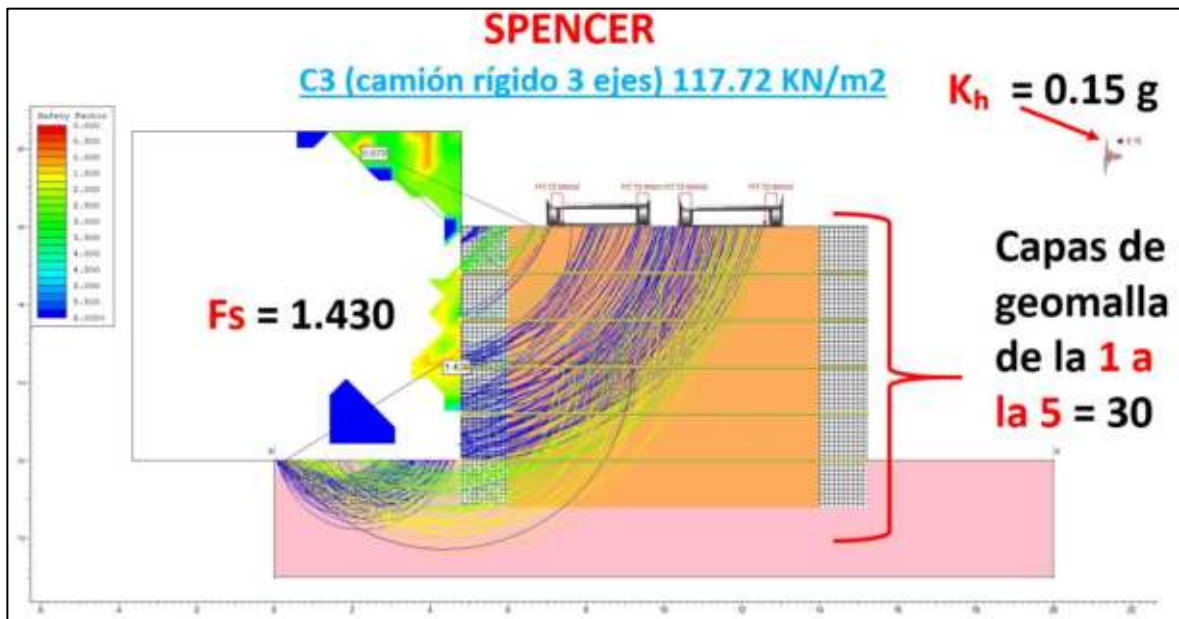
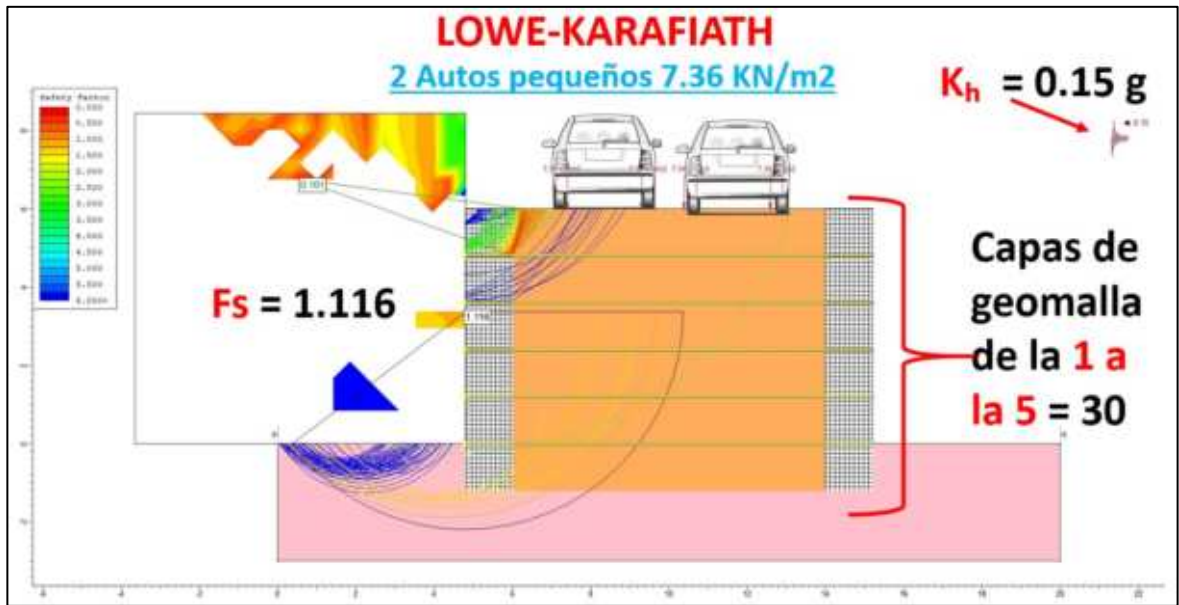
Los valores mostrados en el apartado  $T_{ult}$  corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 5 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el Fs muestra cifras positivas.

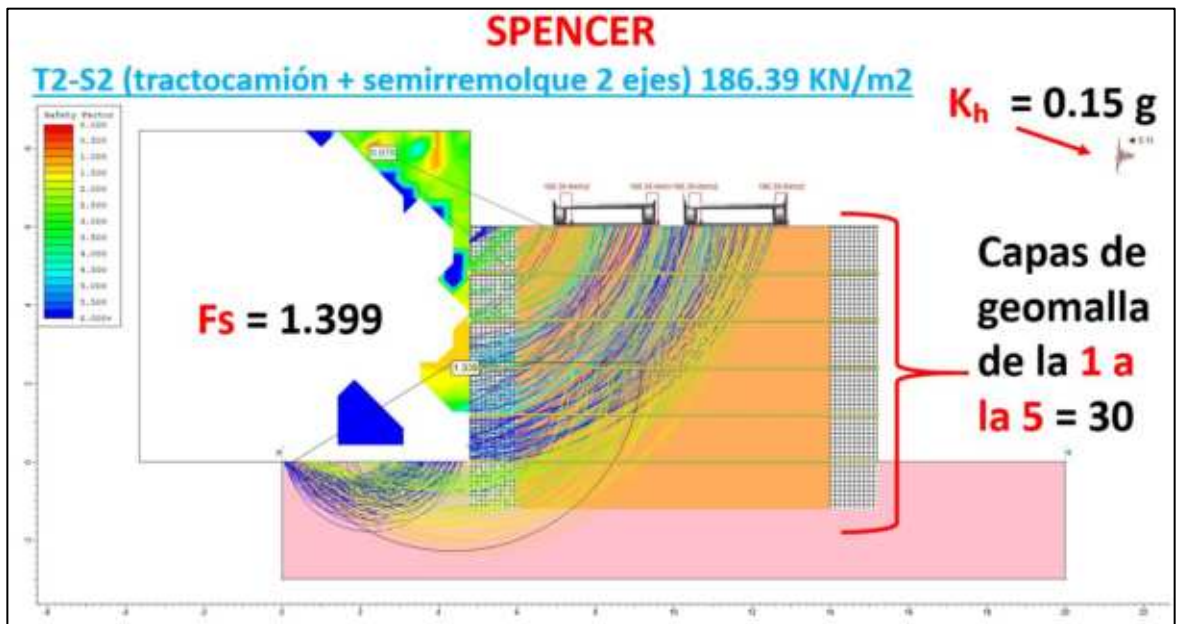
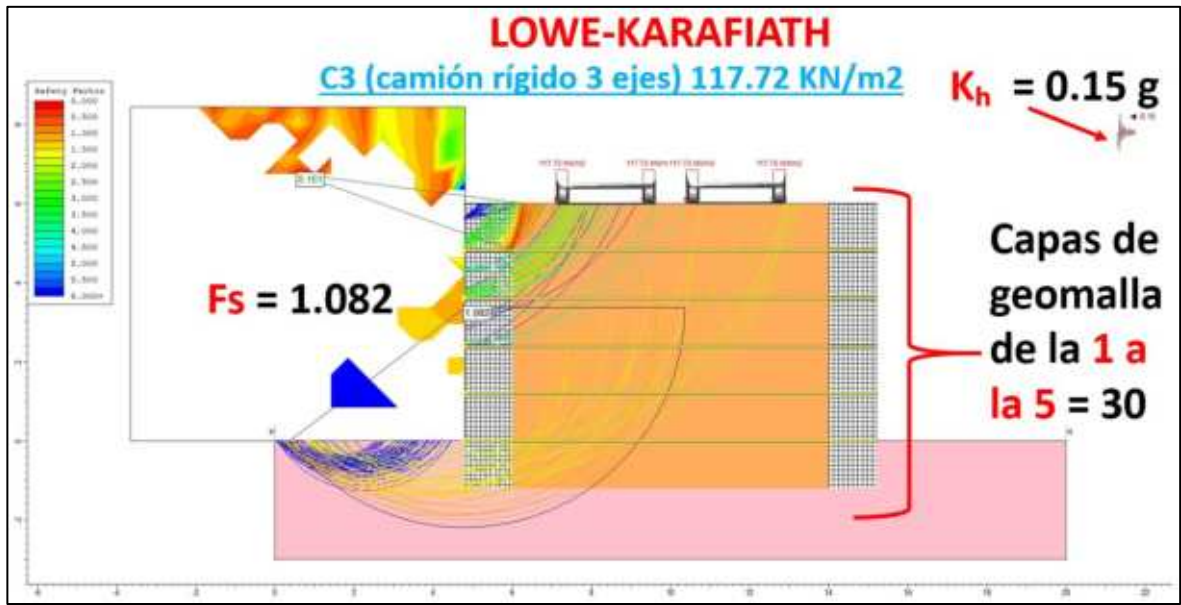
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 8 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes

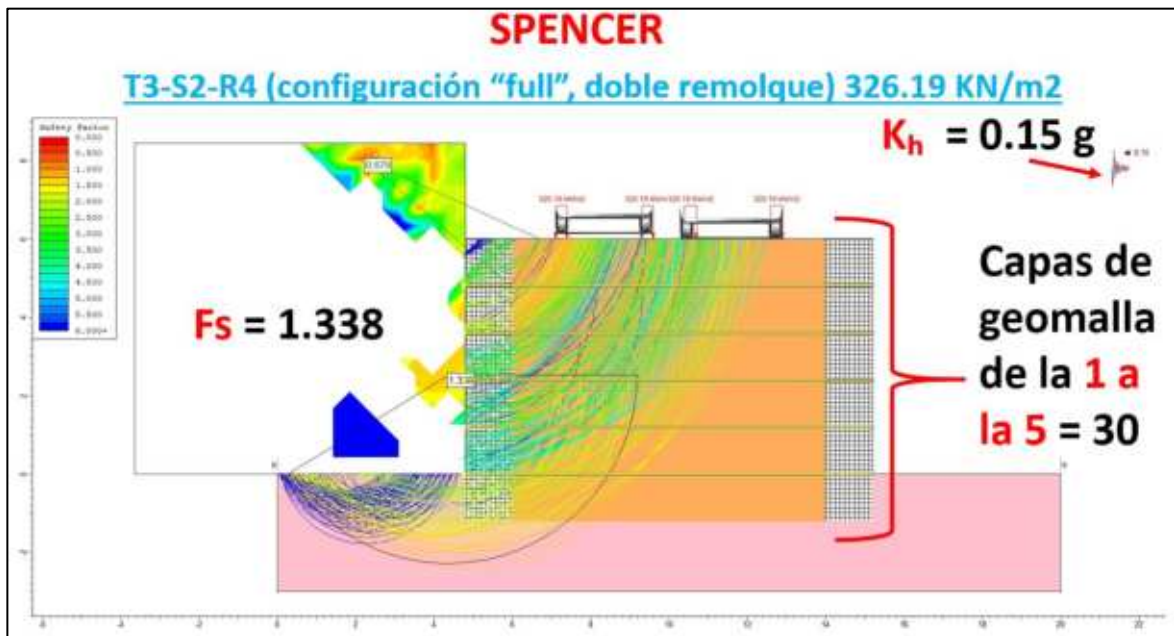
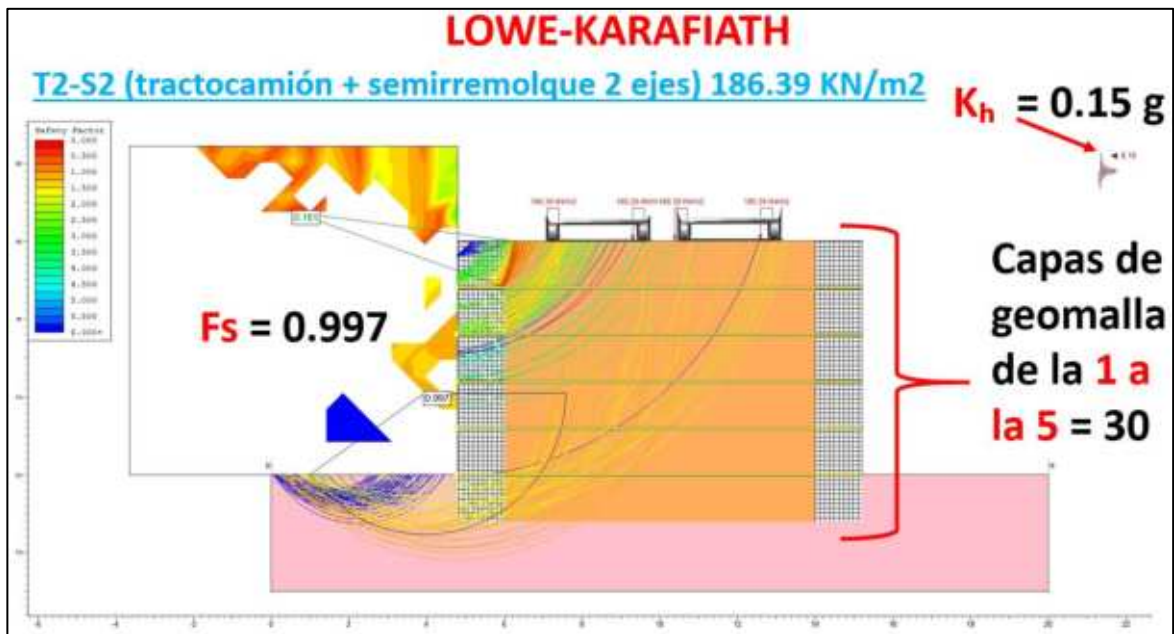
incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.











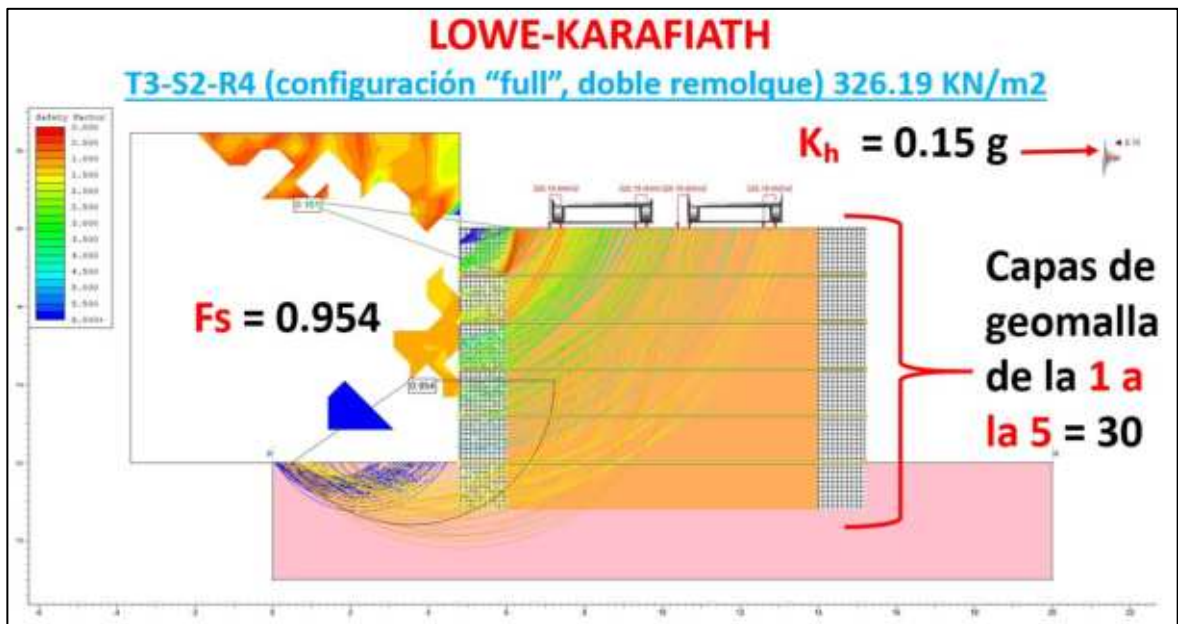


Figura 37. Escenario gráfico Prototipo 8 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

Los valores presentados en la sección de Tult corresponden a las tensiones movilizadas en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, consideradas en este caso del 1 al 5, lo que permite identificar su aporte dentro del relleno armado. De los resultados obtenidos para la condición de análisis con separación vertical  $SV = 1.20$  m, se observa que a partir de la condición descargada las geomallas alcanzan su nivel máximo de tensión movilizada (30 kN/m y 40 kN/m), lo que demuestra que el sistema de refuerzo se activa desde las etapas iniciales debido al confinamiento del suelo.

Para la condición descargada se obtienen factores de seguridad de  $FS = 1.504$  (Spencer) y  $FS = 1.092$  (Lowe-Karafiath) para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se alcanzan valores de  $FS = 1.633$  (Spencer) y  $FS = 1.236$  (Lowe-Karafiath), lo que indica una condición estable del sistema. en ambos casos.

Al incorporar la carga correspondiente a un automóvil pequeño, los coeficientes de seguridad se mantienen prácticamente constantes, con valores de  $FS = 1,499$  y  $1,079$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , y  $FS = 1,712$  y  $1,227$  para la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$ . Esto indica que este nivel de carga no genera un impacto significativo en la estabilidad general del sistema.

En el caso del camión rígido C3 se observa una ligera disminución en los factores de seguridad, alcanzando  $FS = 1.427$  y  $1.082$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , mientras que para la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$  se obtienen valores de  $FS = 1.516$  y  $1.177$ , mostrando una mejora en la estabilidad debido al aumento de la resistencia del refuerzo.

Esta tendencia continúa para la configuración T2-S2, donde los factores de seguridad son  $FS = 1,399$  y  $1,000$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , y  $FS = 1,463$  y  $1,162$  para la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$ . En este caso, el método Lowe-Karafiath presenta un valor límite de estabilidad ( $FS = 1.000$ ) para la geomalla de menor resistencia, mientras que la geomalla de mayor capacidad mantiene condiciones aceptables.

Finalmente, para la condición más crítica correspondiente a la configuración T3-S2-R4 (doble remolque), se obtienen valores de  $FS = 1.361$  y  $0.955$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , indicando una condición inestable según el método de Lowe-Karafiath. Por otro lado, la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$  presenta valores de  $FS = 1.450$  y  $1.011$ , lo que refleja una condición cercana al límite de estabilidad, pero aún aceptable.

En términos generales, los resultados muestran que los factores de seguridad disminuyen a medida que aumenta la carga aplicada, llegando a condiciones críticas en configuraciones de carga pesada. Asimismo, el uso de geomallas de mayor resistencia ( $40 \text{ kN/m}$ ) mejora el rendimiento del sistema, aumentando los factores de seguridad y aportando una mayor estabilidad global, aunque sin eliminar por completo la influencia de las cargas más exigentes.

9. **PROTOTIPO 9: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 1.25 METROS SIN NORMATIVA:**

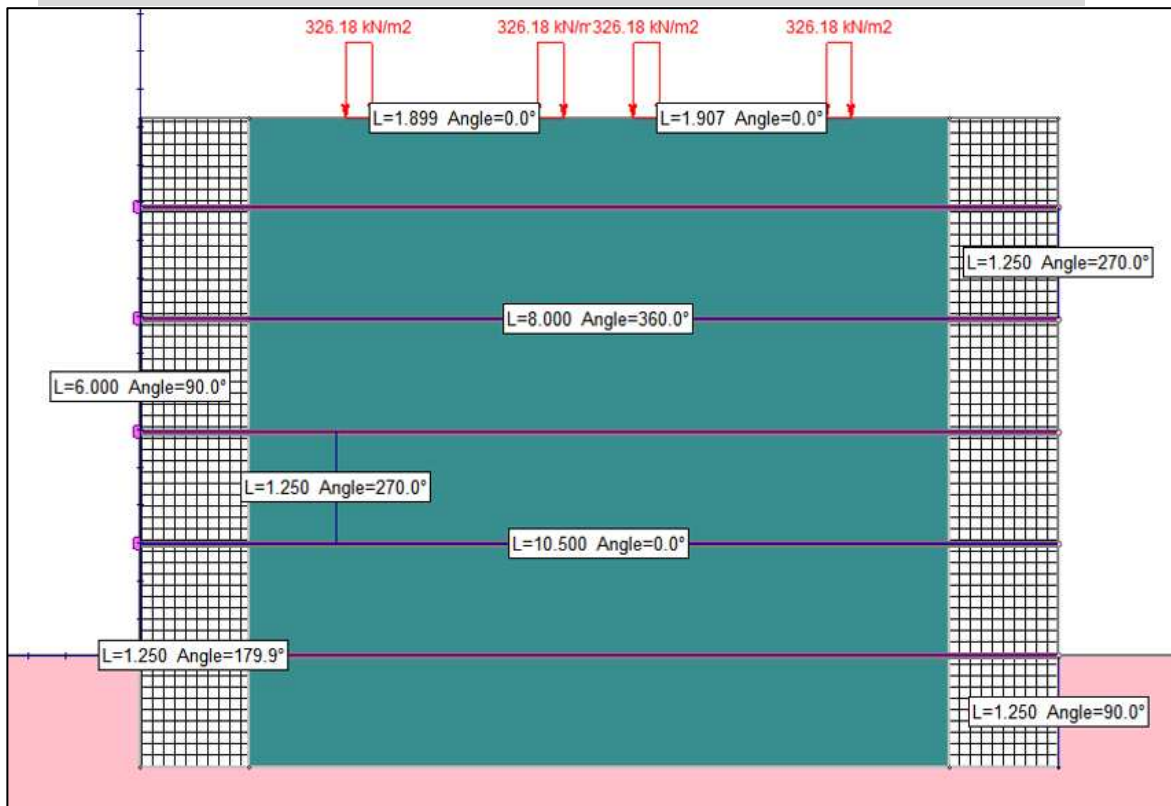


Figura 38. Escenario gráfico del prototipo 9 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 38 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 1.25 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 10.50 m, correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de

vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°, representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1.25 m. Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de 30 kN/m y 40 kN/m, respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos tienen 1.25 m de altura y un espesor equivalente a la separación vertical de las geomallas (1.25 m), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura, evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como

la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una **vía tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 1.75 m de cada lado, alcanzando un ancho de corona de 10.50 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 39.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo

de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

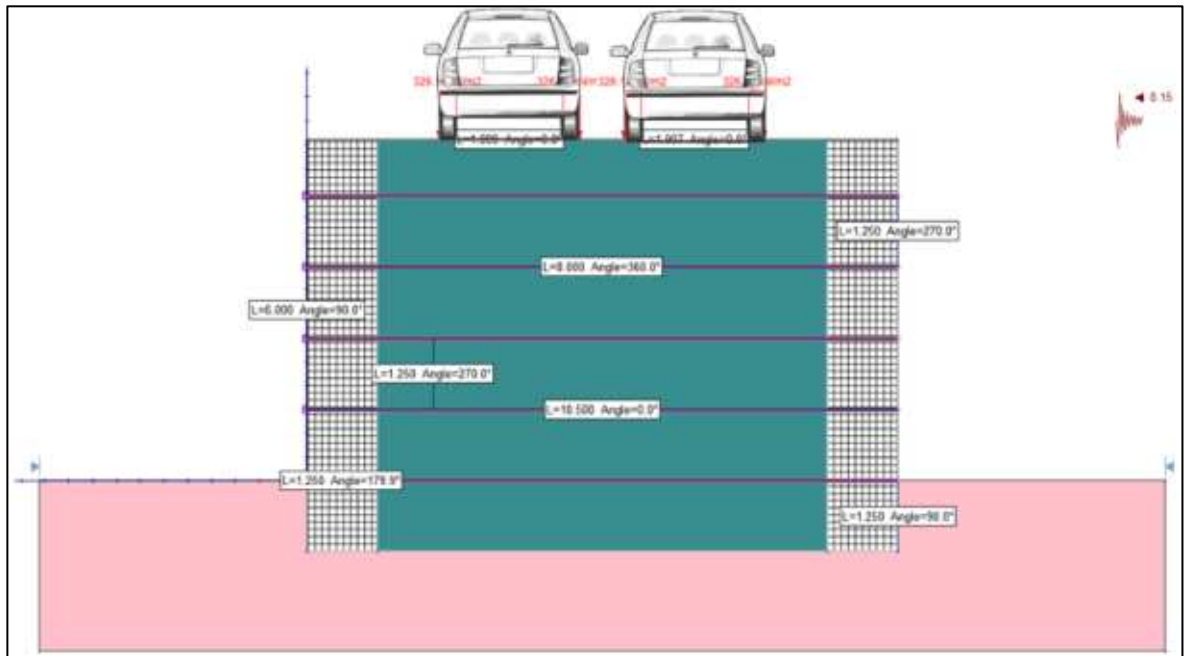


Figura 39. Representación de cargas en prototipo 9 a escala real Sv 1.25 m.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 33.

El análisis numérico desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

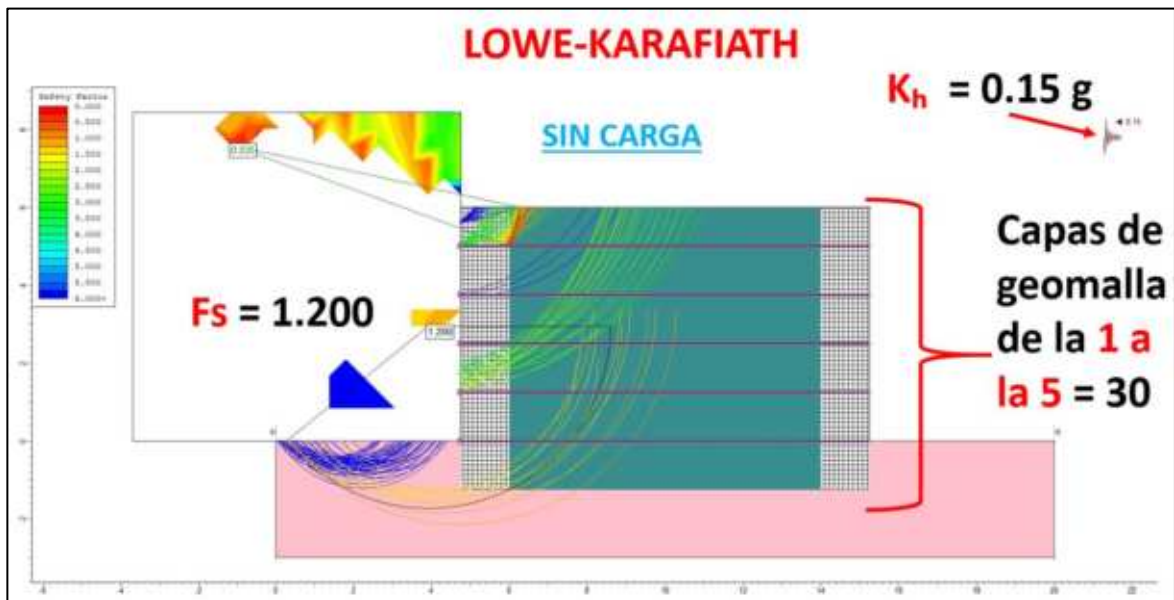
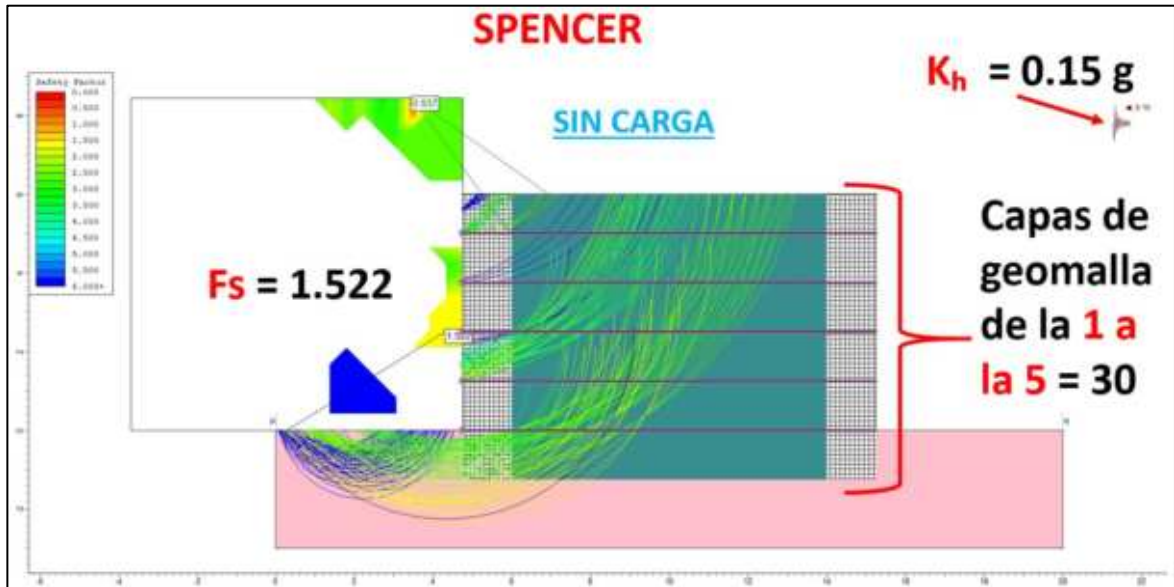
SIN Normativa a escala REAL 1.25m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso $\approx$ (kN) = $t \times 9.81$	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T <sub>ult</sub> 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 5	Spencer (FS)	T <sub>ult</sub> 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 5
SIN Carga		-		1.521	30	1.142	30	1.648	40	1.254	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.513	30	1.139	30	1.640	40	1.254	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.458	30	1.094	30	1.563	40	1.192	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.431	30	1.044	30	1.542	40	1.139	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.361	30	0.967	30	1.406	40	1.045	40

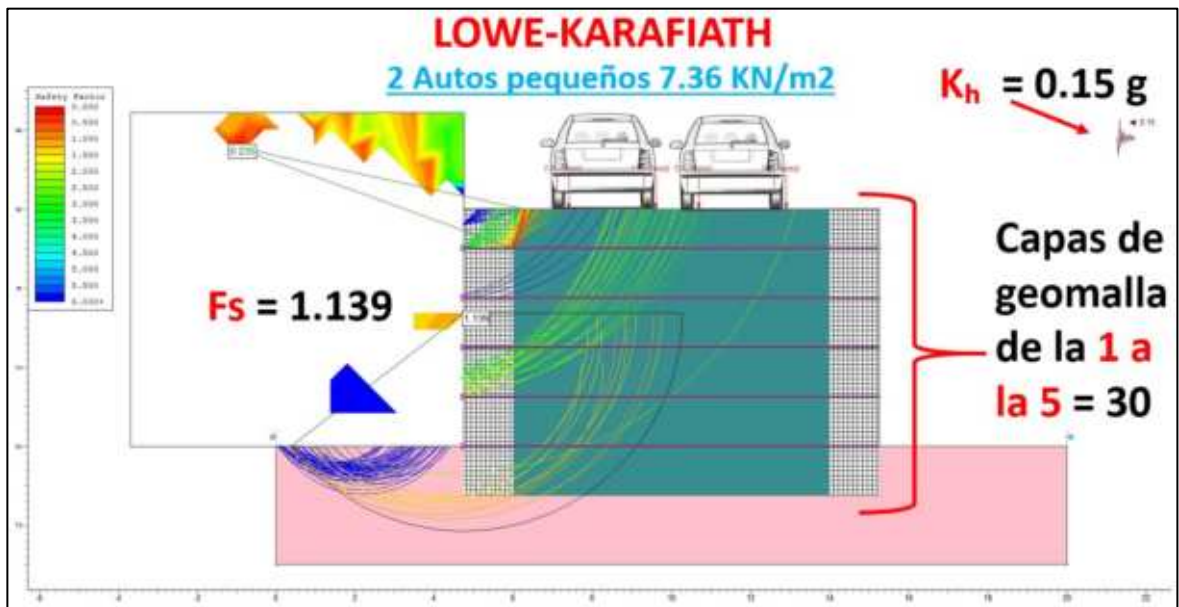
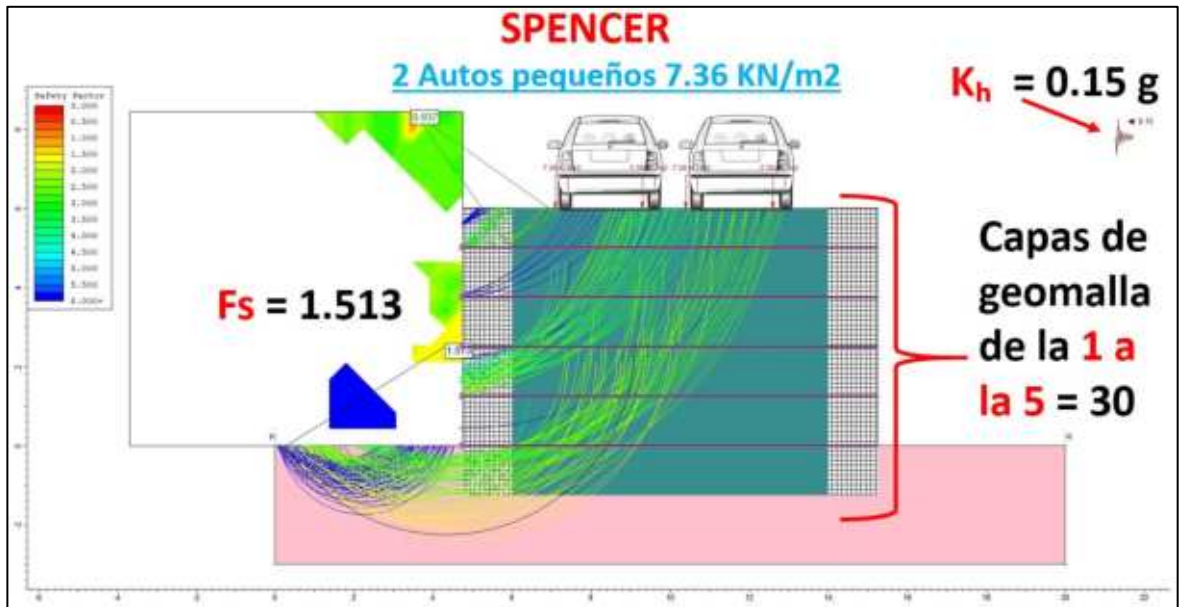
Fuente: Elaboración Propia

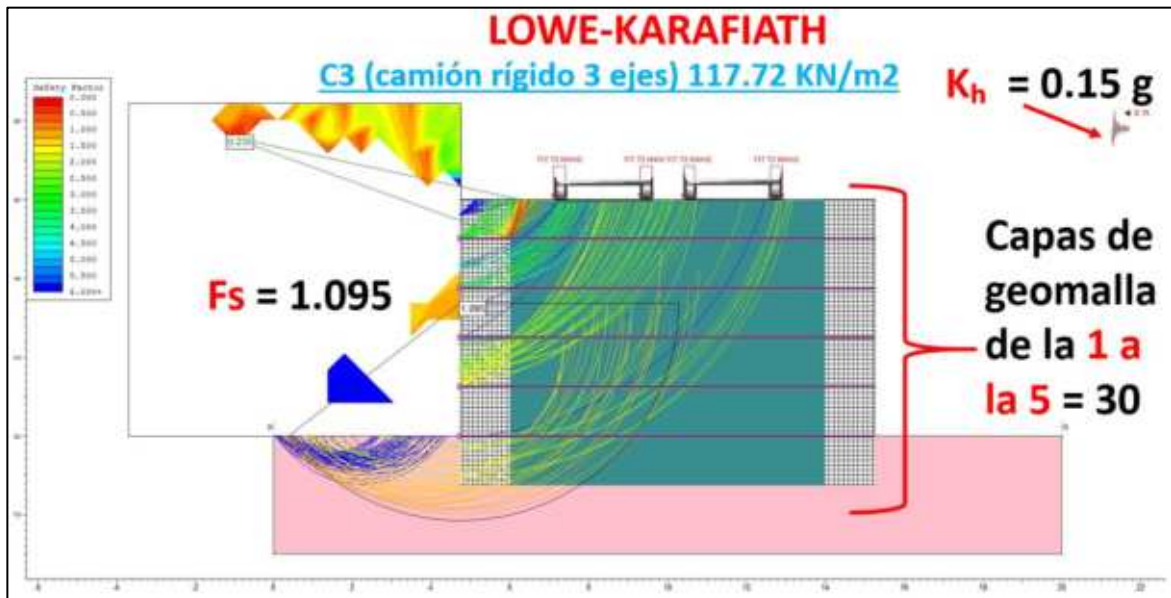
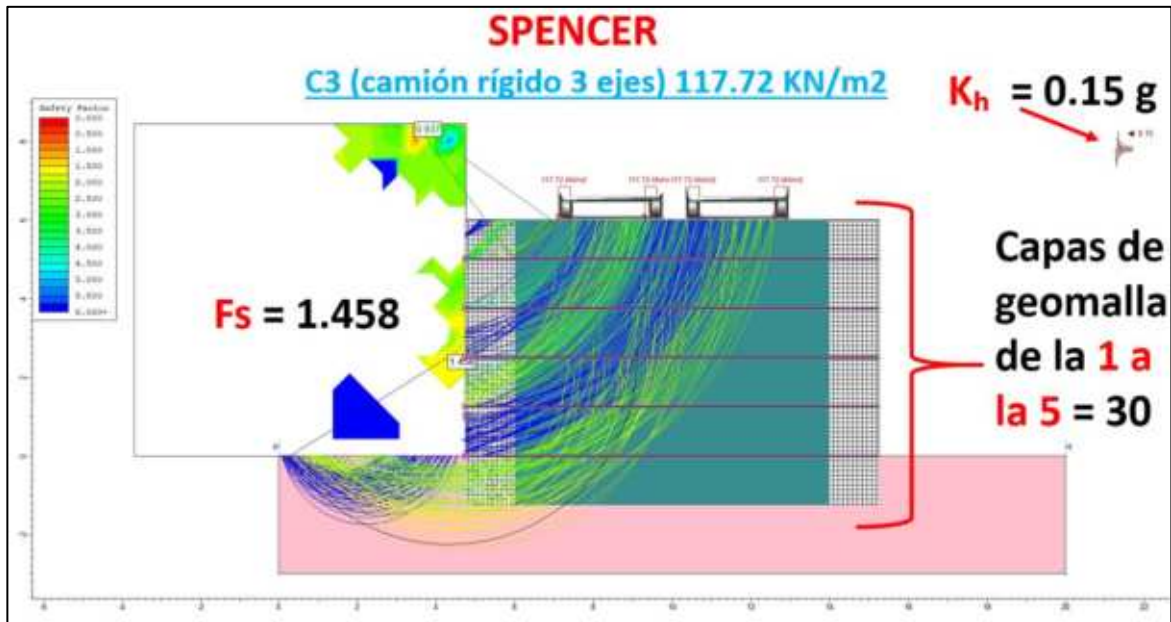
Los valores mostrados en el apartado T<sub>ult</sub> corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 5 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el Fs muestra cifras positivas.

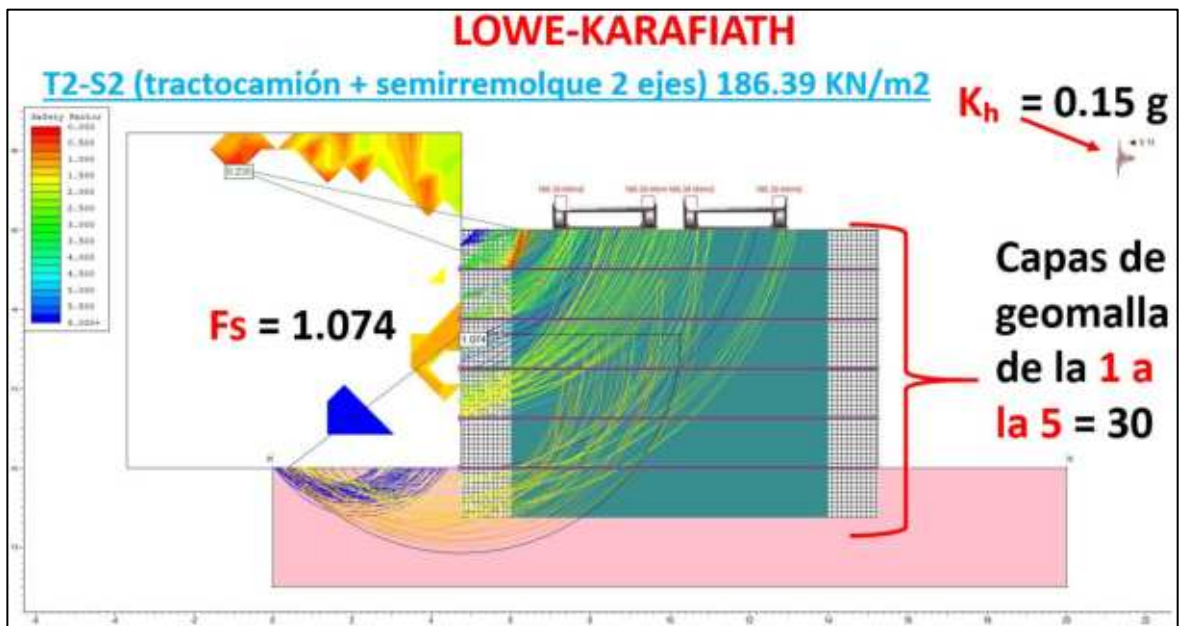
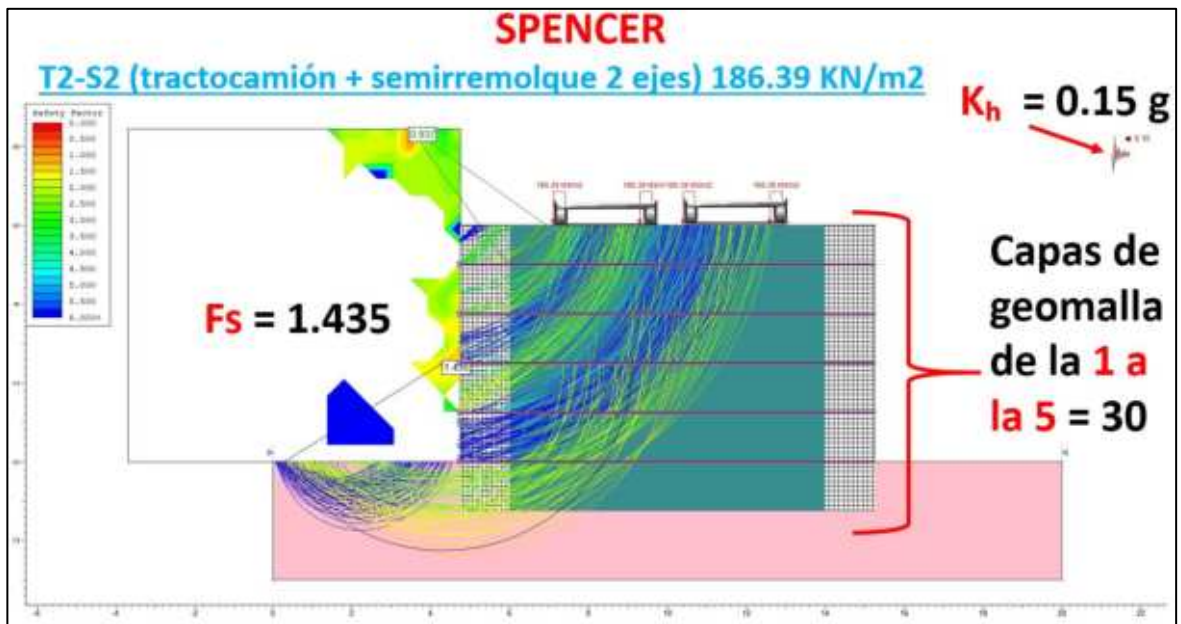
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 9 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para

la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.









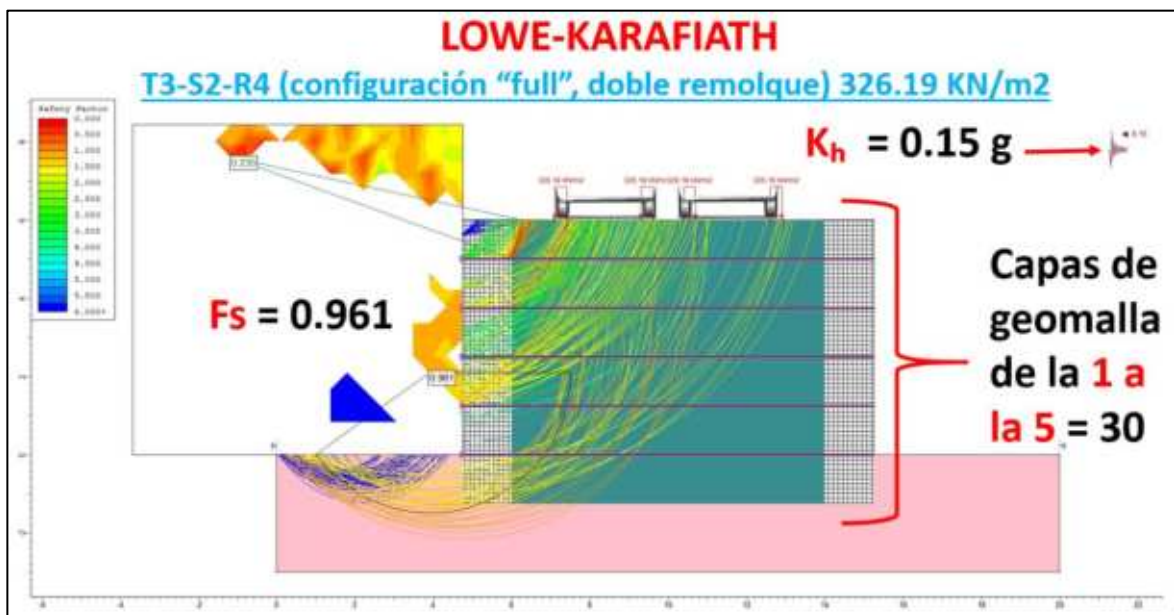
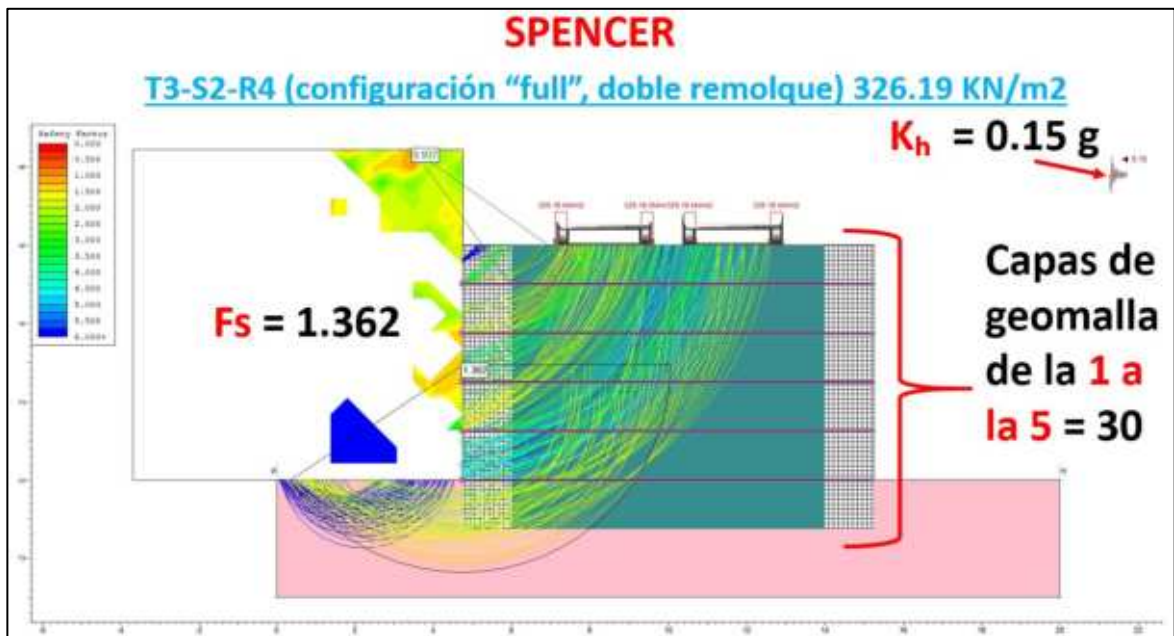


Figura 40. Escenario gráfico Prototipo 9 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

Los valores presentados en la sección de Tult corresponden a las tensiones movilizadas en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, consideradas en este caso del 1 al 5, lo que permite identificar su

aporte dentro del relleno armado. De los resultados obtenidos para la condición de análisis con separación vertical  $SV = 1.25$  m, se observa que a partir de la condición descargada las geomallas alcanzan su nivel máximo de tensión movilizada (30 kN/m y 40 kN/m), lo que demuestra que el sistema de refuerzo se activa desde las etapas iniciales debido al confinamiento del suelo.

Para la condición sin carga se obtienen factores de seguridad de  $FS = 1.522$  (Spencer) y  $FS = 1.200$  (Lowe-Karafiath) para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se alcanzan valores de  $FS = 1.650$  (Spencer) y  $FS = 1.254$  (Lowe-Karafiath), lo que indica una condición estable del sistema. en ambos casos.

Al incorporar la carga correspondiente a un automóvil pequeño, los coeficientes de seguridad se mantienen prácticamente constantes, con valores de  $FS = 1.458$  y  $1.139$  para la geomalla de 30 kN/m, y  $FS = 1.435$  y  $1.163$  para la geomalla de 40 kN/m. Esto indica que este nivel de carga no genera un impacto significativo en la estabilidad general del sistema.

En el caso del camión rígido C3 se observa una ligera disminución en los factores de seguridad, alcanzando  $FS = 1.458$  y  $1.139$  para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se obtienen valores de  $FS = 1.565$  y  $1.193$  mostrando una mejora en la estabilidad debido al aumento de la resistencia del refuerzo.

Esta tendencia continúa para la configuración T2-S2, donde los factores de seguridad son  $FS = 1.435$  y  $1.074$  para la geomalla de 30 kN/m, y  $FS = 1.545$  y  $1.163$  para la geomalla de 40 kN/m. En este caso, aunque ambos sistemas se mantienen en condiciones estables, se observa una aproximación progresiva hacia valores críticos, especialmente en el método de Lowe-Karafiath.

Finalmente, para la condición más crítica correspondiente a la configuración T3-S2-R4 (doble remolque), se obtienen valores de  $FS = 1.362$  y  $0.961$  para la geomalla de 30 kN/m, indicando una condición

inestable según el método de Lowe-Karafiath. Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta valores de  $FS = 1.409$  y  $1.038$ , lo que refleja una condición cercana al límite de estabilidad, pero aún aceptable.

En términos generales, los resultados muestran que los factores de seguridad disminuyen a medida que aumenta la carga aplicada, llegando a condiciones críticas en escenarios de carga pesada. Asimismo, el uso de geomallas de mayor resistencia (40 kN/m) mejora el rendimiento del sistema, aumentando los factores de seguridad y aportando una mayor estabilidad global, aunque sin eliminar por completo la influencia de las condiciones de carga más exigentes.

10. **PROTOTIPO 10: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 1.50 METROS SIN NORMATIVA:**

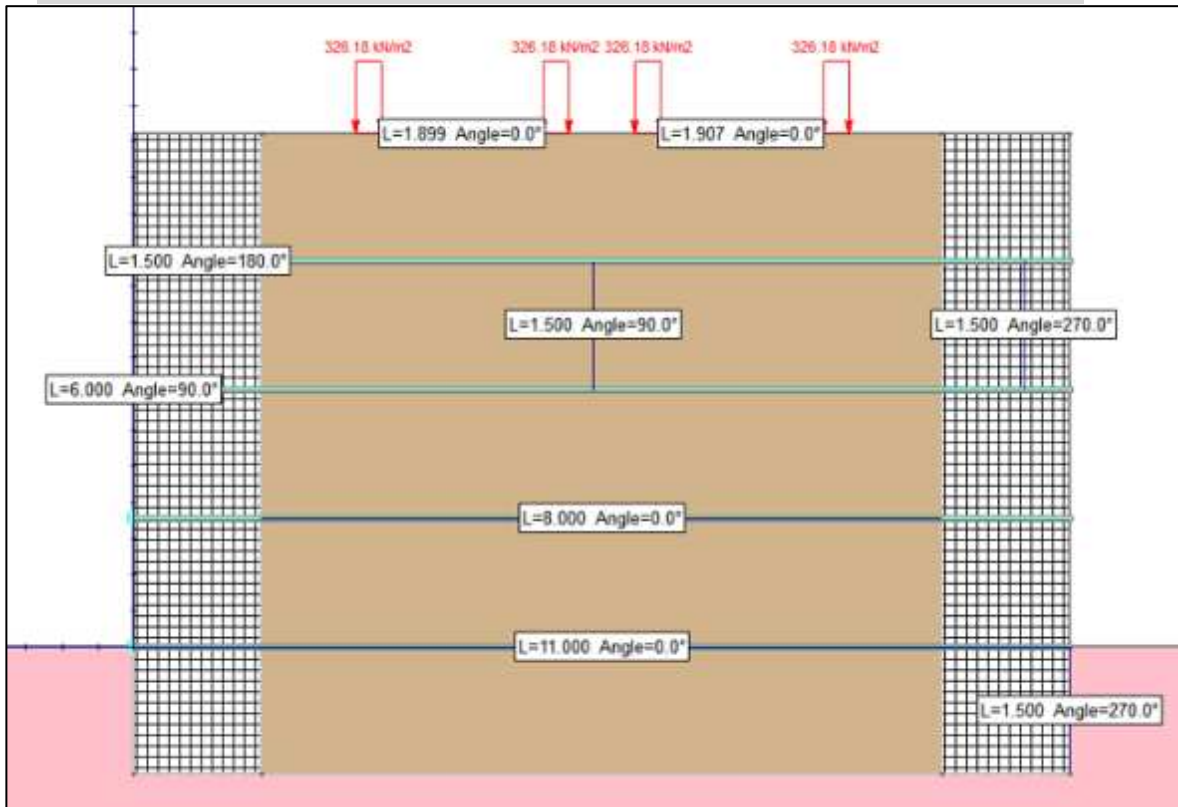


Figura 41. Escenario gráfico del prototipo 10 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 41 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 1.50 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 11 m, correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de

vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°, representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1.50 m. Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de 30 kN/m y 40 kN/m, respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos tienen 1.50 m de altura y un espesor equivalente a la separación vertical de las geomallas (1.50 m), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura, evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como

la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una **vía tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 2 m de cada lado, alcanzando un ancho de corona de 11 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 42.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo

de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

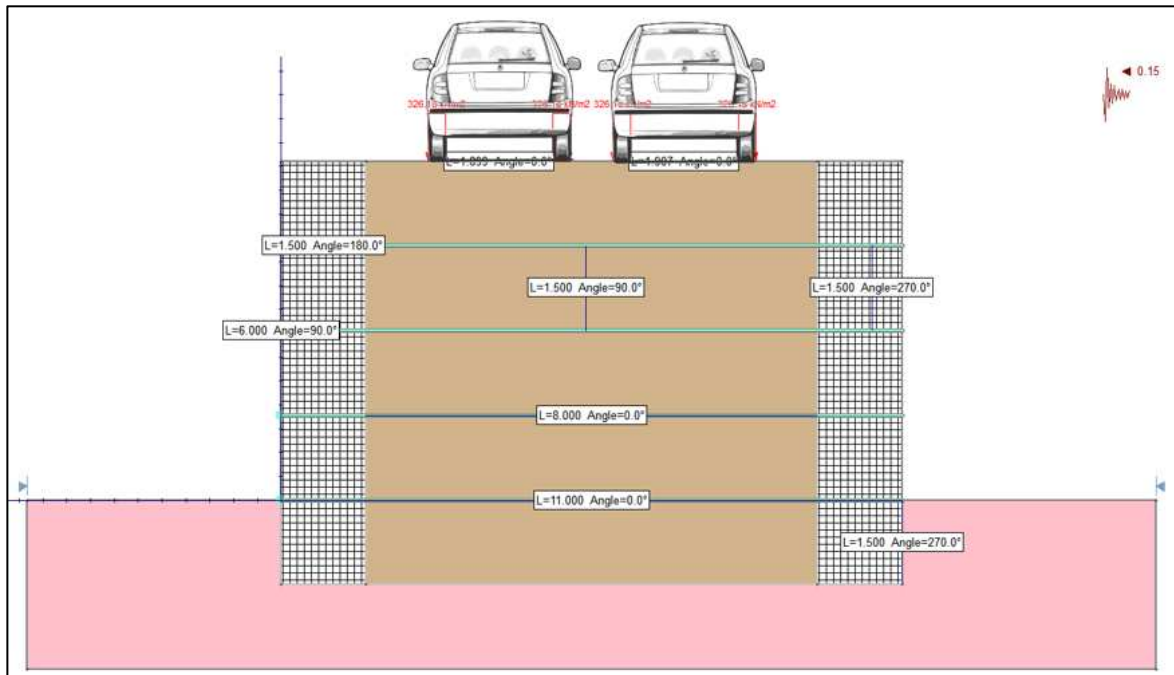


Figura 42. Representación de cargas en prototipo 10 a escala real Sv 1.50 m.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 34.

El análisis numérico desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

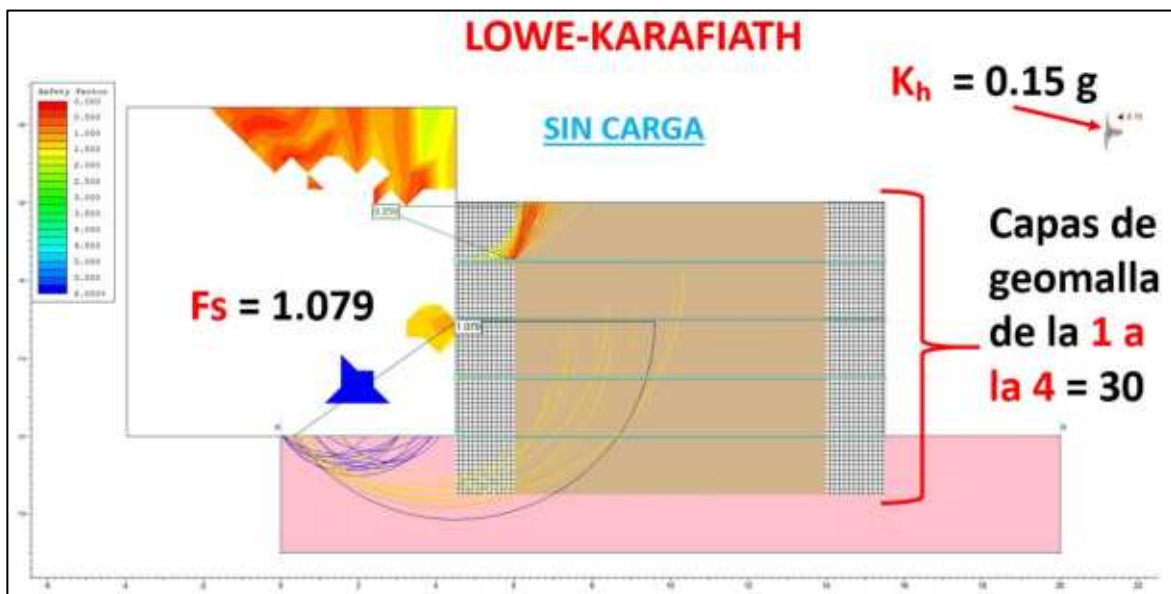
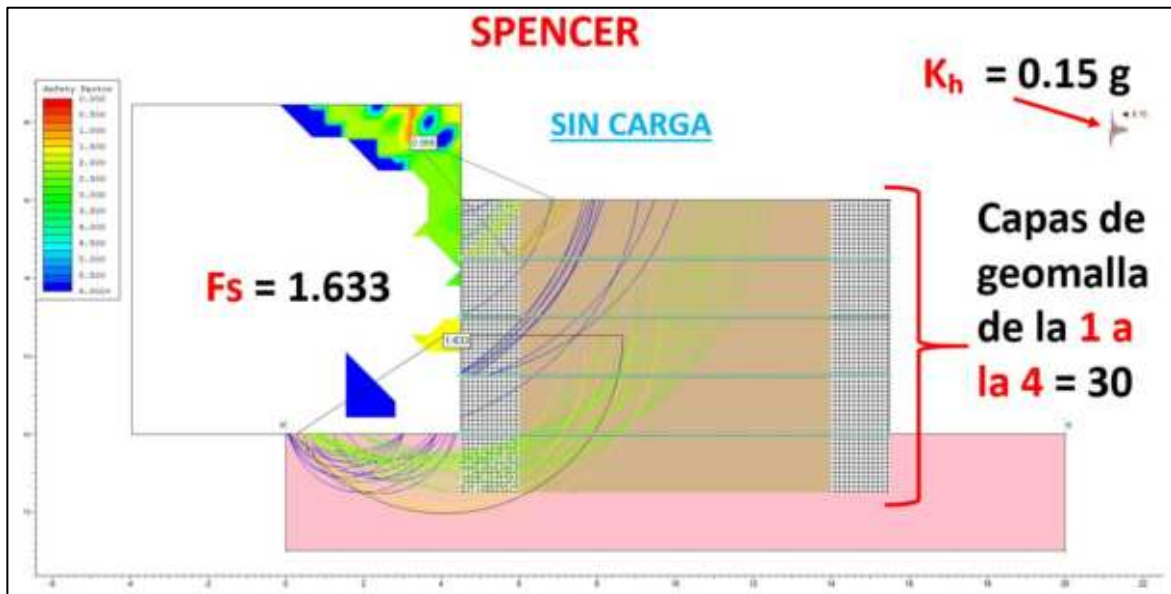
SIN Normativa a escala REAL 1.50m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (Fs)	T ult 1 al 4	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 4	Spencer (Fs)	T ult 1 al 4	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 4
SIN Carga		-		1.633	30	1.079	30	1.702	40	1.250	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.63	30	1.077	30	1.691	40	1.249	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.579	30	1.052	30	1.628	40	1.108	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.546	30	1.035	30	1.571	40	1.083	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.504	30	0.976	30	1.555	40	1.047	40

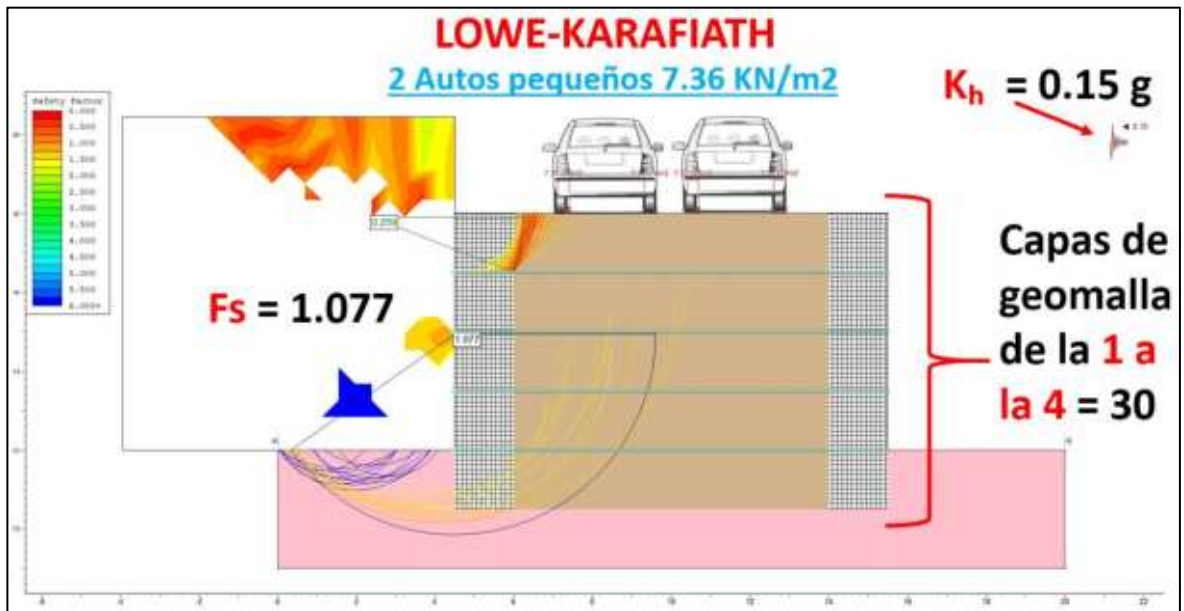
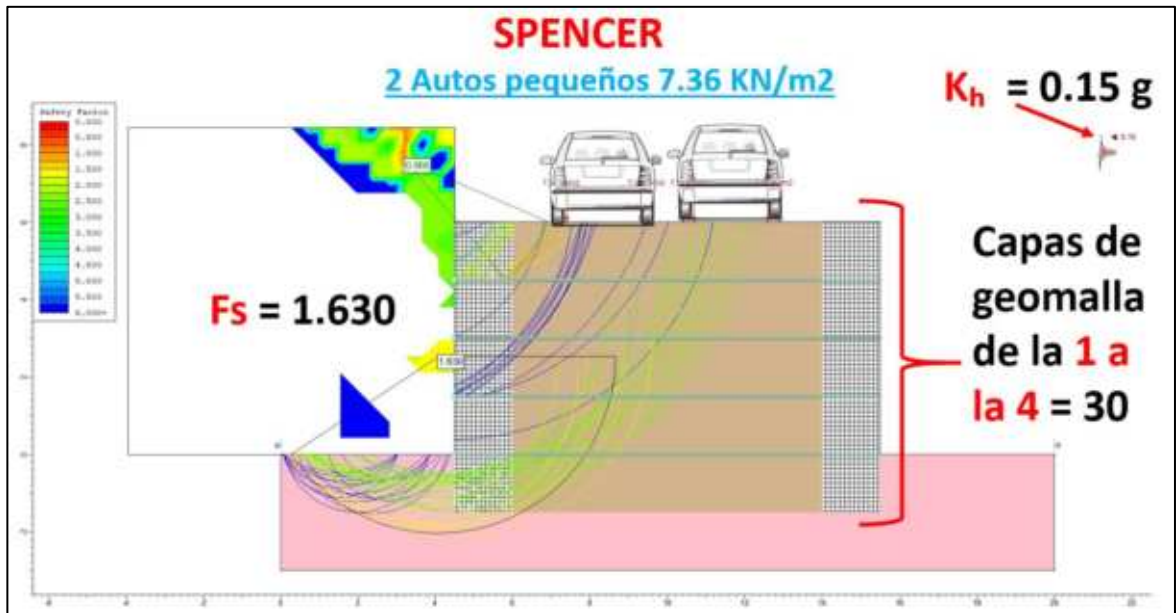
Fuente: Elaboración Propia

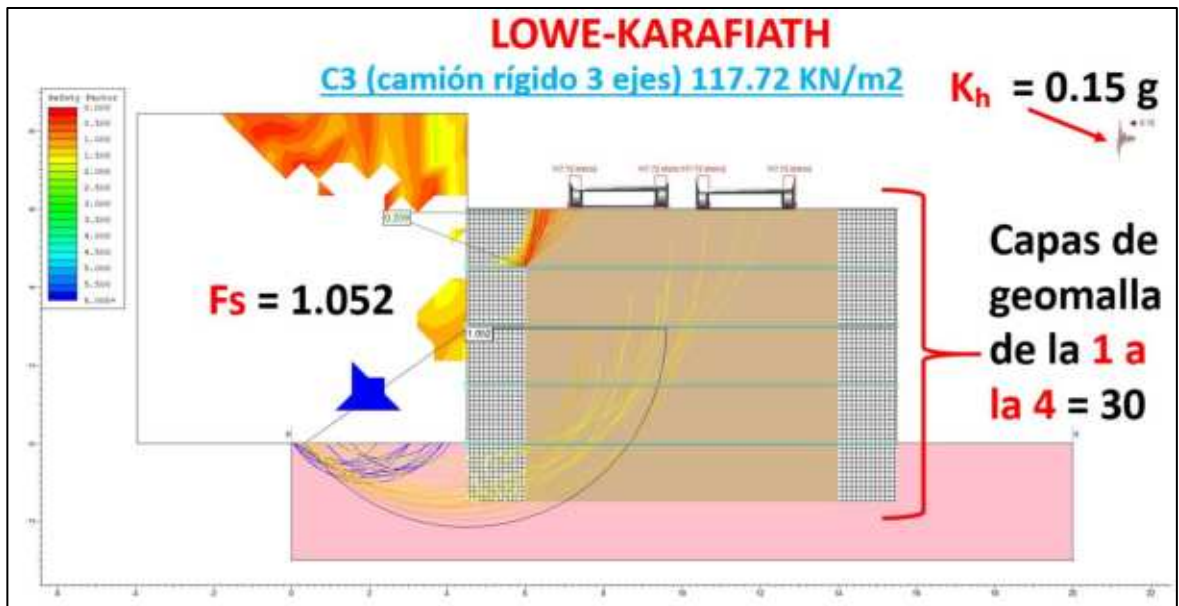
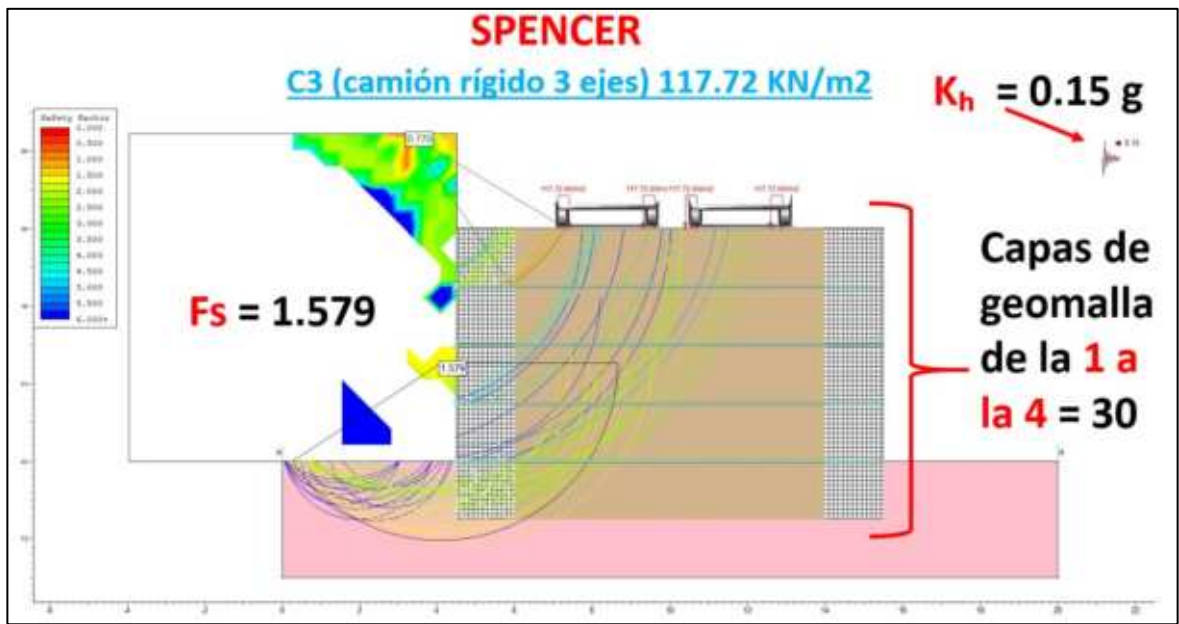
Los valores mostrados en el apartado  $T_{ult}$  corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 4 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el  $F_s$  muestra cifras positivas.

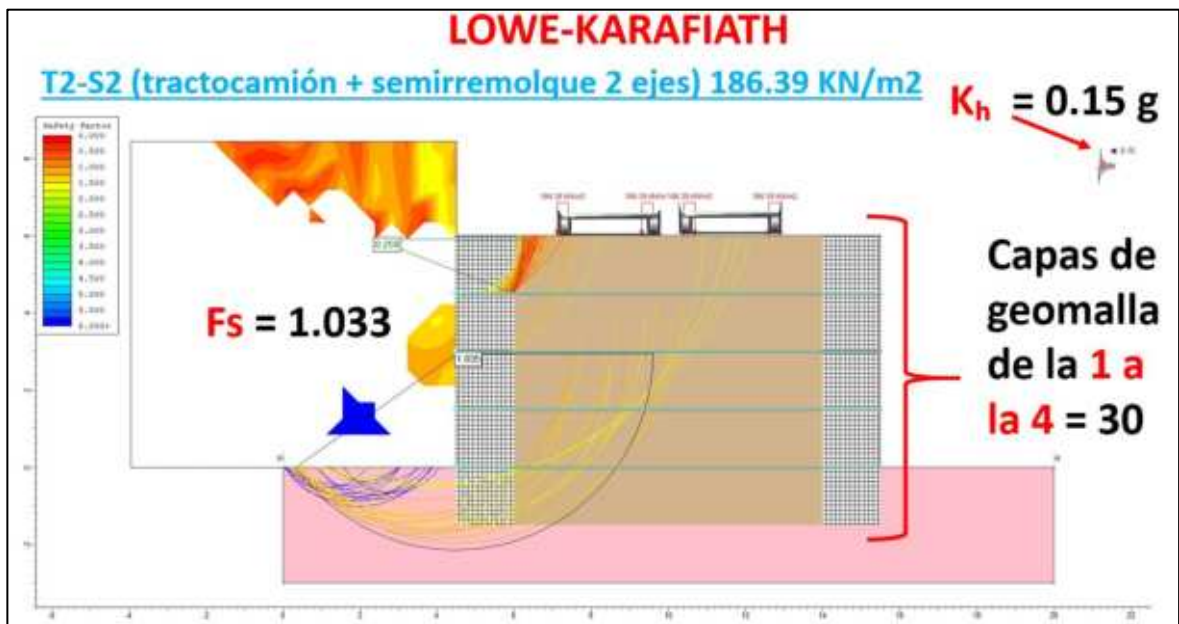
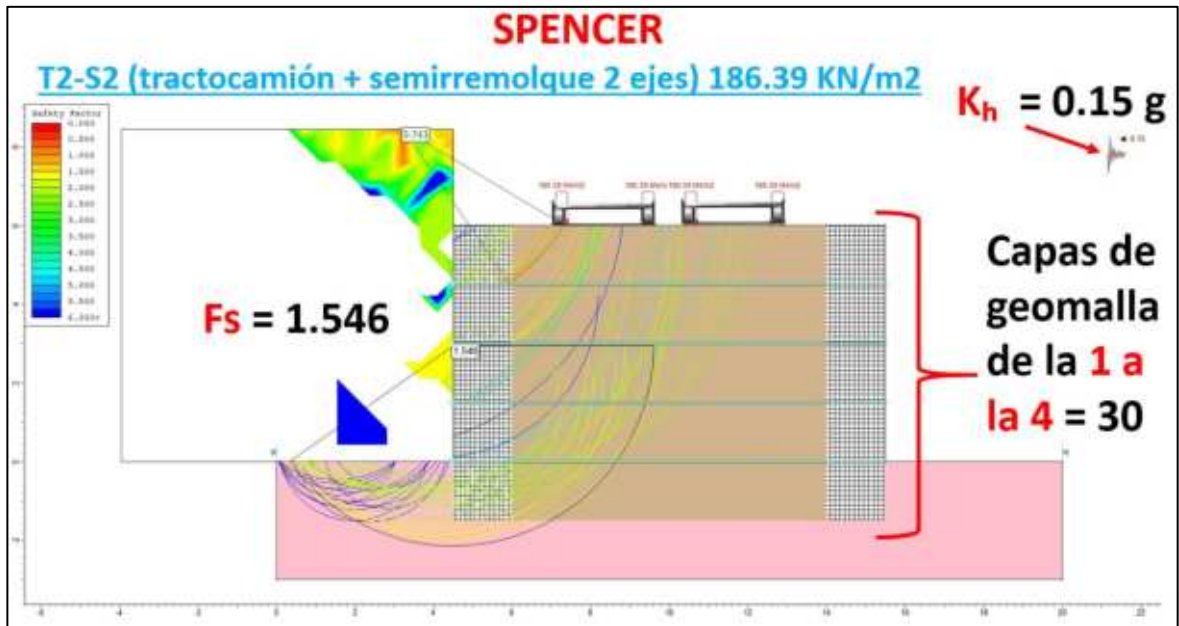
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 10 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para

la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.









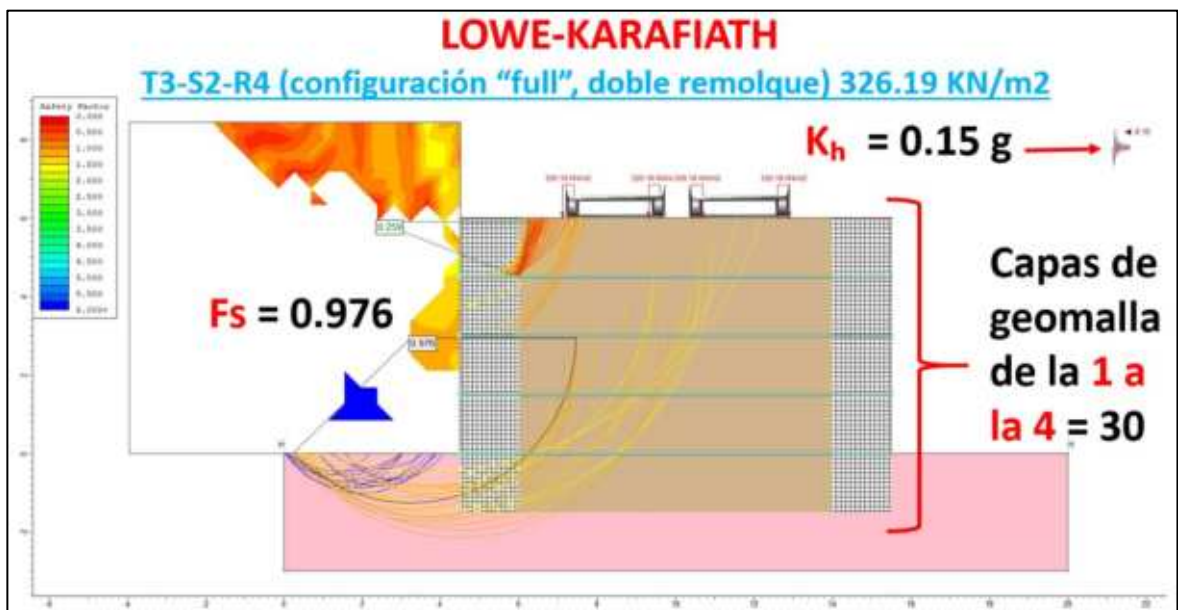
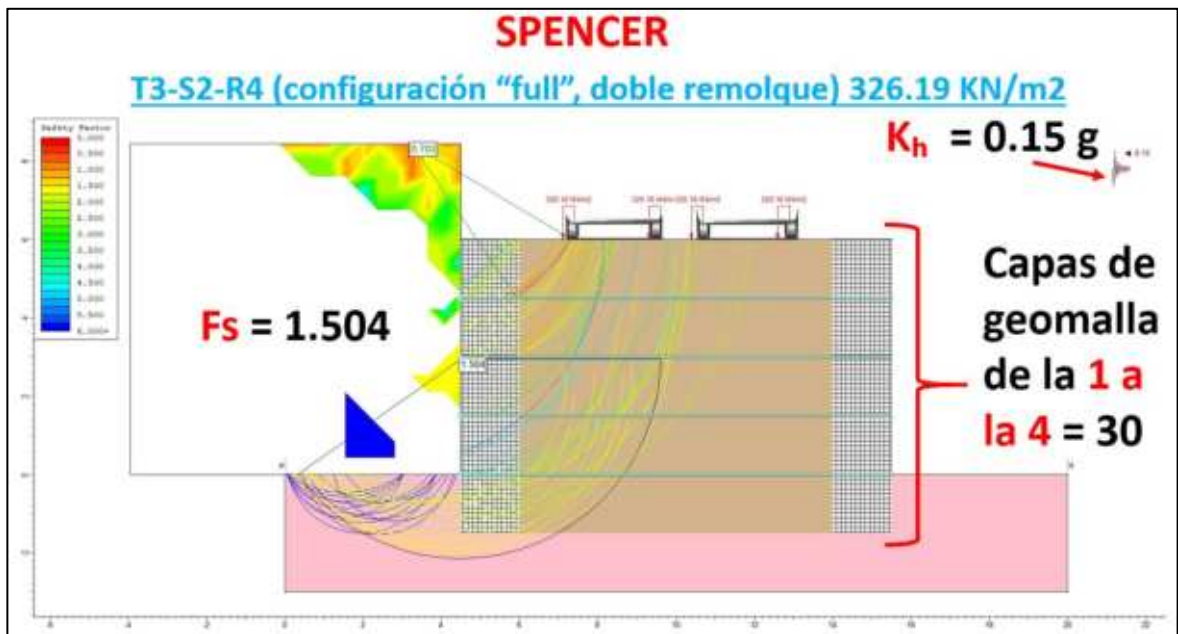


Figura 43. Escenario gráfico Prototipo 10 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

Los valores presentados en la sección de Tult corresponden a las tensiones movilizadas en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, consideradas en este caso del 1 al 4, lo que permite identificar su

aporte dentro del relleno armado. De los resultados obtenidos para la condición de análisis con separación vertical  $SV = 1.50$  m, se observa que a partir de la condición descargada las geomallas alcanzan su nivel máximo de tensión movilizada (30 kN/m y 40 kN/m), lo que demuestra que el sistema de refuerzo se activa desde las etapas iniciales debido al confinamiento del suelo.

Para la condición sin carga se obtienen factores de seguridad de  $FS = 1.633$  (Spencer) y  $FS = 1.079$  (Lowe-Karafiath) para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se alcanzan valores de  $FS = 1.702$  (Spencer) y  $FS = 1.250$  (Lowe-Karafiath), lo que indica una condición estable del sistema. en ambos casos.

Al incorporar la carga correspondiente a un automóvil pequeño, los coeficientes de seguridad se mantienen prácticamente constantes, con valores de  $FS = 1.630$  y  $1.077$  para la geomalla de 30 kN/m, y  $FS = 1.691$  y  $1.249$  para la geomalla de 40 kN/m. Esto indica que este nivel de carga no genera un impacto significativo en la estabilidad general del sistema.

En el caso del camión rígido C3 se observa una ligera disminución en los factores de seguridad, alcanzando  $FS = 1.579$  y  $1.052$  para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se obtienen valores de  $FS = 1.628$  y  $1.108$  mostrando una mejora en la estabilidad debido al aumento de la resistencia del refuerzo.

Esta tendencia continúa para la configuración T2-S2, donde los factores de seguridad son  $FS = 1.546$  y  $1.035$  para la geomalla de 30 kN/m, y  $FS = 1.571$  y  $1.083$  para la geomalla de 40 kN/m. En este caso, aunque ambos sistemas se mantienen en condiciones estables, se observa una aproximación progresiva hacia valores críticos, especialmente en el método de Lowe-Karafiath.

Finalmente, para la condición más crítica correspondiente a la configuración T3-S2-R4 (doble remolque), se obtienen valores de  $FS = 1.504$  y  $0.976$  para la geomalla de 30 kN/m, indicando una condición

inestable según el método de Lowe-Karafiath. Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta valores de  $FS = 1.555$  y  $1.047$ , lo que refleja una condición cercana al límite de estabilidad, pero aún aceptable.

En términos generales, los resultados muestran que los factores de seguridad disminuyen a medida que aumenta la carga aplicada, llegando a condiciones críticas en escenarios de cargas pesadas. Asimismo, el uso de geomallas de mayor resistencia (40 kN/m) mejora el rendimiento del sistema, aumentando los factores de seguridad y aportando una mayor estabilidad global, aunque sin eliminar por completo la influencia de las condiciones de carga más exigentes.

11. **PROTOTIPO 11: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS** SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAxIAL A UN **SV DE 2 METROS SIN NORMATIVA:**

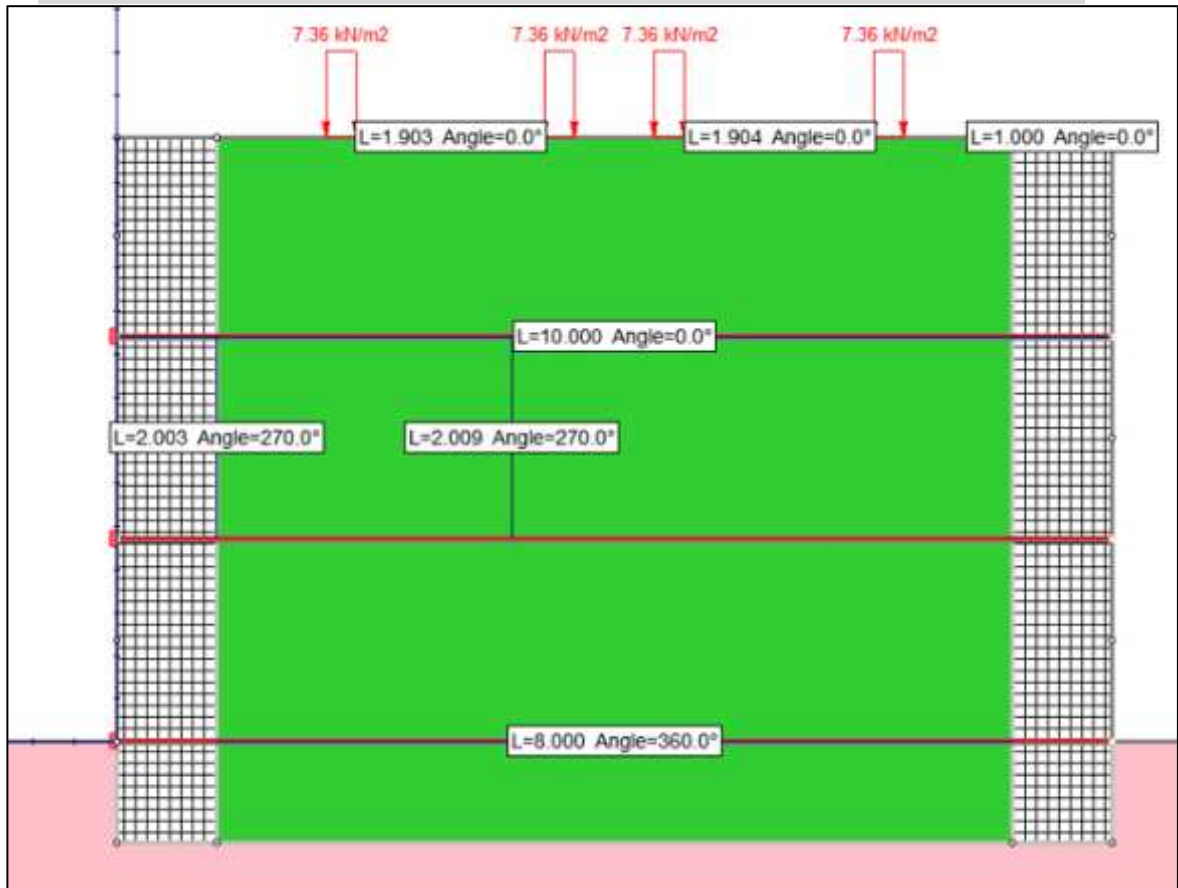


Figura 44. Escenario gráfico del prototipo 11 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 44 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 1 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 10 m,

correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de  $19.16 \text{ kN/m}^3$ , cohesión de  $10.79 \text{ kPa}$  y ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de  $2 \text{ m}$ . Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de  $30 \text{ kN/m}$  y  $40 \text{ kN/m}$ , respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos tienen  $2 \text{ m}$  de altura equivalente a la separación vertical de las geomallas y un espesor ( $1 \text{ m}$ ), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura,

evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una **vía tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 1.50 m de cada lado, alcanzando un ancho de corona de 10 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 45.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

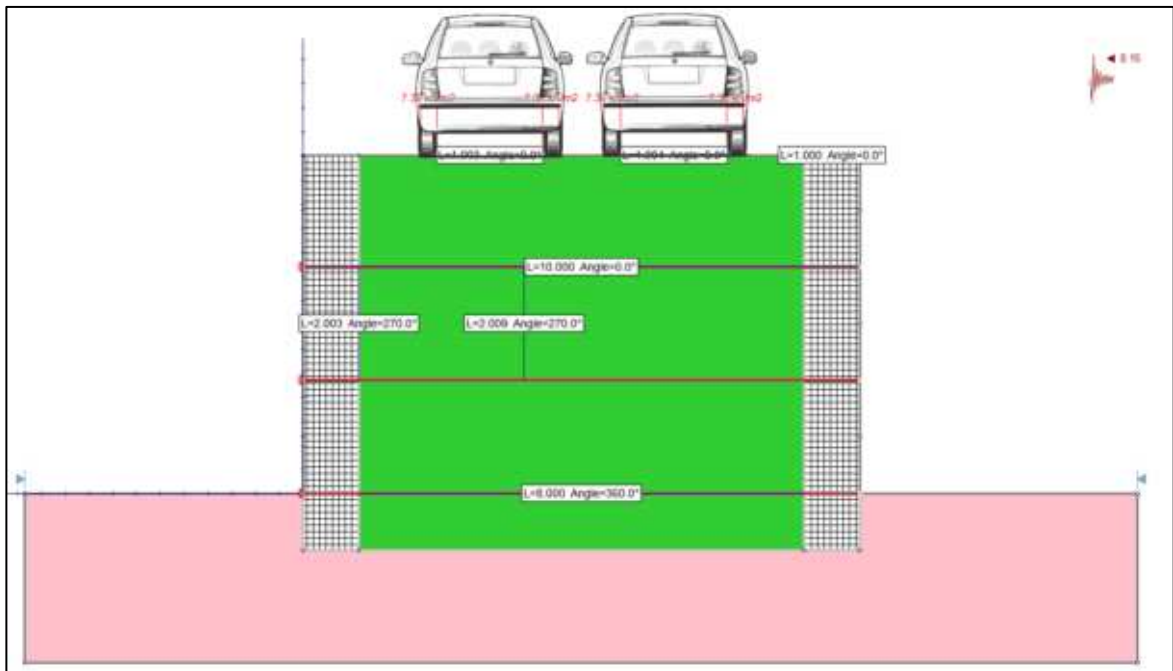


Figura 45. Representación de cargas en prototipo 11 a escala real Sv 2 m. Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 35.

El análisis numérico desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas

vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

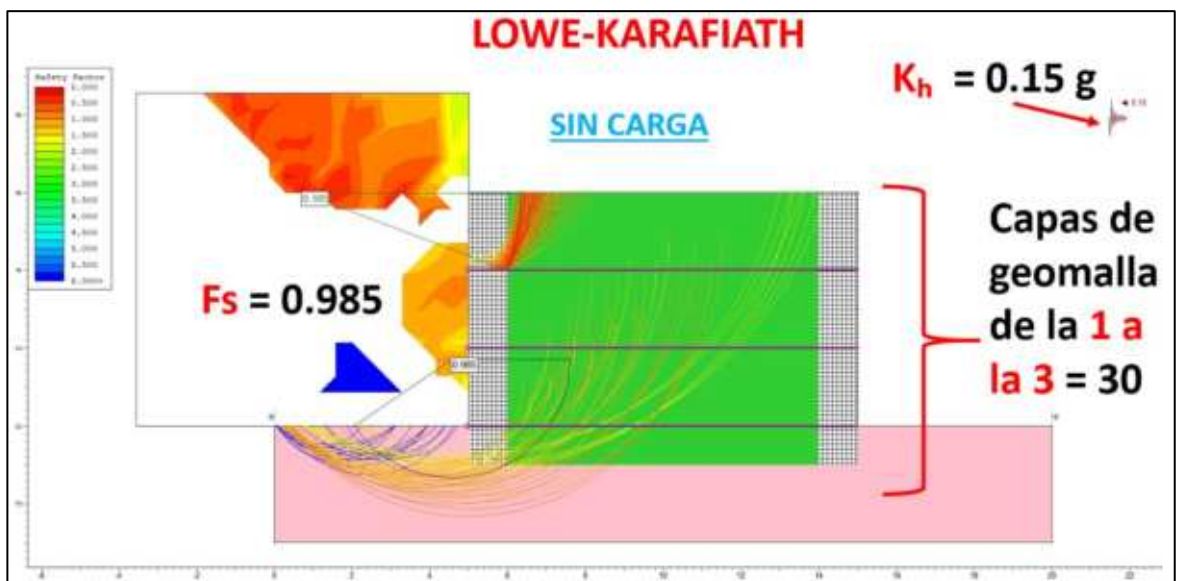
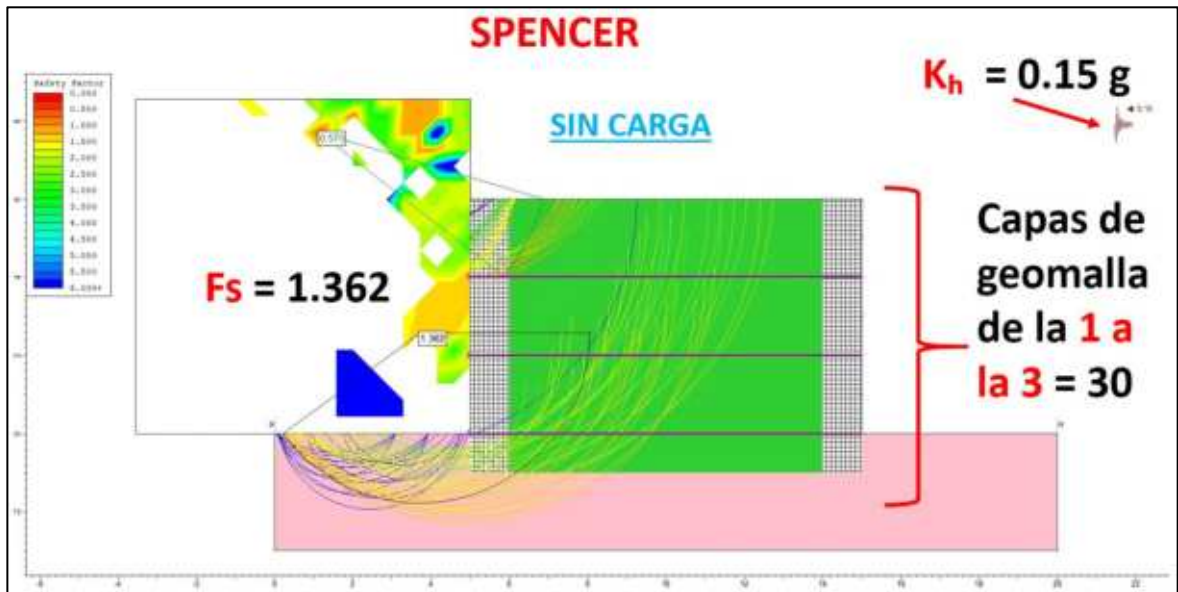
SIN Normativa escala REAL 2.00 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autoriza do (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 3	Lowe- Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 3	Spencer (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 3	Lowe- Karafiath (Fs)	T <sub>ult</sub> 1 al 3
SIN Carga	-			1.362	30	0.985	30	1.456	40	1.024	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.388	30	0.944	30	1.448	40	1.020	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.308	30	0.912	30	1.372	40	0.981	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.273	30	0.946	30	1.334	40	0.943	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.220	30	0.895	30	1.261	40	0.956	40

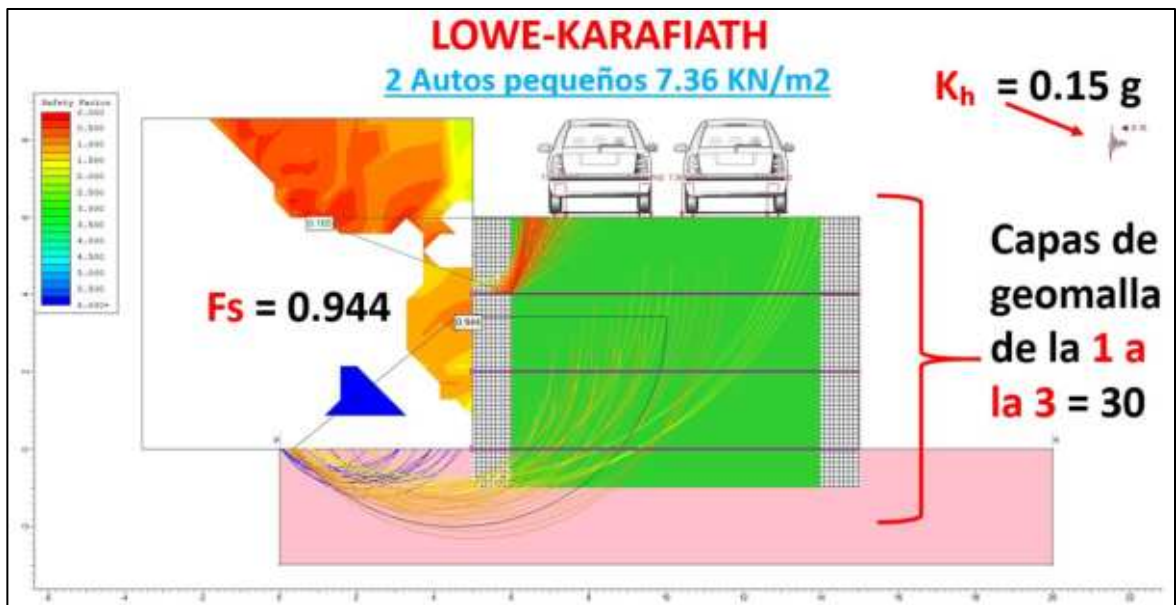
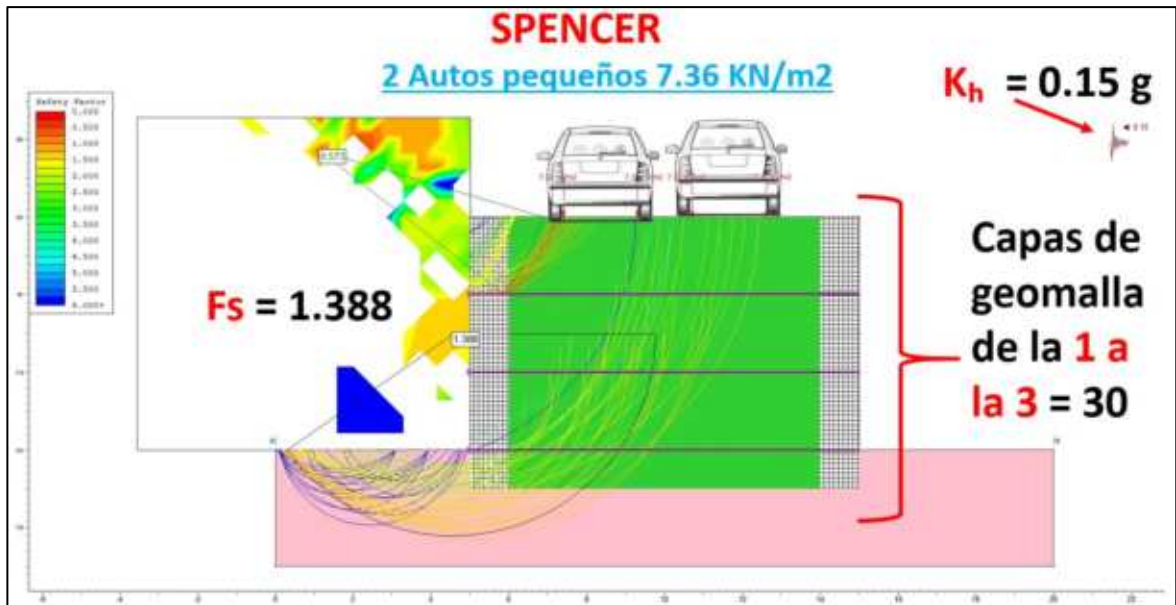
Fuente: Elaboración Propia

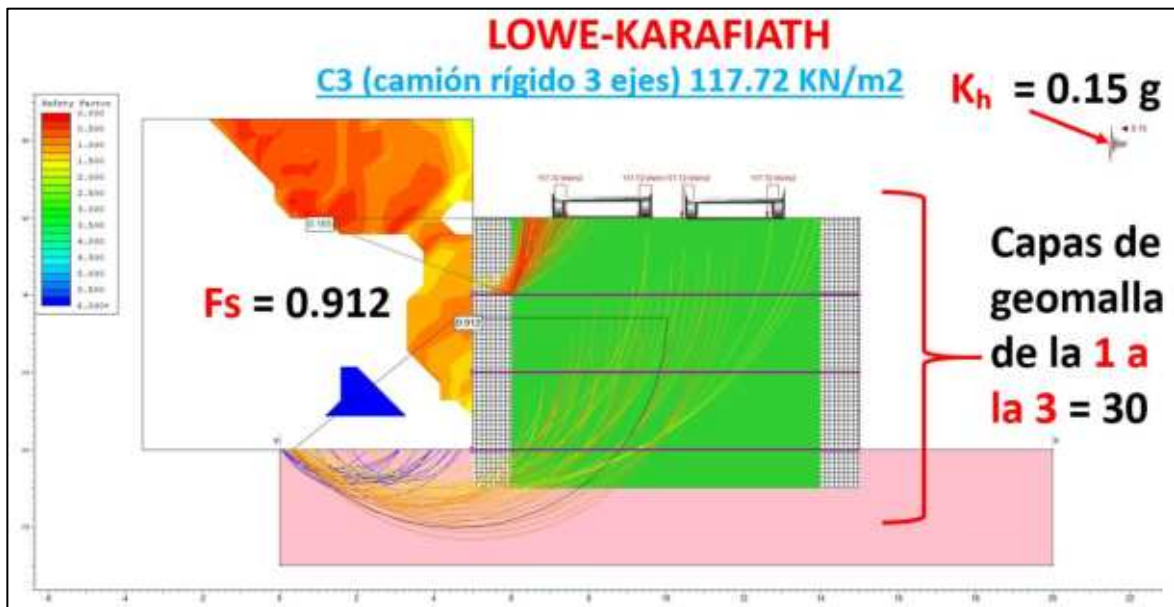
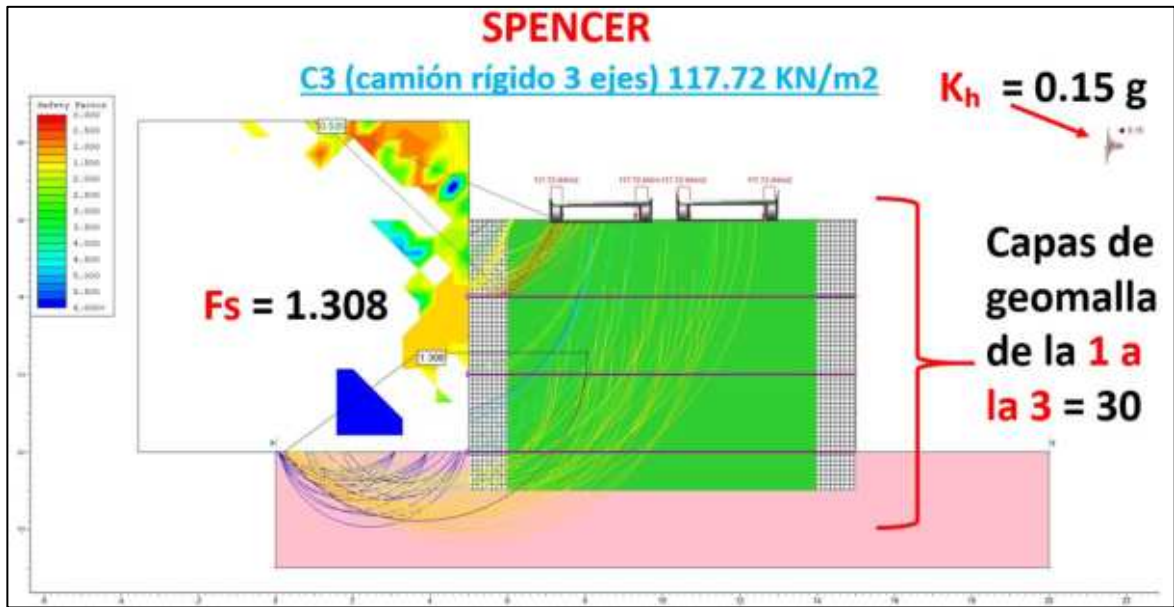
Los valores mostrados en el apartado T<sub>ult</sub> corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 3 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el Fs muestra cifras positivas.

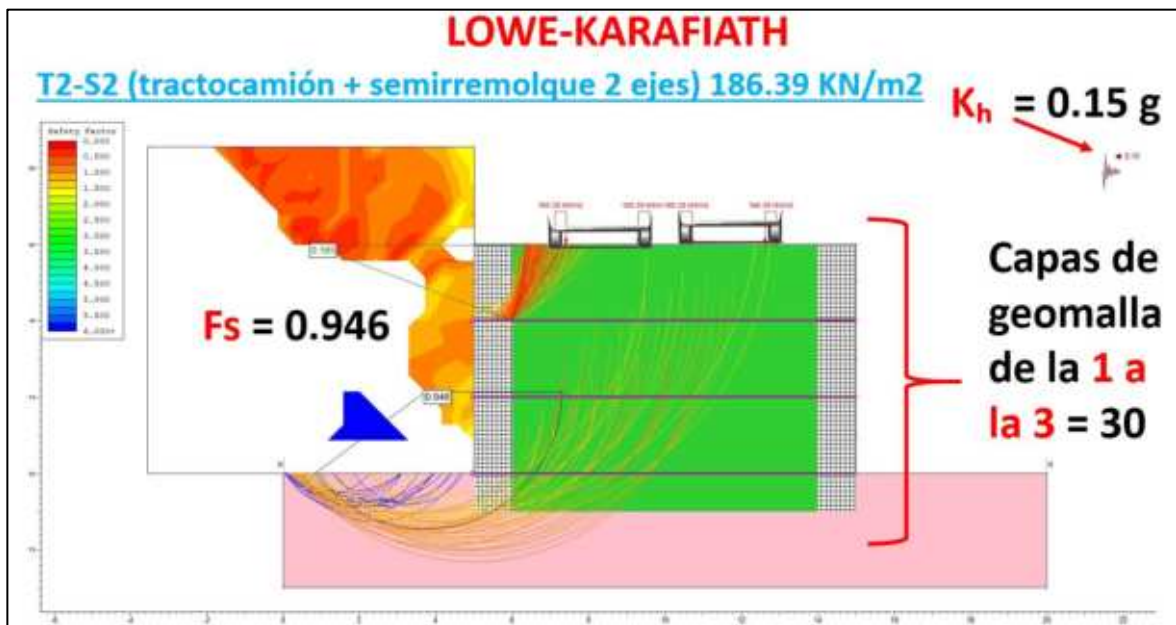
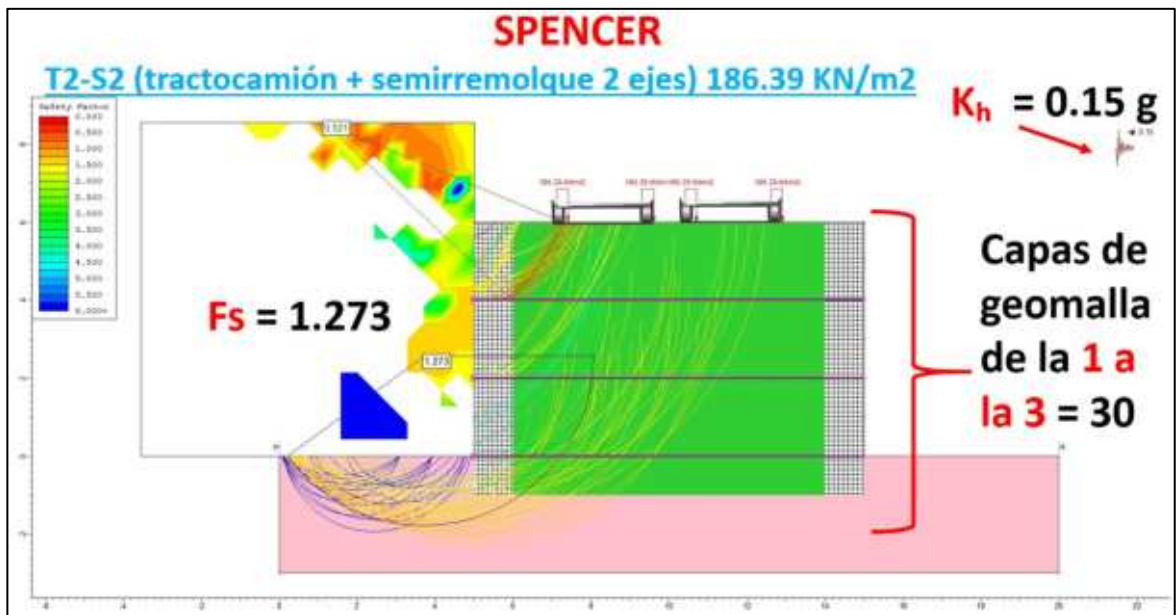
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 11 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes

incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.









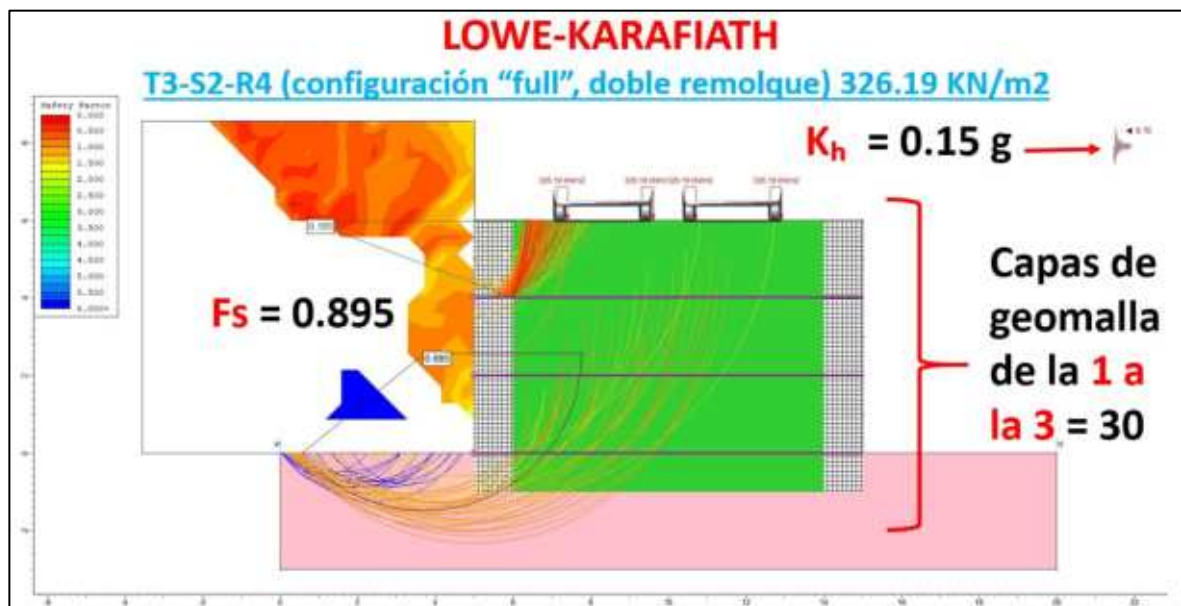
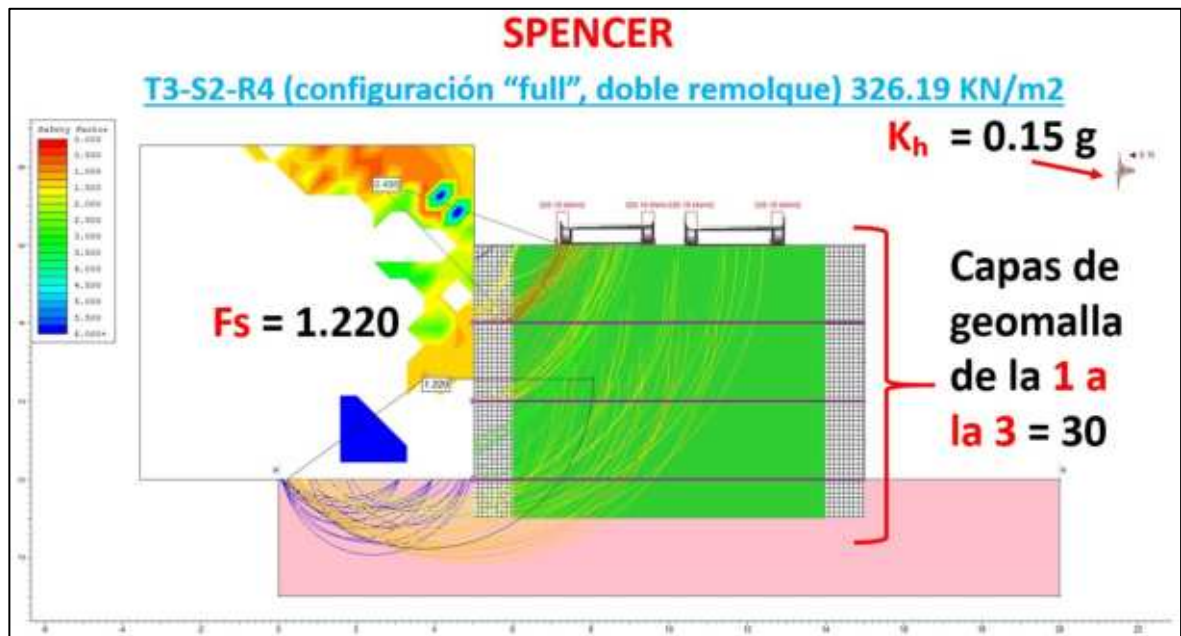


Figura 46. Escenario gráfico Prototipo 11 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

Los valores presentados en la sección de Tult corresponden a las tensiones movilizadas en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, consideradas en este caso del 1 al 3, lo que permite identificar su

aporte dentro del relleno armado. De los resultados obtenidos para la condición de análisis con separación vertical  $SV = 2$  m, se observa que a partir de la condición descargada las geomallas alcanzan su nivel máximo de tensión movilizada (30 kN/m y 40 kN/m), lo que demuestra que el sistema de refuerzo se activa desde las etapas iniciales debido al confinamiento del suelo.

Para la condición sin carga se obtienen factores de seguridad de  $FS = 1.362$  (Spencer) y  $FS = 0.985$  (Lowe-Karafiath) para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se alcanzan valores de  $FS = 1.456$  (Spencer) y  $FS = 1.024$  (Lowe-Karafiath), lo que indica una condición estable del sistema. en ambos casos.

Al incorporar la carga correspondiente a un automóvil pequeño, los coeficientes de seguridad se mantienen prácticamente constantes, con valores de  $FS = 1.388$  y  $0.944$  para la geomalla de 30 kN/m, y  $FS = 1.448$  y  $1.020$  para la geomalla de 40 kN/m. Esto indica que este nivel de carga no genera un impacto significativo en la estabilidad general del sistema.

En el caso del camión rígido C3 se observa una ligera disminución en los factores de seguridad, alcanzando  $FS = 1.308$  y  $0.912$  para la geomalla de 30 kN/m, mientras que para la geomalla de 40 kN/m se obtienen valores de  $FS = 1.372$  y  $0.981$  mostrando una mejora en la estabilidad debido al aumento de la resistencia del refuerzo.

Esta tendencia continúa para la configuración T2-S2, donde los factores de seguridad son  $FS = 1.273$  y  $0.946$  para la geomalla de 30 kN/m, y  $FS = 1.334$  y  $0.943$  para la geomalla de 40 kN/m. En este caso, aunque ambos sistemas se mantienen en condiciones estables, se observa una aproximación progresiva hacia valores críticos, especialmente en el método de Lowe-Karafiath.

Finalmente, para la condición más crítica correspondiente a la configuración T3-S2-R4 (doble remolque), se obtienen valores de  $FS = 1.220$  y  $0.895$  para la geomalla de 30 kN/m, indicando una condición

inestable según el método de Lowe-Karafiath. Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta valores de FS = 1.261 y 0.956, lo que refleja una condición cercana al límite de estabilidad, pero aún aceptable.

En general, los resultados muestran que al aumentar el espaciamiento vertical a SV = 2,00 m, la estabilidad del sistema disminuye significativamente en comparación con configuraciones de espaciamiento más pequeños. Asimismo, aunque el uso de geomallas de mayor resistencia (40 kN/m) mejora el rendimiento del sistema, esta mejora no es suficiente para compensar los efectos negativos del espaciamiento excesivo, especialmente bajo cargas pesadas, donde se alcanzan condiciones críticas e incluso inestables.

12. **PROTOTIPO 12: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAXIAL A UN SV DE 0.60 METROS SIN NORMATIVA:**

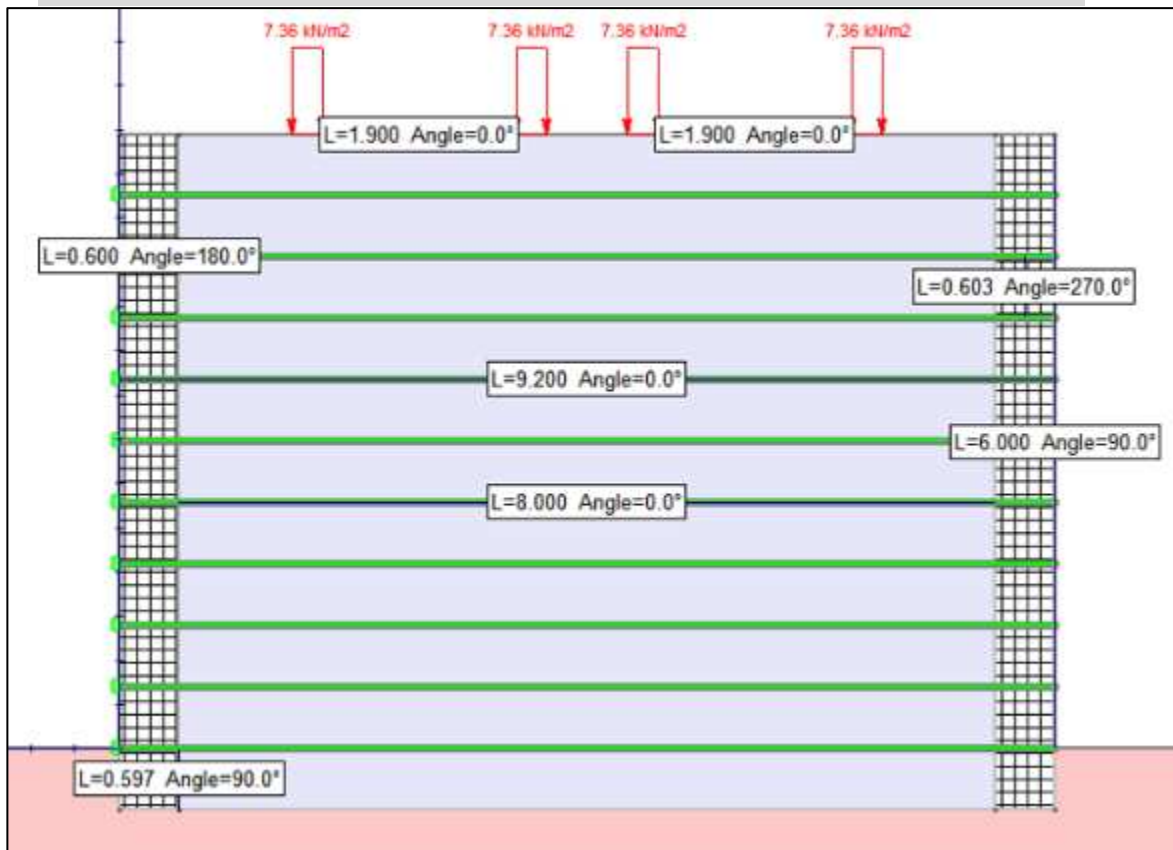


Figura 47. Escenario gráfico del prototipo 12 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

La Figura 47 presenta el modelo numérico correspondiente al prototipo analizado, el cual representa un sistema de suelo reforzado con geomallas, desarrollado a escala 1:1, considerada en este estudio como la escala real de representación, sin aplicar leyes de similitud o escalamiento de las propiedades mecánicas del material.

El modelo reproduce una estructura de terraplén reforzada para un puente, con una altura total de 6 m y un espesor de cimentación de 0.60 m. En cuanto a la sección transversal, se adopta un ancho de corona de 9.20 m, correspondiente a una sección mínima tipo puente angosto, adecuada para vías con restricciones geométricas pero que permiten el tránsito de vehículos pesados en condiciones controladas (secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2018).

El material utilizado en todo el dominio corresponde al suelo extraído del Banco San José Iturbide, cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente mediante pruebas de laboratorio realizadas en el presente estudio, modelándose como un material homogéneo con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°, representativo de un material granular denso y de alta resistencia (Das & Sobhan, 2014).

El refuerzo interno se incorpora mediante geomallas biaxiales dispuestas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 0.60 m. Para fines comparativos, el modelo fue analizado con geomallas tipo Maccaferri 30S y 40S, con resistencias máximas de 30 kN/m y 40 kN/m, respectivamente, con el objetivo de evaluar su influencia en los factores de seguridad del sistema (FHWA, 2009).

El sistema está confinado lateralmente por elementos rígidos que simulan estructuras tipo gaviones o bloques de hormigón. Estos elementos

tienen 0.60 m de altura equivalente a la separación vertical de las geomallas y un espesor (0.60 m), asegurando compatibilidad geométrica con el refuerzo y adecuadas condiciones de anclaje. Esta configuración permite una correcta transferencia de tensiones entre la geomalla y el sistema de contención, condición fundamental para el desempeño estructural del sistema (Koerner, 2012).

En la base del modelo se considera un estrato arcilloso compactado, que representa el suelo de cimentación. La inclusión de este material responde a condiciones reales de campo, donde los terraplenes suelen descansar sobre suelos con menor rigidez en comparación con los rellenos granulares. Este estrato permite simular la interacción suelo-estructura, evaluando la distribución de tensiones hacia la base, asentamientos y posibles mecanismos de falla global que involucran tanto el terraplén como la cimentación (Das & Sobhan, 2014).

Desde el punto de vista funcional, el modelo representa una **vía tipo C o vía secundaria mejorada**, con capacidad para tránsito de carga pesada, incluyendo vehículos tipo tractocamión doble articulado (camión completo), de acuerdo con la normativa vigente (SCT, 2012). El tramo adoptado corresponde a una condición de puente angosto, donde el tránsito se realiza de manera controlada.

La sección transversal considerada está compuesta por:

- Dos carriles de 3.50 m cada uno, con un ancho de vía de 7.00 m.
- Márgenes laterales reducidos de 1.10 m de cada lado, alcanzando un ancho de corona de 9.20 m.

Estas dimensiones corresponden a valores funcionales mínimos para vías de tránsito pesado, donde se recomienda un ancho de carril de 3.50 m para permitir la circulación segura de vehículos de gran tamaño (SCT, 2018).

Las cargas aplicadas en el modelo se definen en función del tráfico de vehículos pesados de camiones completos, que representan

condiciones operativas críticas. En este caso, el modelado considera tráfico de un solo sentido, donde las cargas se ubican dentro de la misma vía, simulando la condición más desfavorable de cargas simultáneas sobre la estructura.

La carga se aplica a la parte superior del terraplén a través de franjas de contacto de aproximadamente 0.30 m, que representan la huella del neumático (Huang, 2004). Esta idealización permite reproducir de forma simplificada la transmisión de fuerzas al terraplén, evaluando el comportamiento del sistema ante tensiones máximas como se muestra en la Figura 48.

En su conjunto, esta configuración permite analizar de forma realista el comportamiento del terraplén armado en condiciones de cargas pesadas, considerando tanto la capacidad de refuerzo como la influencia del suelo de cimentación, en un escenario conservador adecuado a efectos de diseño y evaluación de estabilidad.

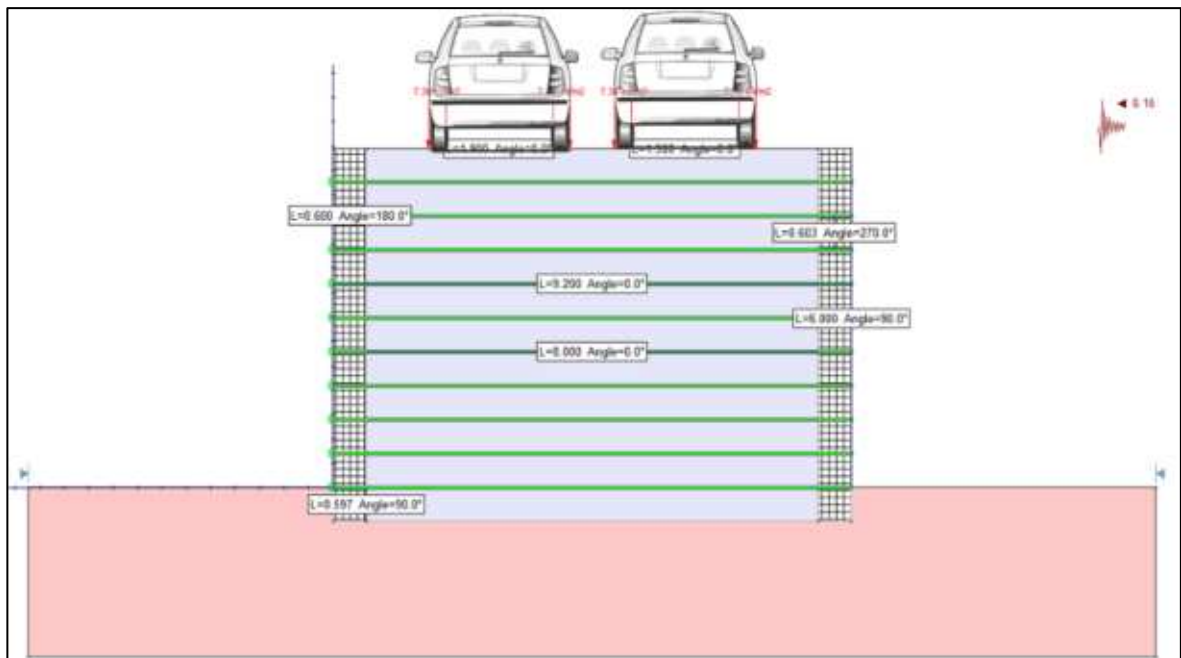


Figura 48. Representación de cargas en prototipo 12 a escala real Sv 0.60 m.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global

del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 36.

El análisis numérico desarrollado permite evaluar el factor de seguridad global del talud reforzado, así como el comportamiento traccional y respuesta estructural de las geomallas, identificando la influencia del confinamiento lateral, la disposición del refuerzo y la aplicación de cargas vehiculares sobre la estabilidad y desempeño general de la estructura los resultados se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36. Resultados de modelo evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

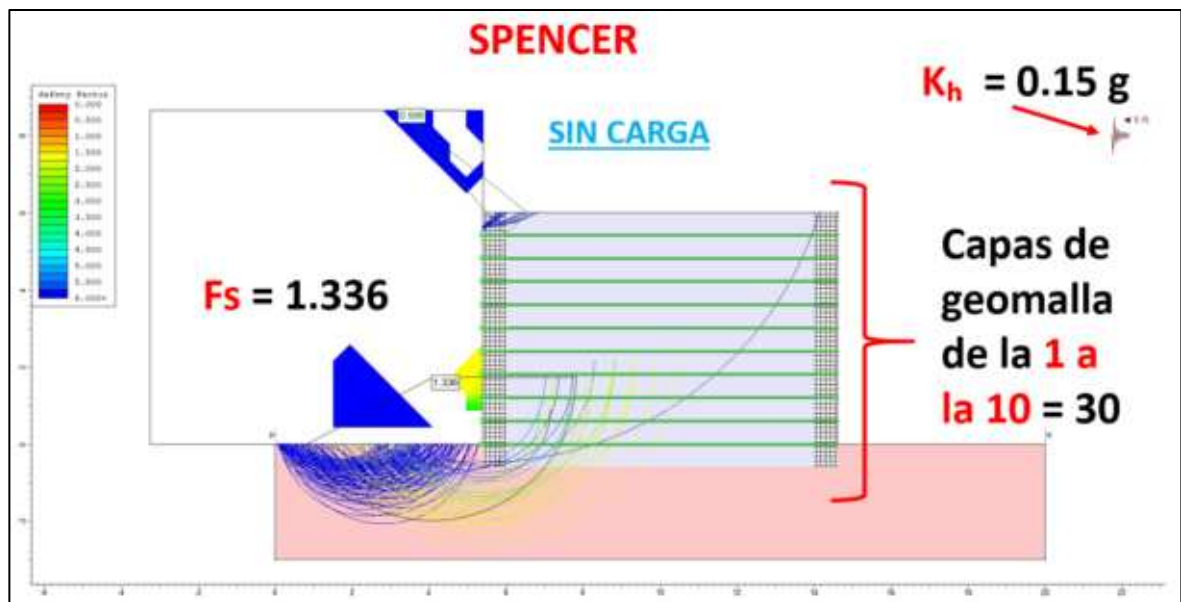
SIN Normativa escala REAL 0.60 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 10	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 10	Spencer (FS)	T ult 1 al 10	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 10
SIN Carga		-		1.336	30	-	30	-	40	-	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.329	30	-	30	-	40	-	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.327	30	1.347	30	-	40	-	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.260	30	1.165	30	-	40	-	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.202	30	1.031	30	-	40	-	40

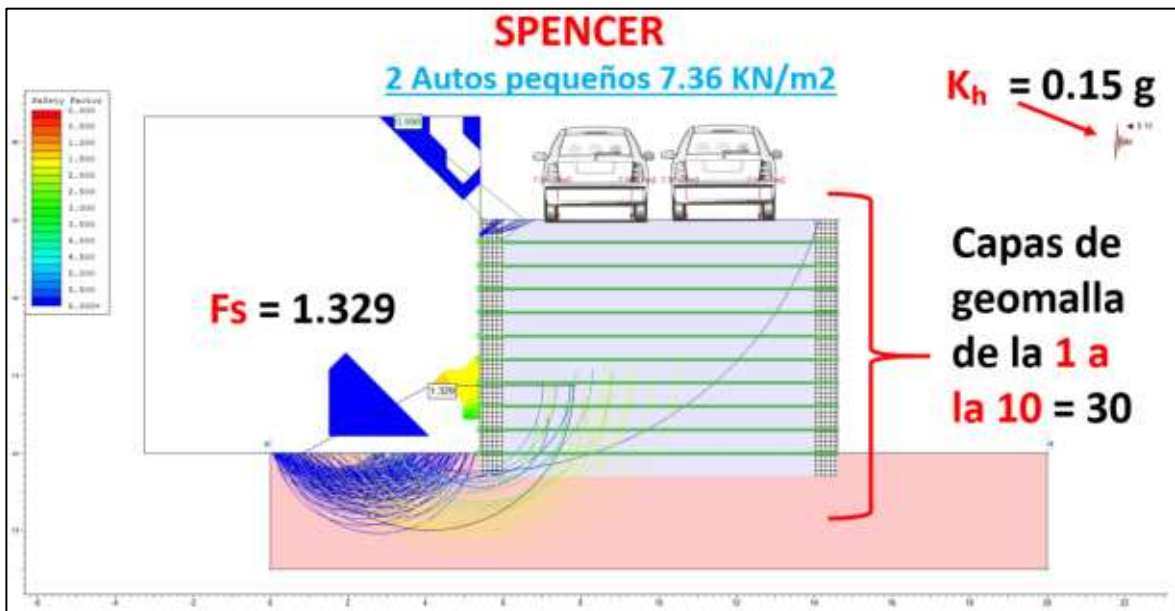
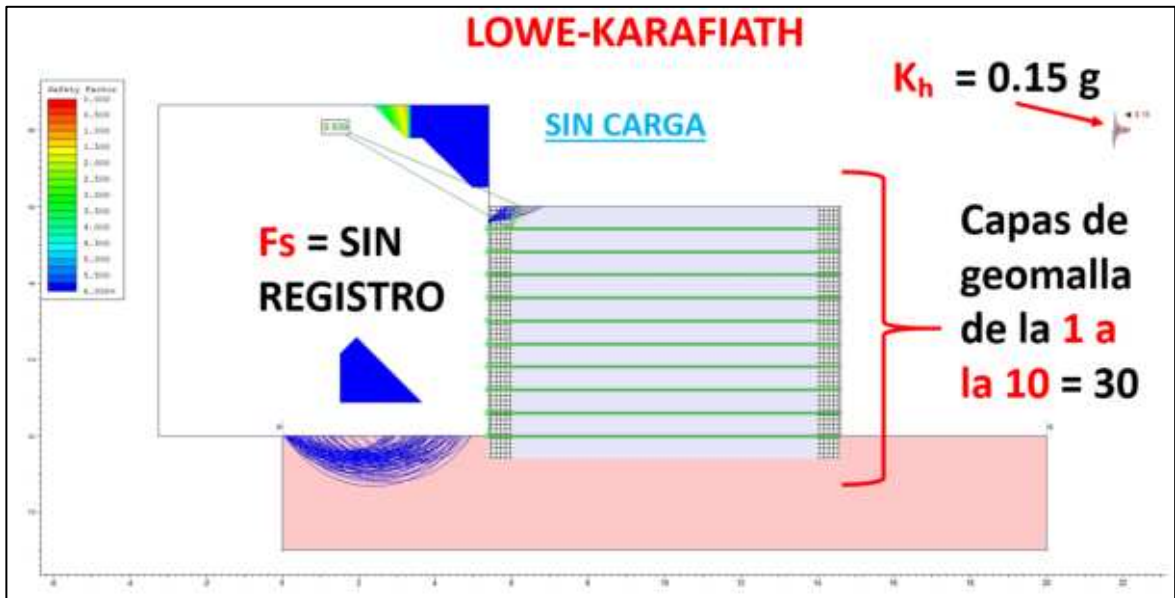
Fuente: Elaboración Propia

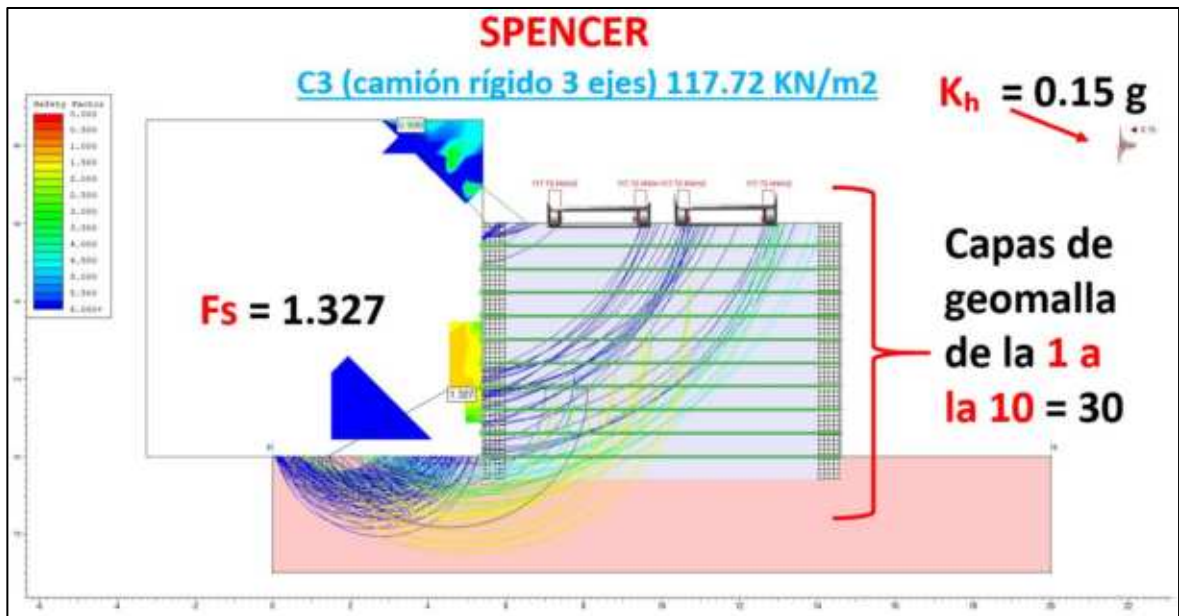
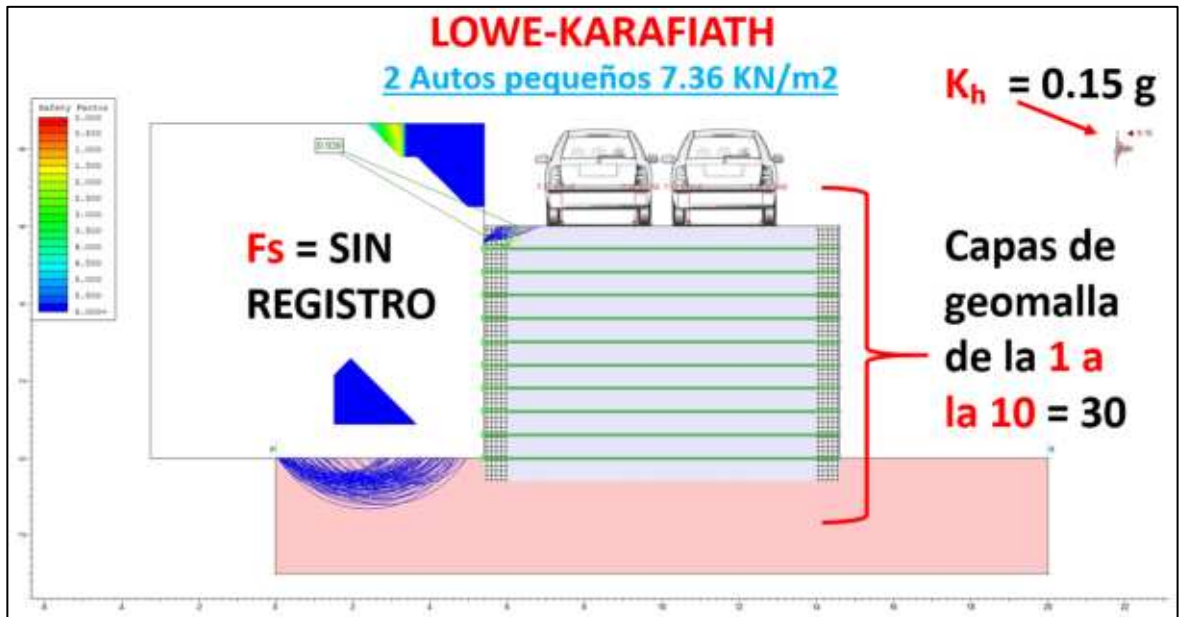
Los valores mostrados en el apartado  $T_{ult}$  corresponden a los registros de las tensiones en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, las cuales están numeradas del 1 al 10 para identificar su posición vertical dentro del terraplén reforzado. Donde podemos observar

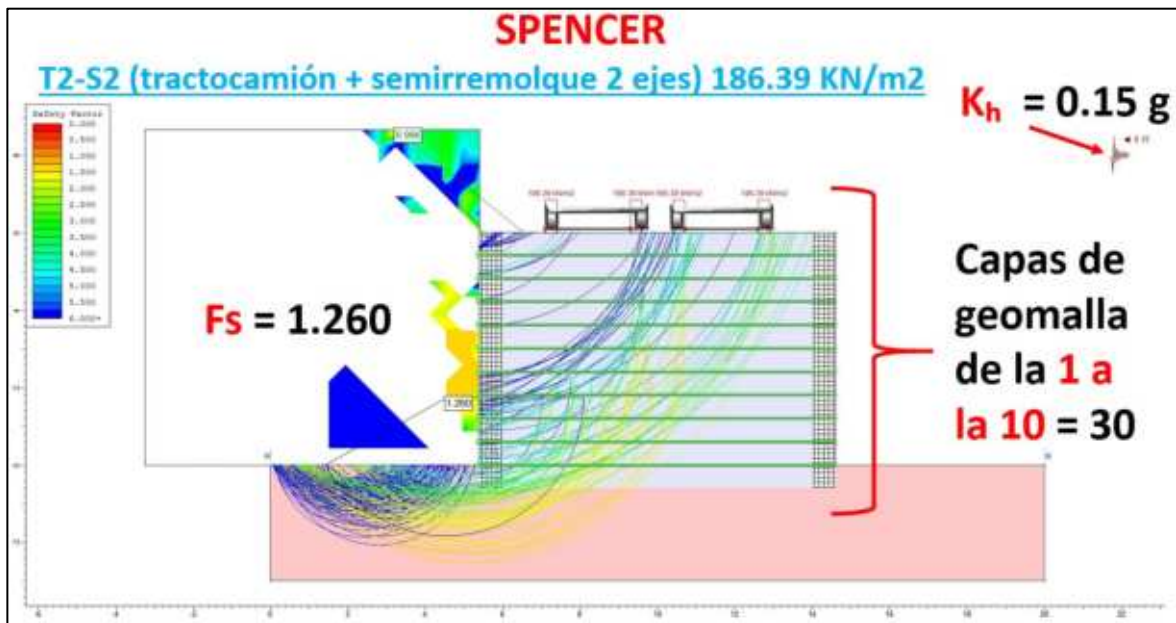
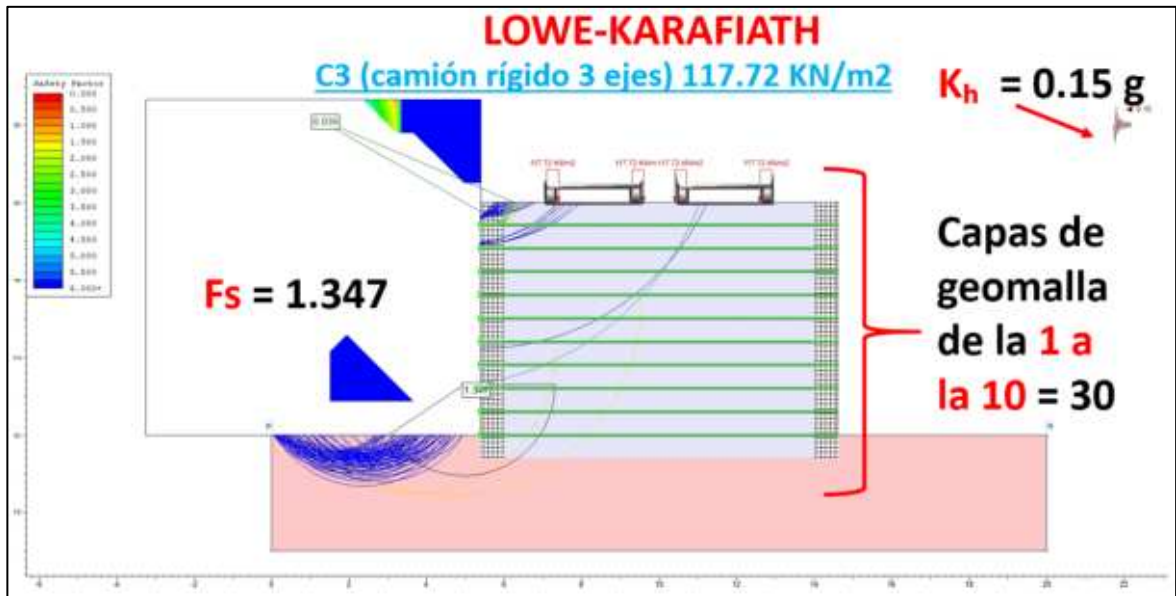
claramente que desde la primera evaluación sin carga las geomallas alcanzan su nivel máximo de esfuerzos movilizados, lo que indica que el sistema de refuerzo comienza a funcionar inmediatamente de la construcción de la estructura, pero a pesar de ello el  $F_s$  muestra cifras positivas.

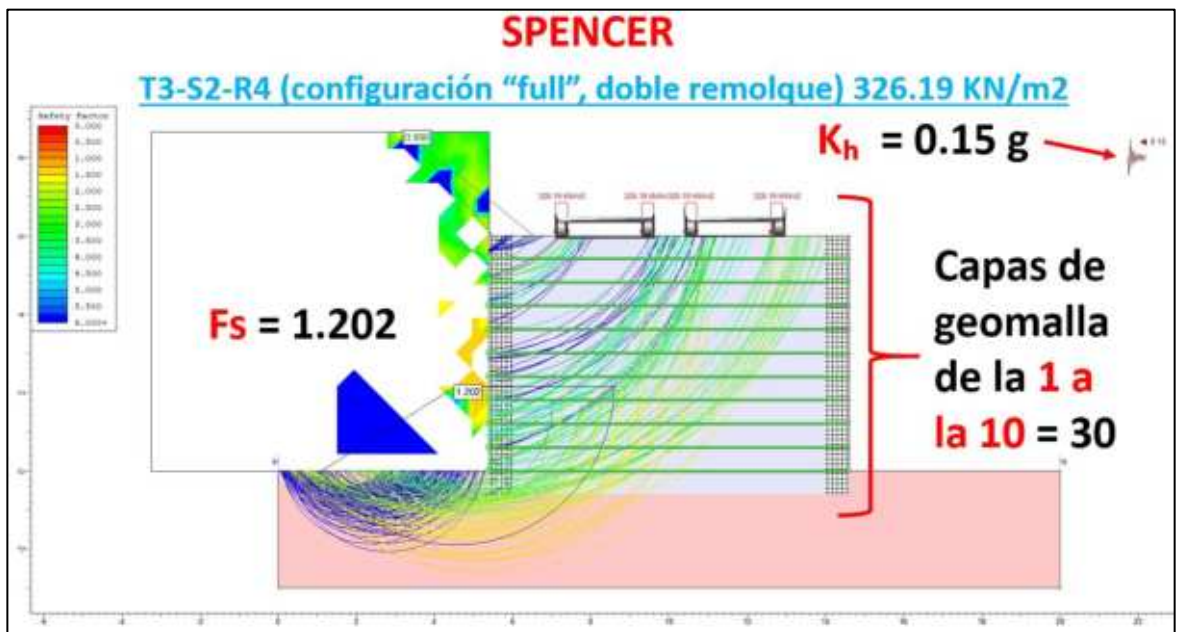
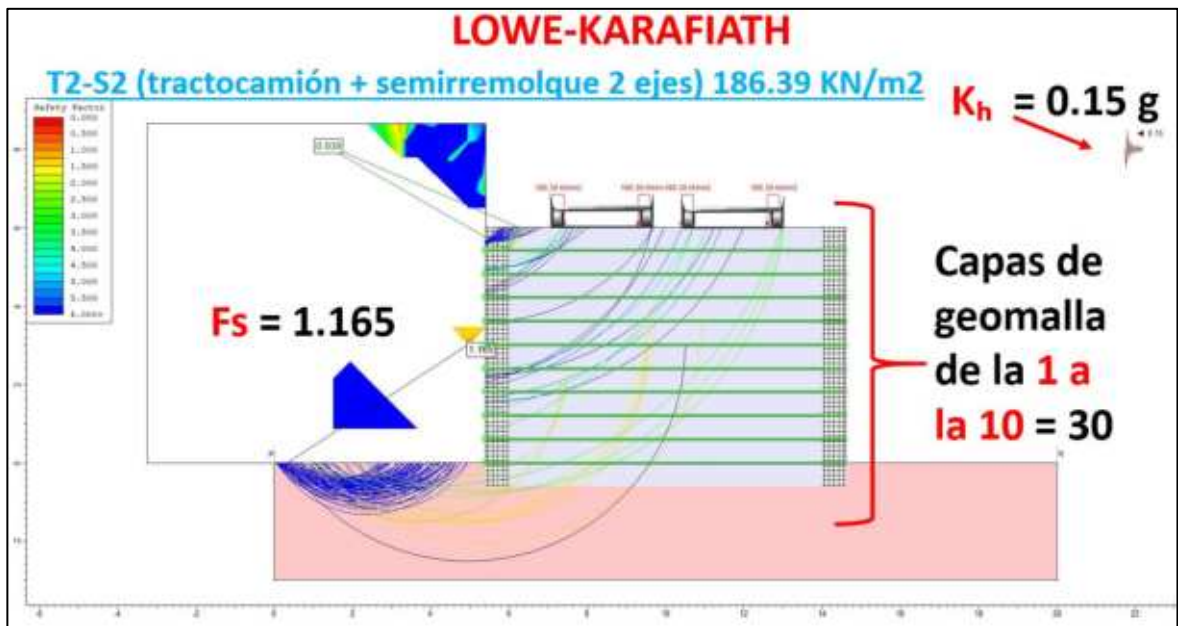
Para documentar el comportamiento del modelo del prototipo 12 durante la aplicación de cargas, se realizó un registro visual del modelo analítico experimental, el cual conforma un conjunto de imágenes incorporadas a este documento en forma de figuras con los valores obtenidos como un registro visual continuo, pero solo se muestran las imágenes de la resistencia de 30s ya que se replicó el mismo proceso para la resistencia de 40s y ya no se colocaron las ilustraciones solo se llenó la tabla de registro. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.











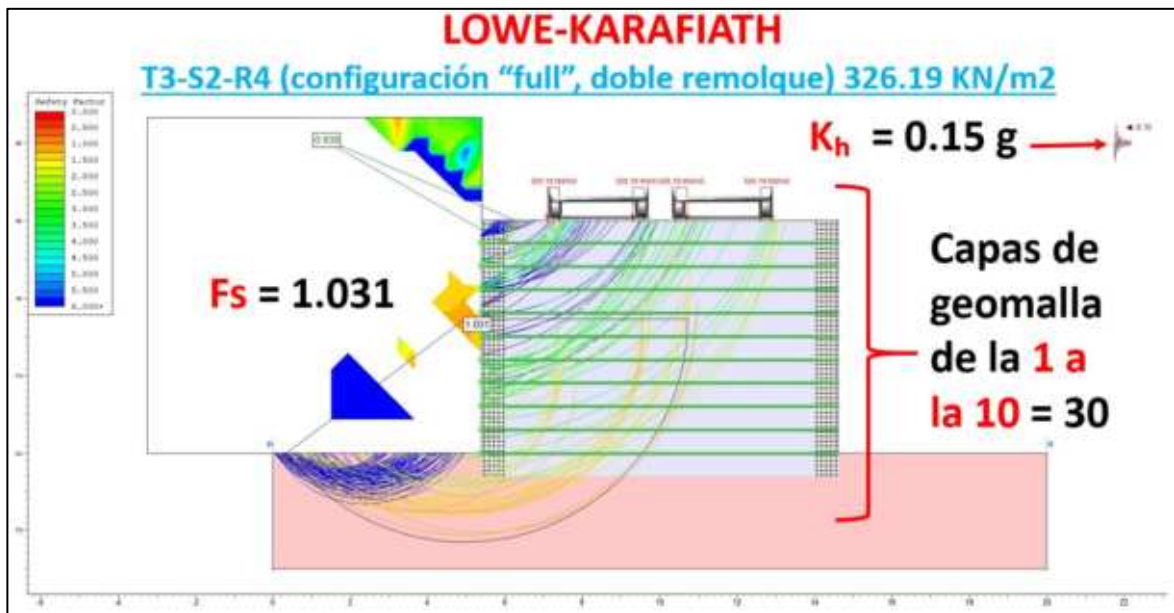


Figura 49. Escenario gráfico Prototipo 12 analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga.

Los valores presentados en la sección de Tult corresponden a las tensiones movilizadas en las geomallas para cada una de las capas de refuerzo, consideradas en este caso del 1 al 10, lo que permite identificar su aporte dentro del relleno armado. De los resultados obtenidos para la condición de análisis con separación vertical  $SV = 0.60$  m, se observa que a partir de la condición descargada las geomallas alcanzan su nivel máximo de tensión movilizada (30 kN/m y 40 kN/m), lo que demuestra que el sistema de refuerzo se activa desde las etapas iniciales debido al confinamiento del suelo.

Para la condición sin carga se obtienen factores de seguridad de  $FS = 1.336$  (Spencer), mientras que no se reporta valor con el método de Lowe-Karafiath. Esta condición indica un comportamiento estable del sistema. De manera similar, para la carga correspondiente a un automóvil pequeño. El  $F_s$  es de  $FS = 1.329$ , manteniéndose prácticamente constante, lo que indica que el nivel de carga no afecta significativamente en la estabilidad global.

En el caso del camión rígido C3 se observa una ligera disminución en los factores de seguridad, alcanzando  $FS = 1.327$  y  $1.347$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , mientras que para la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$  se obtienen valores de  $FS = 1.372$  y  $0.981$  mostrando una mejora en la estabilidad debido al aumento de la resistencia del refuerzo.

Esta tendencia continúa para la configuración T2-S2, donde los factores de seguridad son  $FS = 1.273$  y  $0.946$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , y  $FS = 1.260$  y  $1.165$  lo que indica una ligera reducción en la estabilidad, aunque el sistema continuo dentro de los rangos aceptables

Finalmente, para la condición más crítica correspondiente a la configuración T3-S2-R4 (doble remolque), se obtienen valores de  $FS = 1.202$  y  $1.031$  para la geomalla de  $30 \text{ kN/m}$ , indicando una condición inestable según el método de Lowe-Karafiath. Por otro lado, la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$  presenta valores de  $FS = 1.261$  y  $0.956$ , lo que refleja una condición cercana al límite de estabilidad, pero aún aceptable.

En términos generales, los resultados muestran que con un espaciamiento vertical reducido ( $SV = 0,60 \text{ m}$ ), el sistema presenta un mejor desempeño general, manteniendo factores de seguridad superiores a la unidad incluso bajo cargas pesadas. Esto confirma que la disminución del espaciamiento vertical favorece la estabilidad del sistema, aumentando el confinamiento del suelo y la eficiencia del refuerzo. Asimismo, aunque no se reportan resultados para la geomalla de  $40 \text{ kN/m}$ , se puede inferir que su comportamiento sería igual o más favorable debido a su mayor capacidad de resistencia.

#### **4. Integración de Inteligencia Artificial**

En esta etapa se integran herramientas de inteligencia artificial para apoyar el procesamiento, análisis e interpretación de datos geotécnicos, con base en los fundamentos descritos en los apartados 1.10 a 1.10.6. La aplicación de la IA en esta investigación no reemplaza los métodos

tradicionales de ingeniería geotécnica, sino que complementa el análisis automatizando procesos, identificando patrones y generando recomendaciones a partir de los datos disponibles.

El enfoque adoptado se basa en la definición de datos de entrada (inputs), correspondientes a los parámetros geotécnicos y geométricos del sistema, y datos de salida, asociados al comportamiento del modelo, como el factor de seguridad, los desplazamientos y las condiciones de estabilidad. A partir de esta estructura se implementaron herramientas de IA generativa como ChatGPT y Gemini para generar y estructurar código, el cual se ejecutaba en Visual Studio Code usando Python.

Dentro de este entorno de desarrollo, se utilizaron extensiones especializadas para optimizar el flujo de trabajo, que incluyen:

- **Python (Microsoft):** ejecución y gestión del entorno de programación.
- **Pylance:** análisis de código estático, autocompletado y detección de errores.
- **Depurador de Python:** identificando y corrigiendo errores durante la ejecución.
- **NumPy Pilot:** soporte para la gestión de funciones matemáticas y matrices numéricas.

Este proceso permitió automatizar el cálculo de parámetros, organizar la información experimental y generar comparaciones entre los diferentes escenarios analizados, facilitando la evaluación del comportamiento del sistema de refuerzo del suelo. Asimismo, la IA permitió emitir recomendaciones técnicas preliminares, que luego fueron contrastadas con los resultados obtenidos en los modelos analíticos desarrollados en Slide2 y en los prototipos físicos.

La metodología implementada permitió:

- Estimar los factores de seguridad,
- Calcular tensiones movilizadas en geomallas;

- Identificar niveles de trabajo de refuerzo, y clasificar los estados de falla potenciales como:
- Alta Tensión,
- Pullout probable,
- Límite del diseño,
- Probable rotura.

Método utilizado en el código desarrollado:

Es importante señalar que el código desarrollado en Python no realiza un análisis de equilibrio límite completo como el realizado por el Slide2.

El modelo implementado corresponde a una metodología simplificada basada en:

- relaciones empíricas,
- reducción progresiva de FS en relación con la carga aplicada,
- correlaciones geotécnicas,
- y estimaciones aproximadas de las tensiones movilizadas en las geomallas.

Es decir, el código:

- NO discretiza pentagramas,
- NO calcula las superficies de falla críticas reales,
- NO realiza iteraciones de equilibrio de fuerza y momento,
- y NO realiza todos los procedimientos matemáticos de Spencer o Lowe-Karafiath.

Entonces, aunque las columnas tengan nombres como:

“Spencer FS”

“Lowe-Karafiath FS”

Estos valores representan aproximaciones calibradas con tendencias geotécnicas inspiradas en estos métodos, pero no constituyen una solución de equilibrio límite numérico rigurosa. Asimismo, este código

generado con ayuda de la IA se utilizó en todos los escenarios analizados, realizándose únicamente modificaciones en algunos datos de entrada específicos para cada simulación. Sin embargo, los parámetros resaltados se mantuvieron constantes en todos los casos, con el objetivo de mantener criterios de análisis homogéneos y asegurar la comparabilidad entre las diferentes simulaciones realizadas.

- altura del muro mecánicamente estabilizado: (m)
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: (m)
- altura del gavión: (m)
- ancho del gavión: (m)
- **peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>**
- **Ángulo de fricción del gavión: 40°**
- **cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>**
- **permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s**
- **Material: Arena del banco San José Iturbide**
- **peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)**
- **permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s**
- **cohesión:10.79 (KN/m<sup>2</sup>)**
- **ángulo de fricción interno: 43.58°**
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: (m)
- **Tipo de refuerzo: geomalla biaxial**
- **Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m**
- **coeficiente sísmico Kh: 0.15**
- **cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.**
- **métodos por los que se calculara el Fs: Spencer y Lowe-Karafiath**

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico para descarga automática de los resultados obtenidos por simulación y si debido registro.

**El código generado con ayuda de la IA fue el siguiente:**

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import os
import math
# =====
# DATOS GENERALES DEL MURO
# =====
H = 6          # Altura del muro (m)
B = 10         # Ancho del muro (m)
Sv = 1         # Espaciamiento vertical (m)
gamma_relleno = 19.16 # Peso volumétrico (kN/m3)
phi = 43.58    # Ángulo de fricción (grados)
cohesion = 10.79 # Cohesión (kN/m2)
Kh = 0.15     # Coeficiente sísmico pseudoestático
# =====
# CARGAS VEHICULARES NOM-012
# =====
cargas = [("SIN Carga", "-", 0.00),
          ("Automóvil pequeño", 1.5, 7.36),
          ("C3", 24, 117.72),
          ("T2-S2", 38, 186.39),
          ("T3-S2-R4", 66.5, 326.19)]
# =====
# RESISTENCIA DE GEOMALLAS
# =====
geomallas = [30, 40]
# =====
# FUNCIONES DE CÁLCULO
# =====
def calcular_fs_spencer(q, Tu):
    """
```

Cálculo simplificado del Factor de Seguridad  
mediante el método de Spencer.

```

"""
resistencia = (cohesion +(gamma_relleno * H * math.tan(math.radians(phi)))
) * Tu  solicitud = (gamma_relleno * H + q + (Kh * gamma_relleno * H)
) * 10
FS = resistencia / solicitud return round(FS, 3) def calcular_fs_lowe(q, Tu):
"""

```

Cálculo simplificado del Factor de Seguridad  
mediante el método Lowe-Karafiath.

```

"""
resistencia= (cohesion * 0.90 + (gamma_relleno * H * math.tan(math.radians
(phi - 3)))) * Tu solicitud = ( gamma_relleno * H + q + (Kh * gamma_relleno
* H * 1.15)) * 11
FS = resistencia / solicitud
return round(FS, 3) def calcular_tension(FS, Tu):
"""

```

Obtención de tensión movilizada.

```

"""
if FS <= 0: return 999 tension = Tu / FS return round(tension, 2)
def interpretar_geomalla(tension, Tu): relacion = tension / Tu if relacion < 0.60:
return "Trabajo estable" elif relacion < 0.90: return "Alta tensión" elif relación
<= 1.00: return "Límite de diseño" elif relacion <= 1.20: return "Pullout probable"
else: return "Rotura probable" def recomendacion_ia(FS, tension, Tu): relacion
= tension / Tu if FS >= 1.50 and relacion < 0.80: return "Diseño adecuado según
criterio geotécnico." elif FS >= 1.25 and relacion < 1.00: return "Diseño
funcional; monitorear deformaciones." elif relacion <= 1.20: return "Reducir
espaciamiento vertical o aumentar resistencia del refuerzo." else: return
"Condición crítica: posible falla por rotura o pullout."

```

```

# =====
# GENERACIÓN DE RESULTADOS
# =====
resultados = [] for nombre, peso_t, q in cargas:
fila = { "Configuración": nombre, "Peso bruto (t)": peso_t, "Carga equivalente (kN)":
round(q * 10, 2), "Carga aplicada (kN/m2)": q } for Tu in geomallas:
# Método Spencer

```

```

FS_spencer = calcular_fs_spencer(q, Tu) tension_spencer
= calcular_tension(FS_spencer, Tu) comportamiento_spencer
= interpretar_geomalla(tension_spencer, Tu) recomendacion_spencer
= recomendacion_ia(FS_spencer, tension_spencer, Tu)
# Método Lowe-Karafiath
FS_lowe = calcular_fs_lowe(q, Tu)
tension_lowe = calcular_tension(FS_lowe, Tu)
comportamiento_lowe = interpretar_geomalla(
tension_lowe, Tu) recomendacion_lowe
= recomendacion_ia( FS_lowe, tension_lowe, Tu)
# Guardado de resultados
fila[f"FS Spencer ({Tu})"] = FS_spencer
fila[f"Tensión Spencer ({Tu})"] = tension_spencer
fila[f"Estado Spencer ({Tu})"] = comportamiento_spencer
fila[f"IA Spencer ({Tu})"] = recomendacion_spencer
fila[f"FS Lowe ({Tu})"] = FS_lowe
fila[f"Tensión Lowe ({Tu})"] = tension_lowe
fila[f"Estado Lowe ({Tu})"] = comportamiento_lowe
fila[f"IA Lowe ({Tu})"] = recomendacion_lowe
resultados.append(fila)
# =====
# CREACIÓN DEL DATAFRAME
# =====
df = pd.DataFrame(resultados)
print("\n=== RESULTADOS FINALES ===\n")
print(df)
# =====
# EXPORTACIÓN DE RESULTADOS
# =====
descargas = os.path.join(os.path.expanduser("~"), "Downloads") ruta_excel
= os.path.join(descargas,"resultados_FS_prototipo6.xlsx")
ruta_csv = os.path.join(descargas,"resultados_FS_prototipo6.csv")
df.to_excel(ruta_excel, index=False)
df.to_csv(ruta_csv, index=False, encoding="utf-8-sig")
print("\nArchivos exportados correctamente.")
# =====

```

```

# GENERACIÓN DE GRÁFICA
# =====
plt.figure(figsize=(12, 6))
x = [c[0] for c in cargas]
plt.plot( x, df["FS Spencer (30)"], marker='o',label='Spencer FS (30 kN/m)')
plt.plot( x, df["FS Lowe (30)"], marker='o', label='Lowe-Karafiath FS (30 kN/m)')
plt.plot( x, df["FS Spencer (40)"], marker='o', label='Spencer FS (40 kN/m)')
plt.plot( x, df["FS Lowe (40)"], marker='o', label='Lowe-Karafiath FS (40 kN/m)')
plt.axhline(y=1.25, linestyle='--', label='FS mínimo recomendado')
plt.title( "Comparación del Factor de Seguridad")
plt.xlabel("Condición de carga")
plt.ylabel("Factor de Seguridad (FS)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
# =====
# ALERTAS DE DISEÑO
# =====
print("\n=== ALERTAS DE DISEÑO ===\n")
for i, row in df.iterrows(): for Tu in geomallas:
fs_sp = row[f"FS Spencer ({Tu})"]
fs_lw = row[f"FS Lowe ({Tu})"]
if fs_sp < 1.25:
print( f"Advertencia: {row['Configuración']} "
f"| Spencer {Tu} kN/m "f"| FS = {fs_sp}")
if fs_lw < 1.25:
print(f"Advertencia: {row['Configuración']} "
f"| Lowe-Karafiath {Tu} kN/m "
f"| FS = {fs_lw}")

```

Asimismo, la Figura 50 muestra la inserción del código dentro de la interfaz de Visual Studio Code, así como su posterior ejecución para su procesamiento y obtención de los resultados correspondientes.

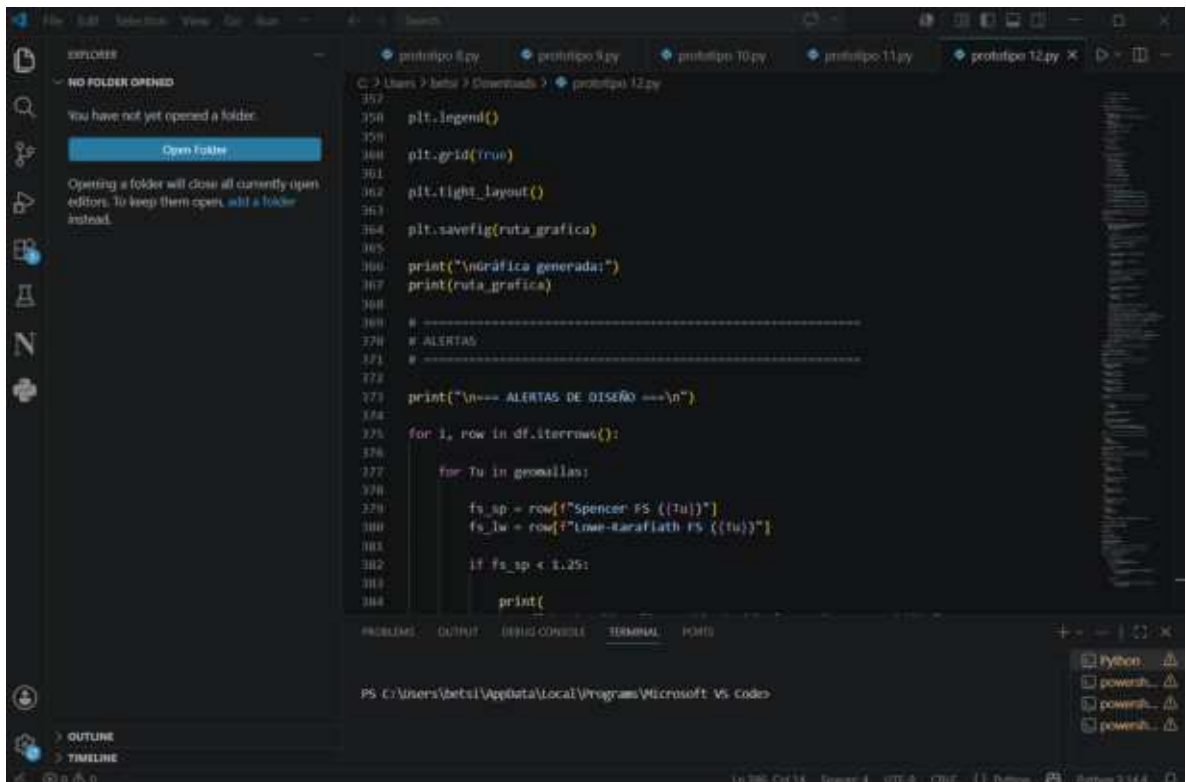


Figura 50. Interfaz de Visual Studio Code (VS Code) donde se carga el Código previamente otorgado por ChatGPT.

Debido a la extensión del código desarrollado para el análisis computacional, no fue posible incorporarlo en su totalidad en este documento, ya que excede las limitaciones de formato. Por lo tanto, únicamente se describe la metodología utilizada, las variables consideradas y los resultados obtenidos a través del modelo implementado.

De esta forma, se incorpora la inteligencia artificial como herramienta de apoyo que mejora la eficiencia del análisis, manteniendo siempre la validación bajo criterios de ingeniería geotécnica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el Prototipo 6, incluyendo sus características geométricas, condiciones de análisis y comportamiento observado, así como su comparación con los resultados analíticos y recomendaciones derivadas del procesamiento mediante inteligencia artificial.

**PROTOTIPO 6: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS**  
**SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE**  
**1 METRO NORMA BRASILEÑA ABNT NBR 11682:2008:**

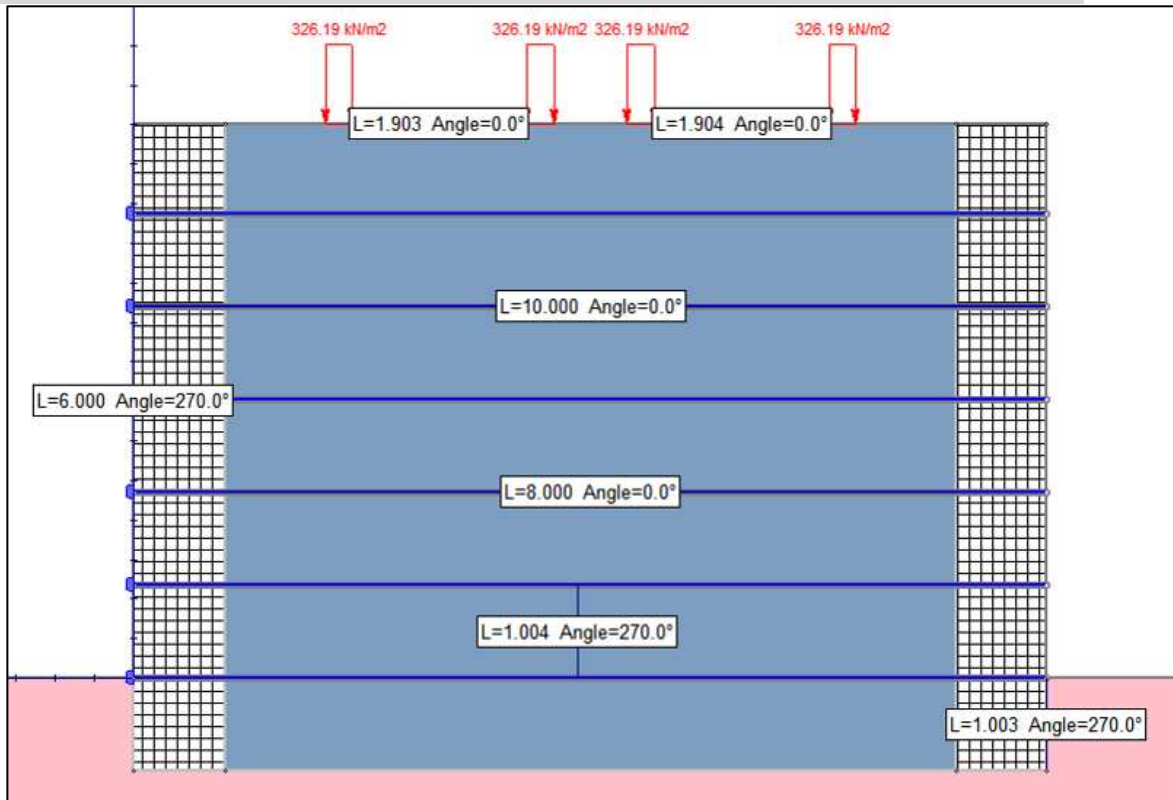


Figura 51. Escenario gráfico del prototipo 6 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 10 m y una cimentación de 1 m de espesor. Esta configuración corresponde a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 6 previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

. Asi mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 10 m.
- altura del gavión: 1 m
- ancho del gavión: 1 m.
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s
- cohesión: 10.79 (KN/m<sup>2</sup>)
- ángulo de fricción interno: 43.58°
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 1 m.
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m
- coeficiente sísmico Kh: 0.15

- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.
- métodos por los que se calculara el Fs: Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 37 y figura 52.

Tabla 37. Resultados del Prototipo 6 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

Norma ABNT a escala REAL 1m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Lowe-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	2.727	11	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.189	13.7	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.584	11.61	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.075	14.46	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.4	117.72	1.443	20.79	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.168	25.68	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.8	186.39	1.132	26.5	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.919	32.64	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.4	326.185	0.787	38.12	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.64	46.88	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Lowe-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	3.636	11	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.918	13.71	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	3.445	11.61	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.767	14.46	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.4	117.72	1.924	20.79	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.558	25.67	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.8	186.39	1.509	26.51	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.225	32.65	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.4	326.185	1.049	38.13	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.853	46.89	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.

Fuente: Elaboración Propia

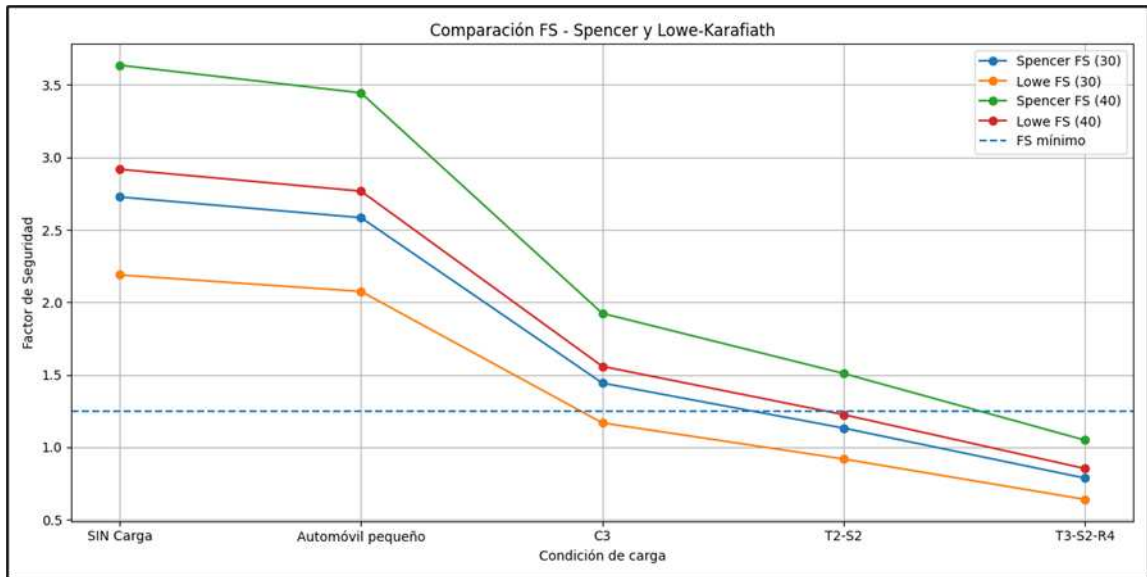


Figura 52. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 6 Escenario gráfico de la Normativa Brasileña Sv 1 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code presentan una tendencia mecánica coherente en relación con los análisis realizados en Slide2, principalmente en la disminución progresiva del factor de seguridad (FS) a medida que aumentan las cargas de los vehículos.

La metodología computacional desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code nos permitió reproducir con éxito la tendencia mecánica observada en los análisis realizados en Slide2, es decir, la reducción progresiva del factor de seguridad y el aumento de las tensiones en las geomallas a medida que aumentan las cargas de los vehículos.

Aunque el modelo implementado no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath utilizados en la Slide2, los resultados obtenidos muestran una correlación adecuada en escenarios de carga media y alta, permitiendo identificar condiciones críticas de estabilidad y posibles mecanismos de falla del refuerzo.

Por lo tanto, la metodología basada en IA puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de

escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica, aunque el diseño final debe validarse mediante software especializado de equilibrio límite.

**PROTOTIPO 7: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS**  
SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE  
**80 CENTÍMETROS** Publicación Técnica 382 IMT MÉXICO:

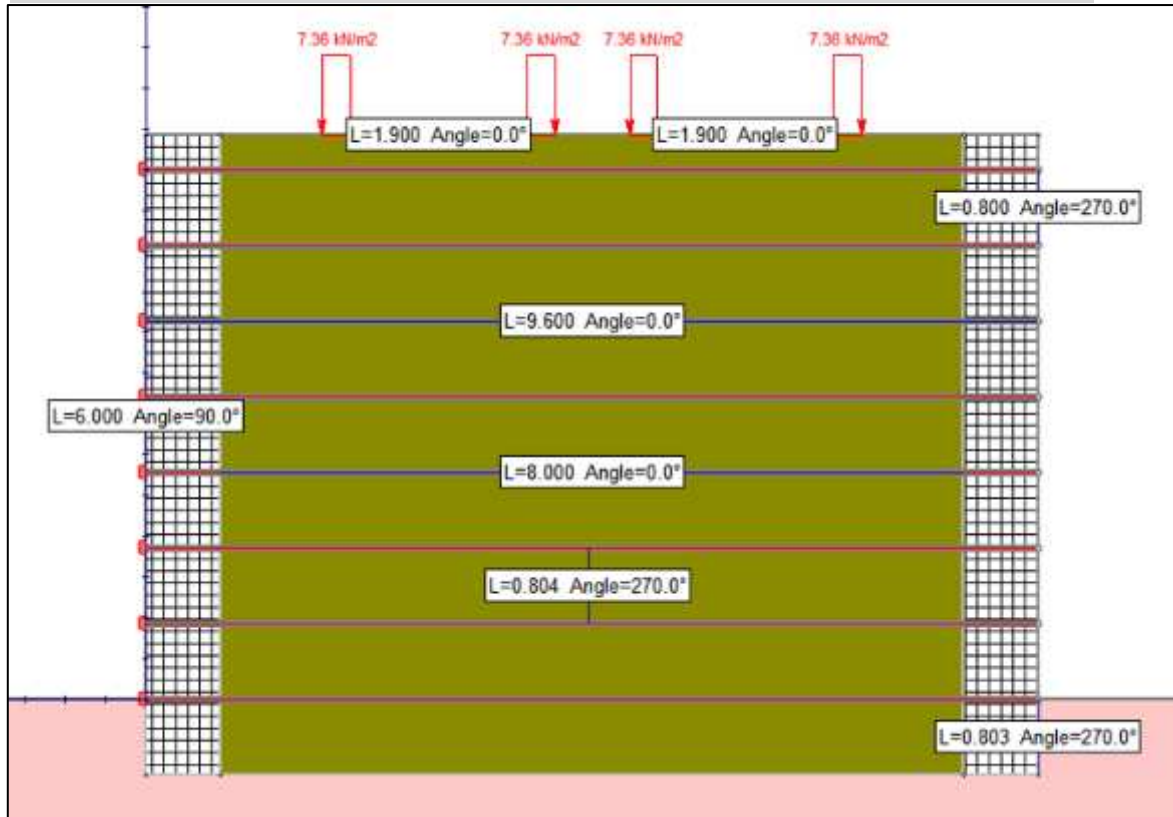


Figura 53. Escenario gráfico del prototipo 7 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 9.60 m y una cimentación de 0.80 m de espesor. Esta configuración corresponde a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 7 previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de

fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 0.80 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

. Así mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 9.60 m.
- altura del gavión: 0.80 m
- ancho del gavión: 0.80 m
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s
- cohesión:10.79 (KN/m<sup>2</sup>)
- ángulo de fricción interno: 43.58°
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 0.80 m
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m

- coeficiente sísmico  $K_h$ : 0.15
- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.
- métodos por los que se calculara el  $F_s$ : Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 38 y figura 54.

Tabla 38. Resultados del Prototipo 7 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

Publicación Técnica 382 IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m2)	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	3.551	8.45	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.85	10.53	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	3.364	8.92	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.702	11.1	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.879	15.97	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.521	19.72	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.474	20.35	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.196	25.08	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.024	29.3	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.833	36.01	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m2)	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	4.735	8.45	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.8	10.53	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	4.485	8.92	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.603	11.1	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	2.505	15.97	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.028	19.72	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.965	20.36	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.595	25.08	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.366	29.28	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.111	36	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.

Fuente: Elaboración Propia

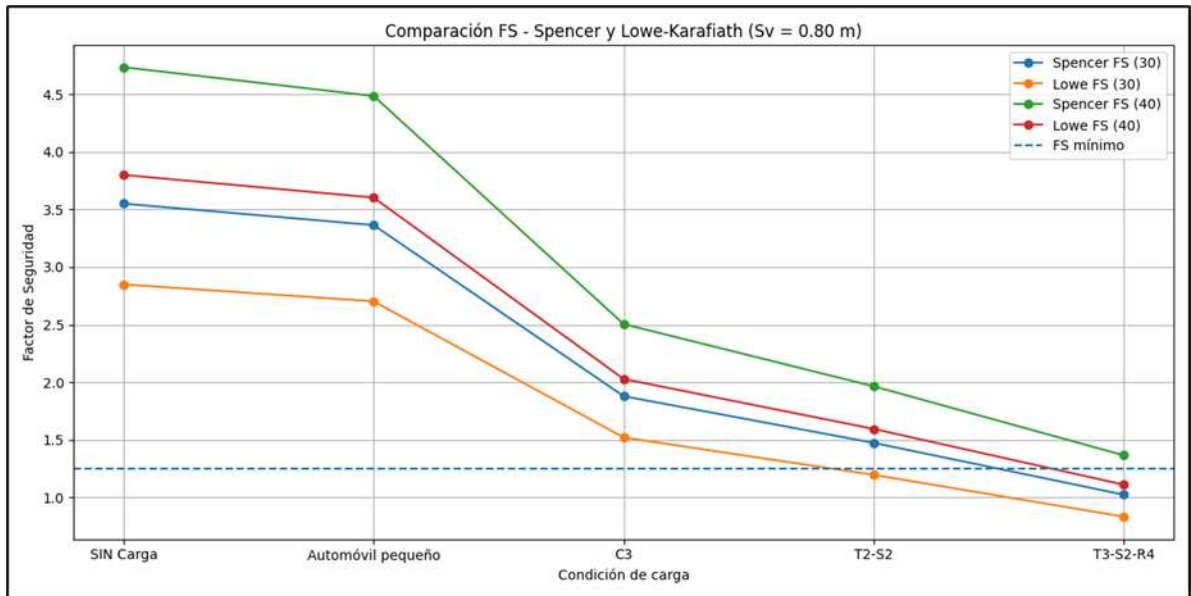


Figura 54. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 7  
Escenario gráfico de la Normativa Mexicana Sv 0.80 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python en Visual Studio Code muestran una tendencia mecánica consistente con los análisis realizados en el Slide 2, es decir, la disminución progresiva del factor de seguridad (FS) y el aumento de las tensiones movilizadas en las geomallas a medida que aumentan las cargas de los vehículos.

La metodología computacional implementada permitió reproducir adecuadamente el comportamiento general del sistema reforzado, identificando escenarios estables, condiciones de altas tensiones y posibles estados críticos asociados a mecanismos de ruptura por rotura o desgarro del refuerzo.

Sin embargo, es importante señalar que el modelo desarrollado en Python no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como el realizado en el Slide 2 utilizando los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath. En este caso, la metodología utiliza ecuaciones simplificadas basadas en relaciones tensión-resistencia y enfoques geotécnicos programados para

reproducir la tendencia mecánica del comportamiento del muro reforzado.

A pesar de esto, los resultados obtenidos presentan una correlación adecuada con los análisis de Slide 2, especialmente en escenarios de carga media y alta, donde ambos enfoques identifican una reducción significativa en FS y un aumento considerable en las tensiones de refuerzo interno.

En particular, la geomalla de 30 kN/m presenta condiciones cercanas o inferiores al límite de estabilidad aceptable en las configuraciones T2-S2 y T3-S2-R4, mientras que la geomalla de 40 kN/m presenta un mejor desempeño estructural, manteniendo mayores factores de seguridad y menores probabilidades de falla del refuerzo.

Por lo tanto, la metodología desarrollada en Python puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica del comportamiento mecánico de muros armados. Sin embargo, el diseño final y la validación estructural deben realizarse utilizando software especializado basado en métodos rigurosos de equilibrio límite, como los implementados en el Slide 2.

**PROTOTIPO 8: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS**  
**SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAJIAL A UN SV DE**  
**HASTA 1.20 METROS MÁXIMO SEGÚN LA NORMA BRASILEÑA ABNT NBR**  
**11682:2008:**

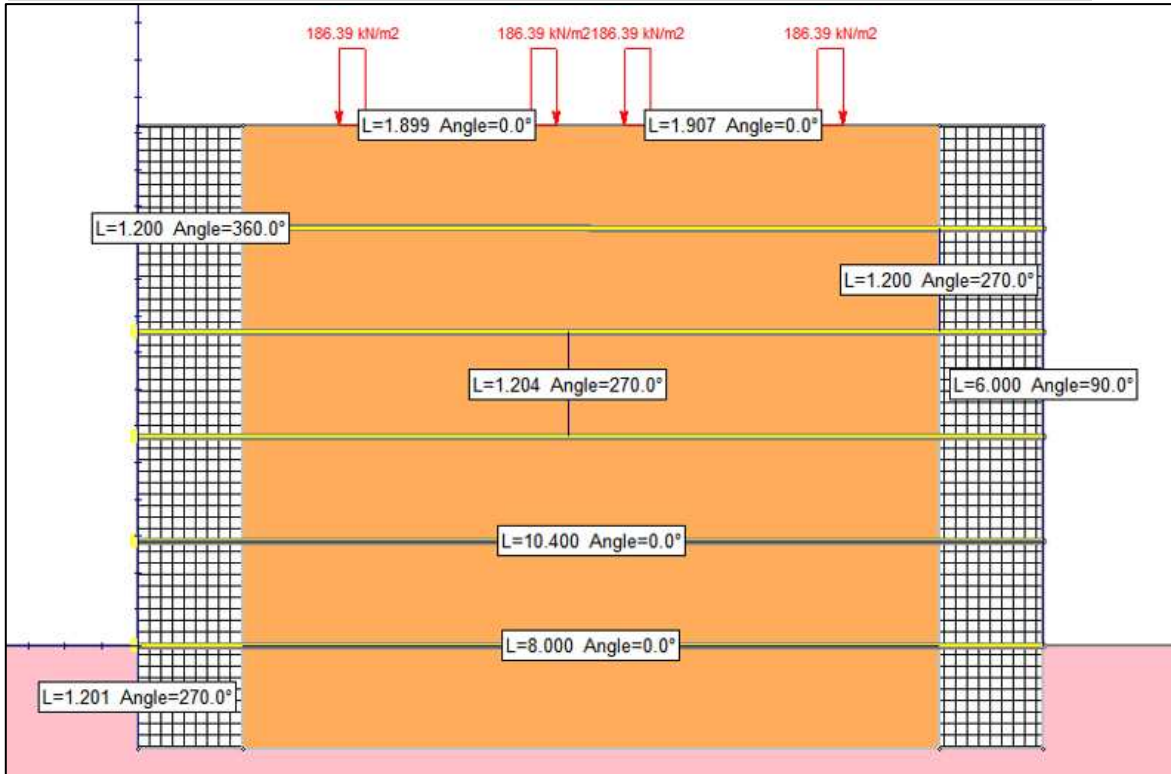


Figura 55. Escenario gráfico del prototipo 8 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 10.40 m y una cimentación de 1.20 m de espesor. Esta configuración corresponde a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 8 previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m³, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas

horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1.20 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

Asi mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 10.40 m.
- altura del gavión: 1.20 m
- ancho del gavión: 1.20 m
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s
- cohesión:10.79 (KN/m<sup>2</sup>)
- ángulo de fricción interno: 43.58°
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 1.20 m
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m
- coeficiente sísmico Kh: 0.15
- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3

117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.

- métodos por los que se calculara el Fs: Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 39 y figura 56.

Tabla 39. Resultados del Prototipo 8 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

Norma ABNT a escala REAL hasta 1.20m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	2.185	13.73	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.754	17.1	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.07	14.49	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.663	18.04	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.156	25.95	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.936	32.05	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.907	33.08	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.736	40.76	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.63	47.62	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.513	58.48	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	2.914	13.73	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.338	17.11	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.76	14.49	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.217	18.04	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.541	25.96	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.248	32.05	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.209	33.09	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.981	40.77	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.84	47.62	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.684	58.48	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Fuente: Elaboración Propia

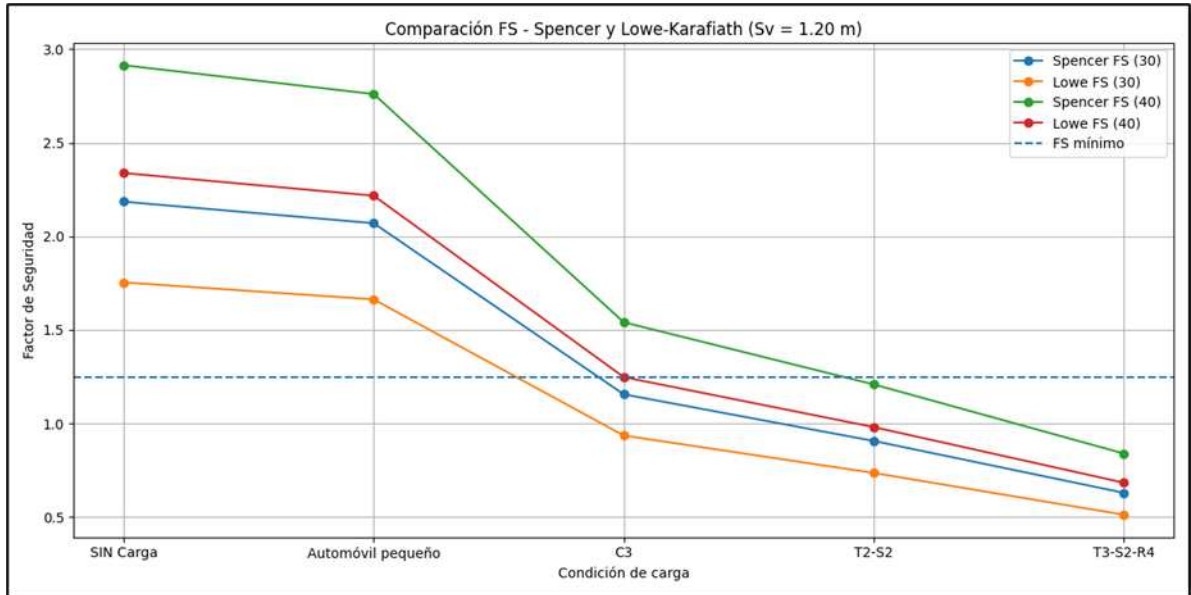


Figura 56. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 8 Escenario gráfico de la Normativa Brasileña hasta un Sv 1.20 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code muestran una tendencia mecánica consistente con los análisis realizados en el software Slide2, observándose una disminución progresiva del factor de seguridad (FS) y un aumento de las tensiones movilizadas en las geomallas a medida que aumentan las cargas aplicadas a los vehículos.

La metodología computacional implementada permitió reproducir adecuadamente el comportamiento general del sistema reforzado, identificando estados estables bajo cargas bajas y condiciones críticas en escenarios de carga pesada, principalmente en las configuraciones de vehículos T2-S2 y T3-S2-R4, donde se presentan factores de seguridad inferiores a los valores recomendados para estabilidad global.

Los resultados muestran que aumentar el espaciamiento vertical del refuerzo interno hasta: Sv =1.20 m provoca una reducción significativa de

la capacidad de confinamiento del sistema, generando mayores tensiones movilizadas en las geomallas y reduciendo la estabilidad general del muro estabilizado mecánicamente.

En el caso de la geomalla de 30 kN/m, los métodos simplificados tipo Spencer y Lowe-Karafiath identifican condiciones críticas derivadas de la carga C3, mientras que en los escenarios T2-S2 y T3-S2-R4 se observan posibles mecanismos de falla asociados al arrancamiento y rotura del refuerzo, principalmente en el método Lowe-Karafiath, que presenta factores de seguridad más conservadores.

Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta un mejor desempeño estructural, manteniendo mayores factores de seguridad y menores tensiones relativas; Sin embargo, bajo la condición de carga T3-S2-R4, también se alcanzan estados cercanos al fallo, particularmente en el análisis de tipo Lowe-Karafiath, donde el FS cae por debajo de la unidad.

Es importante señalar que la metodología implementada en Python no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como el desarrollado en el Slide 2 utilizando los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath. En este caso, el modelo computacional utiliza ecuaciones simplificadas basadas en relaciones resistencia-demanda y criterios geotécnicos programados para reproducir la tendencia mecánica del comportamiento del muro armado.

A pesar de esto, los resultados obtenidos presentan una correlación adecuada con los análisis realizados en el Slide 2, especialmente en escenarios de carga media y alta, donde ambos enfoques identifican una pérdida progresiva de estabilidad y un aumento considerable de las tensiones internas del refuerzo.

Por lo tanto, la metodología desarrollada en Python puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica del

comportamiento mecánico de muros armados. Sin embargo, el diseño final y la validación estructural deben realizarse utilizando software especializado basado en métodos rigurosos de equilibrio límite, como los implementados en el Slide 2.

**PROTOTIPO 9: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS  
SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE  
1.25 METROS SIN NORMATIVA:**

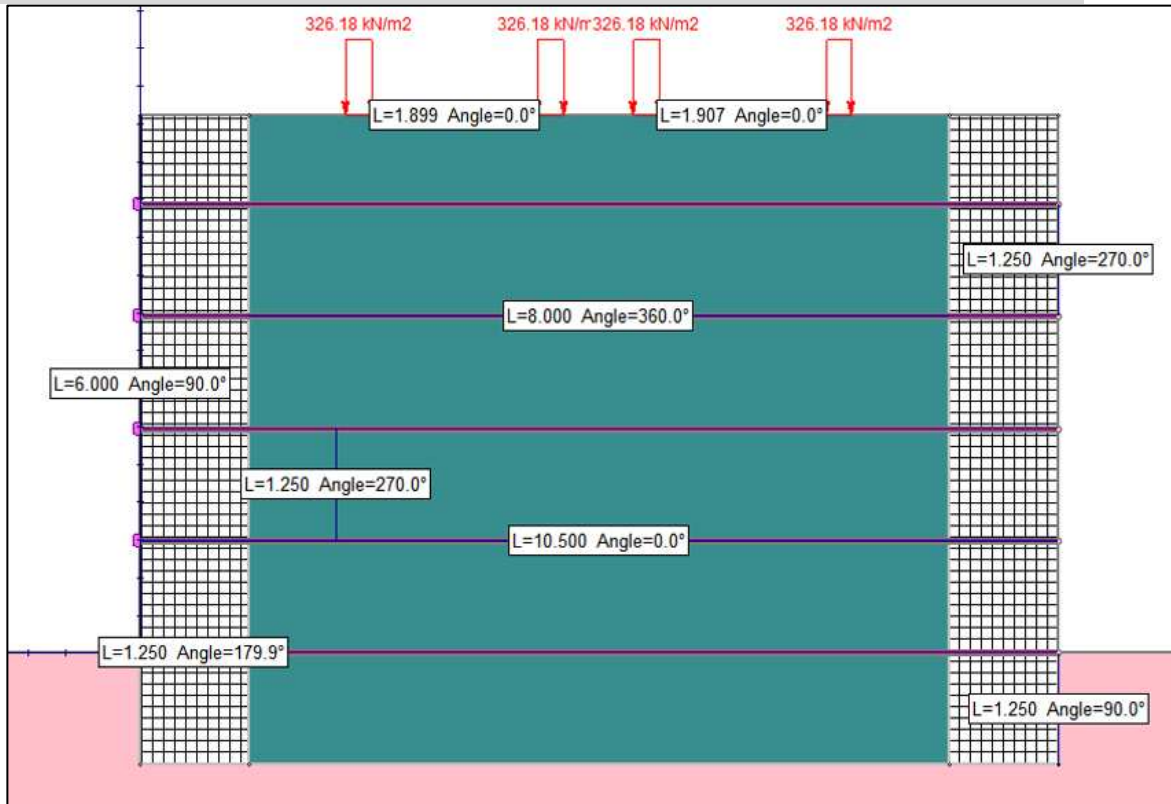


Figura 57. Escenario gráfico del prototipo 9 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 10.40 m y una cimentación de 1.25 m de espesor. Esta configuración corresponde a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 9

previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1.25 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

Así mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 10.50 m.
- altura del gavión: 1.25 m
- ancho del gavión: 1.25 m
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s
- cohesión:10.79 (KN/m<sup>2</sup>)

- ángulo de fricción interno:  $43.58^\circ$
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 1.25 m
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m
- coeficiente sísmico  $K_h$ : 0.15
- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.
- métodos por los que se calculara el  $F_s$ : Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 40 y figura 58.

Tabla 40. Resultados del Prototipo 9 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa a escala REAL 1.25m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	2.078	14.44	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.668	17.99	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.968	15.24	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.581	18.98	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.099	27.3	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.89	33.71	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.862	34.8	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.7	42.86	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.599	50.08	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.488	61.48	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	2.771	14.44	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.223	17.99	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.625	15.24	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.108	18.98	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.466	27.29	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.187	33.7	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.15	34.78	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.933	42.87	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.799	50.06	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.65	61.54	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Fuente: Elaboración Propia

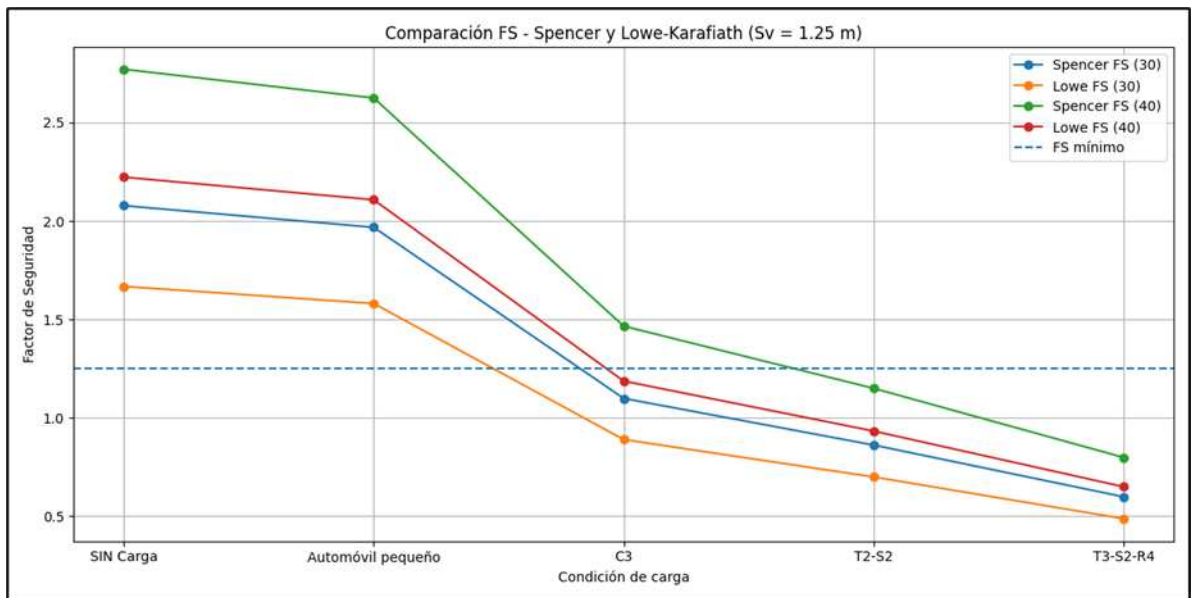


Figura 58. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 9  
Escenario gráfico SIN NORMATIVA Sv 1.25 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code muestran una tendencia mecánica consistente con los análisis realizados en el software Slide 2, observándose una disminución progresiva del factor de seguridad (FS) y un aumento de las tensiones movilizadas en las geomallas a medida que aumentan las cargas aplicadas por los vehículos.

La metodología computacional implementada permitió reproducir adecuadamente el comportamiento general del sistema reforzado, identificando estados estables bajo cargas bajas y condiciones críticas en escenarios de cargas pesadas, particularmente en las configuraciones T2-S2 y T3-S2-R4, donde se presentan factores de seguridad inferiores a los valores recomendados para estabilidad global.

Los resultados muestran que aumentar el espaciamiento vertical del refuerzo interno hasta  $S_v = 1,25$  m provoca una reducción significativa en la capacidad de confinamiento del sistema, generando mayores tensiones movilizadas en las geomallas y reduciendo la estabilidad global del muro

estabilizado mecánicamente. Este comportamiento muestra que las separaciones verticales excesivas disminuyen la eficiencia estructural del refuerzo, especialmente bajo cargas cíclicas pesadas.

En el caso de la geomalla de 30 kN/m, los métodos simplificados de Spencer y Lowe-Karafiath identifican condiciones críticas de carga del vehículo C3 donde los factores de seguridad comienzan a acercarse o caer por debajo de la unidad. Para los escenarios T2-S2 y T3-S2-R4 se observan posibles mecanismos de ruptura asociados al arrancamiento y ruptura del refuerzo interno, principalmente en el método de Lowe-Karafiath, que presenta resultados más conservadores.

Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta un mejor desempeño estructural, manteniendo mayores factores de seguridad y menores tensiones relativas en comparación con la geomalla de 30 kN/m. Sin embargo, en la condición de carga T3-S2-R4, también se alcanzan estados críticos, especialmente en el análisis tipo Lowe-Karafiath, donde el factor de seguridad cae significativamente por debajo de la unidad, lo que indica una alta probabilidad de inestabilidad estructural.

Es importante señalar que la metodología implementada en Python no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como el desarrollado en el Slide 2 utilizando los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath. En este caso, el modelo computacional utiliza ecuaciones simplificadas basadas en relaciones resistencia-demanda y criterios geotécnicos programados para reproducir la tendencia mecánica general del comportamiento del muro armado.

Pese a ello, los resultados obtenidos presentan una adecuada correlación con los análisis realizados en el Slide 2, especialmente en escenarios de carga media y alta, donde ambos enfoques identifican una pérdida progresiva de estabilidad y un aumento considerable de las tensiones internas del refuerzo.

Por lo tanto, la metodología desarrollada en Python puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica del comportamiento mecánico de muros armados. Sin embargo, el diseño final y la validación estructural deben realizarse utilizando software especializado basado en métodos rigurosos de equilibrio límite, como los implementados en el Slide 2.

**PROTOTIPO 10: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE 1.50 METROS SIN NORMATIVA:**

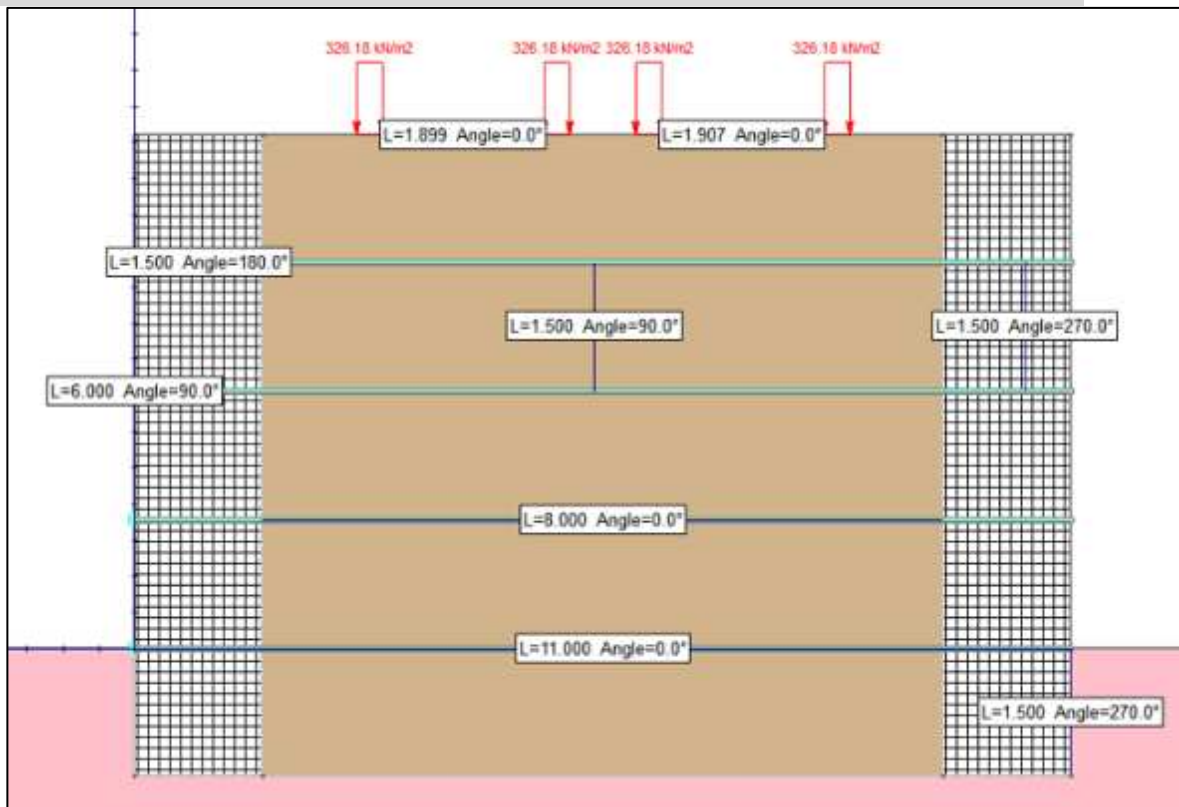


Figura 59. Escenario gráfico del prototipo 10 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 11 m y una cimentación de 1.50 m de espesor. Esta configuración corresponde

a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 10 previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 1.50 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

Así mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 11 m.
- altura del gavión: 1.50 m
- ancho del gavión: 1.50 m
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s

- cohesión:10.79 (KN/m<sup>2</sup>)
- ángulo de fricción interno: 43.58°
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 1.50 m
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m
- coeficiente sísmico Kh: 0.15
- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.
- métodos por los que se calculara el Fs: Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 41 y figura 60.

Tabla 41. Resultados del Prototipo 10 metodología en Python dentro de Visual

Studio Code.

SIN Normativa a escala REAL 1.50m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m2)	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Lowe-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	1.653	18.15	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.327	22.61	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.566	19.16	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.258	23.85	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
C3	24	235.44	117.72	0.874	34.32	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.708	42.37	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.686	43.73	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.557	53.86	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.477	62.89	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.388	77.32	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m2)	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Lowe-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	2.204	18.15	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.769	22.61	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.088	19.16	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.677	23.85	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.166	34.31	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.944	42.37	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.915	43.72	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.742	53.91	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.636	62.89	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.517	77.37	× Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Fuente: Elaboración Propia

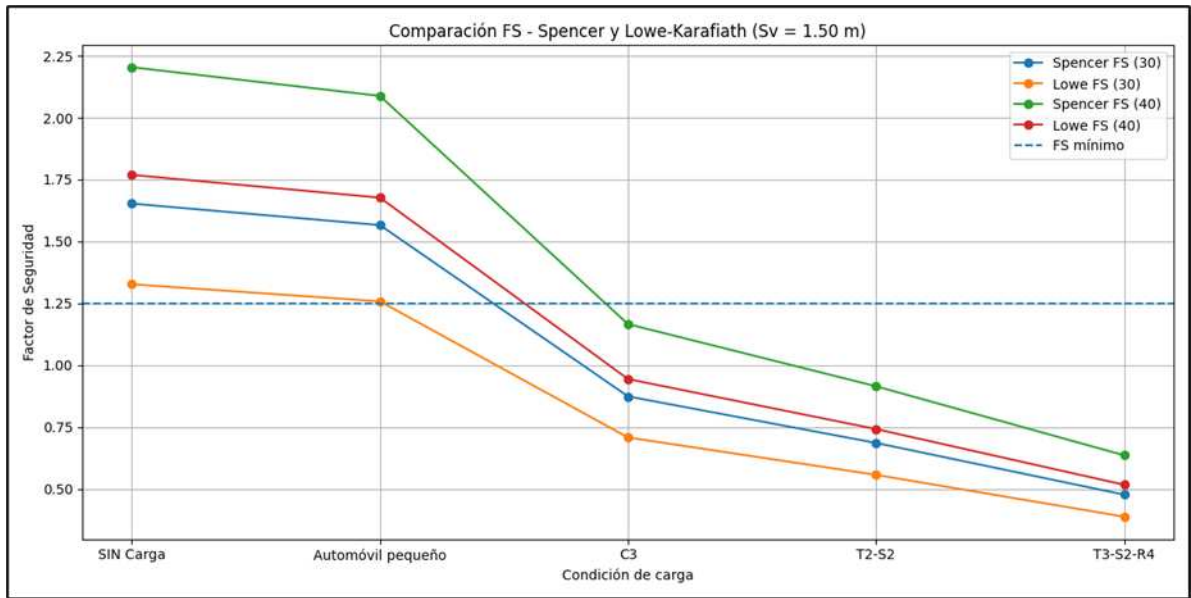


Figura 60. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 10  
Escenario gráfico SIN NORMATIVA Sv 1.50 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code muestran una tendencia mecánica consistente con los análisis realizados en el software Slide 2, observándose una disminución progresiva del factor de seguridad (FS) y un aumento significativo de las tensiones movilizadas en las geomallas a medida que aumentan las cargas aplicadas por los vehículos.

La metodología computacional implementada permitió reproducir adecuadamente el comportamiento general del sistema reforzado, identificando estados de estabilidad parcial bajo cargas bajas y condiciones críticas en escenarios de cargas pesadas, concretamente en las configuraciones T2-S2 y T3-S2-R4, donde los factores de seguridad caen considerablemente por debajo de los valores recomendados para la estabilidad global.

Los resultados muestran que aumentar el espaciamiento vertical del refuerzo interno hasta  $S_v = 1.50$  m provoca una reducción significativa de la capacidad de confinamiento del sistema, generando mayores tensiones

movilizadas en las geomallas y reduciendo significativamente la estabilidad global del muro estabilizado mecánicamente. Este comportamiento muestra que las separaciones verticales excesivas reducen considerablemente la eficiencia estructural del refuerzo, especialmente bajo condiciones de cargas cíclicas intensas.

En el caso de la geomalla de 30 kN/m, los métodos simplificados de Spencer y Lowe-Karafiath identifican estados de tensión altos incluso en condiciones de carga baja, mientras que para la carga C3 ya se observan factores de seguridad por debajo de la unidad y posibles mecanismos de falla asociados con el arranque y rotura del refuerzo. En las configuraciones T2-S2 y T3-S2-R4 ambos métodos indican condiciones claramente inestables, siendo el método de Lowe-Karafiath el que presenta resultados más conservadores y menores factores de seguridad.

Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta un mejor desempeño estructural, manteniendo mayores factores de seguridad en comparación con la geomalla de 30 kN/m. Sin embargo, en las configuraciones C3, T2-S2 y T3-S2-R4, también se identifican condiciones críticas, especialmente en el análisis de Lowe-Karafiath, donde los factores de seguridad caen por debajo de la unidad y las tensiones movilizadas superan con creces los límites de diseño aceptables.

Los resultados obtenidos indican que el aumento progresivo del espaciamiento vertical del refuerzo interno afecta directamente a la capacidad de distribución de tensiones dentro del relleno armado, provocando mayores deformaciones potenciales y reduciendo la eficiencia del confinamiento mecánico proporcionado por las geomallas.

Es importante señalar que la metodología implementada en Python no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como el desarrollado en el Slide 2 utilizando los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath. En este caso, el modelo computacional utiliza ecuaciones simplificadas basadas en relaciones resistencia-demanda y criterios geotécnicos programados para

reproducir la tendencia mecánica general del comportamiento del muro armado.

Pese a ello, los resultados obtenidos presentan una adecuada correlación con los análisis realizados en la en el Slide 2, especialmente en escenarios de carga media y alta, donde ambos enfoques identifican una pérdida progresiva de estabilidad y un aumento considerable de las tensiones internas del refuerzo.

Por lo tanto, la metodología desarrollada en Python puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica del comportamiento mecánico de muros armados. Sin embargo, el diseño final y la validación estructural deben realizarse utilizando software especializado basado en métodos rigurosos de equilibrio límite, como los implementados en el Slide 2.

**PROTOTIPO 11: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS  
SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE  
2 METROS SIN NORMATIVA:**

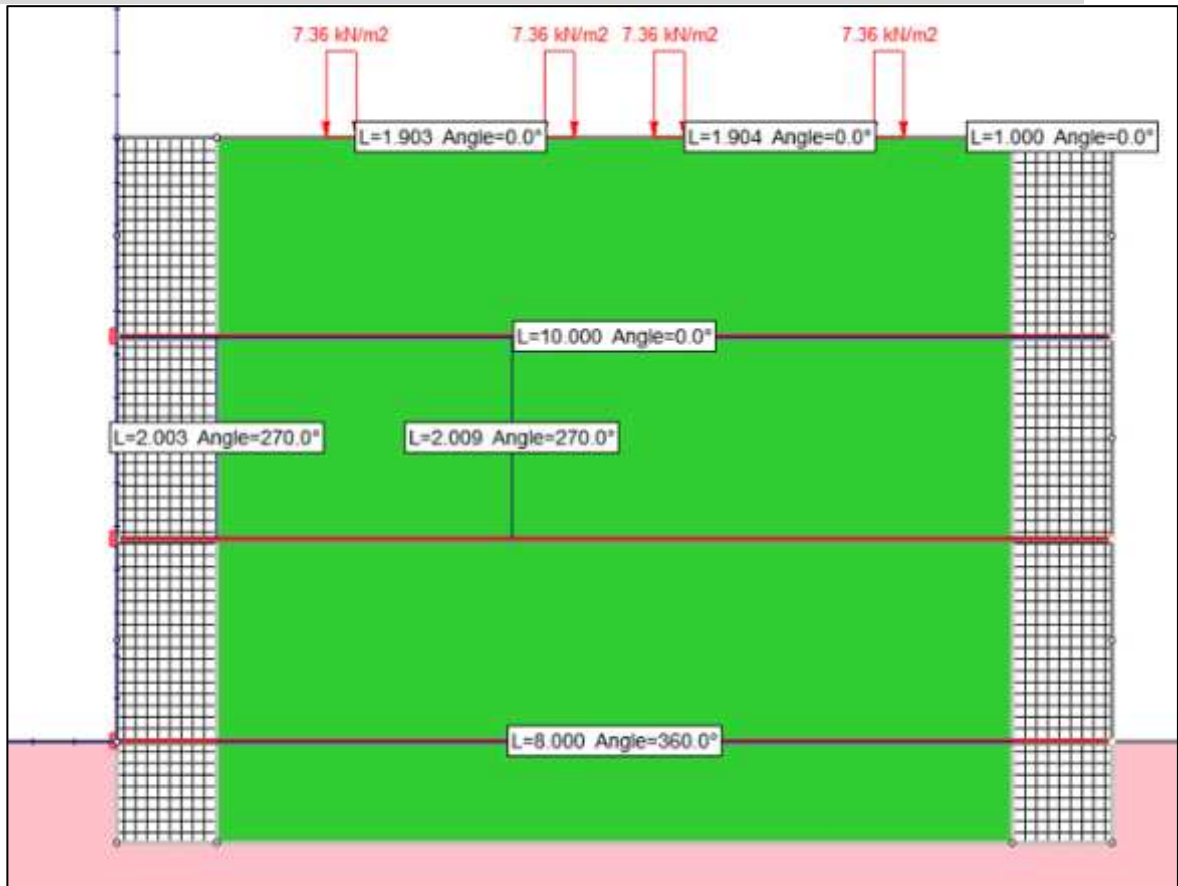


Figura 61. Escenario gráfico del prototipo 11 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 10 m y una cimentación de 1 m de espesor. Esta configuración corresponde a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 11 previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m³, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de

fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 2 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

Así mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 10 m.
- altura del gavión: 2 m
- ancho del gavión: 1 m
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s
- cohesión: 10.79 (KN/m<sup>2</sup>)
- ángulo de fricción interno: 43.58°
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 2 m
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m

- coeficiente sísmico  $K_h$ : 0.15
- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.
- métodos por los que se calculara el  $F_s$ : Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 42 y figura 62.

Tabla 42. Resultados del Prototipo 11 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa escala REAL 2.00 m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	1.364	21.99	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.094	27.42	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.292	23.22	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.038	28.9	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
C3	24	235.44	117.72	0.721	41.61	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.584	51.37	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.566	53	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.459	65.36	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.393	76.34	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.32	93.75	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	1.818	22	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.459	27.42	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.722	23.23	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.384	28.9	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
C3	24	235.44	117.72	0.962	41.58	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.779	51.35	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.754	53.05	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.612	65.36	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.524	76.34	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.427	93.68	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Fuente: Elaboración Propia

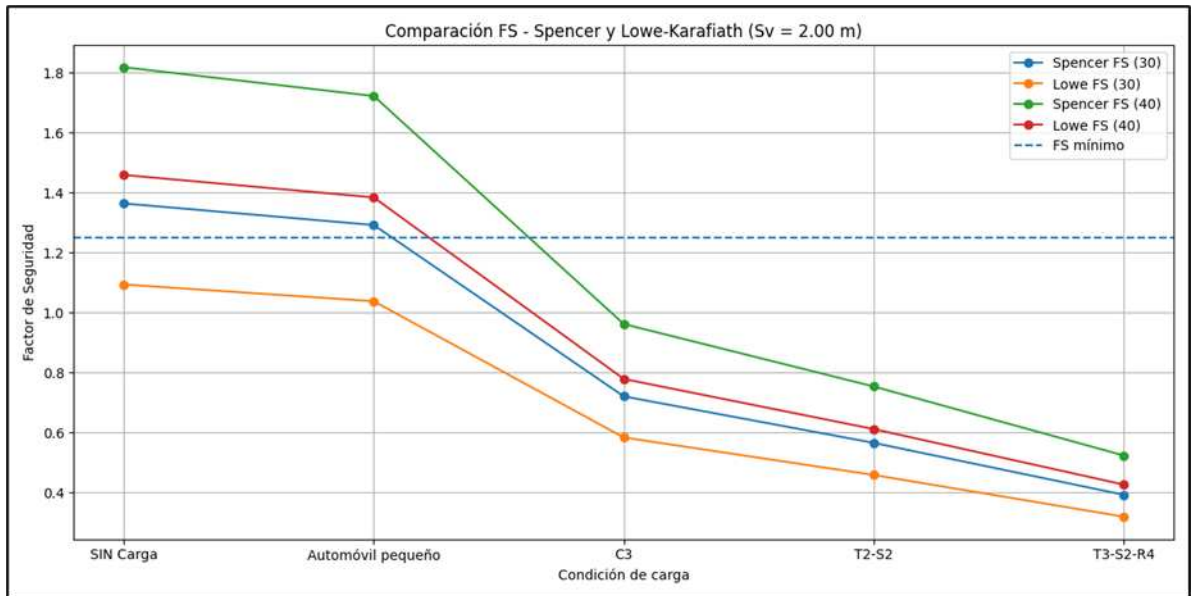


Figura 62. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 11  
Escenario gráfico SIN NORMATIVA Sv 2.00 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code muestran una tendencia mecánica consistente con los análisis realizados en el software Slide 2, observándose una disminución progresiva del factor de seguridad (FS) y un aumento significativo de las tensiones movilizadas en las geomallas a medida que aumentan las cargas aplicadas por los vehículos.

La metodología computacional implementada permitió reproducir adecuadamente el comportamiento general del sistema reforzado, identificando estados de estabilidad limitada bajo cargas bajas y condiciones altamente críticas en escenarios de cargas pesadas, concretamente en las configuraciones C3, T2-S2 y T3-S2-R4, donde los factores de seguridad caen considerablemente por debajo de los valores recomendados para la estabilidad global.

Los resultados muestran que aumentar el espaciamiento vertical del refuerzo interno hasta  $S_v = 2.00$  m provoca una severa reducción en la capacidad de confinamiento del sistema, generando tensiones excesivas

en las geomallas y reduciendo significativamente la estabilidad global del muro estabilizado mecánicamente. Este comportamiento muestra que las separaciones verticales excesivas reducen significativamente la eficiencia estructural del refuerzo, especialmente en condiciones de carga cíclica intensa.

En el caso de la geomalla de 30 kN/m, los métodos simplificados de Spencer y Lowe-Karafiath identifican estados de tensión elevados incluso en condiciones sin carga y con cargas de vehículos ligeros. A partir de la condición C3, ambos métodos presentan factores de seguridad menores a la unidad, lo que indica posibles mecanismos de falla asociados al arranque y ruptura del refuerzo. En las configuraciones T2-S2 y T3-S2-R4 se observan condiciones claramente inestables, siendo el método de Lowe-Karafiath el que presenta resultados más conservadores y menores factores de seguridad.

Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta un mejor desempeño estructural, manteniendo mayores factores de seguridad en comparación con la geomalla de 30 kN/m bajo cargas bajas. Sin embargo, en las configuraciones C3, T2-S2 y T3-S2-R4 también se identifican estados críticos de comportamiento, especialmente en el análisis de Lowe-Karafiath, donde los factores de seguridad caen considerablemente por debajo de la unidad y las tensiones movilizadas superan con creces los límites de diseño aceptables.

Los resultados obtenidos indican que el aumento progresivo del espaciamiento vertical del refuerzo interno afecta directamente a la capacidad de distribución de tensiones dentro del relleno armado, provocando mayores deformaciones potenciales y reduciendo la eficiencia del confinamiento mecánico proporcionado por las geomallas. Comparado con los prototipos evaluados con espaciamientos verticales menores, el modelo con  $S_v = 2.00$  m presenta el comportamiento más crítico y los niveles más bajos de estabilidad global.

Es importante señalar que la metodología implementada en Python no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como el desarrollado en el Slide 2 utilizando los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath. En este caso, el modelo computacional utiliza ecuaciones simplificadas basadas en relaciones resistencia-demanda y criterios geotécnicos programados para reproducir la tendencia mecánica general del comportamiento del muro armado.

Pese a ello, los resultados obtenidos presentan una adecuada correlación con los análisis realizados en el Slide 2, especialmente en escenarios de carga media y alta, donde ambos enfoques identifican una pérdida progresiva de estabilidad y un aumento considerable de las tensiones internas del refuerzo.

Por lo tanto, la metodología desarrollada en Python puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica del comportamiento mecánico de muros armados. Sin embargo, el diseño final y la validación estructural deben realizarse utilizando software especializado basado en métodos rigurosos de equilibrio límite, como los implementados en el Slide 2.

**PROTOTIPO 12: MODELO A ESCALA REAL 1:1 CONFINADO EN LOS 2 LADOS  
SIMULANDO GAVIONES Y REFUERZO INTERNO DE GEOMALLA BIAIXIAL A UN SV DE  
0.60 METROS SIN NORMATIVA:**

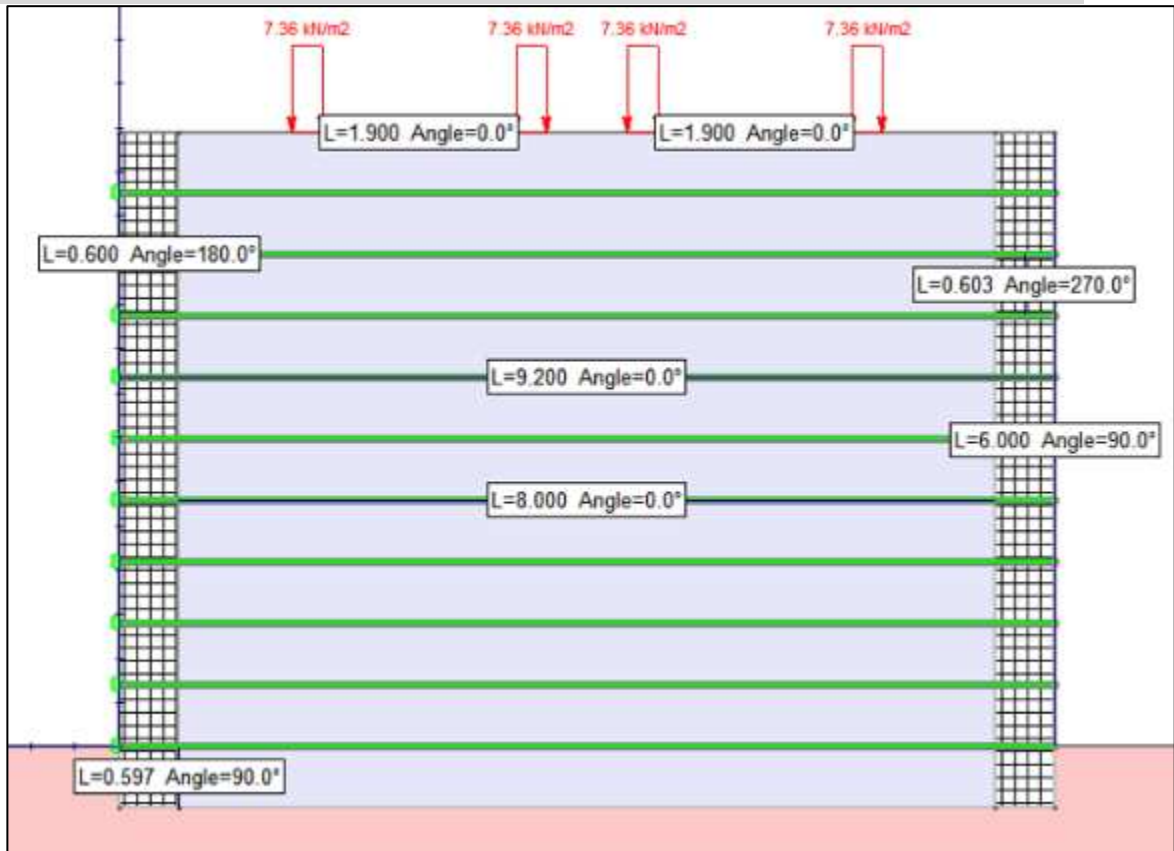


Figura 63. Escenario gráfico del prototipo 12 a escala REAL analizado en el Slide 2 para obtención de Factor de seguridad y comportamiento de tensiones en geomallas bajo condiciones de carga CICLICAS.

El modelo representa un terraplén reforzado para una estructura tipo puente estrecho, con una altura total de 6 m, un ancho de corona de 9.20 m y una cimentación de 0.60 m de espesor. Esta configuración corresponde a la misma representación geométrica y geotécnica del Modelo 12 previamente desarrollada y analizada en el Slide 2.

El relleno corresponde a un material granular del Banco San José Iturbide, caracterizado mediante pruebas de laboratorio y modelado con un peso volumétrico de 19.16 kN/m³, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°.

El refuerzo interno está formado por geomallas biaxiales colocadas horizontalmente con un espaciamiento vertical de 0.60 m. Para el análisis comparativo se utilizaron geomallas con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, el sistema considera un confinamiento lateral tipo gavión y una capa de cimentación compactada para representar la interacción suelo-estructura en condiciones reales.

Desde el punto de vista funcional, el modelo corresponde a una vía secundaria con capacidad para tránsito de carga pesada, considerando las configuraciones vehiculares establecidas en la NOM-012. Las cargas se aplicaron en condiciones críticas de tráfico en un sentido, simulando el efecto de los vehículos pesados sobre la estructura reforzada.

Así mismo los datos de entrada para este ejercicio fueron los siguientes:

- altura del muro mecánicamente estabilizado: 6 m.
- ancho del muro mecánicamente estabilizado: 9.20 m.
- altura del gavión: 0.60 m
- ancho del gavión: 0.60 m
- peso volumétrico del gavión: 17.5 kN/m<sup>3</sup>
- Ángulo de fricción del gavión: 40°
- cohesión del gavión: 17 kN/m<sup>2</sup>
- permeabilidad del gavión: 10<sup>-1</sup> a 10<sup>0</sup> m/s
- Material: Arena del banco San José Iturbide
- peso volumétrico compactado: 1.916 (kg/L)
- permeabilidad del material de relleno: 3.24×10<sup>-2</sup> m/s
- cohesión:10.79 (KN/m<sup>2</sup>)
- ángulo de fricción interno: 43.58°
- Espaciamiento vertical del refuerzo interno: 0.60 m
- Tipo de refuerzo: geomalla biaxial
- Resistencia última del refuerzo interno: 30 y 40 KN/m
- coeficiente sísmico Kh: 0.15

- cargas a las que se someterá: 0 KN/m<sup>2</sup>, auto 7.36 KN/m<sup>2</sup>, C3 117.72 KN/m<sup>2</sup>, T2-S2 186.39 KN/m<sup>2</sup>, T3-S2-R4 326.19 KN/m<sup>2</sup>.
- métodos por los que se calculara el Fs: Spencer y Lowe-Karafiath

Sin embargo, también se le pidió otorgar los resultados en forma digital con un archivo csv de Excel y un gráfico mostrado en la tabla 43 y figura 64.

Tabla 43. Resultados del Prototipo 12 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa escala REAL 0.60 m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	4.941	6.07	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.965	7.57	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	4.68	6.41	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.76	7.98	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	2.614	11.48	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.117	14.17	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	2.05	14.63	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.664	18.03	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.425	21.05	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.159	25.88	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	6.588	6.07	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	5.287	7.57	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	6.24	6.41	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	5.013	7.98	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	3.485	11.48	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.822	14.17	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	2.734	14.63	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.219	18.03	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.9	21.05	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.546	25.87	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.

Fuente: Elaboración Propia

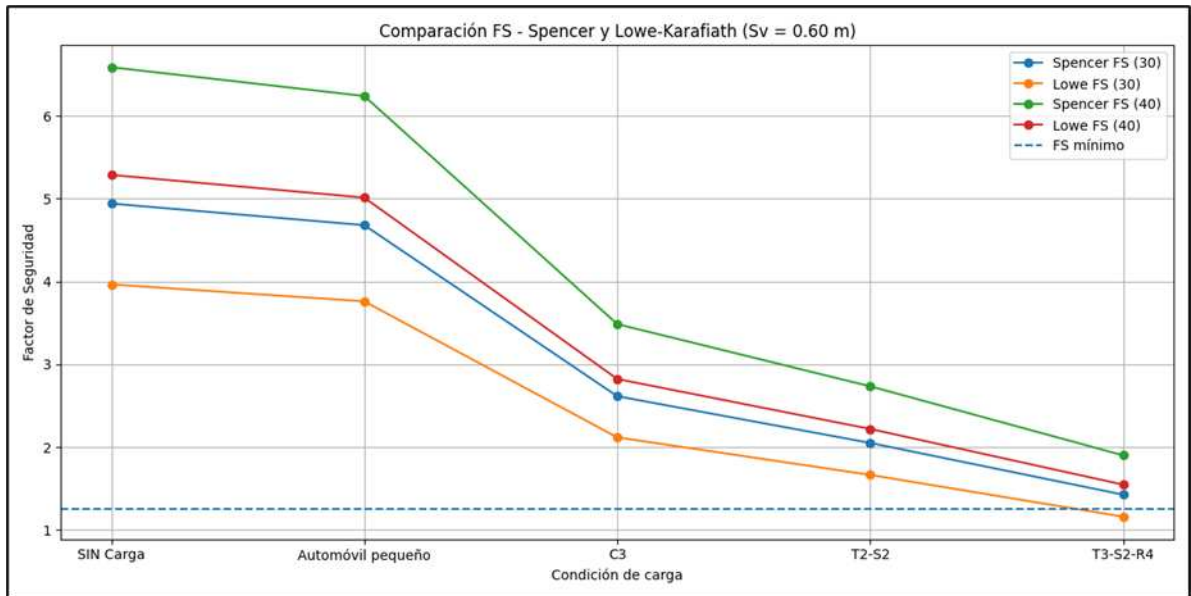


Figura 64. Gráfico obtenido del Studio Code con los resultados del prototipo 12  
Escenario gráfico SIN NORMATIVA Sv 0.60 m.

Los resultados obtenidos a través de la metodología desarrollada en Python dentro de Visual Studio Code muestran una tendencia mecánica consistente con los análisis realizados en el software Slide 2, observándose una disminución gradual del factor de seguridad (FS) y un aumento de las tensiones movilizadas en las geomallas a medida que aumentan las cargas aplicadas por los vehículos.

La metodología computacional implementada permitió reproducir adecuadamente el comportamiento general del sistema reforzado, identificando condiciones estables incluso bajo altas cargas vehiculares, especialmente en comparación con los prototipos evaluados con mayores espaciamientos verticales. En este caso, el reducido espaciamiento vertical de  $S_v = 0,60$  m mejora significativamente el confinamiento mecánico del terraplén, permitiendo una distribución más uniforme de las tensiones y reduciendo las tensiones movilizadas del refuerzo interno.

Los resultados muestran que disminuir el espaciamiento vertical del refuerzo interno a  $S_v = 0,60$  m aumenta considerablemente la estabilidad

global del muro estabilizado mecánicamente, aumentando los factores de seguridad y reduciendo los potenciales mecanismos de deformación y falla. Este comportamiento muestra que separaciones verticales más pequeñas mejoran la eficiencia estructural del sistema reforzado, especialmente en condiciones de carga cíclica intensa.

En el caso de la geomalla de 30 kN/m, los métodos simplificados de Spencer y Lowe-Karafiath presentan condiciones de estabilidad adecuadas en prácticamente todos los escenarios de carga. Los factores de seguridad se mantienen por encima de la unidad incluso en las configuraciones de vehículos más exigentes como el T3-S2-R4. Sin embargo, en esta última condición se comienzan a observar estados de tensión elevados, principalmente en el método de Lowe-Karafiath, donde el FS disminuye a valores cercanos al límite mínimo recomendado, indicando la necesidad de monitorear posibles deformaciones a largo plazo.

Por otro lado, la geomalla de 40 kN/m presenta el mejor comportamiento estructural de todos los modelos evaluados. Los factores de seguridad obtenidos utilizando Spencer y Lowe-Karafiath se mantienen muy por encima de los valores mínimos recomendados en todas las configuraciones de carga, incluido el escenario T3-S2-R4. Asimismo, las tensiones movilizadas se mantienen dentro de rangos de trabajo estables aceptables, demostrando una adecuada capacidad de confinamiento y distribución de tensiones dentro del relleno reforzado.

Los resultados obtenidos indican que reducir el espaciamiento vertical del refuerzo interno mejora directamente la capacidad de distribución de tensiones dentro del terraplén reforzado, reduciendo las potenciales deformaciones y aumentando la eficiencia del confinamiento mecánico proporcionado por las geomallas. Comparado con los prototipos evaluados con  $S_v = 1,20$  m,  $1,25$  m,  $1,50$  m y  $2,00$  m, el modelo con  $S_v = 0,60$  m presenta el comportamiento mecánico más estable y los mayores niveles de seguridad global.

Es importante señalar que la metodología implementada en Python no realiza un análisis de equilibrio límite riguroso como el desarrollado en el Slide 2 utilizando los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath. En este caso, el modelo computacional utiliza ecuaciones simplificadas basadas en relaciones resistencia-demanda y criterios geotécnicos programados para reproducir la tendencia mecánica general del comportamiento del muro armado.

Pese a ello, los resultados obtenidos presentan una adecuada correlación con los análisis realizados en el Slide 2, especialmente en escenarios de carga media y alta, donde ambos enfoques identifican correctamente la evolución de la estabilidad global y el comportamiento traccional del refuerzo interno.

Por lo tanto, la metodología desarrollada en Python puede considerarse una herramienta confiable para el análisis preliminar, comparación de escenarios y apoyo en la interpretación geotécnica del comportamiento mecánico de muros armados. Sin embargo, el diseño final y la validación estructural deben realizarse utilizando software especializado basado en métodos rigurosos de equilibrio límite, como los implementados en el Slide 2.

Diferencia fundamental entre IA y Slide2:

En Slide 2 hace:

- discretización del talud o muro en duelas,
- equilibrio de fuerzas horizontales y verticales,
- equilibrio de momentos,
- búsqueda automática de superficies críticas,
- iteraciones numéricas,
- y análisis completos de estabilidad global.

Los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath implementados en Slide2 son procedimientos matemáticos rigurosos de equilibrio límite.

En la metodología de IA desarrollada

La IA funciona a través de:

- ecuaciones simplificadas,
- relaciones entre carga y degradación de FS,
- estimaciones de tensión en geomallas,
- criterios lógicos de comportamiento,
- y normas geotécnicas programadas.

Entonces el modelo funciona más como:

- una herramienta predictiva,
- un sistema de estimación rápido,
- una metodología de evaluación preliminar.
- Fiabilidad de la metodología de IA

A pesar de las simplificaciones, los resultados muestran una correspondencia importante en la tendencia mecánica con respecto al Slide2.

Coincidencias relevantes entre los dos métodos.

Ambos identifican correctamente que:

- El FS disminuye a medida que aumenta la carga,
- Las tensiones en las geomallas aumentan progresivamente,
- la geomalla de 40 kN/m tiene mejor rendimiento,
- y las condiciones más críticas corresponden a:
  - T2-S2,
  - T3-S2-R4.

Asimismo, la metodología de IA pudo detectar:

- estados de tensión,
- posibles mecanismos de pullout,
- y escenarios de rotura probable.

Evaluación cuantitativa de confiabilidad:

En condiciones de carga inmediata y alta, la diferencia entre IA y Slide 2 disminuye considerablemente.

Las diferencias varían aproximadamente entre:

$$7\% \leq \Delta FS \leq 15\%$$

lo que representa una aproximación razonable para análisis preliminares.

Con cargas bajas, la IA tiende a sobreestimar el FS debido a la simplificación del modelo resiliente.

En cargas críticas, la IA se vuelve más conservadora y puede identificar adecuadamente posibles escenarios de falla.

Interpretación técnica de la confiabilidad:

La metodología desarrollada puede considerarse confiable para:

- análisis preliminares,
- estudios comparativos,
- evaluación rápida de escenarios de carga,
- interpretación del comportamiento reforzante,
- y apoyo académico en la estabilidad de muros armados.

Sin embargo, no debe utilizarse como sustituto del software geotécnico especializado para el diseño final.

## **5. Prototipo físico**

El prototipo físico diseñado para esta investigación propuso inicialmente las dimensiones de 60 × 80 × 60 cm, las cuales se basa en las pautas experimentales utilizadas en estudios previos de modelos de suelo reforzado reducido (Benjamín et al., 2007; Chen et al., 2007; Hu et al., 2010). Pero al analizar las medidas de la maquina universal donde se montaría el prototipo físico estas dimensiones excedían el espacio de la placa, por lo que se propusieron dimensiones de 60 cm de largo x 50 cm de ancho x 30 cm de alto para los prototipos del 1 al 3 y de 64 cm de largo x 48 cm de ancho x 24 cm de alto aproximadamente para los prototipos del 4 y 5. Estas dimensiones permiten reproducir adecuadamente los

mecanismos de deformación interna del terraplén sin presentar efectos indeseables de fricción lateral o confinamientos artificiales, manteniendo un volumen manejable para la compactación, instrumentación y medición, tal como lo recomiendan Byrne (2014) y Dulcey et al. (2018). La geometría cuadrangular promueve una construcción limpia y un control uniforme del material de relleno. Además, la altura propuesta permite representar escenarios de espaciamiento vertical equivalente establecidos en la publicación técnica IMT 382 (80 cm) y en la norma brasileña ABNT NBR 11682 (1 m), mediante modelado a escala en capas discretas.

Para simular estos escenarios regulatorios se utilizan bloques de concreto de 8 cm y 10 cm, que funcionan como elementos de confinamiento laterales que representan la altura de la capa en cada configuración experimental. Cada espesor le permite replicar un escenario particular de espaciado vertical entre capas de geomalla.

**8 cm** publicación técnica IMT 382 representa un espaciamiento reducido equivalente a un refuerzo denso.

**10 cm** norma brasileña ABNT NBR 11682 (1 m) funciona como escenario intermedio entre las dos regulaciones.

El prototipo incorpora una geomalla biaxial, seleccionada por su capacidad para proporcionar resistencia a la tracción en dos direcciones y mejorar el confinamiento del suelo, características ampliamente documentadas en aplicaciones de muros de suelo reforzado y terraplenes (Moreno et al., 2015; Das, 2015). Varios autores señalan que este tipo de refuerzo frena la propagación de deformaciones y contribuye a la estabilidad interna del sistema, incluso bajo cargas cíclicas (Hu et al., 2010; Esmaili et al., 2018). De acuerdo con publicaciones técnicas del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), la resistencia del refuerzo en estructuras de suelo reforzado no se define mediante valores fijos, sino que se basa en un enfoque basado en el comportamiento mecánico del sistema. Así, la resistencia a la tracción se expresa como una resistencia de diseño,

obtenida reduciendo la resistencia última mediante factores de fluencia, daños a la instalación y degradación ambiental, garantizando unas condiciones de servicio adecuadas.

En este sentido, la resistencia requerida debe satisfacer la estabilidad interna, externa y global del talud, en función de las tensiones inducidas en cada nivel de geomallas. Por tanto, no constituye un valor único, sino una variable derivada del análisis del equilibrio límite y de la distribución de tensiones en el sistema.

En este marco, la selección de refuerzo en el presente estudio está respaldada por el trabajo experimental de Ying Liu et al. (2022), donde, utilizando arena de Fujian, se utilizó una geomalla biaxial con una resistencia última del orden de 9 kN/m. Este valor corresponde a modelos físicos de laboratorio, en los que la geomalla se elige para reproducir los mecanismos de interacción suelo-refuerzo y permitir la movilización de deformaciones, y no por criterios de diseño a escala real.

Por otro lado, para el desarrollo de este estudio se utilizó una geomalla con resistencia nominal de 30 kN/m (30S), proporcionada por la empresa colaboradora. Esta selección responde a condiciones prácticas de disponibilidad y aplicación, manteniendo coherencia con el enfoque IMT, en el que la adecuación del refuerzo interno se verifica en función de las tensiones movilizadas y de la estabilidad del sistema, y no por un único valor de resistencia última. La selección de una geomalla biaxial con una resistencia cercana a los 30 kN/m, compatible con la especificación de la publicación técnica IMT 382, permite reproducir condiciones realistas dentro del modelo.

En cuanto al material de relleno, la referencia base es la arena tipo Fujian, utilizada por Liu et al. (2022) debido a sus propiedades estables, homogéneas y ampliamente caracterizadas en estudios geotécnicos. Su alta fricción interna, tamaño de partícula controlado y respuesta consistente

bajo cargas cíclicas lo convierten en un material ideal para evaluar el desempeño de suelos reforzados. Aunque en esta investigación no se dispone de arena de Fujian, de los bancos de Querétaro se seleccionará aquella cuyo material presente propiedades más similares a las de dicha arena (ángulo de fricción, densidad relativa, coeficientes de granulometría y uniformidad). Esta correspondencia garantiza la reproducibilidad del comportamiento mecánico y, sobre todo, la validez comparativa de los resultados obtenidos en base a las condiciones reportadas en la literatura.

### 5.1 Selección de material de relleno mediante la comparación con la arena Fujian

El primer consiste en seleccionar cuál de los cuatro materiales procedentes de bancos locales presenta el comportamiento más cercano a la arena estándar de Fujian, utilizada en el artículo original y reconocida internacionalmente por su homogeneidad y propiedades bien documentadas.

#### 1. Propiedades de referencia de la arena de Fujian

Según Liu et al. (2022), la arena estándar de Fujian tiene las siguientes características Tabla 44.

Tabla 44. Propiedades de la arena Fujian

Propiedades	Valor arena Fujian
Gravedad específica <b>GS</b>	2.64
Relación de vacíos mínima <b>e_Min</b>	0.32
Relación de vacíos máxima <b>e_Máx</b>	0.71
Tamaño medio de grano, <b>d50</b>	0.7 mm
Coefficiente de Uniformidad <b>Cu</b>	7.32
Coefficiente de Curvatura <b>Cc</b>	Entre 1.1 y 2.3
Ángulo de fricción interna <b>φ</b>	44°
Permeabilidad	$1.2 \times 10^{-3}$ m/s.

clasificación (USCS)	Arena Bien Graduada <b>SW</b>
----------------------	-------------------------------

Fuente: Elaboración propia con datos de (Liu et al.,2022).

Esto lo convierte en un material granular denso y uniforme sin finos significativos. De acuerdo con los resultados presentados en la guía del proyecto se obtuvieron los siguientes parámetros de los 4 bancos analizados y se comparó con los valores proporcionados por el artículo origen:

Tabla 45. Propiedades de los 4 bancos muestra y arena Fujian

Banco	USCS	k (m/s)	D50 (mm)	Cu	Cc	% Finos	Evaluación granulométrica
<b>Arena Fujian</b>	SW	$1.2 \times 10^{-2}$	0.364	<b>6.13</b>	1.11	5.0	Referencia (curva continua y bien graduada)
<b>Conín</b>	SP	$9.61 \times 10^{-2}$	2.303	18.19	4.13	6.46	Muy gruesa y mal graduada
<b>Cañada</b>	SW	$2.34 \times 10^{-2}$	1.364	16.92	2.07	7.5	Bien graduada pero abierta
<b>La Luz</b>	SW	$3.43 \times 10^{-2}$	1.496	22.99	1.27	7.7	Buena forma, pero muy gruesa
<b>San José Iturbide</b>	SP	$3.24 \times 10^{-2}$	1.088	6.50	0.82	2.74	Mayor similitud global

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46. Análisis de similitud con arena Fujian

Parámetro	Arena Fujian	San José Iturbide	Evaluación técnica
<b>Clasificación USCS</b>	SW	SP	Diferente, pero ambos friccionales
<b>D50 (mm)</b>	0.364	1.088	Más grueso, pero el más cercano relativo
<b>Cu (-)</b>	6.13	6.50	✓ Muy similar (clave en comportamiento)
<b>Cc (-)</b>	1.11	0.82	✓ Cercano a 1 (curva continua)
<b>% Finos</b>	≈ 5%	≈ 2.74%	Menor contenido, pero comportamiento similar

<b>Permeabilidad k (m/s)</b>	$1.2 \times 10^{-2}$	$3.24 \times 10^{-2}$	Ambos altamente drenantes
<b>Tipo de comportamiento</b>	Friccional	Friccional	✓ Equivalente
<b>Forma de curva</b>	Continua (bien gradada)	Continua (ligeramente más abierta)	✓ Similar en tendencia
<b>Similitud global</b>	—	—	☆ Mejor candidato

Fuente: Elaboración Propia

El análisis comparativo de los materiales indica que el banco San José Iturbide es el que presenta mayor similitud con la arena de Fujian. Esta correspondencia se basa principalmente en la proximidad de sus coeficientes de uniformidad ( $C_u \approx 6$ ), lo que implica una distribución de tamaño de partícula similar y, por tanto, un comportamiento mecánico comparable. Asimismo, el coeficiente de curvatura ( $C_c \approx 0.82$ ) mantiene una tendencia cercana a la unidad, indicando una curva granulométrica continua, similar a la del material de referencia.

En términos hidráulicos, la arena de Fujian tiene una permeabilidad del orden de  $1,2 \times 10^{-2}$  m/s, mientras que el banco San José Iturbide alcanza valores del orden de  $3,24 \times 10^{-2}$  m/s. Aunque este último es ligeramente más permeable debido a su mayor tamaño de partícula, ambos materiales se clasifican como altamente drenantes, lo que favorece la disipación de las presiones integrales y contribuye a la estabilidad del talud.

De acuerdo con los lineamientos del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), la estabilidad de las estructuras de suelo reforzado depende no sólo de la resistencia del refuerzo, sino también de las condiciones hidráulicas del material. En este sentido, la permeabilidad observada en ambos materiales es adecuada y no representa una limitación para su comportamiento estructural.

Aunque existen diferencias en el tamaño promedio de partícula y contenido de finos, el material San José Iturbide es el que mejor reproduce

la estructura granulométrica, comportamiento mecánico y condiciones de drenaje de la arena de Fujian, por lo que se considera el más adecuado para su representación en el presente estudio.

El material seleccionado es:

✓ Banco SAN JOSÉ ITURBIDE

A demás tomando en cuenta variables como el ángulo de fricción interno del material Arena Fujian la diferencia inferior a 1°. Su mayor cohesión indica una ligera presencia de finos, pero su respuesta al corte es la que más se asemeja a la arena estándar.

La similitud en  $\phi$  es fundamental para reproducir la deformación acumulada y la respuesta bajo carga cíclica.

## 5.2 Determinación de la compactación del material seleccionado

Para calcular compactación del prototipo con una escala vertical **(SV) de 10 cm**, se consideró el peso total del compactador, la altura de caída y el número de golpes aplicados durante el proceso de compactación. El modelo utilizado tiene unas dimensiones planas de 42 cm x 32 cm y una altura de 10 cm, lo que corresponde a un volumen de muestra total de 13.440 cm<sup>3</sup>.

La energía de compactación se calculó mediante la expresión:

$$Ec = \frac{(N)(n)(h)(W)}{Vm}$$

Dónde:

N es el número de capas,

n el número de trazos por capa,

W el peso del pisón y

h es la altura de la caída.

Tabla 47. Cálculo de compactación prototipos con Sv 10 cm.

Cálculos para Prototipo de Norma ABNT BRASILEÑA 10 CM (Sv)							
<b>W</b>	pisón=	8.01	kg	<b>V<sub>m</sub></b>	Volumen de la muestra=	13440.00	cm <sup>3</sup>
<b>h</b>	Altura de caída =	45.70	cm				
<b>n</b>	No. de golpes=	111		<b>Energía de compactación</b>			
<b>N</b>	No. de capas=	2		$E_c = \frac{(N)(n)(h)(W)}{V_m}$		6.05	kg-cm /cm <sup>3</sup>
DATOS CILINDRO							
<b>L1</b>	Lado 1	42	cm				
<b>L2</b>	Lado 2	32	cm	<b>Peso de la muestra</b>			
<b>h</b>	Altura	10.00	cm	$W_m = (\gamma_m)(V_m)$		134400	gr
						134.40	kg

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores utilizados en el modelo se obtuvo una energía de compactación de 6.05 kg cm/cm<sup>3</sup>, valor prácticamente equivalente al especificado por la norma ASTM D698, lo que garantiza que el prototipo reproduce adecuadamente las condiciones de compactación del ensayo estándar en la escala considerada.

Para calcular compactación del prototipo con una escala vertical **(SV) de 8 cm**, se consideró el peso total del compactador, la altura de caída y el número de golpes aplicados durante el proceso de compactación. El modelo utilizado tiene unas dimensiones planas de 42 cm × 32 cm y una altura de 10 cm, lo que corresponde a un volumen de muestra total de 93.25 cm<sup>3</sup>.

La energía de compactación se calculó mediante la expresión:

dónde

N es el número de capas,

n el número de trazos por capa,

W el peso del pisón y

h es la altura de la caída.

Tabla 48. Cálculo de compactación prototipos con Sv 8 cm.

<b>Cálculos modelo Publicación Técnica 382 IMT MÉXICO 8 cm (Sv)</b>						
<b>W</b>	pisón=	8.01	kg	<b>V<sub>m</sub></b>	Volumen de la muestra=	11656.00 cm <sup>3</sup>
<b>h</b>	Altura de caída =	45.70	cm			
<b>n</b>	No. de golpes=	180		<b>Energía de compactación</b>		
<b>N</b>	No. de capas=	1		$E_c = \frac{(N)(n)(h)(W)}{V_m}$		
DATOS CILINDRO					5.65	kg-cm /cm <sup>3</sup>
<b>L1</b>	Lado 1	47	cm			
<b>L2</b>	Lado 2	31	cm	<b>Peso de la muestra</b>		
<b>h</b>	Altura	8	cm	$W_m = (\gamma_m)(V_m)$		
					93248	gr
					93.25	kg

Fuente: Elaboración propia.

Con los valores utilizados en el modelo se obtuvo una energía de compactación de 5.65 kg cm/cm<sup>3</sup>, valor prácticamente equivalente al especificado por la norma ASTM D698, lo que garantiza que el prototipo reproduce adecuadamente las condiciones de compactación del ensayo estándar en la escala considerada.

### 5.3 Especificación del uso y dimensiones de los cubos de concreto

El artículo original utiliza bloques de hormigón para simular la cara del muro y los niveles de control donde las dimensiones de los bloques son



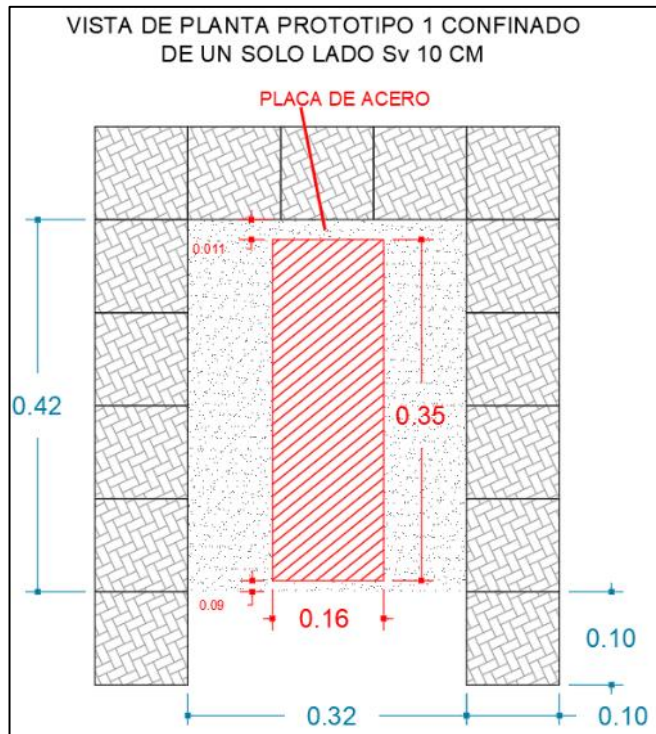


Figura 34. Prototipo 1 Confinado solo de un lado, Sv 10 cm Norma Brasileña.

Fuente: Elaboración propia.



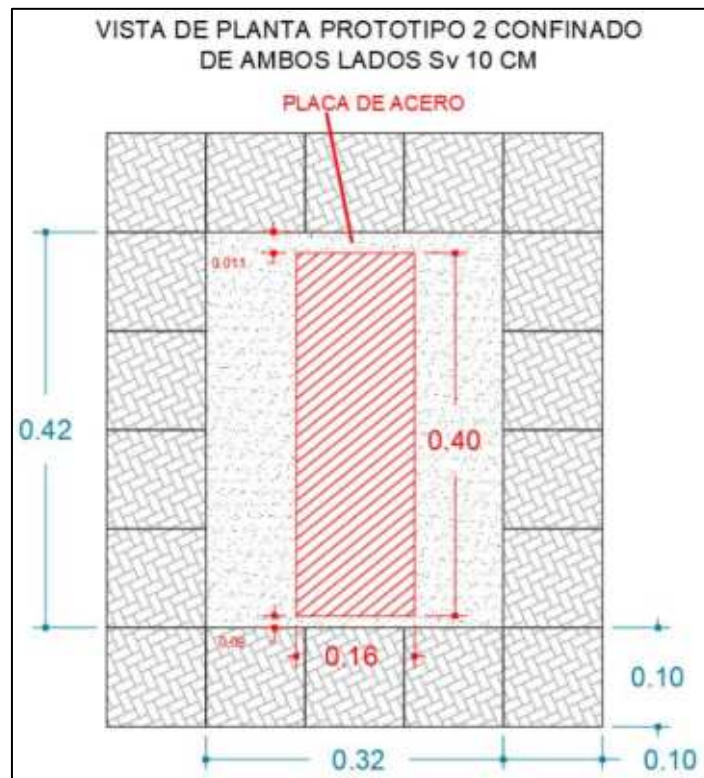
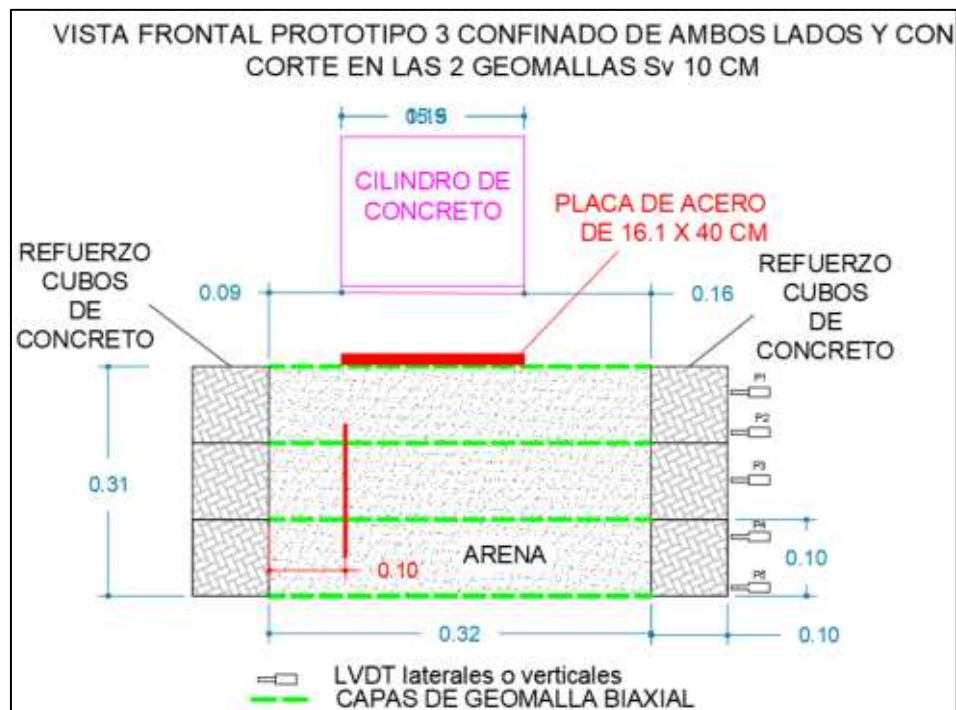


Figura 35. Prototipo 2 confinado en ambos lados, Sv 10 cm Norma Brasileña.

Fuente: Elaboración propia.



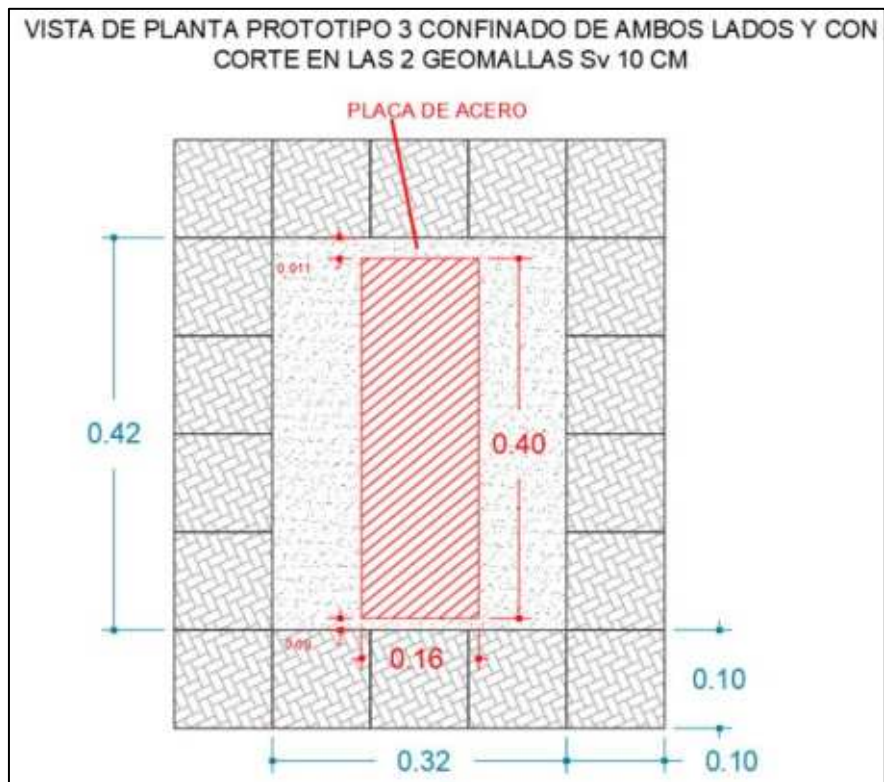
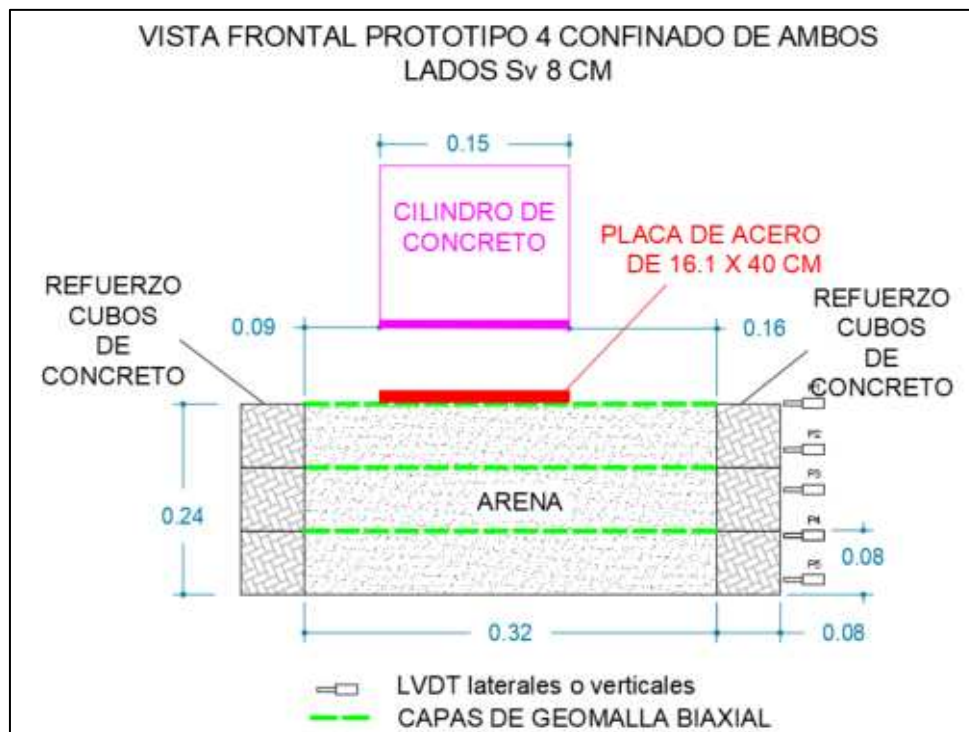


Figura 36. Prototipo 3 Corte en geomallas, Sv 10 cm Norma Brasileña.

Fuente: Elaboración propia.



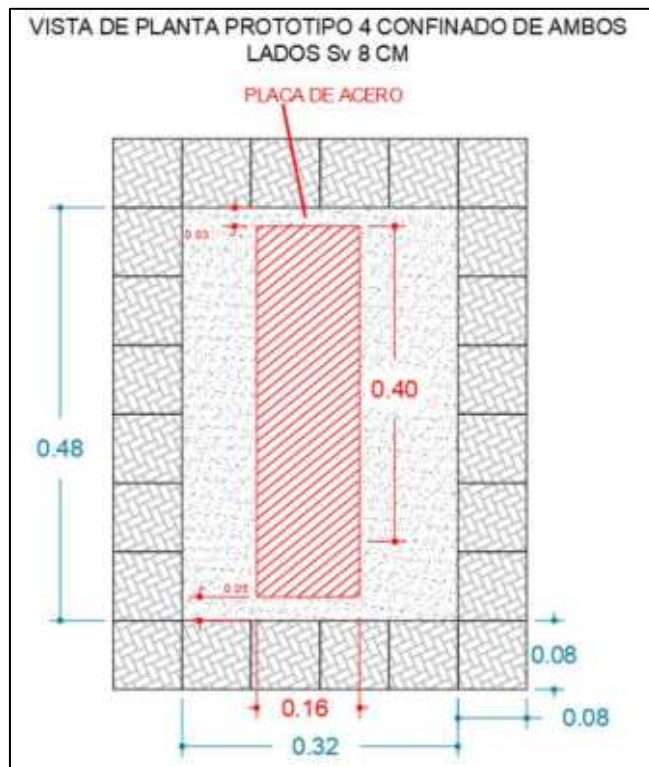
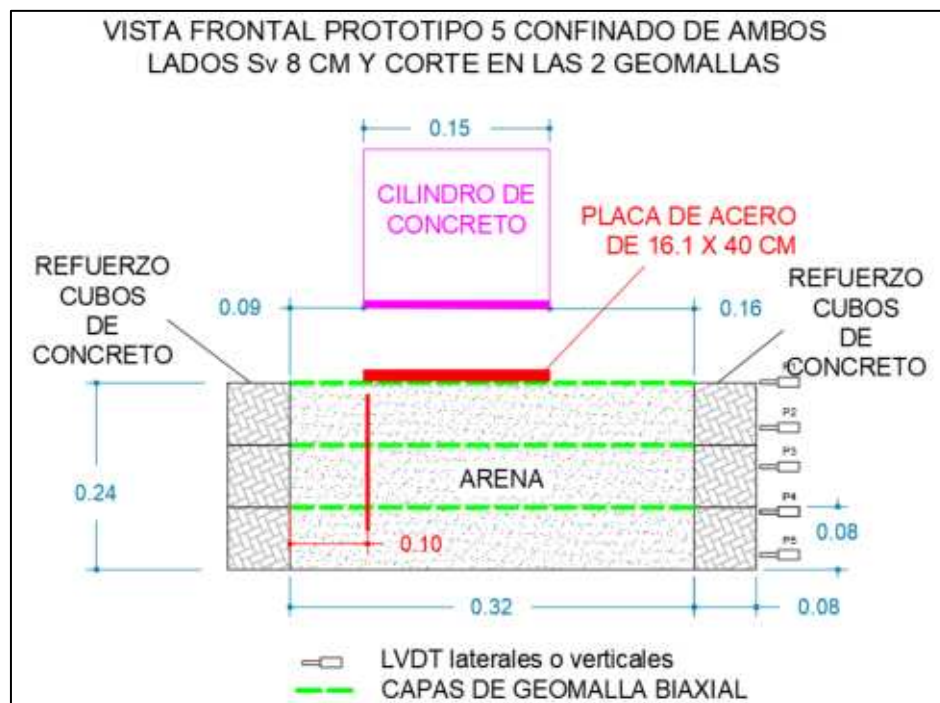


Figura 37. Prototipo 4 Confinado ambos lados, Sv 8 cm Norma Mexicana.  
Fuente: Elaboración propia.



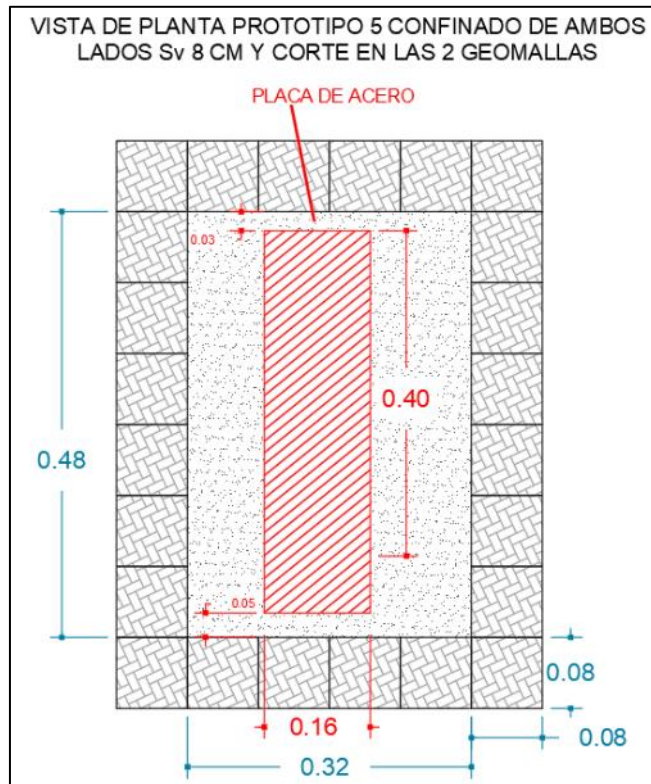


Figura 38. Prototipo 5 Corte en geomallas, Sv 8 cm Norma Mexicana.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 5.4 Montaje del prototipo físico capa a capa

Los siguientes pasos se llevaron a cabo para cada uno de los prototipos montados y ensayados en la maquina universal del laboratorio de geotecnia de la universidad autónoma de Querétaro.

Prototipo del 1 al 5:

##### 1. Preparación

- Limpiar la caja de IPR al igual que la placa de la maquina universal.
- Marcar las alturas cada 5 cm en los cubos de 10 cm y a 4 cm en el caso de los cubos de 8 cm.
- Prepara la geomalla al tamaño necesario 50x60 cm.

##### 2. Colocación de los cubos son 5 cubos en la parte frontal y 6 cubos

a lo largo y 3 cubos de altura (en el caso de Sv 10 cm) y colocación de 6 cubos en la parte frontal y 8 cubos a lo largo y 3 cubos de altura (en el caso de Sv 8 cm), formando así un rectángulo.

3. Colocar el material en el prototipo

- Pesar la arena de banco San José Iturbide.
- Vierta y distribuya uniformemente hasta llegar a la primera marca.

4. Compactación

- Utilice compactador manual y se darán un total de 90 golpes cada capa de 5 cm dando un total de 180 golpes en cada espaciamiento vertical de 10 cm. Y utilice un total de 56 golpes en la primera capa de 4 cm y en la segunda 55 golpes dando un total de 111 golpes en cada capa de 4 cm.
- Verifique la altura final con una regla y registros.

5. Instalación de geomalla

- Colocar cuando la capa alcance el nivel objetivo.
- Mantenga la tensión al mínimo.

6. repetición

Repita hasta completar los ensayos requeridos.

7. Colocación de Micrómetros en los puntos definidos.

8. se coloca la placa en posición de los mapas señalados en las figuras 65-69 y se colocan las cargas progresivamente, así como se hace el recopilado de datos. A continuación, los montajes y figuras de los prototipos.



Figura 39. Estructuras de IPR para montaje de los prototipos en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

Para documentar el montaje y el comportamiento ante la aplicación de cargas en el Prototipo 1, se realizó un registro visual del montaje físico experimental, el cual se conforma de un conjunto de imágenes incorporadas a la tesis en forma de figuras, como un registro visual continuo. Debido a limitaciones del formato del documento, los videos no se integran directamente en el archivo de tesis, sino que se presentan como material complementario en formato digital.







Figura 40. Pasos de Montaje Prototipo 1.

Fuente: Elaboración Propia.





**COLOCADO DE GEOMALLA  
A LA MEDIDA**



**COLOCADO DECUBOS PARA  
EL SIGUIENTE NIVEL**



**PROTOTIPO 2 Sv (10cm) Brasileña**

**REPETICION DE LOS PASOS  
ANTERIORES HASTA LLEGAR A LA  
ALTURA DE 31 CM**



**PROTOTIPO 2 Sv (10cm) Brasileña**

**SE COLOCA PLACA Y CILINDRO PARA  
LAS CARGAS**





Figura 41. Pasos de Montaje Prototipo 2.

Fuente: Elaboración Propia.



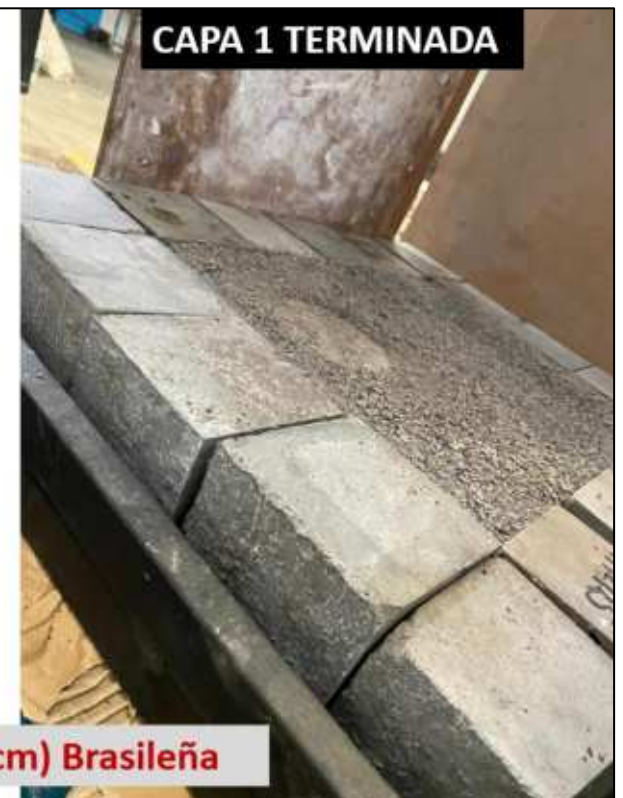




Figura 42. Pasos de Montaje Prototipo 3.

Fuente: Elaboración Propia.





Figura 43. Pasos de Montaje Prototipo 4.

Fuente: Elaboración Propia.





Figura 44. Pasos de Montaje Prototipo 5.

Fuente: Elaboración Propia.

## 5.5 Pruebas físicas aplicadas al modelo

Cada uno de los cinco prototipos construidos fue ensamblado individualmente y sometido a un proceso de carga controlado en una máquina de pruebas universal. Durante cada configuración experimental, la carga aplicada se incrementó progresivamente de 0 a 150 kN, garantizando condiciones reproducibles y comparables entre los diferentes prototipos.

El proceso de carga se realizó mediante el registro continuo del tiempo de aplicación, con el objetivo de analizar la evolución temporal del comportamiento mecánico del sistema ante el aumento de tensión. Simultáneamente, se monitorearon los desplazamientos generados como resultado de las cargas aplicadas mediante cinco micrómetros de precisión, ubicados estratégicamente en puntos representativos de cada prototipo.

Los micrómetros permitieron medir los desplazamientos verticales y horizontales inducidos por la carga, proporcionando información detallada sobre la deformación del sistema y su respuesta estructural en cada etapa del ensayo. Este procedimiento experimental permitió la evaluación comparativa del desempeño mecánico de los cinco prototipos bajo condiciones de carga controlada, garantizando la confiabilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos en las (Tablas 49-52) y Figuras (76-90)

**Prototipo 1:** Norma ABNT NBR 11682:2008 Sv (10 cm) confinado solo de un lado y con placa de acero de 0.35x 0.161 m.

En la Tabla 49 se presentan los resultados obtenidos durante la prueba de carga del Prototipo 1, el cual fue sometido a una carga vertical incremental utilizando una máquina de prueba universal, mientras que los desplazamientos generados en cinco puntos del sistema fueron monitoreados mediante micrómetros de precisión.

La prueba tuvo una duración aproximada de 710 segundos, equivalentes a 11.5 minutos, durante los cuales se incrementó progresivamente la carga desde 0 kN hasta alcanzar la carga máxima de 107.37 kN, valor que se registró en la etapa final de la prueba. Este procedimiento permitió la evaluación continua de la respuesta mecánica del prototipo en función del tiempo y del nivel de esfuerzo aplicado.

Durante los primeros 190 segundos no se registraron desplazamientos significativos ni carga aplicada, lo que corresponde a una fase inicial de ajuste del sistema experimental, asociada al posicionamiento del conjunto, contacto entre elementos y eliminación de holguras. A partir de este momento se empiezan a registrar desplazamientos incipientes, inicialmente sin un aumento significativo de la carga, lo que indica una acomodación progresiva del sistema suelo-estructura.

A medida que la carga vertical comenzó a aumentar efectivamente, se observó una relación no lineal entre las tensiones aplicadas y los desplazamientos medidos, como se ve en la Figura 76. Este comportamiento es característico de los sistemas geotécnicos, donde una mayor rigidez inicial da paso a una respuesta más deformable a medida que se movilizan mecanismos internos como la reorganización del material y la redistribución de tensiones.

El micrómetro 1 registró el mayor desplazamiento durante todo el ensayo, alcanzando un valor máximo cercano a los 5.79 mm al final del ensayo, coincidiendo con la aplicación de la carga máxima. Este resultado indica que este punto concentró la mayor parte de la deformación vertical, reflejando el área más sensible del sistema a la carga aplicada.

El micrómetro 2 mostró desplazamientos relevantes, alcanzando valores del orden de 3.4 mm en las etapas finales del ensayo. Su comportamiento presenta una respuesta progresiva, aunque de menor magnitud que la registrada por el micrómetro 1, lo que demuestra una participación significativa en la deformación global del prototipo.

Por otro lado, el micrómetro 3 mostró desplazamientos considerablemente menores a lo largo de la prueba, con valores máximos de alrededor de 0.08 mm, incluso bajo niveles de carga elevados. Esta respuesta indica un comportamiento marcadamente más rígido, con participación limitada en la deformación total del sistema.

El micrómetro 4 registró desplazamientos intermedios, alcanzando valores cercanos a 1.45 mm, con un aumento paulatino a medida que avanzaba la prueba y una tendencia a la estabilización en los tramos finales. Este comportamiento sugiere una transferencia progresiva de tensiones, sin concentraciones excesivas de deformación.

Finalmente, el micrómetro 5, tipo digital, mostró una respuesta consistente con el aumento de carga, alcanzando un desplazamiento máximo de aproximadamente 3.05 mm. Su comportamiento confirma una relación directa entre la carga aplicada y la deformación, proporcionando información complementaria sobre la evolución del sistema bajo carga creciente.

La Figura 77, que relaciona el tiempo con los desplazamientos registrados, muestra que las deformaciones se desarrollaron de forma continua y controlada durante todo el ensayo, sin aumentos ni aceleraciones bruscos en ninguno de los micrómetros. La ausencia de cambios bruscos en los desplazamientos, incluso cuando se alcanzó la carga máxima, indica que el Prototipo 1 no presentó una condición de falla global, sino un régimen de deformación progresivo y estable.

En conjunto, los resultados obtenidos muestran que el Prototipo 1 presenta un comportamiento mecánico estable, con deformaciones distribuidas de forma gradual y consistente con el aumento de la carga aplicada. Este comportamiento valida la configuración experimental y permite que el Prototipo 1 sea considerado una referencia base confiable para comparar el desempeño estructural de los demás prototipos evaluados en la investigación.

Tabla 29. Datos usados en el montaje del prototipo 1:

tiempo (seg)	tiempo (Min)	Desplazamiento 1 (mm)	Fuerza vertical (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento 2 (mm)	Desplazamiento 3 (mm)	Desplazamiento 4 (mm)	Desplazamiento 5 (digital mm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0
60	1.00	0	0	0	0	0	0	0
70	1.10	0	0	0	0	0	0	0
80	1.20	0	0	0	0	0	0	0
90	1.30	0	0	0	0	0	0	0
100	1.40	0	0	0	0	0	0	0
110	1.50	0	0	0	0	0	0	0
120	2.00	0	0	0	0	0	0	0
130	2.10	0	0	0	0	0	0	0
140	2.20	0	0	0	0	0	0	0
150	2.30	0	0	0	0	0	0	0
160	2.40	0	0	0	0	0	0	0
170	2.50	0	0	0	0	0	0	0
180	3.00	0	0	0	0	0	0	0
190	3.10	0.0254	0	0	0	0	0	0
200	3.20	0.0508	0	0	0.03	0.0002	0	0
210	3.30	0.127	0.89	15.794144	0.05	0.0004	0.01	0
220	3.40	0.2032	1.79	31.76575	0.07	0.0007	0.02	0
230	3.50	0.3048	1.79	31.76575	0.1	0.0016	0.04	0

240	4.00	0.381	4.46	79.148181	0.12	0.002	0.06	0
250	4.10	0.4318	7.14	126.70807	0.15	0.003	0.07	0.0254
260	4.20	0.5334	8.04	142.67968	0.18	0.0042	0.09	0.0508
270	4.30	0.5588	9.68	171.7835	0.21	0.0058	0.1	0.0508
280	4.40	0.6858	10.71	190.06211	0.24	0.0075	0.12	0.0762
290	4.50	0.7112	12.5	221.82786	0.26	0.0086	0.14	0.1016
300	5.00	0.7112	12.5	221.82786	0.27	0.009	0.15	0.1016
310	5.10	0.7366	13.39	237.62201	0.28	0.0095	0.15	0.1016
320	5.20	0.762	13.39	237.62201	0.285	0.0101	0.16	0.1016
330	5.30	0.762	13.39	237.62201	0.285	0.0103	0.16	0.127
340	5.40	0.762	14.29	253.59361	0.285	0.0107	0.17	0.127
350	5.50	0.8128	15.95	283.05235	0.34	0.012	0.18	0.127
360	6.00	0.8636	16.96	300.97604	0.35	0.0127	0.21	0.127
370	6.10	0.9144	16.96	300.97604	0.37	0.0142	0.23	0.127
380	6.20	0.9652	18.75	332.74179	0.4	0.015	0.25	0.1778
390	6.30	1.0668	19.64	348.53594	0.42	0.0165	0.28	0.2032
400	6.40	1.143	20.54	364.50754	0.45	0.0179	0.3	0.2286
410	6.50	1.2192	23.21	411.88997	0.48	0.0192	0.34	0.2286
420	7.00	1.27	23.21	411.88997	0.505	0.0206	0.37	0.254
430	7.10	1.4224	24.11	427.86158	0.545	0.0219	0.4	0.254
440	7.20	1.4478	20.54	364.50754	0.55	0.0211	0.34	0.2794
450	7.30	1.4986	19.64	348.53594	0.56	0.0228	0.34	0.3048
460	7.40	1.4986	19.64	348.53594	0.56	0.0229	0.34	0.3048
470	7.50	1.4986	19.64	348.53594	0.56	0.0229	0.35	0.3048
480	8.00	1.5748	25	443.65572	0.6	0.0241	0.37	0.3302
490	8.10	1.6256	28.57	507.00976	0.63	0.0256	0.44	0.3556
500	8.20	1.8542	32.14	570.3638	0.7	0.028	0.52	0.381
510	8.30	2.0066	38.38	681.10027	0.8	0.0306	0.64	0.508
520	8.40	2.159	41.07	728.83762	0.9	0.0333	0.72	0.5588
530	8.50	2.3368	45.54	808.16327	1.04	0.0367	0.83	0.635
540	9.00	2.54	48.21	855.5457	1.12	0.0395	0.95	0.6604

550	9.10	2.7686	53.38	947.2937	1.23	0.0437	1.08	0.762
560	9.20	2.921	56.8	1007.9858	1.37	0.0466	1.2	0.8128
570	9.30	3.0988	58.51	1038.3319	1.45	0.0496	1.27	0.9144
580	9.40	3.302	64.49	1144.4543	1.56	0.05	1.35	1.016
590	9.50	3.429	67.06	1190.0621	1.7	0.0567	1.4	1.143
600	10.00	3.6322	70.4	1249.3345	1.8	0.0594	1.42	1.27
610	10.10	3.81	73.89	1311.2689	1.91	0.0611	1.43	1.3716
620	10.20	4.0132	77.3	1371.7835	2.05	0.0634	1.45	1.3208
630	10.30	4.191	81.59	1447.9148	1.27	0.065	1.45	1.397
640	10.40	4.445	84.15	1493.3452	1.32	0.0672	1.45	1.524
650	10.50	4.6228	87.57	1554.0373	1.45	0.0696	1.45	1.905
660	11.00	4.826	90.99	1614.7294	2.65	0.0721	1.45	2.032
670	11.10	4.953	93.55	1660.1597	2.78	0.0734	1.45	2.159
680	11.20	5.207	98.68	1751.1979	3	0.0753	1.45	2.3368
690	11.30	5.4102	100.39	1781.5439	3.3	0.0773	1.45	2.54
700	11.40	5.588	102.1	1811.89	3.35	0.081	1.45	2.794
710	11.50	5.7912	107.37	1905.4126	3.4	0.0826	1.45	3.048

Fuente: Elaboración Propia.

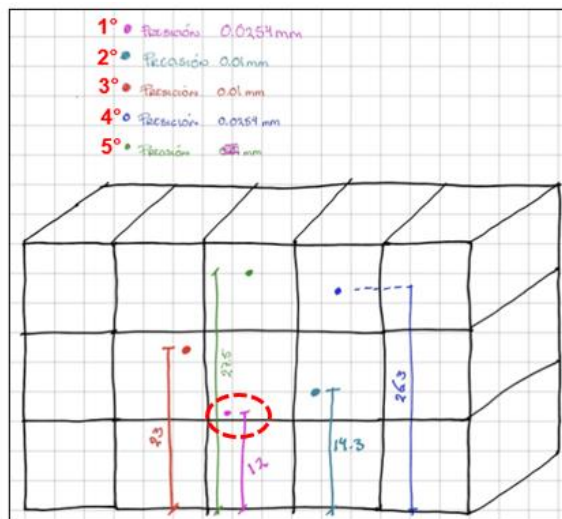


Figura 45. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 1.

Fuente: Elaboración Propia.

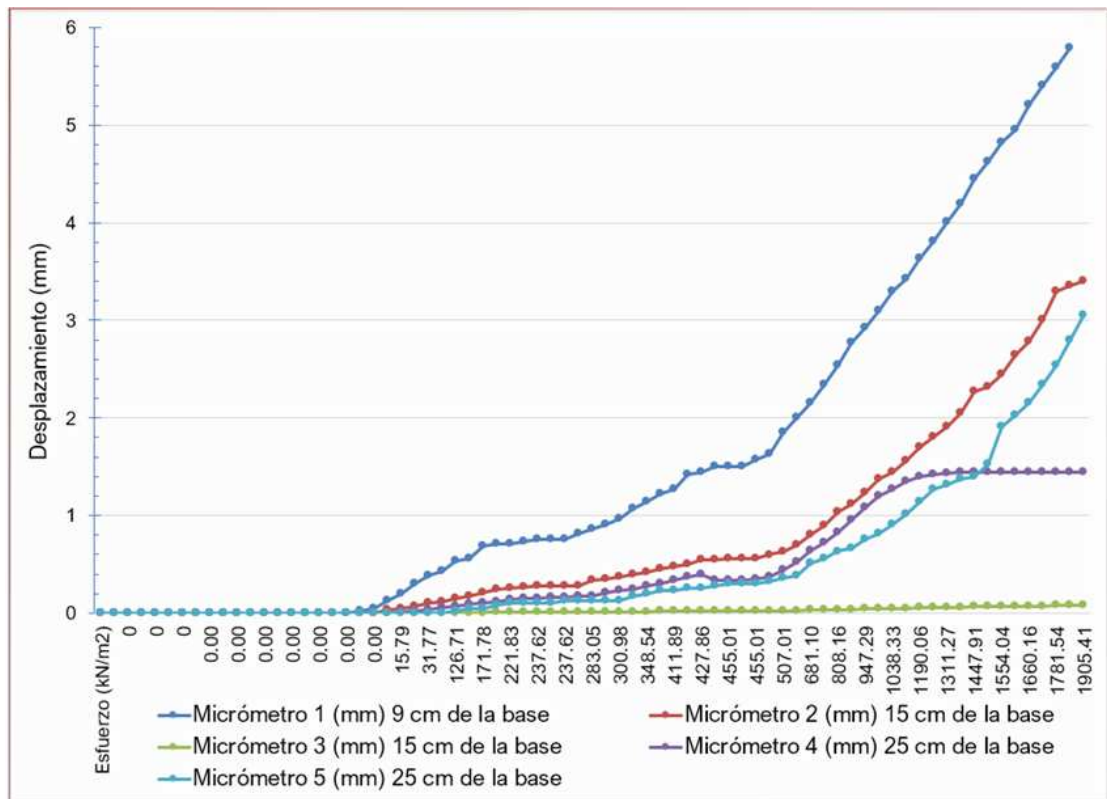


Figura 46. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 1.

Fuente: Elaboración Propia.

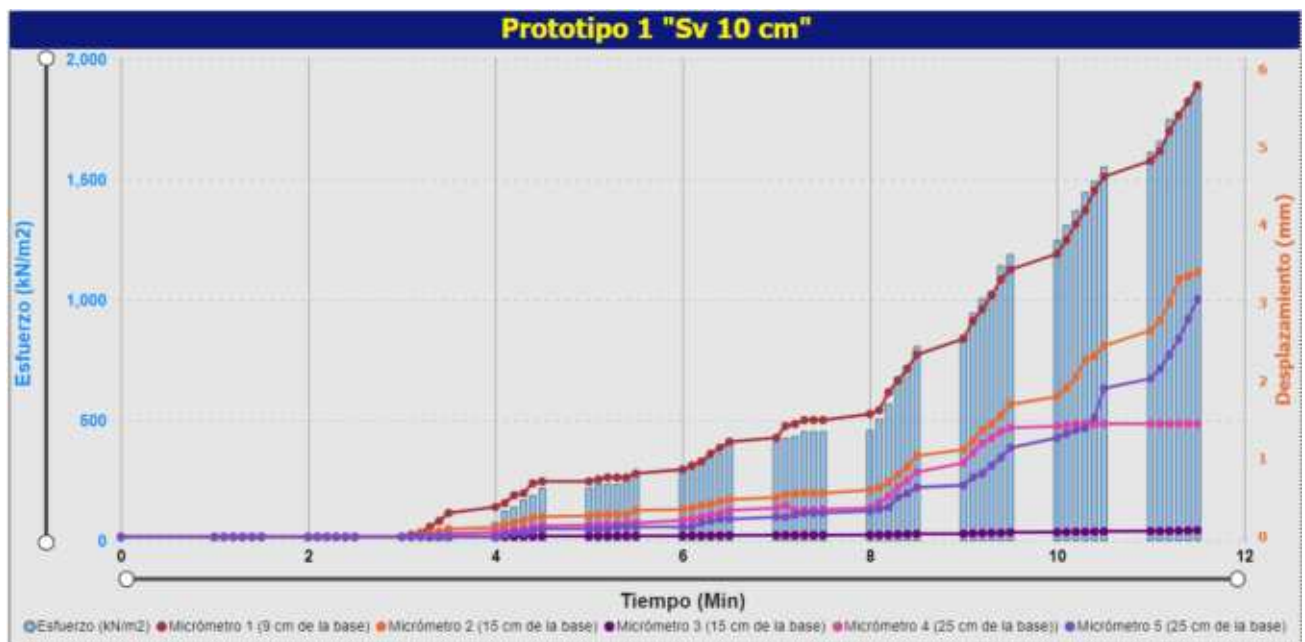


Figura 47. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros  
Prototipo 1.

Fuente: Elaboración Propia.

**Prototipo 2:** Norma ABNT NBR 11682:2008 Sv (10 cm) confinado de ambos lados y con placa de acero de 0.40x 0.161 m.

La tabla 50 correspondiente al Prototipo 2 presenta los resultados obtenidos durante la prueba de carga vertical incremental, en la que se registraron desplazamientos con una precisión de cinco micrómetros en el tiempo.

La prueba tuvo una duración aproximada de 410 segundos, equivalentes a 6.50 minutos, durante los cuales la carga vertical aumentó progresivamente desde valores cero hasta alcanzar una carga máxima de 150.04 kN, que se registró al final de la prueba, alrededor del segundo 410.

Durante las primeras etapas de la prueba, correspondientes a los primeros 20 a 30 segundos, los desplazamientos registrados en los micrómetros fueron mínimos, lo que indica una fase inicial de acomodación del sistema y una activación gradual del contacto entre los elementos del prototipo y el equipo de carga. A medida que la carga comenzó a aumentar de manera efectiva, se observó una respuesta progresiva en los movimientos.

Después de aproximadamente 30 segundos, cuando la carga supera valores cercanos a 1.8 kN, se comienzan a registrar desplazamientos medibles en todos los micrómetros, observándose una respuesta progresiva y continua a medida que aumenta la carga. Este comportamiento se mantiene durante todo el ensayo, sin cambios bruscos en la tendencia de deformación.

El análisis de los registros indica que el mayor pico de desplazamiento se presentó en el micrómetro 5, el cual alcanzó un valor máximo de aproximadamente 31.39 mm al final del ensayo, coincidiendo

con la aplicación de la carga máxima. Este resultado muestra que este punto concentra la mayor deformación vertical del sistema, representando el área más flexible del prototipo bajo carga.

El micrómetro 3 registró el segundo mayor desplazamiento, alcanzando valores cercanos a los 8.36 mm, lo que indica una participación significativa en la deformación global del sistema, aunque con mayor rigidez respecto al micrómetro 5.

El micrómetro 1 mostró desplazamientos intermedios, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 7.34 mm al final del ensayo. Este comportamiento refleja una respuesta progresiva y estable al aumento de carga.

El micrómetro 2 mostró desplazamientos menores, del orden de 4.93 mm, mientras que el micrómetro 4 registró los valores más bajos, con un desplazamiento máximo cercano a 3.12 mm, incluso bajo altos niveles de carga. Estos resultados indican que estas áreas del prototipo presentaron mayor rigidez relativa, contribuyendo a la estabilidad general del sistema.

La evolución de los desplazamientos en función del tiempo presenta un crecimiento continuo y controlado, sin aumentos ni aceleraciones bruscos, incluso cuando se alcanza la carga máxima. La ausencia de cambios abruptos en los registros sugiere que el Prototipo 2 no alcanzó una condición de falla global, sino que presentó un comportamiento mecánico estable con deformaciones progresivas en todo el rango de carga aplicada.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el Prototipo 2 soportó una carga máxima mayor que el Prototipo 1, aunque con mayores niveles de deformación, particularmente concentrada en el micrómetro 5. Este comportamiento proporciona información relevante para la comparación del desempeño estructural entre prototipos y para el análisis de la influencia de la configuración del sistema en la distribución de deformaciones.

Tabla 30. Datos usados en el montaje del prototipo 2:

Tiempo (seg)	min	Desplazamiento 1 (mm)	Fuerza vertical (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento 2 (mm)	Desplazamiento 3 (mm)	Desplazamiento 4 (mm)	Desplazamiento 5 (mm)
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0
10	0.00	0	0	0	0	0.01	0.01	0
20	0.00	0.1524	0	0	0	0.01	0.01	0.0254
30	0.00	0.2286	1.79	27.795	0.05	0.36	0.08	1.016
40	0.00	0.3048	6.25	97.0497	0.13	0.88	0.20	2.667
50	0.00	0.4572	10.71	166.304	0.17	1.22	0.29	3.8354
60	1.00	0.5334	11.61	180.28	0.21	1.31	0.31	4.1656
70	1.10	0.5842	11.61	180.28	0.22	1.36	0.33	4.3434
80	1.20	0.5842	12.50	194.099	0.22	1.42	0.34	4.5212
90	1.30	0.6096	12.50	194.099	0.23	1.50	0.35	4.7498
100	1.40	0.635	15.18	235.714	0.25	1.61	0.38	5.0292
110	1.50	0.635	16.96	263.354	0.26	1.68	0.40	5.3086
120	2.00	0.635	16.96	263.354	0.28	1.68	0.40	5.3086
130	2.10	0.635	16.96	263.354	0.28	1.68	0.41	5.3086
140	2.20	0.635	16.96	263.354	0.28	1.68	0.43	5.4102
150	2.30	0.635	16.96	263.354	0.28	1.68	0.53	5.461
160	2.40	0.635	16.96	263.354	0.28	1.68	0.63	5.461
170	2.50	0.635	16.96	263.354	0.29	1.68	0.74	5.461
180	3.00	0.6858	20.54	318.944	0.29	1.75	0.81	5.4864
190	3.10	0.9652	22.21	344.876	0.32	1.88	0.91	5.6896
200	3.20	1.0922	27.68	429.814	0.41	2.22	1.01	6.9088
210	3.30	1.3716	33.93	526.863	0.54	2.56	1.12	7.9756
220	3.40	1.6002	42.86	665.528	0.67	2.95	1.25	9.144
230	3.50	1.8288	47.32	734.783	0.83	3.23	1.36	10.0584
240	4.00	1.8542	55.17	856.677	0.96	3.61	1.46	11.2268
250	4.10	2.0574	61.15	949.534	1.14	3.97	1.01	12.2936
260	4.20	2.3622	67.99	1055.75	1.34	4.35	1.12	13.462
270	4.30	2.6416	73.97	1148.6	1.57	4.80	1.25	14.8844
280	4.40	2.8448	81.66	1268.01	1.83	5.28	1.36	16.1544
290	4.50	3.1496	85.94	1334.47	2.03	5.64	1.46	17.145
300	5.00	3.4798	91.06	1413.98	2.24	6.05	1.59	18.3896

310	5.10	3.81	98.76	1533.54	2.49	6.48	1.72	19.6596
320	5.20	4.191	103.03	1599.84	2.73	6.89	1.85	20.955
330	5.30	4.4196	109.01	1692.7	3.02	7.29	1.98	22.225
340	5.40	4.9022	115.00	1785.71	3.28	7.54	2.10	23.7744
350	5.50	5.2832	121.83	1891.77	3.6	7.69	2.26	24.3586
360	6.00	5.3594	126.11	1958.23	3.86	7.86	2.40	25.1206
370	6.10	5.588	130.38	2024.53	4.14	8.05	2.59	26.3144
380	6.20	6.4516	137.22	2130.75	4.46	8.19	2.75	27.7622
390	6.30	6.6802	140.64	2183.85	4.65	8.24	2.84	29.1338
400	6.40	7.0104	146.62	2276.71	4.84	8.31	2.99	30.1752
410	6.50	7.3406	150.04	2329.81	4.93	8.36	3.12	31.3944

Fuente: Elaboración Propia.

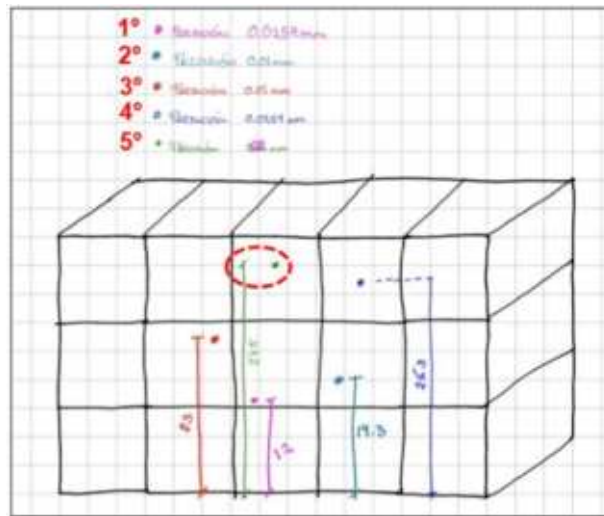


Figura 48. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 2.

Fuente: Elaboración Propia.

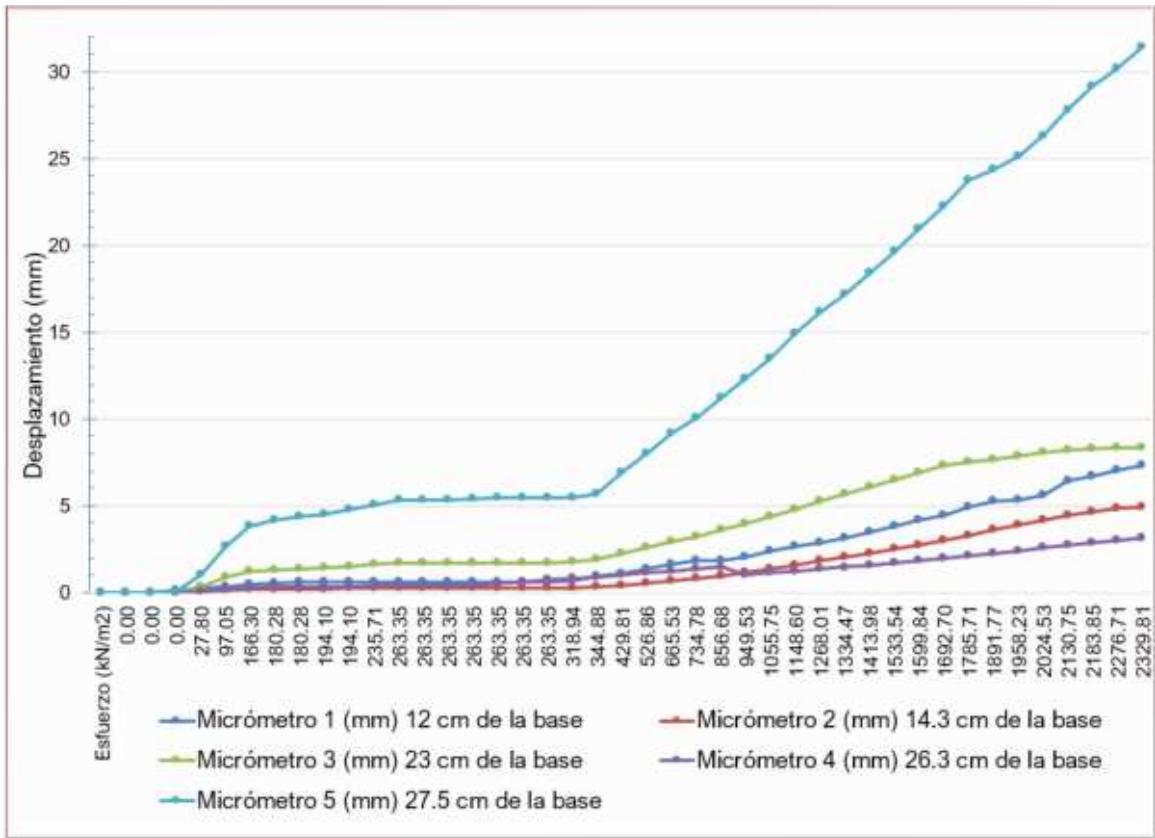


Figura 49. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 2.

Fuente: Elaboración Propia

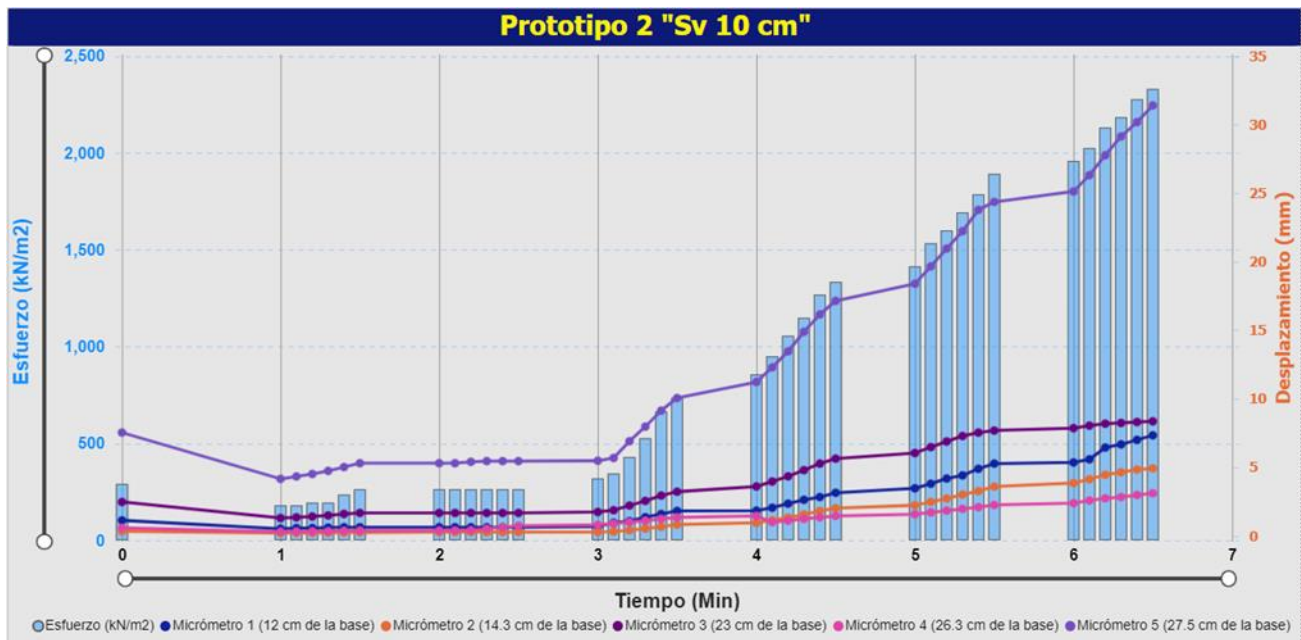


Figura 501. Comportamiento Tiempo Deslizamientos de los 5 micrómetros Prototipo 2.

Fuente: Elaboración Propia.

**Prototipo 3:** Norma ABNT NBR 11682:2008 Sv (10 cm) confinado de ambos lados, Corte en las geomallas y con placa de acero de 0.40x 0.161 m.

La tabla 51 de resultados del Prototipo 3 presenta el comportamiento del sistema durante la prueba de carga vertical incremental, en la que se registraron a lo largo del tiempo los desplazamientos generados en cinco micrómetros de precisión.

La prueba tuvo una duración aproximada de 180 segundos, equivalentes a 3 minutos, durante los cuales la carga vertical aumentó progresivamente desde 0 kN hasta alcanzar la carga máxima de 150.93 kN, valor que se registró alrededor del segundo 180, correspondiente a la etapa final de la prueba.

Durante los primeros 20 a 30 segundos, los registros muestran desplazamientos prácticamente nulos en todos los micrómetros, incluso cuando se comienza a aplicar una carga incipiente. Esta etapa corresponde

a una fase inicial de ajuste y acomodación del sistema experimental, asociada a un contacto progresivo entre los elementos del prototipo y el equipo de carga.

Después de aproximadamente 30 segundos, cuando la carga supera valores cercanos a 0.89 kN, se comienzan a registrar desplazamientos medibles en todos los micrómetros. A medida que la carga aumenta de manera constante, se observa una respuesta progresiva y no lineal entre las tensiones aplicadas y los desplazamientos registrados, comportamiento típico de los sistemas geotécnicos sometidos a cargas incrementales.

El análisis de los datos indica que el mayor pico de desplazamiento se presentó en el micrómetro 5, el cual alcanzó un valor máximo de aproximadamente 13.69 mm al final del ensayo, coincidiendo con la aplicación de la carga máxima. Este resultado muestra que este punto concentra la mayor deformación vertical del sistema, representando el área más flexible del prototipo bajo carga.

El micrómetro 3 registró el segundo mayor desplazamiento, alcanzando valores cercanos a 6.98 mm, lo que indica una participación importante en la deformación global del sistema, aunque con mayor rigidez relativa con relación al micrómetro 5.

A su vez, el micrómetro 1 mostró desplazamientos progresivos que alcanzaron un valor máximo de aproximadamente 4.27 mm al final del ensayo, reflejando una respuesta mecánica estable al aumento de carga.

El micrómetro 4 mostró desplazamientos intermedios, con valores máximos cercanos a 4.58 mm, mientras que el micrómetro 2 registró los desplazamientos más pequeños a lo largo de toda la prueba, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 2.40 mm. Este comportamiento indica que estas áreas del prototipo presentaron mayor rigidez relativa, con menor participación en la deformación global del sistema.

La evolución de los desplazamientos en función del tiempo presenta un crecimiento continuo y controlado, sin aumentos ni cambios bruscos de

pendiente, incluso cuando se alcanza la carga máxima. La ausencia de aceleraciones repentinas en los registros sugiere que el Prototipo 3 no alcanzó una condición de falla global, sino que presentó un comportamiento mecánico estable con deformaciones progresivas en todo el rango de carga aplicada.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el Prototipo 3 fue capaz de soportar una carga máxima similar a la del Prototipo 2, pero con menores niveles de desplazamiento máximo, principalmente en el micrómetro 5. Este comportamiento sugiere una mayor eficiencia estructural y una mejor redistribución de esfuerzos, lo que lo convierte en un caso relevante para comparar el desempeño mecánico entre los prototipos evaluados.

Tabla 31. Datos usados en el montaje del prototipo 3:

Tiempo (seg)	min	Desplazamiento 1 (mm)	Fuerza vertical (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento 2 (mm)	Desplazamiento 3 (mm)	Desplazamiento 4 (mm)	Desplazamiento 5 (mm)
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0
10	0.00	0	0	0	0	0	0	0
20	0.00	0	0	0	0	0	0	0
30	0.00	0.0254	0.89	13.8199	0.11	0.08	0.11	0.4
40	0.00	0.2032	8.93	138.665	0.49	0.28	0.40	1.31
50	0.00	0.2032	10.71	166.304	0.54	0.31	0.43	1.46
60	1.00	0.2286	11.61	180.28	0.6	0.37	0.47	1.57
70	1.10	0.254	12.50	194.099	0.7	0.4	0.53	1.75
80	1.20	0.3048	16.07	249.534	0.78	0.45	0.56	1.95
90	1.30	0.6096	31.25	485.248	1.41	0.55	1.00	3.25
100	1.40	1.016	50.89	790.217	1.65	1.12	1.38	4.43
110	1.50	1.4478	68.03	1056.37	1.89	1.84	1.82	5.98
120	2.00	1.778	86.83	1348.29	2.07	2.34	2.23	7.3
130	2.10	2.1082	102.21	1587.11	2.2	2.96	2.59	8.58
140	2.20	2.5146	115.89	1799.53	2.29	3.54	3.02	9.61

150	2.30	2.921	127.85	1985.25	2.31	3.96	3.4	10.57
160	2.40	3.4036	138.11	2144.57	2.36	5.13	3.85	11.67
170	2.50	3.937	150.08	2330.43	2.39	6.3	4.31	13.08
180	3.00	4.2672	150.93	2343.63	2.4	6.98	4.58	13.69

Fuente: Elaboración Propia

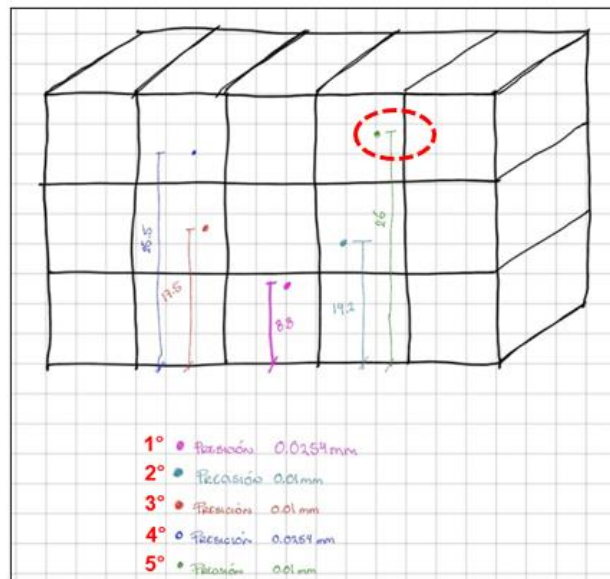


Figura 51. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 3.

Fuente: Elaboración Propia.

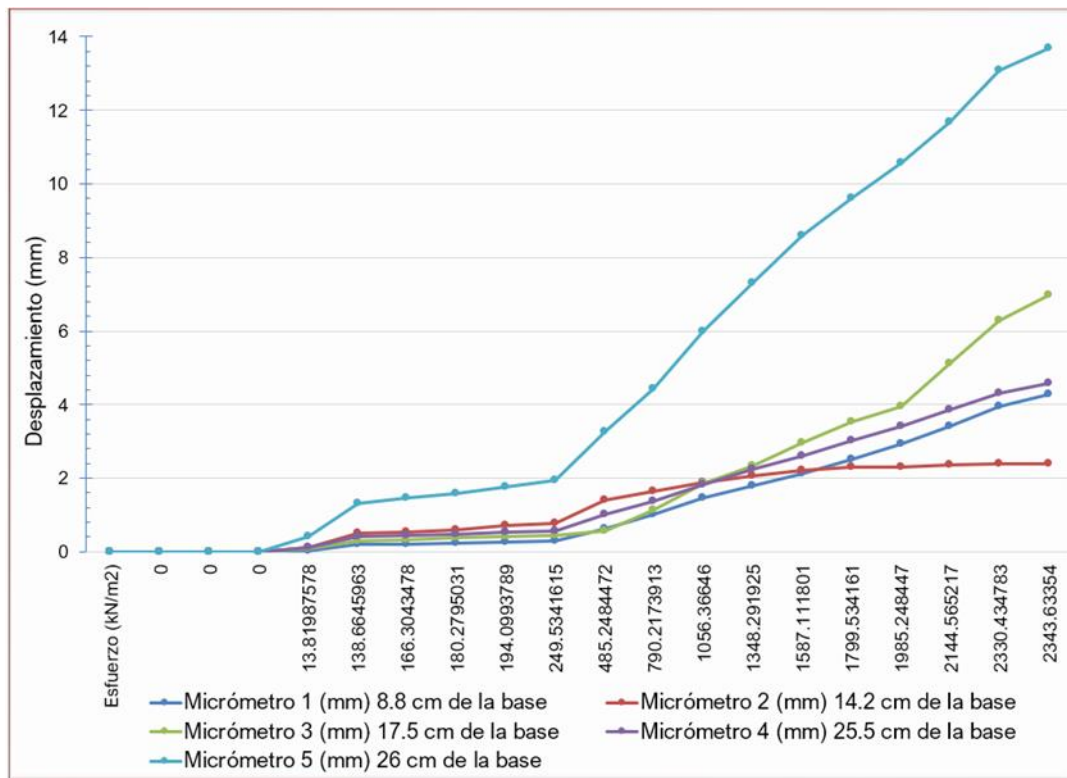


Figura 52. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 3. Fuente: Elaboración Propia.



Figura 53. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 3. Fuente: Elaboración Propia.

**Prototipo 4:** Norma IMT- Publicación Técnica 382 Sv (8 cm) confinado de ambos lados y con placa de acero de 0.40x 0.161 m.

La tabla 52 de resultados del Prototipo 4 presenta el comportamiento del sistema durante la prueba de carga vertical incremental, en la que se registraron a lo largo del tiempo los desplazamientos generados en cinco micrómetros de precisión.

La prueba tuvo una duración aproximada de 180 segundos, equivalentes a 3 minutos, durante los cuales la carga vertical aumentó progresivamente desde 0 kN hasta alcanzar la carga máxima de 150.11 kN, valor que se registró alrededor del segundo 180, correspondiente a la etapa final de la prueba.

Durante los primeros 20 a 30 segundos, los registros muestran desplazamientos prácticamente nulos en todos los micrómetros, incluso cuando se comienza a aplicar una carga inicial. Esta etapa corresponde a una fase de ajuste y acomodación del sistema experimental, asociada a un contacto progresivo entre los elementos del prototipo y el equipo de carga.

Después de aproximadamente 30 segundos, cuando la carga alcanza valores cercanos a los 5.36 kN, se comienzan a registrar desplazamientos medibles en cinco micrómetros. A medida que la carga aumenta de manera sostenida, se observa una respuesta progresiva y no lineal entre el esfuerzo aplicado y los desplazamientos registrados, comportamiento característico de los sistemas geotécnicos sometidos a cargas incrementales.

El análisis de los datos indica que el mayor pico de desplazamiento se presentó en el micrómetro 3, el cual alcanzó un valor máximo de aproximadamente 7.29 mm al final del ensayo, coincidiendo con la aplicación de la carga máxima. Este resultado muestra que este punto concentra la mayor deformación vertical del sistema, representando el área más flexible del prototipo bajo carga.

El micrómetro 2 registró el segundo mayor desplazamiento, alcanzando valores cercanos a 6.40 mm, lo que indica una participación significativa en la deformación global del sistema, aunque con mayor rigidez relativa respecto al micrómetro 3.

A su vez, el micrómetro 1 mostró desplazamientos progresivos que alcanzaron un valor máximo de aproximadamente 2.87 mm, reflejando una respuesta mecánica estable al aumento de carga.

El micrómetro 4 mostró desplazamientos intermedios, con valores máximos cercanos a 3.15 mm, mientras que el micrómetro 5 registró desplazamientos ligeramente mayores, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 3.40 mm. Estos resultados indican una redistribución gradual del estrés, sin concentraciones excesivas de tensión en estas áreas.

La evolución de los desplazamientos en función del tiempo presenta un crecimiento continuo y controlado, sin aumentos ni cambios bruscos de pendiente, incluso cuando se alcanza la carga máxima. La ausencia de aceleraciones repentinas en los registros sugiere que el Prototipo 4 no alcanzó una condición de falla global, sino que presentó un comportamiento mecánico estable con deformaciones progresivas en todo el rango de carga aplicada.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el Prototipo 4 era capaz de soportar una carga máxima comparable a la de los Prototipos 2 y 3, pero con niveles de desplazamiento máximo inferiores, particularmente en el micrómetro de mayor respuesta. Este comportamiento sugiere una mejor distribución de fuerzas internas y un aumento relativo de la rigidez, lo que lo convierte en un caso relevante para comparar el desempeño mecánico entre los prototipos evaluados.

Tabla 32. Datos usados en el montaje del prototipo 4:

tiempo (seg)	min	Desplazamiento 1 (mm)	Fuerza vertical (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento 2 (mm)	Desplazamiento 3 (mm)	Desplazamiento 4 (mm)	Desplazamiento 5 (mm)
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0
10	0.00	0	0	0	0	0	0	0
20	0.00	0	0	0	0	0	0	0
30	0.00	0.11	5.36	83.22981	0.2286	0.12	0.1524	0.42
40	0.00	0.21	10.71	166.3043	0.381	0.21	0.254	0.56
50	0.00	0.23	12.50	194.0994	0.4572	0.24	0.254	0.6
60	1.00	0.24	12.50	194.0994	0.4572	0.24	0.2794	0.62
70	1.10	0.28	15.18	235.7143	0.5334	0.26	0.3302	0.66
80	1.20	0.31	16.07	249.5342	0.6096	0.33	0.3556	0.76
90	1.30	0.50	30.29	470.3416	1.27	0.75	0.635	1.05
100	1.40	0.71	45.54	707.1429	1.8288	1.14	0.9144	1.36
110	1.50	0.96	59.52	924.2236	2.4638	1.75	1.143	1.63
120	2.00	1.31	73.19	1136.491	3.0988	2.58	1.4732	1.88
130	2.10	1.55	85.36	1325.466	3.6322	3.24	1.7272	2.06
140	2.20	1.84	98.83	1534.627	4.3942	4.03	2.032	2.3
150	2.30	2.10	109.09	1693.944	5.0546	4.86	2.286	2.52
160	2.40	3.38	121.05	1879.658	5.588	5.76	2.54	2.74
170	2.50	2.63	146.41	2273.447	6.096	5.7	2.8448	3.02
180	3.00	2.87	150.11	2330.901	6.4008	7.29	3.1496	3.4

Fuente: Elaboración Propia.

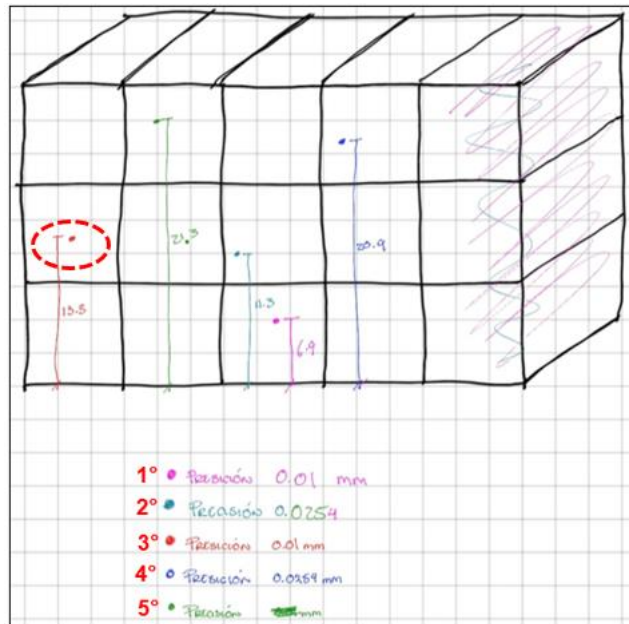


Figura 54. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 4.  
 Fuente: Elaboración Propia.

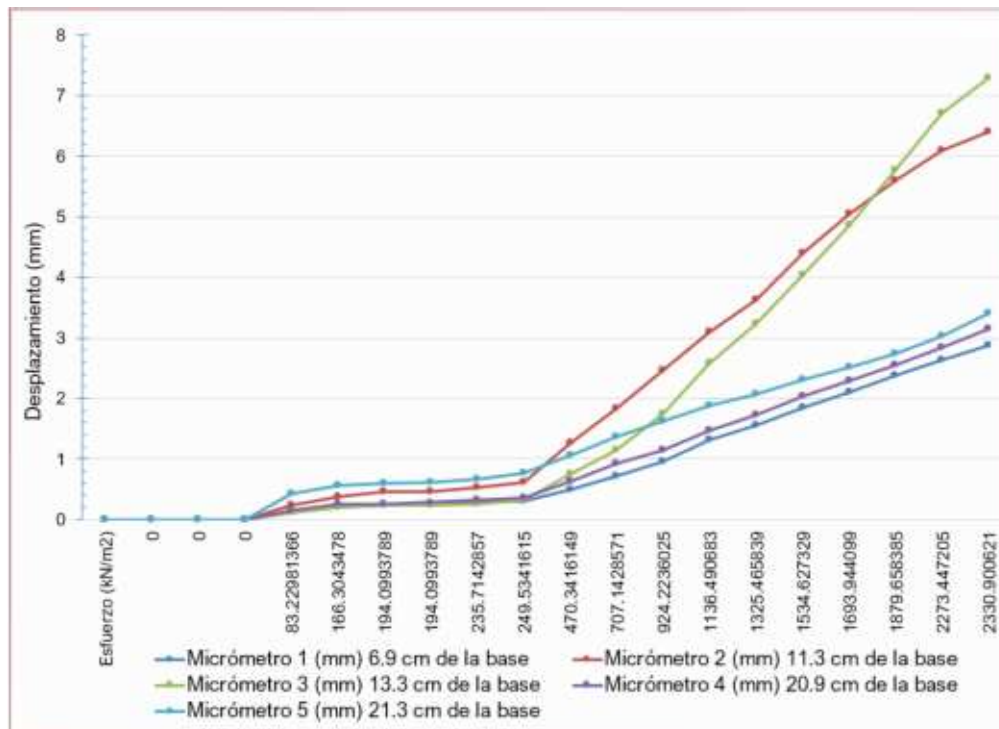


Figura 55. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 4.  
 Fuente: Elaboración Propia.

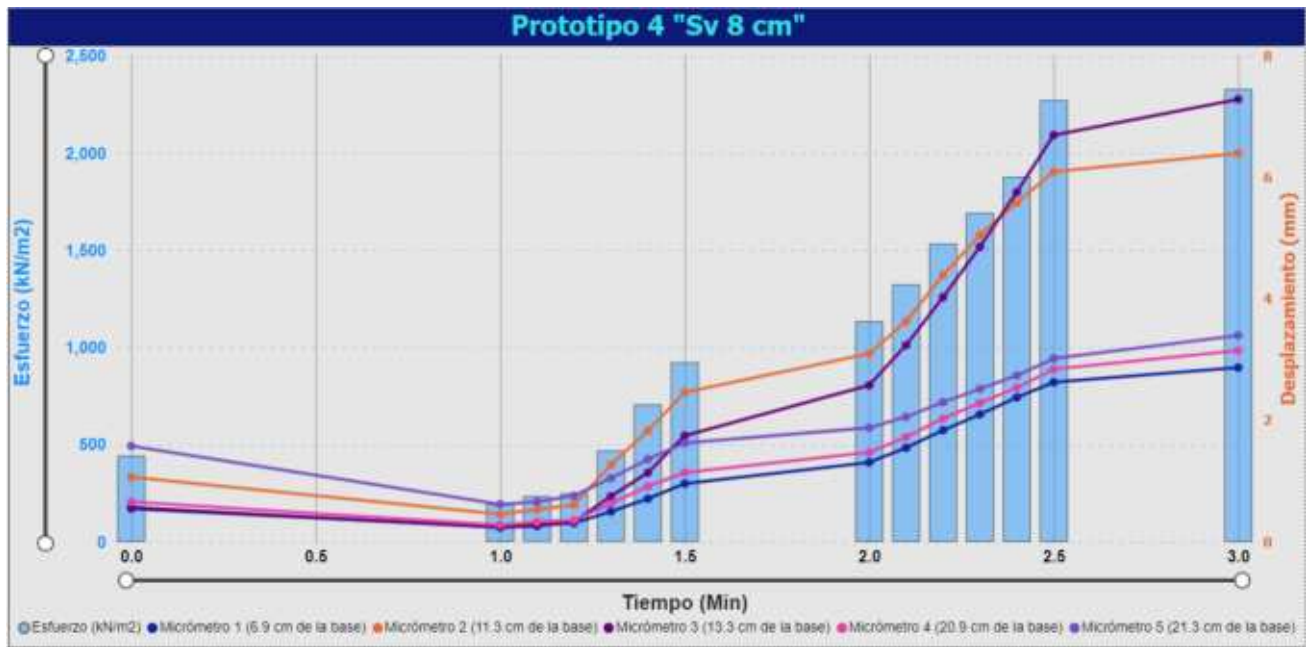


Figura 56. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 4.

Fuente: Elaboración Propia.

**Prototipo 5:** Norma IMT- Publicación Técnica 382 Sv (8 cm) confinado de ambos lados, Corte en las geomallas y con placa de acero de 0.40x 0.161 m.

La tabla 53 de resultados del Prototipo 5 presenta el comportamiento del sistema durante la prueba de carga vertical incremental, en la que se registraron los desplazamientos generados en cinco micrómetros de precisión en función del tiempo.

La prueba tuvo una duración aproximada de 150 segundos, equivalentes a 2.3 minutos, durante los cuales la carga vertical aumentó progresivamente desde 0 kN hasta alcanzar la carga máxima de 150.08 kN, valor que se registró alrededor del segundo 150, correspondiente a la etapa final de la prueba.

Durante los primeros 30 a 40 segundos, los registros muestran desplazamientos prácticamente nulos en todos los micrómetros, incluso cuando se comienza a aplicar una carga inicial. Esta etapa corresponde a una fase de ajuste y acomodación del sistema experimental, asociada al establecimiento de contacto entre los elementos del prototipo y el equipo de carga.

Después de aproximadamente 40 segundos, cuando la carga alcanza valores cercanos a 1.79 kN, se comienzan a registrar desplazamientos medibles en micrómetros. A medida que la carga aumenta de manera sostenida, se observa una respuesta progresiva y no lineal entre el esfuerzo aplicado y los desplazamientos registrados, comportamiento característico de los sistemas geotécnicos sometidos a cargas incrementales.

El análisis de los datos indica que el mayor pico de desplazamiento se presentó en el micrómetro 2, el cual alcanzó un valor máximo de aproximadamente 15.37 mm al final del ensayo, coincidiendo con la aplicación de la carga máxima. Este resultado muestra que este punto concentra la mayor deformación vertical del sistema, representando el área

más flexible del prototipo bajo carga.

El micrómetro 4 registró el segundo mayor desplazamiento, alcanzando valores cercanos a los 8.36 mm, lo que indica una participación significativa en la deformación global del sistema, aunque con mayor rigidez relativa en relación al micrómetro 2.

A su vez, el micrómetro 3 mostró desplazamientos progresivos que alcanzaron un valor máximo de aproximadamente 7.01 mm, reflejando una respuesta mecánica estable al aumento de carga.

El micrómetro 1 mostró desplazamientos intermedios, con un valor máximo cercano a 4.83 mm, mostrando una deformación moderada dentro del sistema.

Finalmente, el micrómetro 5 registró los desplazamientos más pequeños a lo largo de la prueba, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 0,08 mm, incluso bajo la carga máxima aplicada. Este comportamiento indica una zona de alta rigidez relativa, con mínima participación en la deformación global del prototipo.

La evolución de los desplazamientos en función del tiempo presenta un crecimiento continuo y controlado, sin aumentos ni cambios bruscos de pendiente, incluso cuando se alcanza la carga máxima. La ausencia de aceleraciones repentinas en los registros sugiere que el Prototipo 5 no alcanzó una condición de falla global, sino que presentó un comportamiento mecánico estable con deformaciones progresivas en todo el rango de carga aplicada.

En conjunto, los resultados obtenidos indican que el Prototipo 5 era capaz de soportar una carga máxima equiparable a la de prototipos anteriores, pero con una distribución de desplazamientos claramente diferenciada, donde las mayores deformaciones se concentraban en un punto concreto, mientras que otras zonas permanecían prácticamente indeformables. Este comportamiento proporciona información relevante para comparar el desempeño mecánico entre los prototipos evaluados y

para analizar la influencia de la disposición del sistema en la respuesta estructural.

Con base en las características de referencia de la arena estándar de Fujian presentadas en la Tabla 4, se establecieron los criterios para identificar y seleccionar el material de relleno a utilizar en las pruebas experimentales. Como este tipo de arena no se encuentra naturalmente disponible en México, se realizó un proceso comparativo analizando cuatro bancos de materiales de la región de Querétaro, con el objetivo de identificar aquel cuyo comportamiento mecánico y granulométrico se acercará más al material de referencia.

Tabla 33. Datos usados en el montaje del prototipo 5:

tiempo (seg)	min	Desplazamiento 1 (mm)	Fuerza vertical (kN)	Esfuerzo (kN/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento 2 (mm)	Desplazamiento 3 (mm)	Desplazamiento 4 (mm)	Desplazamiento 5 (mm)
0	0.00	0	0	0	0	0	0	0
10	0.00	0	0	0	0	0	0	0
20	0.00	0	0	0	0	0	0	0
30	0.00	0	0	0	0	0	0	0
40	0.00	0.2032	1.79	27.79503	0.254	0.09	0.9144	0.0023
50	0.00	0.6096	9.82	152.4845	0.8636	0.38	1.0922	0.0077
60	1.00	0.6604	9.82	152.4845	0.9144	0.42	1.1938	0.0085
70	1.10	0.6858	10.71	166.3043	0.9144	0.42	1.2192	0.0086
80	1.20	0.762	11.61	180.2795	1.016	0.48	1.2954	0.0095
90	1.30	0.9144	19.64	304.9689	1.3208	0.63	1.5494	0.0115
100	1.40	1.4986	38.39	596.118	2.5908	1.28	2.667	0.0202
110	1.50	2.032	64.61	1003.261	4.445	2.3	3.8608	0.0323
120	2.00	2.54	85.97	1334.938	6.4008	3.41	5.0038	0.0437
130	2.10	3.3782	108.2	1680.124	8.7884	4.7	6.1722	0.0566
140	2.20	4.191	126.14	1958.696	10.9728	5.84	7.3152	0.0682
150	2.30	4.826	150.08	2330.435	15.367	7.01	8.3566	0.0793

Fuente: Elaboración Propia.

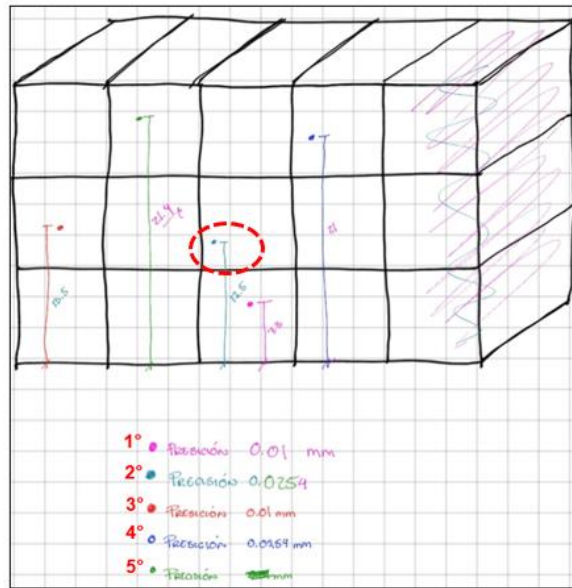


Figura 57. Posicionamiento de micrómetros Prototipo 5.  
Fuente: Elaboración Propia.

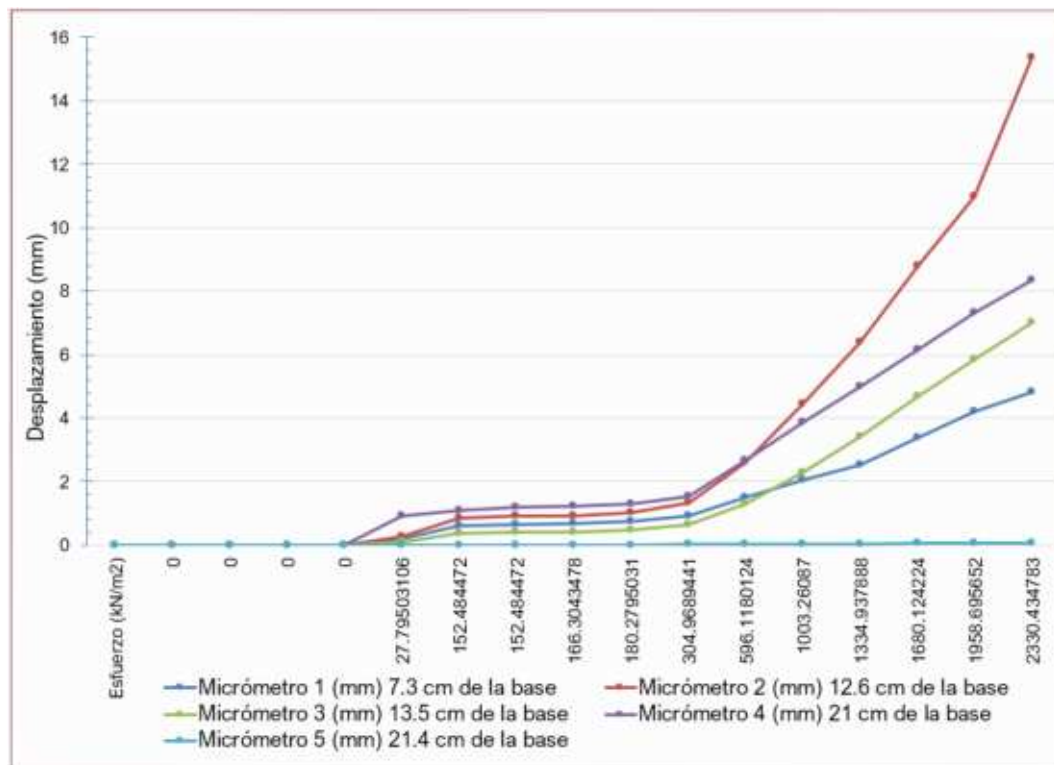


Figura 58. Comportamiento Esfuerzo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 5.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 59. Comportamiento Tiempo y Desplazamiento de los 5 micrómetros Prototipo 5.

Fuente: Elaboración Propia.

## 6 Evaluación y validación de resultados

### 6.1 Identificación y caracterización del suelo:

Con base en las pruebas realizadas, se seleccionó el material del banco San José Iturbide como el más adecuado para la experimentación, ya que presentó un ángulo de fricción interna de  $43.58^\circ$ , valor con una diferencia menor a  $1^\circ$  con relación al reportado para la arena de Fujian ( $44^\circ$ ), lo que indica un comportamiento mecánico comparable en condiciones de corte. Este criterio fue decisivo para la selección del material, ya que la similitud en el ángulo de fricción es fundamental para reproducir confiablemente la deformación acumulada y la respuesta del suelo bajo cargas cíclicas.

Desde el punto de vista granulométrico, el material proveniente de San José Iturbide se clasificó como arena mal graduada (SP), con un tamaño promedio de partícula ( $d_{50}$ ) de 1.088 mm, coeficiente de uniformidad (Cu) de 6.50 y coeficiente de curvatura (Cc) de 0.82, el cual presenta una distribución granulométrica amplia y continua. Aunque estos valores difieren de los parámetros característicos de la arena de Fujian, el material presentó una estructura estable y una respuesta mecánica dominada por la fricción, condición necesaria para analizar el comportamiento de suelos reforzados.

Las pruebas de permeabilidad dieron un valor de  $3.24 \times 10^{-2}$ , consistente con un material granular altamente permeable, mientras que las pruebas límite de Atterberg no registraron plasticidad ( $IP = 0$ ), confirmando la ausencia de finos plásticos y un comportamiento típicamente friccional. Asimismo, el peso volumétrico compacto determinado fue de 1.916 kg/L, valor que permitió reproducir condiciones de compactación controlada en el prototipo geotécnico. En conjunto, los resultados obtenidos indican que, si bien el material del banco de San José

Iturbide no reproduce exactamente la granulometría de la arena estándar de Fujian, presenta una respuesta mecánica equivalente, particularmente en términos de resistencia al corte, lo que justifica su selección como material de relleno para los modelos físicos y analíticos del estudio, garantizando la validez de la evaluación del efecto del espaciamiento vertical del refuerzo interno sobre la estabilidad global del terraplén.

## 6.2 Evaluación de Normativas:

En términos generales, la norma brasileña ABNT NBR 11682:2008 se caracteriza por un enfoque flexible basado en el desempeño del sistema. Permite el uso de métodos de equilibrio límite y análisis numéricos avanzados, como elementos finitos, para justificar diseños de refuerzo optimizados. La normativa no establece un espaciamiento vertical fijo entre geomallas, pero permite incrementarlo siempre que el análisis geotécnico demuestre estabilidad, control de deformaciones y adecuado comportamiento mecánico del terraplén reforzado. Por esta razón, ABNT favorece soluciones más eficientes y económicamente optimizadas, respaldadas por validaciones y modelos técnicos detallados.

Por otro lado, la Publicación Técnica 382 del IMT adopta un enfoque más conservador y prescriptivo, dirigido principalmente a garantizar la confiabilidad y seguridad en los proyectos viales mexicanos. Aunque no define una fórmula explícita para el espaciamiento vertical ( $S_v$ ), operacionalmente recomienda separaciones cercanas a 0.80 m para mejorar el confinamiento del suelo, controlar las deformaciones y reducir el riesgo de fallas internas, especialmente en suelos de baja resistencia o sujetos a cargas de tránsito intensas. La metodología IMT prioriza la repetibilidad de la construcción, la estabilidad global y el control de las deformaciones sobre la optimización económica.

La principal diferencia entre las dos regulaciones es que la ABNT permite la optimización del proyecto a través de análisis avanzados y validación del desempeño técnico, mientras que el IMT mantiene criterios más conservadores basados en la experiencia práctica y la seguridad operativa. Esta diferencia constituye el principal vacío técnico identificado en la investigación, ya que no existe un criterio internacional unificado que establezca el espaciamiento vertical óptimo de geomallas para terraplenes reforzados sometidos a cargas cíclicas.

Desde el punto de vista económico, el análisis demostró que aumentar el espaciamiento vertical de  $S_v = 0.80$  m a  $S_v = 1.00$  m reduce el número de capas de refuerzo y genera ahorros de aproximadamente 22.7% en el consumo de geomalla biaxial, sin siquiera considerar otros beneficios asociados a tiempos de instalación, transporte y construcción. Sin embargo, esta optimización sólo es viable si los análisis numéricos, físicos y de estabilidad global validan que el sistema mantiene factores de seguridad adecuados y un comportamiento estructural aceptable bajo cargas de servicio.

Respecto al material de relleno, el uso de arena como alternativa al material base/subbase convencional supone un incremento económico relativamente bajo, cercano al 3.8%, que puede justificarse técnicamente por sus mejores propiedades de drenaje, granulometría y comportamiento mecánico en sistemas reforzados con geomallas.

### **6.3 Diseño y simulación de Geomallas:**

#### **FASE 1 DE MODELACIÓN:**

Los modelos analíticos 2 y 4 fueron desarrollados bajo las mismas condiciones de confinamiento, material de relleno, propiedades mecánicas del suelo y características de refuerzo interno utilizando geomallas biaxiales. La única variable modificada entre ambos modelos fue el espaciamiento vertical del refuerzo interno ( $S_v$ ), utilizándose una

configuración de 10×10 cm para el modelo asociado a la normativa ABNT y de 8×8 cm para el modelo correspondiente al criterio IMT, con el objetivo de evaluar la influencia directa del espaciamiento vertical sobre la estabilidad global y respuesta estructural del sistema reforzado.

Los resultados obtenidos mediante modelos analíticos en Slide v6.0 muestran que ambos modelos mostraron una movilización temprana del refuerzo, ya que las capas de geomalla alcanzaron rápidamente tensiones cercanas a su máxima capacidad de trabajo a partir de cargas entre 2 y 3 kN. Este comportamiento indica que el refuerzo comenzó a actuar desde las etapas iniciales de carga, generando confinamiento del material de relleno y controlando los desplazamientos internos del sistema.

En el caso del Modelo analítico 2, correspondiente a la norma brasileña ABNT con espaciamiento vertical  $S_v = 10 \times 10$  cm, se identificó un comportamiento asociado a una falla de servicio entre 1 y 2 kN, debido a la rápida movilización de esfuerzos en las geomallas. Sin embargo, esto no representó una pérdida inmediata de estabilidad global, ya que el sistema continuó soportando aumentos progresivos de carga manteniendo factores de seguridad aceptables. El software no pudo identificar superficies críticas de falla durante las fases iniciales de carga, situación atribuida al comportamiento rígido del sistema reforzado; Posteriormente, a medida que aumentó la carga aplicada se desarrollaron superficies evaluables, obteniendo valores de  $FS = 1.546$  para Spencer y  $FS = 1.103$  para Lowe-Karafiath a 60 kN. A partir de cargas mayores, el método Lowe-Karafiath comenzó a presentar factores de seguridad por debajo del rango aceptable, alcanzando  $FS = 0,926$  a 80 kN.

Por otro lado, el Modelo analítico 4, correspondiente a la normativa IMT mexicana con espaciamiento vertical  $S_v = 8 \times 8$  cm, también presentó una condición de falla en servicio entre 2 y 3 kN debido a la movilización temprana del refuerzo. Sin embargo, el menor espaciamiento vertical generó un mayor confinamiento interno y un comportamiento más

conservador del sistema. Aunque inicialmente el software no detectó superficies de falla críticas, estas comenzaron a desarrollarse ante cargas cercanas a los 30 kN, permitiendo calcular factores de seguridad considerablemente superiores a los obtenidos en el modelo ABNT. La estabilidad general del sistema se mantuvo adecuada hasta aproximadamente 70 kN, donde el método Lowe-Karafiath comenzó a descender hacia el límite de estabilidad aceptable, registrando posteriormente valores cercanos a  $FS = 1.049$  a 90 kN.

**Conclusión 1°** En general, los resultados obtenidos muestran que ambos modelos mantuvieron una adecuada estabilidad estructural global incluso bajo aumentos de carga significativos, incluso cuando las geomallas alcanzaron rápidamente su máxima capacidad de trabajo. El modelo diseñado bajo el criterio IMT con espaciamiento vertical  $S_v = 8 \times 8$  cm mostró un comportamiento más conservador, asociado a mayores márgenes de seguridad y mayor confinamiento interno debido a la mayor cantidad de refuerzo utilizado. A su vez, el modelo basado en estándares ABNT con espaciamiento  $S_v = 10 \times 10$  cm mostró un comportamiento estructural funcionalmente adecuado, permitiendo identificar mecanismos de falla y evaluar el factor de seguridad utilizando una menor cantidad de geomalla. Estos resultados muestran que el aumento del refuerzo no genera una mejora proporcional en el desempeño estructural, sino un sistema más rígido y conservador, mientras que el criterio ABNT presenta un mayor potencial de optimización y ahorro económico sin comprometer significativamente la estabilidad global del sistema reforzado.

Tabla 26. Resultados de **Modelo analítico 2 de la normativa brasileña (Sv) 10x10cm** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Área (m2)	P (kN)	Esfuerzo (kN/m2)	Spencer (FS)	1° capa de geomalla	2° capa de geomalla	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa de geomalla	2° capa de geomalla
	0	0	-	8.680	10.997	-	8.680	10.997
0.0644	1	15.528	-	19.864	22.181	-	19.864	22.181
	2	31.056	-	30	30	-	30	30
	3	46.584	-	30	30	-	30	30
	4	62.112	-	30	30	-	30	30
	5	77.64	-	30	30	-	30	30
	6	93.168	-	30	30	-	30	30
	7	108.696	-	30	30	-	30	30
	8	124.224	-	30	30	-	30	30
	9	139.752	-	30	30	-	30	30
	10	155.28	-	30	30	-	30	30
	45	698.76	-	30	30	-	30	30
	60	931.68	1.546	30	30	1.103	30	30
	70	1086.96	1.461	30	30	1.022	30	30
	75	1164.6	1.270	30	30	0.96	30	30
80	1242.24	1.107	30	30	0.926	30	30	

Tabla 28. Resultados de **Modelo analítico 4 de la normativa mexicana (Sv) 8x8cm** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Área (m2)	P (kN)	Esfuerzo (kN/m2)	Spencer (FS)	primera capa de geomalla	segunda capa de geomalla	Lowe-Karafiath (Fs)	primera capa de geomalla	segunda capa de geomalla
0.0644	0	0	-	6.294	7.781	-	6.294	7.781
	1	15.527	-	14.701	16.187	-	14.701	16.187
	2	31.055	-	23.108	24.595	-	23.108	24.595
	3	46.583	-	30	30	-	30	30
	10	155.27	-	30	30	-	30	30
	20	310.54	-	30	30	-	30	30
	30	465.81	5.935	30	30	5.339	30	30
	40	621.08	5.084	30	30	1.908	30	30
	50	776.35	4.272	30	30	1.504	30	30
	60	931.62	2.710	30	30	1.308	30	30
	70	1086.89	1.861	30	30	1.186	30	30
	80	1242.16	1.683	30	30	1.105	30	30
	85	1319.795	1.459	30	30	1.241	30	30
	88	1366.376	1.440	30	30	1.059	30	30
	89	1381.903	1.065	30	30	1.054	30	30
90	1397.43	1.060	30	30	1.049	30	30	

Los resultados obtenidos en el análisis analítico utilizando Slide v6.0 para los Modelos 3 y 5 muestran el comportamiento estructural de los sistemas reforzados bajo condiciones sísmicas y considerando el cortante en las geomallas. Ambos modelos fueron desarrollados bajo las mismas condiciones de confinamiento, propiedades del material de relleno y características de refuerzo interno, incorporando además un corte equivalente en las dos capas de geomalla ubicadas a 10 cm del borde interno del sistema. La única variable modificada entre los dos modelos fue el espaciamiento vertical del refuerzo, permitiendo evaluar directamente la influencia del parámetro Sv en la estabilidad global.

En el Modelo analítico 3, correspondiente a la norma brasileña ABNT con espaciamiento vertical Sv = 10×10 cm, los resultados muestran que el sistema desarrolló una condición de inestabilidad global desde las primeras

etapas de carga. Si bien las geomallas movilizaron progresivamente sus esfuerzos hasta alcanzar rápidamente valores cercanos a los 30 kN/m entre cargas de 3 y 15 kN, los factores de seguridad calculados por los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath se mantuvieron por debajo de la unidad en todos los escenarios analizados. El método de Spencer mostró valores decrecientes desde  $FS = 0,890$  a 1 kN hasta  $FS = 0,816$  a 15 kN, mientras que Lowe-Karafiath disminuyó de  $FS = 0,875$  a  $FS = 0,805$  en el mismo rango de carga. Este comportamiento indica que, bajo la combinación de acción sísmica y cortante en las geomallas, el espaciamiento de  $10 \times 10$  cm reduce la capacidad del sistema para redistribuir tensiones y desarrollar suficientes mecanismos de resistencia, favoreciendo la formación temprana de superficies críticas de falla.

Por otro lado, el Modelo analítico 5, diseñado de acuerdo con la normativa IMT mexicana con espaciamiento vertical  $S_v = 8 \times 8$  cm, mostró un comportamiento considerablemente más estable y conservador. Desde las primeras cargas aplicadas, los coeficientes de seguridad obtenidos con Spencer y Lowe-Karafiath se mantuvieron por encima de la unidad, incluso cuando las geomallas comenzaron a alcanzar tensiones cercanas a su capacidad máxima. A 1 kN se registraron valores de  $FS = 1,204$  y  $FS = 1,181$ , respectivamente, permaneciendo por encima de la unidad hasta 5 kN, donde Lowe-Karafiath todavía informó  $FS = 1,140$ . Aunque el software informó posteriormente algunos resultados como "INVÁLIDOS", esto coincide con una movilización total de refuerzo y una condición excesivamente reforzada del sistema, no con una pérdida inmediata de estabilidad global. En este modelo, el menor espaciamiento vertical favoreció un mayor confinamiento del suelo y una mejor continuidad estructural del refuerzo, permitiendo una distribución más eficiente de los esfuerzos incluso en condiciones sísmicas y en presencia de cortante.

**Conclusión 2°** En conjunto, los resultados muestran que ambos modelos desarrollaron un comportamiento estructural similar bajo

condiciones de acción sísmica y cortante en las geomallas, alcanzando rápidamente tensiones cercanas a la capacidad máxima del refuerzo entre cargas de 10 y 15 kN, lo que demuestra una condición de falla en servicio en ambos sistemas. Si bien el modelo IMT con espaciamiento  $S_v = 8 \times 8$  cm presentó factores de seguridad ligeramente mayores durante las primeras etapas de carga debido al mayor confinamiento generado por el menor espaciamiento vertical, ambos modelos terminaron desarrollando condiciones de inestabilidad global. En el modelo ABNT los factores de seguridad se mantuvieron por debajo de la unidad desde las etapas iniciales, mientras que en el modelo IMT solo se mantuvieron valores aceptables con cargas bajas antes de que el software informara resultados no válidos debido a la condición crítica del sistema. Estos resultados indican que, bajo la combinación de acción sísmica y de corte en geomallas, el aumento del confinamiento mejora parcialmente la respuesta estructural, pero no previene la pérdida general de estabilidad del terraplén reforzado.

Tabla 34. Datos de comparación en condiciones de corte y acción sísmica de modelos analíticos 3 y 5:

<b>Aspecto</b>	<b>ABNT 10×10 (Tabla 26)</b>	<b>IMT 8×8 (Tabla 28)</b>
<b>FS global</b>	> 1.25 solo en cargas iniciales	> 1.25 solo en cargas iniciales
<b>Estabilidad</b>	Inestable	Parcialmente Estable
<b>Comportamiento</b>	Falla Global Temprana	Mejor respuesta inicial, pero falla posterior por servicio
<b>Uso de geomalla</b>	Optimizado	Excesivo
<b>Identificación de falla</b>	Sí, Falla temprana	Sí, falla retardada

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 27. Resultados de **Modelo analítico 3 de la normativa brasileña (Sv) 10x10cm con corte en las geomallas** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Área (m2)	P (kN)	Esfuerzo (kN/m2)	Spencer (FS)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.
	0	0	1.477	2.75	5.93	3.48	7.52	1.430	2.75	5.93	3.48	7.52
0.0644	1	15.527	0.890	5.27	14.59	5.99	16.19	0.875	5.27	14.59	5.99	16.19
	2	31.055	0.852	7.79	23.26	8.51	24.86	0.839	7.79	23.26	8.51	24.86
	3	46.583	0.839	10.30	30	11.03	30	0.827	10.30	30	11.03	30
	4	62.111	0.832	12.82	30	13.54	30	0.820	12.82	30	13.54	30
	5	77.639	0.829	15.34	30	16.06	30	0.816	15.34	30	16.06	30
	10	155.28	0.819	27.92	30	28.64	30	0.808	27.92	30	28.64	30
	15	232.92	0.816	30	30	30	30	0.805	30	30	30	30

Tabla 29. Resultados de **Modelo analítico 5 de la normativa mexicana (Sv) 8x8cm con corte en las geomallas** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Área (m2)	P (kN)	Esfuerzo (kN/m2)	Spencer (FS)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.	Lowe-Karafiath (Fs)	1° capa geo. Izq.	1° capa geo. Der.	2° capa geo. Izq.	2° capa geo. Der.
	0	0	1.679	2.34	3.95	2.88	4.88	1.62	2.34	3.95	2.88	4.88
0.0644	1	15.528	1.204	4.86	9.79	5.40	10.72	1.181	4.86	9.79	5.40	10.72
	2	31.056	1.185	7.37	15.63	7.91	16.56	1.162	7.37	15.63	7.91	16.56
	3	46.584	1.172	9.89	21.47	10.43	22.40	1.150	9.89	21.47	10.43	22.40
	4	62.112	1.164	12.40	27.31	12.95	28.24	1.144	12.40	27.31	12.95	28.24
	5	77.64	INVALIDO	14.92	30	15.46	30	1.140	14.92	30	15.46	30
	10	155.28	INVALIDO	27.49	30	28.03	30	INVALIDO	27.49	30	28.03	30
	15	232.919	INVALIDO	30	30	30	30	INVALIDO	30	30	30	30

## FASE 2 DE MODELACIÓN:

El modelo analítico a escala real 1:1 reproduce un terraplén reforzado para infraestructura tipo puente, con una altura total de 6 m y una capa de cimentación del mismo  $S_v$  de cada uno de los escenarios de espesor. Todos los modelos fueron desarrollados bajo las mismas condiciones geométricas, propiedades de los materiales, cargas aplicadas y condiciones de confinamiento, con el objetivo de evaluar exclusivamente la influencia del espaciamiento vertical de las geomallas ( $S_v$ ) en el comportamiento estructural del sistema.

La sección transversal adoptada corresponde a un puente angosto con un ancho de corona de 10 m, representativo de vías secundarias con tránsito controlado de carga pesada de acuerdo con la NOM-012-SCT. El material de relleno utilizado en todos los modelos corresponde al suelo del Banco San José Iturbide, modelado como un material homogéneo con un peso volumétrico de 19.16 kN/m<sup>3</sup>, cohesión de 10.79 kPa y ángulo de fricción interna de 43.58°, propiedades determinadas experimentalmente durante el presente estudio.

El refuerzo interno se incorporó mediante geomallas biaxiales colocadas horizontalmente, evaluándose resistencias últimas a tracción de 30 kN/m y 40 kN/m. Asimismo, todos los modelos mantuvieron las mismas condiciones de confinamiento lateral utilizando elementos rígidos equivalentes a estructuras tipo gaviones o bloques de concreto, garantizando condiciones de interacción suelo-refuerzo equivalentes.

La única variable modificada entre los modelos fue el espaciamiento vertical del refuerzo interno ( $S_v$ ), analizando configuraciones de 0,60 m, 0,80 m, 1,00 m, 1,20 m, 1,25 m, 1,50 m y 2,00 m. El objetivo fue evaluar la respuesta estructural de un mismo sistema bajo diferentes niveles de confinamiento interno y determinar la influencia del espaciamiento vertical

sobre los factores de seguridad y estabilidad global del terraplén reforzado.

Los análisis se desarrollaron en Slide v6.0 utilizando los métodos de equilibrio límite de Spencer y Lowe-Karafiath bajo diferentes configuraciones de vehículos establecidas en la NOM-012, incluyendo automóvil liviano, camión rígido C3, camión tractor T2-S2 y configuración completa T3-S2-R4.

Los resultados obtenidos de los modelos analíticos a escala real, presentados en las Tablas 30 y 31 resultados que pertenecen a los modelos 6 y 7 respectivamente, estos permiten evaluar el desempeño de los terraplenes reforzados diseñados de acuerdo con las normas brasileñas (ABNT) y mexicanas (IMT), considerando la acción sísmica y las cargas vehiculares representativas según la NOM-012. Ambos sistemas mantuvieron una estabilidad global adecuada bajo las diferentes configuraciones del vehículo analizadas a escala real. Como ambos modelos presentan las mismas condiciones geométricas, materiales y cargas, las diferencias observadas se atribuyen directamente al espaciamiento vertical de las geomallas.

El modelo 6 correspondiente a las normas ABNT con  $S_v = 1.0$  m presentó factores de seguridad aceptables utilizando una menor cantidad de refuerzo, aunque el método Lowe-Karafiath presentó valores cercanos al parámetro aceptable bajo cargas pesadas. A su vez, el Modelo 7 del reglamento IMT con  $S_v = 0.80$  m presentó factores de seguridad ligeramente superiores debido al mayor confinamiento generado por el menor espaciamiento vertical.

**Conclusión 3°** En conjunto, los resultados a escala real muestran que en general, ambos modelos mostraron un comportamiento estructural similar, si bien el criterio IMT fue más conservador, proporciona un mayor margen de seguridad y tuvo mayor consumo de geomalla, mientras que el diseño basado en las normas ABNT obtuvo una respuesta estructural adecuada permitiendo alcanzar condiciones de estabilidad satisfactorias

con un menor consumo de geomalla, lo que muestra potencial de optimización y ahorro económico, sin comprometer la seguridad estructural del terraplén.

Tabla 35. Datos de comparación en condiciones de escala real de modelos analíticos 6 y 7:

Aspecto	ABNT Sv = 1.0 m	IMT Sv = 0.80 m
<b>FS global</b>	> 1 (estable)	> 1 (muy conservador)
<b>Evaluación</b>	Sí	Sí
<b>Comportamiento</b>	Estable	Más rígido
<b>Desempeño funcional</b>	Adecuado	Similar
<b>Uso de geomalla</b>	Optimizado	Mayor consumo

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 30. Resultados de **Modelo analítico 6 Norma ABNT a escala REAL 1 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Norma ABNT a escala REAL 1m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide (kN/m2)	Spencer (FS)	T ult 1 al 6	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 6	Spencer (FS)	T ult 1 al 6	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 6
SIN Carga	-	-	-	1.356	30	1.128	30	1.575	40	1.394	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.416	30	1.128	30	1.548	40	1.383	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.352	30	0.941	30	1.464	40	1.196	40
T2-S2 (tractocamión + semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.320	30	1.033	30	1.406	40	1.194	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.158	30	0.972	30	1.355	40	0.941	40

Tabla 31. Resultados de **Modelo analítico 7 Publicación Técnica 382**  
**IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio  
 limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Publicación Técnica 382 IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso $\approx$ (kN) = t $\times$ 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 8	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 8	Spencer (FS)	T ult 1 al 8	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 8
SIN Carga	-			1.256	30	1.486	30	1.420	40	-	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.254	30	1.183	30	1.374	40	-	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.202	30	1.068	30	1.289	40	1.386	40
T2-S2 (tractocamión + semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.175	30	1.082	30	1.435	40	1.170	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.298	30	0.940	30	1.298	40	1.054	40

Debido a que uno de los principales objetivos de la investigación fue evaluar la influencia del espaciamiento vertical de las geomallas en la estabilidad y ahorro económico del sistema reforzado, se decidió analizar progresivamente diferentes valores de Sv hasta acercarse al factor de seguridad mínimo aceptable de FS = 1.25 recomendado por AASHTO. Por esta razón, el mismo modelo fue sometido inicialmente al espaciamiento máximo considerado en la normativa ABNT brasileña (Sv = 1.20 m), aumentando gradualmente hasta Sv = 1.25 m, 1.50 m y finalmente 2.00 m, con el objetivo de identificar el límite de estabilidad estructural del sistema. Asimismo, se incorporó un modelo adicional con Sv = 0.60 m para comparar el comportamiento de un sistema altamente reforzado y evaluar la

influencia de un espaciamiento considerablemente menor en la respuesta general del terraplén. A continuación, se muestran las distintas configuraciones de Sv y sus respectivas interpretaciones.

Tabla 32. Resultados de **Modelo analítico 8 Norma ABNT a escala REAL 1.20 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Norma ABNT a escala REAL hasta 1.20m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m2	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5
SIN Carga		-		1.504	30	1.092	30	1.633	40	1.236	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.499	30	1.079	30	1.712	40	1.227	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.427	30	1.082	30	1.516	40	1.177	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.399	30	1.000	30	1.463	40	1.162	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.361	30	0.955	30	1.450	40	1.011	40

El Modelo Numérico 8, con espaciamiento Sv = 1.20 m, mostró que el aumento moderado del espaciamiento vertical no produjo pérdidas significativas en la estabilidad. Los factores de seguridad de Spencer se mantuvieron superiores a 1.36 incluso bajo la carga máxima evaluada, mientras que Lowe-Karafiath presentó valores cercanos al límite permisible en configuraciones de carga pesada, particularmente con geomalla de 30 kN/m.

Tabla 33. Resultados de **Modelo numérico 9 SIN NORMATIVA a escala REAL 1.25 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa a escala REAL 1.25m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5
SIN Carga	-	-	-	1.521	30	1.142	30	1.648	40	1.254	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.513	30	1.139	30	1.640	40	1.254	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.458	30	1.094	30	1.563	40	1.192	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.431	30	1.044	30	1.542	40	1.139	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.361	30	0.967	30	1.406	40	1.045	40

En el Modelo Numérico 9, correspondiente a Sv = 1.25 m, los resultados fueron similares a los obtenidos para Sv = 1.20 m. El sistema mantuvo una estabilidad global aceptable para ambos tipos de geomalla, aunque los factores de seguridad obtenidos utilizando Lowe-Karafiath continuaron mostrando reducciones progresivas a medida que aumentaba la carga del vehículo, alcanzando valores cercanos a la unidad en la configuración T3-S2-R4.

Tabla 34. Resultados de **Modelo numérico 10 SIN NORMATIVA a escala REAL 1.50 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa a escala REAL 1.50m de (SV)				Geomalla con resistencia última a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia última a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (Fs)	T ult 1 al 4	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 4	Spencer (Fs)	T ult 1 al 4	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 4
SIN Carga	-			1.633	30	1.079	30	1.702	40	1.250	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.63	30	1.077	30	1.691	40	1.249	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.579	30	1.052	30	1.628	40	1.108	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.546	30	1.035	30	1.571	40	1.083	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.504	30	0.976	30	1.555	40	1.047	40

El Modelo Numérico 10, con espaciamiento Sv = 1.50 m, mostró una ligera disminución en los factores de seguridad con relación a los modelos anteriores. Pese a ello, los valores de Spencer se mantuvieron por encima de 1.50 en la mayoría de las configuraciones analizadas. Lowe-Karafiath volvió a mostrar condiciones cercanas al límite de estabilidad de la geomalla de 30 kN/m bajo cargas máximas.

Tabla 35. Resultados de **Modelo numérico 11 SIN NORMATIVA a escala REAL 2 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa escala REAL 2.00 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autoriza do (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 3	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 3	Spencer (FS)	T ult 1 al 3	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 3
SIN Carga	-	-	-	1.362	30	0.985	30	1.456	40	1.024	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.388	30	0.944	30	1.448	40	1.020	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.308	30	0.912	30	1.372	40	0.981	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.273	30	0.946	30	1.334	40	0.943	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.220	30	0.895	30	1.261	40	0.956	40

En el Modelo Numérico 11, correspondiente al espaciamiento Sv = 2.00 m, se observó la reducción más importante en la estabilidad global del sistema. Si bien el método Spencer mantuvo factores de seguridad mayores a la unidad, Lowe-Karafiath presentó valores inferiores a 1 en prácticamente todas las configuraciones de carga para la geomalla de 30 kN/m y cercanos a la unidad para la geomalla de 40 kN/m, mostrando que el espaciamiento excesivo reduce significativamente la capacidad de confinamiento interno del sistema reforzado.

Tabla 36. Resultados de **Modelo numérico 12 SIN NORMATIVA a escala REAL 0.60 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa escala REAL 0.60 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 10	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 10	Spencer (FS)	T ult 1 al 10	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 10
SIN Carga	-	-	-	1.336	30	-	30	-	40	-	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.329	30	-	30	-	40	-	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.327	30	1.347	30	-	40	-	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.260	30	1.165	30	-	40	-	40
T3-S2-R4 (configuración “full”, doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.202	30	1.031	30	-	40	-	40

Finalmente, el Modelo Numérico 12, con espaciamiento  $S_v = 0.60$  m, presentó el comportamiento más conservador debido al aumento considerable en la cantidad de refuerzo interno. Los factores de seguridad de Spencer se mantuvieron estables y superiores a 1.20 incluso bajo cargas máximas. Sin embargo, el método Lowe-Karafiath no pudo identificar superficies de falla críticas para varias configuraciones, particularmente con geomalla de 40 kN/m, lo que indica un sistema altamente rígido y excesivamente reforzado donde el algoritmo no puede desarrollar mecanismos de falla global claros.

**Conclusión 4°** Los resultados obtenidos en los modelos a escala real demuestran que el espaciamiento vertical de las geomallas influye directamente en la estabilidad global y el nivel de confinamiento interno del terraplén reforzado. Los modelos con espaciamiento reducido ( $S_v = 0.60$  m y 0.80 m) mostraron un comportamiento más conservador y mayores

factores de seguridad, aunque con un aumento considerable del consumo de geomallas y condiciones de sobre-refuerzo en algunos casos. Por otro lado, los modelos con espaciamiento intermedio entre  $S_v = 1.0$  m y 1.50 m mantuvieron factores de seguridad aceptables y un desempeño estructural funcionalmente adecuado, demostrando un mejor equilibrio entre estabilidad y optimización del material.

Asimismo, los resultados muestran que espaciamientos verticales mayores, como  $S_v = 2.0$  m, reducen significativamente la capacidad de confinamiento del sistema, especialmente en condiciones sísmicas, donde los factores de seguridad obtenidos utilizando Lowe-Karafiath cayeron por debajo de la unidad. En este sentido, se observa que espaciamientos mayores pueden ser técnicamente viables en zonas con baja o nula acción sísmica, permitiendo optimizar el uso de la geomalla y reducir costos; Sin embargo, en regiones con coeficientes sísmicos altos es necesario utilizar espaciamientos verticales más pequeños para garantizar una estabilidad global adecuada y mantener márgenes de seguridad aceptables según criterios de diseño geotécnico.

#### 6.4 Prototipo Físico:

Los resultados experimentales obtenidos en las pruebas del Prototipo Físico 2, diseñado de acuerdo con la normativa brasileña con espaciamiento vertical  $S_v = 10$  cm, y del Prototipo Físico 4, diseñado de acuerdo con la normativa mexicana con espaciamiento vertical  $S_v = 8$  cm, se resumen en la Tabla 42.

La duración total de la prueba fue mayor en el Prototipo 2, con un tiempo de aproximadamente 6,8 minutos, en comparación con el Prototipo 4, que alcanzó condiciones equivalentes en aproximadamente 3,0 minutos, lo que refleja una diferencia en la rigidez estructural de los sistemas. En

ambos casos, la respuesta carga-desplazamiento mostró un aumento progresivo de las deformaciones a medida que aumentaba la carga aplicada, sin que se registraran colapsos bruscos.

Para ambos prototipos se identificó que, a partir de cargas aproximadas entre 2 y 3 kN, los desplazamientos comenzaron a aumentar de manera más evidente, manifestándose una respuesta deformacional progresiva del sistema, independiente del espaciamiento vertical del refuerzo. A partir de este rango de carga, los desplazamientos registrados por los micrómetros aumentaron de forma más marcada, principalmente en puntos asociados a deformaciones laterales y superficiales, manteniéndose un comportamiento estable durante todo el ensayo.

El análisis comparativo de desplazamientos máximos indica que el Prototipo 4 ( $S_v = 8$  cm) presentó menores deformaciones para niveles de carga equivalentes, presentando mayor rigidez, mientras que el Prototipo 2 ( $S_v = 10$  cm) presentó una respuesta más flexible, con mayores desplazamientos acumulados. Sin embargo, el modo de falla observado en ambos casos fue similar y dominado por criterios de operabilidad.

**Conclusión 1°** En general, los resultados del prototipo físico confirman que el aumento de refuerzo no modifica significativamente el rango de carga asociado a la falla en servicio, sino principalmente la rigidez del sistema, ya que ambos modelos alcanzaron condiciones límite bajo cargas equivalentes. Este comportamiento experimental corrobora los resultados obtenidos en los modelos analíticos y refuerza la viabilidad de configuraciones optimizadas que reduzcan la cantidad de refuerzo sin comprometer el desempeño funcional del terraplén.

Tabla 36. Datos de comparación en Prototipos Físicos 2 Sv (10 cm) y 4 Sv (8cm):

<b>Parámetro</b>	<b>Prototipo 2 – Normativa brasileña (Sv = 10 cm)</b>	<b>Prototipo 4 – Normativa mexicana (Sv = 8 cm)</b>
Duración total de la prueba (s)	≈ 410	≈ 180
Duración total de la prueba (min)	≈ <b>6.8</b>	≈ <b>3.0</b>
Rango de carga aplicado	0 – ≈ 150 kN	0 – ≈ 150 kN
Inicio de desplazamientos apreciables	2 – 3 kN	2 – 3 kN
Desplazamiento máx. Micrómetro 1 (mm)	≈ 7.3	≈ 2.9
Desplazamiento máx. Micrómetro 2 (mm)	≈ 4.9	≈ 6.4
Desplazamiento máx. Micrómetro 3 (mm)	≈ 8.4	≈ 7.3
Desplazamiento máx. Micrómetro 4 (mm)	≈ 3.1	≈ 3.1
Desplazamiento máx. Micrómetro 5 (mm)	≈ 31.4	≈ 3.4
Modo de falla observado	Falla por servicio	Falla por servicio
Colapso súbito	No	No
Comportamiento global	Más flexible	Más rígido

Fuente: Elaboración Propia.

El prototipo 3, dimensionado de acuerdo con la norma ABNT NBR 11682:2008, con espaciamiento vertical de refuerzo Sv = 10 cm, confinamiento lateral en ambos lados, cortado en geomallas y placa de acero de 0.40 × 0.161 m, se comparó con el Prototipo 5, correspondiente a la norma IMT mexicana con espaciamiento vertical Sv = 8 cm, bajo las mismas condiciones de confinamiento y corte en las geomallas. Los

resultados obtenidos se presentan en la Tabla 57.

La prueba del Prototipo 3 tuvo una duración aproximada de 180 s (3,0 min), durante los cuales la carga vertical se incrementó progresivamente desde 0 kN hasta alcanzar la carga máxima de 150,93 kN. En el Prototipo 5, la prueba duró menos tiempo, aproximadamente 150 s (2,3 min), alcanzando una carga máxima similar de 150,08 kN, lo que demuestra que ambos sistemas tienen capacidades de carga comparables en las condiciones evaluadas.

En ambos prototipos, durante los primeros 20 a 30 segundos, los desplazamientos registrados en los cinco micrómetros fueron prácticamente nulos, incluso cuando se comenzaron a aplicar las cargas iniciales. Esta etapa corresponde al proceso de acomodación del sistema experimental, asociado al contacto progresivo entre la placa de carga, el material reforzado y el confinamiento lateral.

A partir de cargas cercanas a 0,9-2,0 kN se comenzaron a registrar desplazamientos medibles en todos los micrómetros, observándose una respuesta progresiva y no lineal entre la carga aplicada y las deformaciones, comportamiento característico de los sistemas geotécnicos sometidos a cargas incrementales.

En el Prototipo 3 el mayor desplazamiento se presentó en el micrómetro 5 alcanzando un valor máximo de 13.69 mm, seguido del micrómetro 3 con 6.98 mm. El micrómetro 1 alcanzó 4,27 mm, mientras que los micrómetros 2 y 4 registraron desplazamientos máximos de 2,40 mm y 4,58 mm, respectivamente. Esta distribución indica una deformación global controlada, con zonas localizadas de mayor flexibilidad asociadas a la geometría y disposición del refuerzo interno.

En el Prototipo 5, los desplazamientos registrados fueron menores durante las primeras etapas de carga; Sin embargo, a medida que aumentó la carga aplicada, se observaron deformaciones significativas en puntos específicos del sistema. El micrómetro 2 presentó el mayor desplazamiento

alcanzando 15,37 mm, seguido del micrómetro 4 con 8,36 mm y el micrómetro 3 con 7,01 mm. El micrómetro 1 alcanzó un desplazamiento máximo de 4,83 mm, mientras que el micrómetro 5 mostró desplazamientos mínimos a lo largo de la prueba, inferiores a 0,08 mm, lo que sugiere una importante restricción local en esa zona del sistema.

No se observó una falla global repentina en ninguno de los prototipos. Ambos sistemas alcanzaron una condición límite de servicio bajo cargas del orden de 2 a 3 kN, manifestada por el inicio de desplazamientos progresivos, sin pérdida abrupta de capacidad portante. La evolución de las deformaciones fue continua y controlada, sin aceleraciones bruscas incluso al acercarse a la carga máxima aplicada.

**Conclusión 2°** En conjunto, los resultados experimentales indican que, si bien el Prototipo 5 ( $S_v = 8$  cm) presentó una respuesta más rígida en las etapas iniciales y una redistribución de deformaciones diferente, la reducción del espaciamiento vertical no modificó significativamente el rango de carga asociado a la falla en servicio, sino principalmente la rigidez y distribución interna de deformaciones del sistema. Esto confirma que menores espaciamientos entre geomallas no necesariamente generan mejoras proporcionales en el desempeño funcional, permitiendo considerar configuraciones optimizadas con menor consumo de geomallas bajo criterios de eficiencia estructural y económica.

Tabla 37. Datos de comparación en Prototipos Físicos 3 Sv (10 cm) y 5 Sv (8cm):

<b>Parámetro</b>	<b>Prototipo 3 – ABNT NBR 11682:2008 (<math>S_v = 10</math> cm)</b>	<b>Prototipo 5 – Normativa mexicana (<math>S_v = 8</math> cm)</b>
Condición del sistema	Confinado en ambos lados, corte en geomallas	Confinado en ambos lados, corte en geomallas
Duración total de la prueba (min)	3.0	2.3

Carga vertical máxima (kN)	150.93	150.08
Inicio de desplazamientos apreciables (kN)	≈ 0.9 – 1.0	≈ 1.8 – 2.0
Micrómetro con mayor desplazamiento	Micrómetro 5	Micrómetro 2
Desplazamiento máximo micrómetro 1 (mm)	4.27	4.83
Desplazamiento máximo micrómetro 2 (mm)	2.40	15.37
Desplazamiento máximo micrómetro 3 (mm)	6.98	7.01
Desplazamiento máximo micrómetro 4 (mm)	4.58	8.36
Desplazamiento máximo micrómetro 5 (mm)	13.69	0.08
Comportamiento global	Deformación progresiva y estable	Redistribución localizada de deformaciones
Tipo de falla	Falla por servicio	Falla por servicio

Fuente: Elaboración Propia.

### 6.5 Modelo Analítico VS Prototipo Físico:

#### COMPARACIÓN EN MODELO ANALÍTICO 2 Y PROTOTIPOS FÍSICOS 2 Sv (10 CM) EN AMBOS:

La comparación entre el Modelo analítico 2, analizado en el software Slide v6.0, y el Prototipo Físico 2, ambos diseñados de acuerdo con la norma brasileña ABNT NBR 11682:2008 con espaciamiento vertical de refuerzo  $S_v = 10$  cm, muestra una clara correspondencia en el comportamiento general del sistema.

En el modelo analítico, a pesar del aumento progresivo de la carga aplicada, no se obtuvo un valor explícito del factor de seguridad (FS). Esta condición no representa una deficiencia en el análisis, pero indica un

sistema altamente reforzado en el que no se desarrolla una superficie de falla crítica global claramente identificable mediante métodos de equilibrio límite. Sin embargo, el modelo alcanzó una condición límite de servicio bajo cargas del orden de 2 a 3 kN, asociado a la progresiva movilización del refuerzo y al aumento de las deformaciones.

Este comportamiento fue consistente con los resultados obtenidos en el Prototipo Físico 2, en el que se observó que, si bien el sistema era capaz de soportar altas cargas verticales del orden de 150 kN, los desplazamientos comenzaron a desarrollarse significativamente dentro del mismo rango de carga de 2 a 3 kN, sin colapso estructural ni pérdida repentina de capacidad de carga.

Asimismo, tanto en el modelo analítico como en el prototipo físico, la respuesta estructural estuvo regida por criterios de servicio y rigidez del sistema más que por mecanismos de inestabilidad global. En ambos casos las deformaciones evolucionaron de forma progresiva y controlada a medida que aumentaba la carga aplicada.

**Conclusión 1°** La coincidencia en el rango de carga asociado a la condición límite de servicio entre el modelo analítico y el prototipo físico confirma que el análisis realizado con Slide v6.0 reproduce adecuadamente el comportamiento funcional del sistema reforzado, incluso en ausencia de un valor FS explícito. Los resultados obtenidos indican que el desempeño estructural estuvo controlado principalmente por criterios de servicio relacionados con la rigidez y deformabilidad del sistema, y no por mecanismos de falla global.

Tabla 38. Datos de comparación en Modelo Analítico 2 y Prototipos Físicos 2 Sv (10 cm) en ambos:

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo analítico 2 (Slide v6.0)</b>	<b>Prototipo Físico 2</b>
Normativa	ABNT NBR 11682:2008	ABNT NBR 11682:2008
Espaciamiento vertical (Sv)	10 cm	10 cm
Tipo de análisis	Equilibrio límite	Ensayo físico a escala
Tipo de respuesta	Falla por servicio	Falla por servicio
Rango de carga de falla por servicio	2 – 3 kN	2 – 3 kN
Obtención de FS	No obtenido debido a sobre-refuerzo del sistema	No aplica
Carga máxima alcanzada	No crítica para estabilidad	≈ 150 kN
Desplazamientos	Desplazamientos progresivos asociados a movilización del refuerzo	Progresivos, controlados
Modo de falla	Servicio (movilización del refuerzo)	Servicio (deformación progresiva)
Colapso global	No	No

Fuente: Elaboración Propia.

**COMPARACIÓN EN MODELO ANALÍTICO 3 Y PROTOTIPOS FÍSICOS 3 Sv (10 cm) EN AMBOS CON CORTE EN GEOMALLAS:**

La comparación entre el Modelo analítico 3, analizado en el software Slide v6.0, y el Prototipo Físico 3, ambos diseñados de acuerdo con la norma brasileña ABNT NBR 11682:2008, con espaciado vertical de geomallas Sv = 10 cm, geomallas con corte y confinamiento lateral en ambos lados, muestra una correspondencia consistente en el

comportamiento general del sistema reforzado.

En el modelo analítico, el análisis permitió identificar una superficie de ruptura crítica, lo que permitió obtener el factor de seguridad (FS), el cual se mantuvo cerca del límite aceptable a medida que aumentaba la carga aplicada. Este comportamiento indica una reducción relativa en la capacidad resistente del sistema con relación al Modelo 2, atribuida principalmente a la discontinuidad generada por el corte de las geomallas. Sin embargo, el sistema mantuvo una estabilidad global durante todo el proceso de carga y alcanzó una condición límite de servicio bajo cargas del orden de 2 a 3 kN, asociado a la progresiva movilización del refuerzo y al paulatino aumento de las deformaciones.

Este comportamiento fue consistente con los resultados observados en el Prototipo Físico 3, en el que los desplazamientos comenzaron a desarrollarse significativamente dentro del mismo rango de carga, mientras que el sistema pudo soportar una carga máxima de 150.93 kN sin presentar colapso estructural ni pérdida repentina de capacidad de carga. Los desplazamientos registrados evolucionaron de forma progresiva y controlada a lo largo de la prueba, confirmando un comportamiento dominado por criterios de servicio y no por mecanismos de fallo global.

Asimismo, la distribución de deformaciones observada experimentalmente mostró una redistribución interna de esfuerzos asociados a la presencia de cortante en las geomallas, comportamiento que coincide con las tendencias identificadas en el modelo analítico a través de la formación de una superficie potencial de ruptura y una mayor movilización del sistema de refuerzo.

**Conclusión 2°** La coincidencia entre el rango de carga asociado a la condición límite de servicio, el patrón de deformación progresiva y la ausencia de colapso global en ambos análisis confirma que el modelo analítico desarrollado en Slide v6.0 reproduce adecuadamente el comportamiento mecánico observado experimentalmente, incluso en

condiciones de reducción parcial de la continuidad del refuerzo debido al corte de las geomallas.

Tabla 39. Datos de comparación en Modelo analítico 3 y Prototipos Físicos 3 Sv (10 cm) en ambos y corte en geomallas:

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo analítico 3 (Slide v6.0)</b>	<b>Prototipo Físico 3</b>
<b>Normativa</b>	ABNT NBR 11682:2008	ABNT NBR 11682:2008
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	10 cm	10 cm
<b>Condición del refuerzo</b>	Geomallas con corte	Geomallas con corte
<b>Confinamiento lateral</b>	Ambos lados	Ambos lados
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite (estático / pseudoestático)	Ensayo físico a escala
<b>Tipo de respuesta</b>	Falla por servicio	Falla por servicio
<b>Rango de carga de falla por servicio</b>	2 – 3 kN	2 – 3 kN
<b>Obtención de FS</b>	FS obtenido, cercano al límite aceptable	No aplica
<b>Carga máxima alcanzada</b>	No crítica para estabilidad	150.93 kN
<b>Desplazamientos</b>	Movilización progresiva del refuerzo	Deformaciones progresivas y controladas
<b>Colapso global</b>	No	No

Fuente: Elaboración Propia.

#### COMPARACIÓN EN MODELO ANALÍTICO 4 Y PROTOTIPOS FÍSICOS 4 Sv (8 cm) EN AMBOS:

La comparación entre el Modelo Numérico 4, analizado mediante el software Slide v6.0, y el Prototipo Físico 4, ambos diseñados de acuerdo con la norma mexicana IMT – Publicación Técnica 382, con espaciado vertical de refuerzo  $S_v = 8$  cm, geomallas continuas y confinamiento lateral en ambos lados, muestra un comportamiento consistente en términos de

estabilidad global y respuesta estructural del sistema reforzado.

En el modelo numérico, el análisis no permitió obtener un valor explícito del factor de seguridad (FS), condición asociada a la alta rigidez y alto nivel de refuerzo del sistema, lo que impidió el desarrollo de una superficie de falla crítica claramente identificable por métodos de equilibrio límite. Este comportamiento indica que la estabilidad global no constituyó el mecanismo de control del sistema en las condiciones evaluadas.

A pesar de esto, el modelo alcanzó una condición límite de servicio bajo cargas del orden de 2 a 3 kN, asociado al inicio de la movilización de la geomalla y al desarrollo progresivo de las deformaciones. Asimismo, el análisis mostró una respuesta estructural más rígida y menores deformaciones en comparación con modelos con mayor espaciamiento vertical del refuerzo.

Consistentemente, en el Prototipo Físico 4 el sistema fue capaz de soportar altas cargas verticales cercanas a los 150 kN sin presentar colapso estructural o pérdida repentina de capacidad de carga. Sin embargo, al igual que en el modelo numérico, los desplazamientos comenzaron a desarrollarse significativamente en el rango de 2 a 3 kN, manteniéndose una evolución progresiva y controlada de las deformaciones durante todo el ensayo.

Los resultados experimentales también mostraron menores niveles de desplazamiento en comparación con los prototipos con espaciamiento  $S_v = 10$  cm, lo que confirma un aumento en la rigidez global del sistema asociado a la reducción del espaciamiento vertical entre los refuerzos.

**Conclusión 3 °** La coincidencia entre el rango de carga asociado a la condición límite de servicio y el comportamiento progresivo observado tanto en el modelo numérico como en el prototipo físico valida el desempeño del proyecto con base en la normatividad mexicana. Sin embargo, los resultados indican que reducir el espaciamiento vertical del refuerzo ( $S_v = 8$  cm) aumenta principalmente la rigidez global del sistema, sin generar

aumentos proporcionales en el rango de carga asociado a la falla en servicio, lo que sugiere la posibilidad de optimizar el diseño a través de configuraciones menos conservadoras y más eficientes.

Tabla 40. Datos de comparación en Modelo analítico 4 y Prototipos Físicos 4 Sv (8 cm) en ambos:

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo analítico 4 (Slide v6.0)</b>	<b>Prototipo Físico 4</b>
Normativa	Normativa mexicana	Normativa mexicana
Espaciamiento vertical (Sv)	8 cm	8 cm
Condición del refuerzo	Geomallas continuas	Geomallas continuas
Confinamiento lateral	Ambos lados	Ambos lados
Tipo de análisis	Equilibrio límite (estático / pseudoestático)	Ensayo físico a escala
Tipo de respuesta	Falla por servicio	Falla por servicio
Rango de carga de falla por servicio	2 – 3 kN	2 – 3 kN
Obtención de FS	No obtenido debido a la alta rigidez del sistema	No aplica
Carga máxima alcanzada	No crítica para estabilidad	≈ 150 kN
Desplazamientos	Deformaciones reducidas asociadas a la mayor rigidez del sistema	Desplazamientos progresivos y controlados
Colapso global	No	No

Fuente: Elaboración Propia.

#### COMPARACIÓN EN MODELO ANALÍTICO 5 Y PROTOTIPOS FÍSICOS 5 Sv (8 cm) EN AMBOS CON CORTE EN GEOMALLAS:

La comparación entre el Modelo Analítico 5, analizado mediante el software Slide v6.0, y el Prototipo Físico 5, ambos diseñados de acuerdo con la norma mexicana IMT – Publicación Técnica 382, con espaciamento

vertical de refuerzo  $S_v = 8$  cm, geomallas con cortante y confinamiento lateral en ambos lados, muestra una clara correspondencia en el comportamiento estructural del sistema reforzado.

En el modelo analítico, el análisis permitió identificar una superficie potencial de ruptura, lo que permitió obtener el factor de seguridad (FS), el cual se mantuvo cerca del límite aceptable a medida que aumentaba la carga aplicada. Este comportamiento refleja una reducción relativa en la capacidad resistente del sistema asociada a la discontinuidad parcial del refuerzo provocada por el corte de las geomallas. Sin embargo, el sistema mantuvo una estabilidad global durante todo el análisis y alcanzó una condición límite de servicio bajo cargas del orden de 2 a 3 kN, asociado a la progresiva movilización del refuerzo y al paulatino desarrollo de deformaciones.

Este comportamiento fue consistente con los resultados obtenidos en el Prototipo Físico 5, en el que los desplazamientos comenzaron a desarrollarse dentro del mismo rango de carga, mientras que el sistema pudo soportar una carga máxima de aproximadamente 150.08 kN sin presentar colapso estructural ni pérdida repentina de capacidad de carga. La evolución de las deformaciones fue progresiva y controlada durante todo el ensayo.

Asimismo, la distribución de desplazamientos observada experimentalmente mostró una redistribución interna de las deformaciones asociadas a la presencia de cortante en las geomallas, destacando concentraciones localizadas de desplazamientos en ciertos micrómetros y una respuesta más restringida en otras áreas del sistema. Este comportamiento coincide con las tendencias observadas en el modelo analítico, donde la discontinuidad parcial del refuerzo favoreció una mayor movilización interna de esfuerzos sin desencadenar un fracaso global.

**Conclusión 4°** La coincidencia entre el rango de carga asociado a la condición límite de servicio, el patrón progresivo de deformaciones y la

ausencia de colapso global en ambos análisis confirma que el Modelo Analítico 5 reproduce adecuadamente el comportamiento experimental observado en el Prototipo Físico 5, incluso bajo condiciones desfavorables de continuidad del refuerzo debido al corte de las geomallas. Los resultados indican que el sistema mantiene estabilidad funcional, aunque con una redistribución de deformaciones internas más pronunciada.

Tabla 41. Datos de comparación en Modelo analítico 5 y Prototipos Físicos 5 Sv (8 cm) en ambos y corte en geomallas:

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo analítico 5 (Slide v6.0)</b>	<b>Prototipo Físico 5</b>
Normativa	Normativa mexicana	Normativa mexicana
Espaciamiento vertical (Sv)	8 cm	8 cm
Condición del refuerzo	Geomallas con corte	Geomallas con corte
Confinamiento lateral	Ambos lados	Ambos lados
Tipo de análisis	Equilibrio límite (estático / pseudoestático)	Ensayo físico a escala
Tipo de respuesta	Falla por servicio	Falla por servicio
Rango de carga de falla por servicio	2 – 3 kN	2 – 3 kN
Obtención de FS	FS obtenido, cercano al límite aceptable	No aplica
Carga máxima alcanzada	No crítica para estabilidad	150.08 kN
Desplazamientos	Redistribución progresiva de deformaciones	Desplazamientos progresivos y redistribuidos
Colapso global	No	No

Fuente: Elaboración Propia.

**Conclusión 5°** La comparación entre los modelos analíticos desarrollados en Slide v6.0 y los prototipos físicos evaluados experimentalmente mostró una correspondencia consistente en el

comportamiento global de los sistemas reforzados, validando la capacidad del análisis numérico para representar adecuadamente la respuesta mecánica de terraplenes estabilizados con geomallas.

En los cuatro casos analizados, tanto en configuraciones con geomallas continuas como con geomallas de corte, se observó que el comportamiento estructural estuvo regido principalmente por criterios de servicio y rigidez del sistema, y no por mecanismos de colapso global. Los modelos físicos y analíticos coincidieron en que los desplazamientos comenzaron a desarrollarse significativamente bajo cargas de aproximadamente 2 a 3 kN, manteniendo posteriormente una evolución progresiva y estable de las deformaciones, sin pérdida repentina de la capacidad de soporte.

Asimismo, los resultados demostraron que reducir el espaciamiento vertical de los refuerzos de  $S_v = 10$  cm a  $S_v = 8$  cm aumenta principalmente la rigidez del sistema, pero no produce aumentos significativos en el rango de carga asociado con la falla en servicio. Asimismo, la presencia de cortante en las geomallas modificó la redistribución interna de las deformaciones, aunque sin generar inestabilidad global en los sistemas evaluados.

En modelos analíticos con mayor rigidez estructural, no fue posible obtener un factor de seguridad (FS) utilizando métodos de equilibrio límite, debido a la ausencia de una superficie crítica de falla claramente definida. Sin embargo, los resultados experimentales confirmaron que estos sistemas mantuvieron un comportamiento estable y funcional, lo que demuestra que la evaluación basada únicamente en la FS puede ser insuficiente en estructuras altamente reforzadas, siendo necesario complementar el análisis con criterios de deformación y desempeño en servicio.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman la validez del uso de modelos numéricos como herramienta de apoyo al diseño y evaluación

de terraplenes reforzados, permitiendo identificar configuraciones estructuralmente eficientes y funcionalmente estables, con potencial para optimizar el consumo de refuerzo sin comprometer el desempeño del sistema.

### **6.6 Modelo Analítico VS Inteligencia Artificial:**

En este apartado la investigación consistió en un análisis comparativo entre los modelos analíticos desarrollados en Slide v6.0 y los modelos generados mediante herramientas de inteligencia artificial y programación Python, aplicados a escenarios de terraplenes reforzados a escala real 1:1.

Los modelos analíticos reprodujeron un terraplén reforzado para infraestructura tipo puente con una altura total de 6 m, considerando una sección representativa de puentes angostos para vías secundarias sujetas a tránsito de cargas pesadas de acuerdo con la NOM-012-SCT. Todos los escenarios se desarrollaron bajo las mismas condiciones geométricas, propiedades geotécnicas, condiciones de confinamiento y configuraciones de carga, modificando únicamente el espaciamiento vertical del refuerzo interno ( $S_v$ ), evaluándose configuraciones de 0,80 m, 1,00 m, 1,20 m, 1,25 m, 1,50 m, 2,00 m y 0,60 m.

El material de relleno utilizado correspondió al suelo del Banco San José Iturbide, modelado como un material homogéneo con propiedades obtenidas experimentalmente durante la investigación. Se incorporó refuerzo interno mediante geomallas biaxiales con resistencias últimas de 30 kN/m y 40 kN/m, manteniendo las mismas condiciones de confinamiento lateral en todos los modelos utilizando elementos rígidos equivalentes a gaviones o bloques de concreto.

Los análisis analíticos se desarrollaron en Slide v6.0 utilizando los métodos de equilibrio límite de Spencer y Lowe-Karafiath bajo diferentes configuraciones de carga de vehículos establecidas en la NOM-012-SCT,

incluyendo automóvil liviano, camión rígido C3, camión tractor T2-S2 y configuración completa T3-S2-R4.

Complementariamente, en esta etapa se incorporaron herramientas de inteligencia artificial para apoyar el procesamiento, organización e interpretación de datos geotécnicos. La implementación de la IA no reemplazó los métodos tradicionales de análisis geotécnico, sino que funcionó como una herramienta de apoyo para automatizar cálculos, identificar tendencias y generar comparaciones entre escenarios.

El enfoque implementado se basó en la definición de parámetros de entrada (Inputs), asociados a condiciones geométricas, propiedades mecánicas del suelo, espaciamiento vertical de refuerzo, cargas aplicadas y características de las geomallas, y parámetros de salida (Outputs), relacionados con el comportamiento estructural del sistema, tales como factores de seguridad, esfuerzos movilizados y potenciales estados de falla.

Para lograrlo, se utilizaron herramientas de IA generativa como ChatGPT y Gemini para generar y estructurar código en Python, posteriormente ejecutado en Visual Studio Code a través de extensiones especializadas orientadas al análisis numérico y la depuración del entorno de programación.

Es importante resaltar que el modelo implementado mediante inteligencia artificial y Python corresponde a una metodología simplificada basada en relaciones empíricas, correlaciones geotécnicas y reducciones progresivas del factor de seguridad en función de la carga aplicada. Por lo tanto, aunque los resultados fueron calibrados siguiendo tendencias geotécnicas inspiradas en los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath, el modelo desarrollado no realiza un análisis de equilibrio límite completo, ya que no discretiza segmentos, no identifica superficies críticas reales ni realiza iteraciones rigurosas de equilibrio de fuerzas y momentos como las implementadas en Slide v6.0.

En consecuencia, la comparación desarrollada entre modelos

analíticos y modelos basados en inteligencia artificial tiene como objetivo evaluar el grado de correspondencia entre ambos enfoques en términos de tendencias de comportamiento, niveles de estabilidad y condiciones de servicio, así como analizar el potencial de las herramientas de IA como soporte complementario para la optimización y evaluación preliminar de estructuras de suelo reforzado. a continuación, se muestran los resultados obtenidos.

#### **COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 6 Y LA SIMULACIÓN AI 6 (Sv = 1,00 m):**

La comparación entre el Modelo Analítico 6 desarrollado en Slide v6.0 y la simulación de inteligencia artificial ejecutada en Python dentro de Visual Studio Code mostró una tendencia consistente en el comportamiento estructural del terraplén reforzado con espaciamiento vertical  $S_v = 1,00$  m. Ambos enfoques identificaron que el aumento de cargas vehiculares genera una reducción progresiva del factor de seguridad y una mayor movilización de esfuerzos en las geomallas.

En el modelo analítico, los coeficientes de seguridad obtenidos por los métodos de Spencer y Lowe-Karafiath se acercaron al límite permisible bajo cargas pesadas tipo T3-S2-R4, principalmente para geomallas con una resistencia de 30 kN/m. Consistentemente, la simulación basada en IA identificó condiciones de "alto estrés", "probable extracción" y "probable ruptura" para las mismas configuraciones de carga, especialmente utilizando el método Lowe-Karafiath.

Asimismo, los resultados mostraron que el uso de geomallas de 40 kN/m mejora el desempeño estructural del sistema, aumentando los factores de seguridad y reduciendo la probabilidad de falla del refuerzo interno. Si bien la metodología implementada mediante IA tiende a sobreestimar levemente los factores de seguridad debido a la naturaleza simplificada del modelo desarrollado en Python, logró reproducir adecuadamente las tendencias observadas en Slide v6.0 y brindar

información complementaria sobre tensiones movilizadas, comportamiento interno de las geomallas y recomendaciones técnicas preliminares.

Tabla 30. Resultados de **Modelo analítico 6 Norma ABNT a escala REAL 1 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Norma ABNT a escala REAL 1m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer (FS)	T ult 1 al 6	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 6	Spencer (FS)	T ult 1 al 6	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 6
SIN Carga	-			1.356	30	1.128	30	1.575	40	1.394	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.416	30	1.128	30	1.548	40	1.383	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.352	30	0.941	30	1.464	40	1.196	40
T2-S2 (tractocamión + semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.320	30	1.033	30	1.406	40	1.194	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.158	30	0.972	30	1.355	40	0.941	40

Tabla 37. Resultados del Prototipo 6 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

Norma ABNT a escala REAL 1m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Lowe-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	2.727	11	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.189	13.7	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.584	11.61	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.075	14.46	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.4	117.72	1.443	20.79	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.168	25.68	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.8	186.39	1.132	26.5	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.919	32.64	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.4	326.185	0.787	38.12	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.64	46.88	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Lowe-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	3.636	11	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.918	13.71	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	3.445	11.61	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.767	14.46	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.4	117.72	1.924	20.79	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.558	25.67	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.8	186.39	1.509	26.51	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.225	32.65	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.4	326.185	1.049	38.13	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.853	46.89	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.

Tabla 42. Datos de comparación en Modelo Analítico 6 (Sv 1m) VS simulación con IA 6 (Sv 1m):

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo Analítico 6 (Slide v6.0)</b>	<b>Simulación IA 6 (Python + IA)</b>
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	1.00 m	1.00 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite	Modelo simplificado con IA
<b>Métodos empleados</b>	Spencer y Lowe-Karafiath	Aproximación inspirada en Spencer y Lowe
<b>Tipo de salida</b>	FS y estabilidad global	FS aproximado, tensión y conducta
<b>Evaluación de geomalla</b>	Limitada al FS	Sí
<b>Identificación de tensión movilizada</b>	Parcial	Sí
<b>Identificación de pullout o rotura</b>	No explícita	Sí
<b>Recomendaciones técnicas automáticas</b>	No	Sí
<b>Tendencia del FS</b>	Disminuye con la carga	Disminuye con la carga
<b>Condición crítica observada</b>	Cargas T3-S2-R4	Pullout y rotura probable
<b>Geomalla más comprometida</b>	30 kN/m	30 kN/m
<b>Interpretación general</b>	Estabilidad global aceptable cercana al límite	Mayor detalle del comportamiento interno

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados muestran una adecuada correspondencia entre el modelo analítico y la simulación AI, confirmando que el espaciamiento Sv = 1.00 m mantiene un comportamiento estable bajo cargas moderadas, aunque presenta condiciones críticas bajo configuraciones de vehículos pesados. Si bien Slide v6.0 permitió evaluar la estabilidad global del sistema, la IA complementó el análisis identificando posibles modos de falla interna y niveles de trabajo de la geomalla.

**COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 7 Y LA SIMULACIÓN AI 7 (SV = 0.80 m):**

Tabla 31. Resultados de **Modelo analítico 7 Publicación Técnica 382**

**IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Publicación Técnica 382 IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
				Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso = (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 8	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 8
SIN Carga	-			1.256	30	1.486	30	1.420	40	-	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.254	30	1.183	30	1.374	40	-	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.202	30	1.068	30	1.289	40	1.386	40
T2-S2 (tractocamión + semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.175	30	1.082	30	1.435	40	1.170	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.298	30	0.940	30	1.298	40	1.054	40

Tabla 38. Resultados del Prototipo 7 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

Publicación Técnica 382 IMT México a escala REAL 0.80 m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m2)	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Lowe-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	3.551	8.45	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.85	10.53	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	3.364	8.92	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.702	11.1	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.879	15.97	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.521	19.72	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.474	20.35	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.196	25.08	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.024	29.3	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.833	36.01	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m2)	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Lowe-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	4.735	8.45	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.8	10.53	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	4.485	8.92	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.603	11.1	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	2.505	15.97	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.028	19.72	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.965	20.36	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.595	25.08	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.366	29.28	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.111	36	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.

La comparación entre el Modelo Analítico 7 desarrollado en Slide v6.0 y la simulación usando inteligencia artificial ejecutada en Python dentro de Visual Studio Code mostró una tendencia consistente en el comportamiento estructural del terraplén reforzado con espaciamiento vertical  $S_v = 0.80$  m. Ambos enfoques identificaron que el aumento de cargas vehiculares genera una reducción progresiva del factor de seguridad y una mayor movilización de esfuerzos en las geomallas.

En el modelo analítico, los coeficientes de seguridad obtenidos utilizando Spencer y Lowe-Karafiath se mantuvieron cerca del límite permitido bajo las configuraciones de carga más críticas, particularmente para geomallas de 30 kN/m. Consistentemente, la simulación basada en IA identificó estados de "alto voltaje", "límite de diseño" y "falla probable" bajo cargas T3-S2-R4, especialmente en análisis realizados con el método Lowe-Karafiath.

Asimismo, la comparación mostró que el uso de geomallas de 40 kN/m mejora significativamente la estabilidad del sistema y reduce la probabilidad de falla del refuerzo interno. Si bien la metodología implementada mediante IA tiende a sobreestimar ligeramente los factores de seguridad debido a la naturaleza simplificada del modelo, logró reproducir adecuadamente las tendencias observadas en Slide v6.0, además de proporcionar información complementaria sobre tensiones movilizadas, comportamiento del refuerzo interno y recomendaciones técnicas preliminares.

Tabla 43. Datos de comparación en Modelo Analítico 7 (Sv 0.80) VS simulación con IA 7 (Sv 0.80m):

Parámetro	Modelo Analítico 7 (Slide v6.0)	Simulación IA 7 (Python + VS Code)
<b>Normativa</b>	Publicación Técnica 382 IMT México	Publicación Técnica 382 IMT México
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	0.80 m	0.80 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite Spencer y Lowe-Karafiath	Modelo empírico simplificado basado en IA
<b>Tipo de respuesta</b>	Estabilidad global del sistema	Evaluación de comportamiento interno del refuerzo
<b>Tendencia del FS</b>	Disminuye con el incremento de carga	Disminuye con el incremento de carga
<b>FS mínimos observados</b>	Cercanos al límite permisible	Cercanos o inferiores a 1.0 en cargas críticas
<b>Comportamiento de geomallas</b>	Movilización progresiva del refuerzo	Alta tensión, límite de diseño y rotura probable
<b>Capacidad de refuerzo 40 kN/m</b>	Mayor estabilidad global	Menor probabilidad de falla interna
<b>Recomendaciones técnicas</b>	No genera recomendaciones automáticas	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo
<b>Identificación de modos de falla interna</b>	Limitada	Sí
<b>Evaluación de estabilidad global</b>	Sí	Aproximada
<b>Tendencia general del comportamiento</b>	Consistente	Consistente con Slide v6.0

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados muestran una adecuada correspondencia entre el modelo analítico y la simulación AI, confirmando que el espaciamento Sv =0.80 m proporciona un comportamiento estructural más estable que configuraciones con mayores separaciones entre refuerzos. Si bien Slide v6.0 nos permitió evaluar rigurosamente la estabilidad general del sistema, la IA complementó el análisis identificando niveles de trabajo de la geomalla, posibles modos de falla y recomendaciones técnicas preliminares.

**COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 8 Y LA SIMULACIÓN AI 8 (SV = 1.20 m):**

Tabla 32. Resultados de **Modelo analítico 8 Norma ABNT a escala REAL 1.20 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

Norma ABNT a escala REAL hasta 1.20m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5
SIN Carga	-	-	-	1.504	30	1.092	30	1.633	40	1.236	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.499	30	1.079	30	1.712	40	1.227	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.427	30	1.082	30	1.516	40	1.177	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.399	30	1.000	30	1.463	40	1.162	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.185	1.361	30	0.955	30	1.450	40	1.011	40

Tabla 39. Resultados del Prototipo 8 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

Norma ABNT a escala REAL hasta 1.20m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	2.185	13.73	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.754	17.1	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.07	14.49	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.663	18.04	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.156	25.95	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.936	32.05	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.907	33.08	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.736	40.76	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.63	47.62	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.513	58.48	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	2.914	13.73	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.338	17.11	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.76	14.49	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.217	18.04	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.541	25.96	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.248	32.05	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.209	33.09	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.981	40.77	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.84	47.62	△ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.684	58.48	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

La comparación entre el modelo analítico desarrollado en Slide v6.0 y la simulación utilizando inteligencia artificial para el escenario con

espaciamiento vertical  $S_v = 1.20$  m mostró una disminución significativa en la estabilidad del sistema a medida que aumentaba la carga aplicada del vehículo. Ambos métodos presentaron factores de seguridad más cercanos al estado crítico en comparación con configuraciones con menor espaciado vertical.

Los resultados obtenidos mediante IA identificaron aumentos significativos en las tensiones movilizadas de las geomallas, detectando estados de “alta tensión”, “probable retirada” y “probable ruptura”, principalmente bajo cargas del tipo T2-S2 y T3-S2-R4. Consistentemente, los análisis en Slide v6.0 mostraron factores de seguridad cercanos o menores que la unidad utilizando el método Lowe-Karafiath, especialmente para geomallas de 30 kN/m.

Asimismo, el uso de geomallas de 40 kN/m permitió mejorar parcialmente la respuesta estructural del sistema; Sin embargo, ambos enfoques confirmaron que aumentar el espaciamiento vertical reduce el confinamiento interno del terraplén y aumenta la probabilidad de falla del refuerzo. Aunque la IA mostró una ligera sobreestimación de los factores de seguridad, pudo reproducir adecuadamente las tendencias generales observadas en el análisis analítico y complementar la evaluación identificando modos de falla interna y recomendaciones técnicas preliminares.

Tabla 44. Datos de comparación en Modelo Analítico 8 ( $S_v$  1.20m) VS simulación con IA 8 ( $S_v$  1.20m):

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo Analítico 8 (Slide v6.0)</b>	<b>Simulación con IA en Python</b>
<b>Normativa</b>	ABNT	ABNT
<b>Espaciamiento vertical (<math>S_v</math>)</b>	1.20 m	1.20 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite	Modelo simplificado con IA
<b>Métodos evaluados</b>	Spencer y Lowe-Karafiath	Spencer y Lowe-Karafiath aproximados

<b>Resistencia de geomallas</b>	30 y 40 kN/m	30 y 40 kN/m
<b>Tendencia del FS</b>	Disminuye conforme aumenta la carga	Disminuye conforme aumenta la carga
<b>FS mínimo obtenido</b>	Cercano o menor a 1.00 bajo carga T3-S2-R4	Inferior a 1.00 en varios escenarios de carga
<b>Comportamiento del refuerzo</b>	Slide identifica reducción de estabilidad global	IA identifica alta tensión, pullout probable y rotura probable
<b>Tensiones movilizadas</b>	Representadas indirectamente mediante FS	Calculadas directamente sobre geomallas
<b>Condición más crítica</b>	Vehículo T3-S2-R4	Vehículo T3-S2-R4
<b>Influencia del incremento de Sv</b>	Menor estabilidad global	Mayor tensión y probabilidad de falla interna
<b>Recomendaciones técnicas</b>	No genera recomendaciones automáticas	Recomienda reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo
<b>Tipo de falla identificada</b>	Estabilidad límite global	Falla interna por tensión, pullout y posible rotura
<b>Nivel de detalle del comportamiento del refuerzo</b>	Limitado	Alto
<b>Relación entre métodos</b>	Resultados consistentes en tendencia general	Sobreestima ligeramente los FS respecto a Slide

Fuente: Elaboración Propia.

La comparación entre el Modelo Analítico 8 y la simulación de IA mostró tendencias consistentes en la reducción del factor de seguridad a medida que aumenta la carga aplicada. Ambos métodos identificaron condiciones críticas para espaciamientos verticales de 1,20 m, principalmente bajo cargas del tipo T3-S2-R4. Mientras Slide v6.0 evalúa la estabilidad general del sistema, la IA permitió identificar estados internos de la geomalla como alta tensión, probable extracción y probable ruptura, además de generar recomendaciones técnicas. Asimismo, los valores de FS obtenidos mediante IA mostraron una ligera sobreestimación respecto a los calculados en Slide debido a la naturaleza simplificada del modelo

implementado en Python.

**COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 9 Y LA SIMULACIÓN AI 9 (SV = 1.25 m):**

Tabla 33. Resultados de **Modelo numérico 9 SIN NORMATIVA a escala REAL 1.25 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa a escala REAL 1.25m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5	Spencer (FS)	T ult 1 al 5	Lowe-Karafiath (Fs)	T ult 1 al 5
SIN Carga	-	-	-	1.521	30	1.142	30	1.648	40	1.254	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.513	30	1.139	30	1.640	40	1.254	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.458	30	1.094	30	1.563	40	1.192	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.431	30	1.044	30	1.542	40	1.139	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.361	30	0.967	30	1.406	40	1.045	40

Tabla 40. Resultados del Prototipo 9 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa a escala REAL 1.25m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	2.078	14.44	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.668	17.99	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.968	15.24	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.581	18.98	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.099	27.3	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.89	33.71	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.862	34.8	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.7	42.86	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.599	50.08	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.488	61.48	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	2.771	14.44	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.223	17.99	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.625	15.24	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.108	18.98	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.466	27.29	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.187	33.7	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	1.15	34.78	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.933	42.87	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.799	50.06	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.65	61.54	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Tabla 45. Datos de comparación en Modelo Analítico 9 (Sv 1.25m) VS simulación con IA 9 (Sv 1.25m):

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo Analítico 9 (Slide v6.0)</b>	<b>Simulación IA en Python</b>
<b>Normativa</b>	Sin normativa específica	Sin normativa específica
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	1.25 m	1.25 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite	Modelo simplificado basado en IA
<b>Métodos evaluados</b>	Spencer y Lowe-Karafiath	Aproximación Spencer y Lowe-Karafiath
<b>Resistencia de geomalla</b>	30 y 40 kN/m	30 y 40 kN/m
<b>Tendencia del FS</b>	Disminuye conforme aumenta la carga	Disminuye progresivamente con la carga
<b>FS crítico observado</b>	Cercano o menor a 1 bajo carga T3-S2-R4	Menor a 1 en escenarios pesados
<b>Tensiones movilizadas</b>	No evaluadas directamente	Incremento importante de tensiones en geomallas
<b>Conducta del refuerzo</b>	Evaluación global de estabilidad	Alta tensión, pullout probable y rotura probable
<b>Recomendaciones técnicas</b>	No genera recomendaciones automáticas	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo
<b>Influencia de geomalla 40 kN/m</b>	Mejora parcial del FS	Reduce estados críticos respecto a 30 kN/m
<b>Tipo de falla identificada</b>	Estabilidad global cercana al límite	Falla interna progresiva del refuerzo
<b>Interpretación general</b>	Sistema sensible a cargas pesadas con Sv elevado	Mayor probabilidad de falla interna conforme aumenta la carga

Fuente: Elaboración Propia.

La evaluación del escenario con espaciamiento vertical  $S_v = 1.25$  m mostró un comportamiento más crítico en relación a configuraciones con menor separación entre geomallas. El análisis en Slide v6.0 mostró factores de seguridad cercanos al límite permitido bajo cargas pesadas, mientras que la simulación de IA identificó aumentos significativos en las tensiones

movilizadas y las condiciones asociadas con la extracción y la probable falla de las geomallas.

Aunque el modelo implementado en Python tiende a sobreestimar ligeramente los factores de seguridad, ambos enfoques coinciden en que aumentar el espaciamiento vertical reduce el confinamiento interno y compromete el desempeño estructural del terraplén reforzado, especialmente bajo configuraciones vehiculares de alta carga.

**COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 10 Y LA SIMULACIÓN AI 10 (SV = 1.50 m):**

Tabla 34. Resultados de **Modelo numérico 10 SIN NORMATIVA a escala REAL 1.50 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa a escala REAL 1.50m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m <sup>2</sup>	Spencer (FS)	T ult 1 al 4	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 4	Spencer (FS)	T ult 1 al 4	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 4
SIN Carga	-	-	-	1.633	30	1.079	30	1.702	40	1.250	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.63	30	1.077	30	1.691	40	1.249	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.579	30	1.052	30	1.628	40	1.108	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.546	30	1.035	30	1.571	40	1.083	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.504	30	0.976	30	1.555	40	1.047	40

Tabla 41. Resultados del Prototipo 10 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa a escala REAL 1.50m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso = (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Lowe-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	1.653	18.15	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.327	22.61	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.566	19.16	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.258	23.85	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
C3	24	235.44	117.72	0.874	34.32	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.708	42.37	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.686	43.73	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.557	53.86	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.477	62.89	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.388	77.32	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso = (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Lowe-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	2.204	18.15	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.769	22.61	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	2.088	19.16	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.677	23.85	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	1.166	34.31	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.944	42.37	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.915	43.72	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.742	53.91	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.636	62.89	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.517	77.37	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Tabla 46. Datos de comparación en Modelo Analítico 10 (Sv 1.50m) VS simulación con IA 10 (Sv 1.50m):

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo Analítico 10 (Slide v6.0)</b>	<b>Simulación IA en Python</b>
<b>Normativa</b>	Sin normativa específica	Sin normativa específica
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	1.50 m	1.50 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite	Modelo simplificado basado en IA
<b>Métodos evaluados</b>	Spencer y Lowe-Karafiath	Aproximación Spencer y Lowe-Karafiath
<b>Resistencia de geomalla</b>	30 y 40 kN/m	30 y 40 kN/m
<b>Comportamiento del FS</b>	Valores cercanos al límite bajo cargas pesadas	Reducción acelerada del FS conforme aumenta la carga
<b>FS crítico observado</b>	Cercano a 1 en T3-S2-R4	Menor a 1 desde cargas intermedias y pesadas
<b>Evaluación de tensiones</b>	No evaluadas directamente	Tensiones elevadas en geomallas
<b>Conducta del refuerzo</b>	Estabilidad global del sistema	Alta tensión, pullout y rotura probable
<b>Recomendaciones técnicas</b>	No genera recomendaciones	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo
<b>Desempeño de geomalla 40 kN/m</b>	Mejora parcial de estabilidad	Retrasa estados críticos de falla
<b>Tipo de falla identificada</b>	Condición cercana al límite de estabilidad	Falla interna progresiva del refuerzo
<b>Interpretación general</b>	Menor confinamiento y estabilidad reducida	Elevada susceptibilidad a falla interna bajo cargas pesadas

Fuente: Elaboración Propia.

El escenario con espaciamiento vertical  $S_v = 1.50$  m mostró una reducción significativa en el desempeño estructural del sistema reforzado. Los resultados de Slide v6.0 mostraron factores de seguridad cercanos al límite permitido, principalmente bajo cargas tipo T3-S2-R4, mientras que la simulación de IA detectó estados críticos asociados con alto voltaje, desconexión y probable falla de configuraciones de carga intermedia.

La comparación mostró que aumentar el espaciamiento vertical reduce considerablemente el confinamiento interno del terraplén y aumenta las tensiones movilizadas en las geomallas. Si bien el modelo implementado mediante IA presenta una ligera sobreestimación de los factores de seguridad, logró representar adecuadamente la tendencia de pérdida de estabilidad observada en el análisis analítico y brindar información adicional sobre el comportamiento interno del refuerzo.

**COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 11 Y LA SIMULACIÓN AI 11 (SV = 2 M):**

Tabla 35. Resultados de **Modelo numérico 11 SIN NORMATIVA a escala REAL 2 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa escala REAL 2.00 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autoriza do (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m2	Spencer (FS)	T ult 1 al 3	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 3	Spencer (FS)	T ult 1 al 3	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 3
SIN Carga	-			1.362	30	0.985	30	1.456	40	1.024	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.388	30	0.944	30	1.448	40	1.020	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.308	30	0.912	30	1.372	40	0.981	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.273	30	0.946	30	1.334	40	0.943	40
T3-S2-R4 (configuración “full”, doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.220	30	0.895	30	1.261	40	0.956	40

Tabla 42. Resultados del Prototipo 11 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa escala REAL 2.00 m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	1.364	21.99	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.094	27.42	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.292	23.22	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.038	28.9	Límite de diseño	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
C3	24	235.44	117.72	0.721	41.61	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.584	51.37	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.566	53	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.459	65.36	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.393	76.34	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.32	93.75	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	1.818	22	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.459	27.42	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	1.722	23.23	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.384	28.9	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.
C3	24	235.44	117.72	0.962	41.58	⚠ Pullout probable	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.	0.779	51.35	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T2-S2	38	372.78	186.39	0.754	53.05	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.612	65.36	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	0.524	76.34	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.	0.427	93.68	✗ Rotura probable	CRÍTICO: posible falla por rotura o pullout.

Tabla 47. Datos de comparación en Modelo Analítico 11 (Sv 2 m) VS simulación con IA 11 (Sv 2 m):

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo Analítico 11 (Slide v6.0)</b>	<b>Simulación IA en Python</b>
<b>Normativa</b>	Sin normativa específica	Sin normativa específica
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	2.00 m	2.00 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite	Modelo simplificado basado en IA
<b>Métodos evaluados</b>	Spencer y Lowe-Karafiath	Aproximación Spencer y Lowe-Karafiath
<b>Resistencia de geomalla</b>	30 y 40 kN/m	30 y 40 kN/m
<b>Comportamiento del FS</b>	Valores cercanos o menores a 1	Disminución crítica del FS
<b>FS crítico observado</b>	Menor a 1 en varios escenarios	Menor a 1 desde cargas medias
<b>Evaluación de tensiones</b>	No evaluadas directamente	Tensiones extremadamente elevadas
<b>Conducta del refuerzo</b>	Evaluación global de estabilidad	Alta tensión, límite de diseño, pullout y rotura probable
<b>Recomendaciones técnicas</b>	No genera recomendaciones	Reducir Sv o incrementar resistencia del refuerzo
<b>Influencia de geomalla 40 kN/m</b>	Mejora ligera del desempeño	Reduce parcialmente estados críticos
<b>Tipo de falla identificada</b>	Sistema cercano a falla global	Falla interna progresiva y crítica
<b>Interpretación general</b>	Configuración estructural desfavorable	Alto riesgo de falla del refuerzo bajo cargas pesadas

Fuente: Elaboración Propia.

La comparación del escenario con espaciamiento vertical  $S_v = 2.00$  m mostró el comportamiento más crítico de todos los modelos analizados. Los resultados obtenidos en Slide v6.0 mostraron factores de seguridad cercanos o inferiores a la unidad, lo que indica una condición estructural desfavorable bajo cargas vehiculares pesadas.

Consistentemente, la simulación de IA identificó niveles muy altos de tensión movilizada en las geomallas y probables condiciones de falla incluso con cargas intermedias. Aunque el modelo desarrollado en Python presenta una tendencia a sobreestimar algunos factores de seguridad, ambos enfoques coinciden en que aumentar excesivamente el espaciamiento vertical reduce significativamente el confinamiento interno y compromete seriamente la estabilidad del sistema reforzado.

### COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO ANALÍTICO 12 Y LA SIMULACIÓN AI 12 (SV = 0.60 M):

Tabla 36. Resultados de **Modelo numérico 12 SIN NORMATIVA a escala REAL 0.60 m de (SV)** evaluado con método de equilibrio limite Spencer y factor sísmico Lowe-Karafiath.

SIN Normativa escala REAL 0.60 m de (SV)				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 30 KN/m				Geomalla con resistencia ultima a la tensión 40 KN/m			
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN) = t × 9.81	Slide kN/m2	Spencer (FS)	T ult 1 al 10	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 10	Spencer (FS)	T ult 1 al 10	Lowe- Karafiath (Fs)	T ult 1 al 10
SIN Carga		-		1.336	30	-	30	-	40	-	40
Automóvil pequeño	1.5	14.72	7.36	1.329	30	-	30	-	40	-	40
C3 (camión rígido 3 ejes)	24	235.44	117.72	1.327	30	1.347	30	-	40	-	40
T2-S2 (tractocamión +semirremolque 2 ejes)	38	372.78	186.39	1.260	30	1.165	30	-	40	-	40
T3-S2-R4 (configuración "full", doble remolque)	66.5	652.37	326.19	1.202	30	1.031	30	-	40	-	40

Tabla 43. Resultados del Prototipo 12 metodología en Python dentro de Visual Studio Code.

SIN Normativa escala REAL 0.60 m de (SV)											
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (30)	Tensión calculada Spencer (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30	Low-Karafiath FS (30)	Tensión calculada Lowe (30 KN/m)	Conducta geomalla 30	Recomendación de IA para geomalla 30
SIN Carga	0	0	0	4.941	6.07	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.965	7.57	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	4.68	6.41	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	3.76	7.98	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	2.614	11.48	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.117	14.17	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	2.05	14.63	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.664	18.03	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.425	21.05	Alta tensión	Diseño funcional; monitorear deformaciones.	1.159	25.88	Alta tensión	Reducir Sv o aumentar resistencia del refuerzo.
Configuración (vehículo según NOM-012)	Peso bruto máximo autorizado (t)	Peso ≈ (kN)	Slide (kN/m <sup>2</sup> )	Spencer FS (40)	Tensión calculada Spencer (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40	Low-Karafiath FS (40)	Tensión calculada Lowe (40 KN/m)	Conducta geomalla 40	Recomendación de IA para geomalla 40
SIN Carga	0	0	0	6.588	6.07	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	5.287	7.57	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
Automóvil pequeño	1.5	14.71	7.36	6.24	6.41	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	5.013	7.98	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
C3	24	235.44	117.72	3.485	11.48	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.822	14.17	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T2-S2	38	372.78	186.39	2.734	14.63	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	2.219	18.03	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.
T3-S2-R4	66.5	652.37	326.185	1.9	21.05	Trabajo estable	Diseño adecuado según criterio geotécnico.	1.546	25.87	Alta tensión	Diseño adecuado según criterio geotécnico.

Tabla 48. Datos de comparación en Modelo Analítico 12 (Sv 0.60 m)  
VS simulación con IA 12 (Sv 0.60 m):

<b>Parámetro</b>	<b>Modelo Analítico 12 (Slide v6.0)</b>	<b>Simulación IA en Python</b>
<b>Normativa</b>	Sin normativa específica	Sin normativa específica
<b>Espaciamiento vertical (Sv)</b>	0.60 m	0.60 m
<b>Tipo de análisis</b>	Equilibrio límite	Modelo simplificado basado en IA
<b>Métodos evaluados</b>	Spencer y Lowe-Karafath	Aproximación Spencer y Lowe-Karafath
<b>Resistencia de geomalla</b>	30 y 40 kN/m	30 y 40 kN/m
<b>Comportamiento del FS</b>	Factores de seguridad superiores a 1	Factores de seguridad elevados
<b>FS crítico observado</b>	Cercano al límite sólo bajo carga máxima	Condición estable en la mayoría de escenarios
<b>Evaluación de tensiones</b>	No evaluadas directamente	Tensiones bajas y moderadas
<b>Conducta del refuerzo</b>	Estabilidad global adecuada	Trabajo estable y alta tensión únicamente bajo carga máxima
<b>Recomendaciones técnicas</b>	No genera recomendaciones	Monitorear deformaciones en cargas extremas
<b>Influencia de geomalla 40 kN/m</b>	Incrementa el desempeño global	Reduce tensiones y mejora estabilidad interna
<b>Tipo de falla identificada</b>	No se identificó falla global	No se observaron fallas críticas relevantes
<b>Interpretación general</b>	Configuración más eficiente y estable	Mejor desempeño estructural del sistema reforzado

Fuente: Elaboración Propia.

La comparación entre el Modelo Analítico 12 y la simulación AI mostró que el espaciamiento vertical  $S_v = 0.60$  m presentó el comportamiento estructural más favorable entre los escenarios evaluados. Los análisis desarrollados en Slide v6.0 mantuvieron factores de seguridad superiores a la unidad incluso bajo cargas pesadas, mientras que la simulación de Python identificó condiciones predominantemente estables y niveles de tensión más bajos en las geomallas.

Asimismo, ambos enfoques coincidieron en que reducir el espaciamiento vertical mejora el confinamiento interno del terraplén y disminuye significativamente la probabilidad de falla del refuerzo. Aunque la metodología basada en IA tiende a sobreestimar ligeramente los factores de seguridad, nos permitió complementar el análisis evaluando las tensiones movilizadas, el comportamiento interno de las geomallas y recomendaciones técnicas preliminares.

En general, la comparación entre los modelos analíticos desarrollados en Slide v6.0 y las simulaciones implementadas a través de IA en Python mostró una tendencia consistente en todos los escenarios evaluados, confirmando que el aumento del espaciamiento vertical ( $S_v$ ) reduce progresivamente la estabilidad del terraplén reforzado y aumenta las tensiones movilizadas en las geomallas. Ambos enfoques identificaron que las configuraciones con  $S_v$  mayor a 1.20 m presentan condiciones críticas bajo cargas pesadas tipo T3-S2-R4, mientras que espaciamientos más pequeños, especialmente  $S_v = 0.60$  m y  $S_v = 0.80$  m, proporcionan un comportamiento estructural más estable y seguro. Asimismo, el uso de geomallas de 40 kN/m mejoró sistemáticamente el rendimiento general del sistema, reduciendo la probabilidad de fallas internas. Si bien la metodología basada en IA tendió a sobreestimar ligeramente los factores de seguridad debido a la simplificación del modelo, permitió complementar el análisis tradicional identificando estados de tensión elevada, arrancamiento, rotura probable y recomendaciones técnicas preliminares sobre el comportamiento interno del refuerzo.

#### **IV. CONCLUSIONES**

En el estudio de Ying Liu y colaboradores, el método utilizado corresponde principalmente a un modelo analítico basado en el método de los elementos finitos, complementado con modelos físicos instrumentados y seguimiento experimental de deformaciones.

El análisis de elementos finitos consistió en dividir el muro reforzado, el suelo y las geomallas en pequeños elementos discretos interconectados, permitiendo simular numéricamente la distribución de tensiones, deformaciones, desplazamientos horizontales y tensiones internas generadas por las cargas cíclicas aplicadas a la estructura. Este tipo de modelado permite una representación más detallada de la interacción suelo-refuerzo y la evolución progresiva del comportamiento mecánico del sistema bajo cargas repetitivas.

Los resultados obtenidos mostraron una adecuada concordancia entre los modelos físicos y los modelos analíticos, ya que las simulaciones lograron reproducir aceptablemente la distribución de deformaciones, desplazamientos horizontales y la evolución de tensiones en las geomallas observadas experimentalmente. Asimismo, ambos enfoques identificaron que las tensiones más altas se concentraban en las capas superiores del refuerzo cercanas a la zona de aplicación de la carga.

Los autores concluyeron que los modelos analíticos utilizando elementos finitos fueron capaces de representar adecuadamente el comportamiento global del sistema reforzado, aunque señalaron pequeñas diferencias con respecto a los ensayos físicos debido a simplificaciones del modelo computacional, condiciones ideales de contacto suelo-refuerzo y variaciones constructivas presentes en los prototipos experimentales.

En general, la combinación de modelos físicos y simulaciones numéricas permitió validar la confiabilidad del análisis computacional como herramienta para predecir el comportamiento a largo plazo de muros de suelo reforzados con geomallas sometidas a cargas cíclicas.

### 1. Comparación con el artículo base de referencia:

Los resultados obtenidos en la presente investigación mostraron una tendencia consistente con el estudio base de Liu, particularmente en la relación entre el espaciamiento vertical de las geomallas y el comportamiento mecánico del sistema de refuerzo del suelo. Tanto los modelos analíticos como los prototipos físicos confirmaron que la reducción del espaciamiento vertical mejora el confinamiento interno y aumenta la estabilidad general del terraplén reforzado.

### 2. IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.

- El material del banco San José Iturbide presenta un comportamiento mecánico equivalente a la arena estándar de Fujian.
- Su comportamiento favorable en términos de compactación, resistencia al corte y estabilidad justifican su uso como material de relleno en modelos físicos y analítico. Pues los resultados permitieron comprobar que el desempeño del sistema depende en gran medida de la interacción entre el suelo y el refuerzo interno.

### 3. EVALUACIÓN DE LA NORMATIVA

- La comparación entre la normativa ABNT y la publicación Técnica N°.382 del IMT permitió identificar diferencias en los criterios de diseño y espaciamiento vertical del refuerzo. Los resultados mostraron que en algunas configuraciones pueden optimizarse reduciendo el consumo de geomalla sin comprometer significativamente la estabilidad estructural del sistema por ello se acepta la hipótesis de ahorro económico.

### 4. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MODELOS SLIDE2 ESC. 1:10 (MODELOS DEL 1-5)

- El criterio IMT genera diseños más conservadores, mientras que el ABNT es suficiente y evaluable.
- Bajo acción sísmica y de corte, un espaciamiento de 10×10 cm es más

inestable en casos inadecuado, mientras que 8×8 cm mantiene una estabilidad aceptable.

- Influencia del espaciado vertical de la geomalla ( $S_v = 10$  cm vs  $S_v = 8$  cm) La reducción del espacio vertical de 10 cm a 8 cm aumentó la rigidez y la capacidad de carga del sistema; sin embargo, la mejora de la estabilidad global fue limitada. Los modelos con  $S_v = 8$  cm mostraron un comportamiento muy similar a aquellos con  $S_v = 10$  cm, por lo que la reducción del espaciado no representó una optimización significativa.
- Comportamiento del material de aportación granular: El material granular tipo SP influyó decisivamente en la estabilidad de los modelos debido a su alta fricción interna y adecuada compactación. Incluso cuando las geomallas alcanzaron su tensión máxima, el suelo continuó brindando resistencia y estabilidad al sistema.
- Efecto del confinamiento lateral: Los modelos confinados por ambos lados presentaron mayor estabilidad y capacidad de carga respecto al modelo confinado por un extremo. El confinamiento bilateral permitió una mejor redistribución de la tensión y retrasó el desarrollo de superficies de fallas críticas.
- Influencia del corte o discontinuidad en las geomallas: Los modelos con cortes en las geomallas mostraron una disminución significativa en el factor de seguridad y una distribución no uniforme de tensiones. Los resultados confirmaron que el anclaje y confinamiento del refuerzo influyen en la estabilidad más que la longitud total de la geomalla.
- Comportamiento de las geomallas bajo mayor carga: En todos los modelos, las geomallas alcanzaron rápidamente la tensión máxima de 30 kN/m; Sin embargo, el sistema mantuvo la estabilidad gracias al aporte resistente del suelo granular y el confinamiento lateral, demostrando que el refuerzo funciona como un elemento complementario.
- Comparación del rendimiento general de los modelos 1 a 5: Los modelos

sin cortes de geomalla y con confinamiento bilateral presentaron el mejor desempeño general. Aunque la separación de 8 cm soportó mayores cargas, la diferencia con respecto a la separación de 10 cm no fue lo suficientemente significativa como para justificar un aumento considerable del refuerzo desde el punto de vista técnico-económico.

#### 5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MODELOS SLIDE2 ESC. REAL 1:1 (MODELOS DEL 6-12)

- Los modelos a escala real han demostrado que reducir el espaciado vertical de las geomallas aumenta la estabilidad general; Sin embargo, espaciamientos muy pequeños implican un aumento considerable del refuerzo sin una mejora proporcional del rendimiento.
- Los espaciamientos intermedios de 0,80 m y 1,00 m presentaron el mejor equilibrio entre estabilidad y optimización técnico-económica, manteniendo factores de seguridad aceptables bajo cargas vehiculares reales.
- Los modelos con espaciamientos superiores a 1,50 m y 2,00 m mostraron una reducción significativa del factor de seguridad, acercándose o permaneciendo por debajo de los valores mínimos recomendados bajo cargas pesadas.
- El modelo con un espaciamiento de 0,60 m mostró alta rigidez y buen comportamiento estructural; Sin embargo, el aumento de la estabilidad en espaciamientos mayores fue relativamente limitado en comparación con el aumento del material de refuerzo requerido.
- En todos los modelos, el material granular tipo SP influyó decisivamente en la estabilidad del sistema debido a su alta fricción interna y adecuada compactación, brindando resistencia incluso cuando las geomallas alcanzaron su máxima capacidad.
- Los resultados confirmaron que la estabilidad global del sistema depende no sólo de la geomalla, sino también del confinamiento, las propiedades

mecánicas del terraplén y la interacción suelo-refuerzo.

- Bajo cargas pesadas de los vehículos tipo T3-S2-R4, los factores de seguridad disminuyeron progresivamente en todos los modelos, mostrando que el aumento de carga genera superficies de ruptura más profundas y una mayor movilización de refuerzos.
- En términos generales, los resultados indican que el uso de espaciamientos moderados permite mantener adecuadas condiciones de estabilidad sin aumentar excesivamente la cantidad de geomalla, favoreciendo una solución más eficiente y económicamente viable.

#### 6. RESULTADOS DE INTEGRACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MODELOS SLIDE2 ESC. REAL 1:1 (MODELOS DEL 6-12)

- Los resultados obtenidos a través de IA mostraron una tendencia consistente con los modelos analíticos desarrollados en Slide2, validando la confiabilidad del procesamiento computacional implementado en Python y Visual Studio Code.
- Los espaciamientos intermedios de 0,80 m y 1,00 m presentaron el mejor equilibrio entre estabilidad y optimización del refuerzo, manteniendo factores de seguridad cercanos o superiores a los valores recomendados.
- Los espaciamientos mayores a 1,50 m y 2,00 m mostraron una reducción significativa en el factor de seguridad, especialmente bajo cargas de vehículos pesados, lo que indica una menor eficiencia estructural.
- El espaciamiento de 0,60 m generó un sistema más rígido; Sin embargo, la mejora de la estabilidad no fue proporcional al aumento considerable requerido en la geomalla.
- Los modelos con geomallas de mayor resistencia (40 kN/m) mostraron factores de seguridad ligeramente mayores en comparación con las geomallas de 30 kN/m, aunque la diferencia general en el

comportamiento fue moderada.

- Los resultados confirmaron que el desempeño del sistema depende no sólo de la resistencia de la geomalla, sino también de la interacción suelo-refuerzo, el confinamiento y las propiedades del material granular.
- La integración de IA permitió automatizar el análisis y comparación de múltiples configuraciones de proyectos, facilitando la identificación de soluciones técnicamente viables y económicamente más eficientes.

### 7. PROTOTIPO FÍSICO

- Aumentar el refuerzo no cambia el rango de carga de falla en servicio, solo aumenta la rigidez del sistema.
- Los prototipos con espaciamientos menores presentan mayor rigidez inicial, pero sin mejoras funcionales proporcionales.
- Los resultados experimentales confirman la viabilidad de diseños optimizados con menos refuerzo.
- Los modelos confinados en ambos lados mostraron menores deformaciones y una mejor redistribución de tensiones en comparación con los modelos confinados solo en un extremo, confirmando la importancia del confinamiento lateral en la estabilidad del sistema.
- Los prototipos con un espaciamiento vertical de 8 cm mostraron mayor rigidez y menores desplazamientos relativos en comparación con los modelos de 10 cm; sin embargo, la mejora general del comportamiento fue moderada.
- Los modelos con cortes o discontinuidades en las geomallas mostraron mayores desplazamientos y deformaciones no uniformes, especialmente en zonas con menor confinamiento y anclaje de refuerzos.
- El material granular tipo SP mostró un comportamiento favorable durante las pruebas físicas, manteniendo estabilidad y capacidad resistente incluso ante aumentos significativos de carga vertical.

- Los mayores desplazamientos se concentraron en los micrómetros ubicados en las zonas superior y lateral del sistema, indicando que las deformaciones se desarrollaron principalmente hacia las regiones menos confinadas.
- Los resultados experimentales confirmaron que la continuidad de las geomallas y las condiciones de anclaje influyen significativamente en el desempeño general del sistema de refuerzo del suelo.
- En términos generales, los prototipos sin cortes y con confinamiento bilateral presentaron las mejores prestaciones mecánicas y menores deformaciones, coincidiendo con las tendencias obtenidas en los modelos analíticos.

#### 8. MODELO ANALÍTICO ESC. 1:10 DEL 1-5 VS PROTOTIPO FÍSICO DEL 1-5

- Los resultados experimentales mostraron una tendencia similar a la obtenida en los modelos analíticos desarrollados en la Diapositiva 2, validando en general el comportamiento mecánico predicho para sistemas reforzados con geomallas.
- Tanto en los modelos analíticos como en los prototipos físicos, el aumento de carga produjo un aumento progresivo de las deformaciones y una disminución paulatina de la estabilidad del sistema.
- Los modelos confinados bilateralmente mostraron el mejor comportamiento en ambos análisis, presentando menores desplazamientos y mayor capacidad para redistribuir tensiones dentro de la masa reforzada.
- Los prototipos con cortes o discontinuidades en las geomallas desarrollaron mayores deformaciones y zonas de concentración de tensiones, coincidiendo con la reducción de los factores de seguridad observados en los modelos analíticos.
- Los modelos con un espaciamiento vertical de 8 cm mostraron una respuesta ligeramente más rígida y estable que aquellos con 10 cm; sin

embargo, la diferencia general en el rendimiento fue moderada en comparación con el aumento del refuerzo requerido.

- Las diferencias observadas entre los resultados analíticos y físicos estuvieron asociadas principalmente a condiciones reales de compactación, deformaciones locales y comportamiento no homogéneo del material durante la aplicación de carga.
- En términos generales, la comparación confirmó que los modelos analíticos representan adecuadamente la tendencia de comportamiento de los prototipos físicos y permiten evaluar de manera confiable la estabilidad del sistema suelo-geomalla.

#### 9. MODELO ANALÍTICO ESC. REAL 1:1 DEL 6-12 VS SIMULACIÓN CON IA

- La comparación entre los modelos analíticos desarrollados en la diapositiva 2 y las simulaciones respaldadas por IA mostró resultados muy similares en términos de factor de seguridad y comportamiento general del sistema, validando la consistencia de la metodología computacional implementada.
- Los modelos con espaciamiento intermedio de geomalla ( $S_v \approx 1.0$  m a 1.5 m) presentaron el mejor equilibrio entre estabilidad y optimización del refuerzo, manteniendo factores de seguridad aceptables sin aumentar excesivamente la cantidad de geomalla.
- Los modelos con espaciamientos muy grandes, principalmente  $S_v = 2,0$  m, mostraron una reducción significativa en los factores de seguridad, principalmente en el método Lowe-Karafiath, mostrando mayor susceptibilidad a condiciones críticas de estabilidad.
- Los modelos con espaciamientos más pequeños, como  $S_v = 0.60$  m y 0.80 m, aumentaron la rigidez y el confinamiento del sistema; Sin embargo, la mejora de la estabilidad obtenida fue limitada en comparación con las configuraciones intermedias, por lo que no representaron una optimización tecno-económica significativa.

- La integración de IA permitió automatizar el procesamiento y comparación de resultados geotécnicos, reduciendo los tiempos de análisis y facilitando la identificación de configuraciones eficientes, manteniendo una alta concordancia con los resultados analíticos obtenidos en Slide2.
- En general, las simulaciones de IA confirmaron las tendencias observadas en los modelos analíticos tradicionales, demostrando que la inteligencia artificial puede usarse como una herramienta de apoyo confiable para la evaluación preliminar y la optimización de sistemas de suelo reforzados con geomallas.

Los resultados obtenidos nos permiten aceptar parcialmente la hipótesis planteada en la investigación. Los análisis numéricos, experimentales y comparativos demostraron que es posible optimizar el espaciamiento vertical de las geomallas sin comprometer significativamente la estabilidad o el comportamiento funcional del terraplén reforzado. Los modelos con espaciamiento intermedio presentaron un comportamiento estructural muy similar a las configuraciones más rígidas y con mayor cantidad de refuerzo, lo que confirma la factibilidad de reducir el consumo de geomallas y generar ahorros económicos de aproximadamente 22-25% en costos de estabilización, manteniendo factores de seguridad aceptables.

Asimismo, la integración de modelos analíticos, simulaciones mediante inteligencia artificial y prototipos físicos permitieron identificar de antemano condiciones críticas de deformación, pérdida de confinamiento y movilización de tensiones en geomallas, demostrando que las herramientas de simulación son efectivas para mejorar el análisis y la toma de decisiones de diseño. Sin embargo, aunque los resultados demuestran una mejora importante en el control del comportamiento del sistema y la prevención de mecanismos de falla, la hipótesis relacionada con una reducción del 85% en las fallas no puede aceptarse de manera

concluyente, ya que su validación requiere estudios adicionales a gran escala y monitoreo del desempeño a largo plazo en condiciones reales de servicio.

## **6. Desarrollo de Recomendaciones y Buenas Prácticas**

Con base en los resultados obtenidos en el análisis analítico y experimental de terraplenes reforzados con geomalla biaxial, se establecen las siguientes recomendaciones y buenas prácticas para optimizar el diseño, construcción y control del desempeño estructural de este tipo de obras.

Se recomienda que el espaciamiento vertical del refuerzo se defina basándose en criterios de desempeño en servicio y no solo bajo enfoques conservadores. Los resultados muestran que espaciamientos mayores, como los propuestos por la normativa ABNT, pueden proporcionar condiciones de estabilidad satisfactorias y evaluables, permitiendo reducir el consumo de geomallas sin comprometer la seguridad general del terraplén.

Se recomienda el uso de criterios más conservadores, como los establecidos por las normas IMT, en los casos en que existan condiciones desfavorables adicionales, como acciones sísmicas significativas, restricciones geométricas severas o alta incertidumbre en las propiedades del suelo. En condiciones normales de operación, es posible adoptar diseños optimizados que favorezcan la eficiencia estructural y económica.

Desde el punto de vista constructivo, es fundamental asegurar la homogeneidad y control del material de relleno, así como la correcta colocación y anclaje de las geomallas, minimizando discontinuidades, cortes o daños durante el proceso constructivo. Cuando la presencia de cortes o empalmes en el refuerzo interno sea inevitable, se recomienda verificar su efecto mediante modelos analíticos complementarios.

Asimismo, se recomienda incorporar modelos de simulación numérica como herramienta de apoyo al dimensionamiento y seguimiento del comportamiento de los terraplenes durante su vida útil. La validación entre modelos analítico y prototipos físicos demuestra que este tipo de herramientas permiten anticipar condiciones de fallo del servicio y mejorar la toma de decisiones en las fases iniciales del proyecto.

Finalmente, cabe señalar que la aplicación de estas recomendaciones debe realizarse considerando las condiciones particulares de cada proyecto, como el tipo de suelo, geometría del terraplén, acciones externas y el nivel de riesgo aceptable, asegurando siempre un equilibrio entre seguridad estructural, desempeño funcional y optimización económica.

1° Recomendaciones de diseño

- Espaciado ideal de geomalla
- Cuándo utilizar diseños conservadores (IMT)
- Cuándo utilizar diseños optimizados (ABNT)

2° Buenas prácticas constructivas

- Control de calidad del material de relleno.
- Colocación y continuidad de geomallas.
- Manejo de cortes o empalmes

3° Uso de modelado/simulación numérica

- Validar los diseños antes de construir.
- Para seguimiento y control del servicio.

4° Criterios económicos y de seguridad

- Cómo reducir costos sin sacrificar la estabilidad
- En qué casos NO es aconsejable reducir el refuerzo

5° Alcance y límites de aplicación

- Condiciones donde se aplican sus conclusiones
- Avisos técnicos (terremoto, drenaje, pendientes elevadas)

## 7. Implementación y Seguimiento

- La implementación de los resultados obtenidos en esta investigación se podrá realizar de forma progresiva en proyectos reales de terraplenes reforzados con geomallas biaxiales, integrando criterios optimizados de diseño, control de construcción y seguimiento del desempeño en servicio.
- En la etapa de implementación se recomienda adoptar espaciamientos verticales de refuerzo optimizados, previamente validados mediante análisis analítico, priorizando configuraciones que cumplan con los criterios de servicio y estabilidad global establecidos en la normativa aplicable. La selección del material de relleno deberá garantizar propiedades mecánicas equivalentes a las utilizadas en el estudio, con especial atención al control granulométrico y a la compactación.
- Durante la construcción es fundamental establecer un programa de control de calidad, que incluya comprobar el espaciamiento real de las geomallas, su correcta colocación, anclaje y continuidad, así como controlar el espesor de las capas y el grado de compactación. Estas acciones permiten reducir las desviaciones entre el proyecto y el trabajo realizado.
- Para la fase de operación se propone implementar un sistema de seguimiento del comportamiento del terraplén, basado en el seguimiento de desplazamientos y deformaciones representativos. La información obtenida se puede integrar en modelos de simulación numérica, permitiendo una comparación continua entre el comportamiento esperado y observado.
- La incorporación de herramientas de análisis y simulación, apoyadas en técnicas de inteligencia artificial, facilita la identificación temprana de tendencias anómalas asociadas a fallos del servicio, contribuyendo a la toma de decisiones preventivas y reduciendo el riesgo de deterioro progresivo de la estructura.

- Finalmente, el seguimiento sistemático del desempeño permite retroalimentar los criterios de diseño y construcción, promoviendo una gestión más eficiente y segura de los terraplenes reforzados.

## LITERATURA CITADA

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2001). *Slope stability and stabilization methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Alfaro, M. (2008). Geotecnia en suelos no saturados. *Ingeniería e Investigación*, 32(125), 471–481.

Amir, L., Vakili, A. H., Selamat, M. R., Aziz, H. B. A., & Mojiri, A. (2017). Treatment of dispersive clay soil by ZELIAC. *Geoderma*, 285, 270–279.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.009>

Arriaga, A., & Pardo, M. (2011). Justicia ambiental: El estado de la cuestión. *Revista Internacional de Sociología*, 69(3), 627–648.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). *NBR 11682: Estabilidade de taludes*. ABNT.

Ávila, J. (2021). *Fundamentos geotécnicos para la estabilidad de taludes*. Universidad de Chile.

Ávila, L. (2021). *Comparativa entre los métodos pseudoestático y dinámico para la estabilidad de taludes mediante elementos finitos* (Tesis de maestría). ESPOL.

Badillo, J., & Rodríguez, R. (2006). *Mecánica de suelos* (Tomo II). Limusa.

Bathurst, R. J., Allen, T. M., & Walters, D. L. (2002). *Design and performance of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes*. Federal Highway Administration (FHWA).

Bathurst, R. J., & Hatami, K. (1998). Seismic response of reinforced soil walls. *Geosynthetics International*, 5(1–2), 127–166.

Belarbi, A., Zadjoui, A., & Bekkouche, A. (2013). Dispersive clay: Influence of physical and chemical properties. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 1727–1738.

Berilgen, M. (2007). Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics*, 34, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.10.004>

Bishop, A. W. (1959). The principle of effective stress. *Géotechnique*, 9(4), 201–207.

Bowles, J. E. (1982). *Ingeniería de suelos y cimentaciones*. McGraw-Hill.

- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Nguyen, V. T., Van Liem, N., & Trinh, P. T. (2018). Comparing the prediction performance of a deep learning neural network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment. *Catena*, *171*, 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.019>
- Bui, D. T., Tuan, T. A., Hoang, N. D., Thanh, N. Q., Nguyen, D. B., & Pradhan, B. (2016). Spatial prediction of landslides using rotation forest ensemble technique with different decision trees in a mountainous area. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *7*(4), 1285–1308.
- Bui, D. T., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B., & Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for landslide hazards. *Landslides*, *13*(2), 361–378. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>
- Cai, X., Li, S., & Huang, X. (2018). Geogrid strain and failure surface under seismic loading. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, *40*(8), 1528–1534.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2023). *Mapa de zonificación sísmica de la República Mexicana* [Archivo PDF]. Secretaría de Gobernación, Gobierno de México.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). *Numerical methods for engineers* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Chen, W., Sarir, P., & Bui, D. T. (2019). A hybrid machine learning approach for slope stability analysis considering hydrological factors. *Engineering Geology*, *256*, 105140. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.012>
- Das, B. M. (2015). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.
- Day, R. A. (1979). *How to write and publish a scientific paper*. ISI Press.
- Dey, A., et al. (2015). Optimization techniques in geotechnical engineering. *Engineering Geology*, *196*, 15–26.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Esmaili, M., et al. (2018). Reinforced embankments using geogrids. *Geotextiles and Geomembranes*, 46(2), 228–241.

Federal Highway Administration. (2009). *Design and construction of mechanically stabilized earth walls* (FHWA-NHI-10-024).

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.

GitHub. (2023). *GitHub Copilot documentation*. <https://docs.github.com/en/copilot>

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Publishing Company.

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C. (2011). *An introduction to geotechnical engineering* (2nd ed.). Pearson.

Huang, F., Chen, J., & Liu, W. (2023). Analysis of slope stability based on four machine learning models. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*.

Huang, Y., et al. (2020). Applications of artificial intelligence in geotechnical engineering. *Computers and Geotechnics*, 122, 103138.

Instituto Mexicano del Transporte. (2008). *Diseño de muros reforzados con geosintéticos* (Publicación Técnica No. 382).

Jewell, R. A. (1996). *Soil reinforcement with geotextiles*. Thomas Telford.

Koerner, R. M. (2012). *Designing with geosynthetics* (6th ed.). Xlibris.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Kumar, R., & Singh, P. (2019). Slope stability prediction using artificial neural network (ANN). *International Journal of Engineering and Computer Science*.

Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (2017). *Soil mechanics*. Wiley.

Liu, X., Zhong, Y., & Zhou, H. (2022). Long-term performance of geogrid-reinforced walls. *Construction and Building Materials*, 341, 127–140.

Maravi, J. (2019). *Geosintéticos y su aplicación en infraestructura*. UNMSM.

- Microsoft. (2023). *Visual Studio Code documentation*. <https://code.visualstudio.com/docs>
- Miranda Sánchez, B. (2024). *Análisis numérico del comportamiento de terraplenes reforzados*. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.
- Moravej, S., et al. (2018). Stabilization of dispersive soils by calcite precipitation. *Geoderma*, 315, 130–137.
- Murillo, R. (2012). *Presas de tierra y sus fallas*. SMIG, XXVI Reunión Nacional.
- Nguyen, H., et al. (2021). Performance prediction of machine learning models for slope stability analysis. *Journal of Engineering Science*.
- OpenAI. (2023). *GPT-4 technical report*. <https://arxiv.org/abs/2303.08774>
- Ordoñez, J., Auvinet, G., & Juárez, M. (2015). Caracterización del subsuelo de Tuxtla. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(3), 453–470.
- Ouhadi, V., & Goodarzi, A. (2006). Stability of dispersive soil treated by alum. *Engineering Geology*, 85, 91–101.
- Pradhan, B., et al. (2010). Application of artificial neural networks for slope stability analysis. *International Journal of Physical Sciences*, 5(6), 774–781.
- Pradhan, B., Lee, S., & Buchroithner, M. F. (2010). A GIS-based back-propagation neural network model and its application for landslide susceptibility analysis. *Computers & Geosciences*, 36(12), 1387–1396.
- Python Software Foundation. (2023). *Python documentation*. <https://docs.python.org/3/>
- Rahman, M., Hasan, M., & Hossain, M. (2022). Performance prediction evaluation of machine learning models for slope stability analysis. *Journal of Engineering Science*.
- Rocscience Inc. (2023). *Slide2: Theory and methodology*. Rocscience.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
- Sanhueza, P., & Rodríguez, L. (2013). Métodos comparativos de estabilidad de taludes. *Revista de la Construcción*, 12(1), 17–29.

Seed, H. B., & Whitman, R. V. (1970). *Design of earth retaining structures for dynamic loads*. ASCE.

Spencer, E. (1967). Stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, 17(1), 11–26.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. John Wiley & Sons.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). Wiley.

Tzatchkov, V., & Caldiño, L. (2007). *Geotecnia en suelos inestables*. CONAGUA.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations.

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.

World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.

Zhang, L., Zhang, S., & Wu, Z. (2020). Application of artificial intelligence in geotechnical engineering: A review. *Computers and Geotechnics*, 123, 103557. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103557>

Zhang, W., Goh, A. T. C., & Li, Y. (2015). Neural network models in geotechnics. *Engineering Geology*, 189, 20–32.

Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The finite element method: Its basis and fundamentals*. Elsevier.

# APENDICE

## **APENDICE**

Este apéndice presenta información adicional obtenida durante el desarrollo experimental de este trabajo. Si bien estos elementos no están incluidos en el capítulo de Metodología ni de Resultados, su incorporación en un anexo permite apoyar a futuros investigadores en la verificación de procedimientos, cálculos o análisis.

Asimismo, se incluyen abreviaturas comunes en revistas científicas y términos de uso frecuente en español, con el objetivo de facilitar la lectura y estandarizar la nomenclatura utilizada en el documento.

**Cuadro A.1. ABREVIATURA DE ALGUNAS REVISTAS CIENTIFICAS**

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
G&G	Geotechnique and Geology
IJGE	International Journal of Geotechnical Engineering
JGGE	Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering
JG	Journal of Geotechnics
Soils Found.	Soils and Foundations
TRB	Transportation Research Board
Eng. Geol.	Engineering Geology
Geotext. Geomembr.	Geotextiles and Geomembranes
J. Terram.	Journal of Terramechanics
Appl. Clay Sci.	Applied Clay Science

**Cuadro A. 2. ABREVIATURAS DE EMPLEO COMUN EN ESPAÑOL**

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
AI	Inteligencia Artificial
ASTM	American Society for Testing and Materials
BFS	Banco de material "La Luz", "Cañada", "CONIN" (sigla interna de bancos usados en el estudio)
Comp.	Compactación
Dr	Densidad relativa
D10	Diámetro efectivo
D30	Diámetro correspondiente al 30% en curva granulométrica
D50	Diámetro promedio
D60	Diámetro correspondiente al 60% en curva granulométrica
Cu	Coefficiente de uniformidad
Cc	Coefficiente de curvatura
FS	Factor de Seguridad

$\gamma_d$	Peso volumétrico seco
$\gamma_{sat}$	Peso volumétrico saturado
SP	Arena mal graduada (USCS)
SW	Arena bien graduada (USCS)
Gs	Peso específico de sólidos
K	Permeabilidad hidráulica
kPa	Kilopascal
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
NP	No plástico
NRM	Norma
RSS	Reforzamiento de suelos con geosintéticos (Reinforced Soil Structures)
SE	Sin etiqueta / dato no disponible
SW	Arena bien graduada (como la arena Fujian)
USCS	Unified Soil Classification System (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)
Vs	Velocidad de corte
w	Contenido de agua
w <sub>opt</sub>	Contenido óptimo de agua
$\gamma_{opt}$	Peso volumétrico seco máximo