

Modelación numérica de estructuras de pavimento conformadas con capas de materiales
granulares marginales incluyendo efectos de succión

Jose Alberto Durán Baquero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magister en Geotecnia

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.

Codirector

Allex Eduardo Álvarez Lugo

Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Geotecnia

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis padres, quienes con su esfuerzo, amor incondicional y ejemplo de perseverancia me han guiado en cada paso de mi vida, siempre inspirándome a ser mejor. A mi hermano, por ser un apoyo constante, un amigo incondicional y una fuente de motivación en este largo camino.

A mi esposa, cuyo amor, comprensión y paciencia me han permitido alcanzar este logro. Gracias por estar a mi lado en los momentos más difíciles y por creer en mí cuando yo más lo necesitaba.

A mis fieles compañeros de cuatro patas, Hachi y Abril, cuya compañía y alegría me han brindado momentos de tranquilidad y felicidad en medio de las largas jornadas de estudio.

Finalmente, a mis directores, quienes, con su conocimiento, orientación y valiosa retroalimentación, han sido fundamentales para la culminación de este trabajo.

A todos ustedes, dedico este esfuerzo y logro con profunda gratitud y cariño.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada momento de este camino. Sin Su luz y bendición, nada de esto habría sido posible.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander, que a lo largo de estos años ha sido mucho más que un espacio de formación académica; ha sido un lugar donde he crecido como persona y como profesional. Gracias por brindarme las herramientas y el entorno propicio para desarrollar mis conocimientos y habilidades.

A todos los profesores que me han acompañado en este camino, quiero expresarles mi gratitud por su dedicación, pasión por la enseñanza y por compartir su conocimiento de manera generosa. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi formación, contribuyendo de manera significativa a mi desarrollo académico.

En especial, quiero agradecer al profesor Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, quien ha sido un mentor inigualable desde mis días en el pregrado. Su guía y apoyo han sido fundamentales en mi formación profesional. Agradezco profundamente su confianza en mí, su paciencia y su disposición para compartir su vasto conocimiento. Su influencia ha sido clave en la realización de este trabajo, y por ello le estaré eternamente agradecido.

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Objetivos	21
1.1 Objetivo general	21
1.2 Objetivos específicos	21
2. Marco de referencia	22
2.1 Vía terciarias	22
2.2 Materiales granulares marginales	22
2.2.1 Definición y características	22
2.2.2 Usos y aplicaciones en pavimentos	24
2.3 Suelos parcialmente saturados	25
2.3.1 Conceptos básicos	25
2.3.2 Succión	27
2.3.3 Relación contenido de agua y succión en el suelo	28
2.4 Modelación numérica	32
2.4.1 Softwares para modelación numérica	32
2.4.1.1 CODE_BRIGHT ®	32
2.4.1.2 GiD ®	33
2.4.2 Modelos constitutivos	34
2.4.2.1 Modelo Elástico Lineal	34
2.4.2.2 Modelo de Superficies de Estado	37
2.4.2.3 Modelo de viscoplasticidad	39
2.4.2.4 Modelos constitutivos Hidráulicos	42

2.4.2.4.1	Curva de retención de agua	42
2.4.2.4.2	Flujo de agua	42
3.	Metodología	44
3.1	Revisión bibliográfica	44
3.2	Caracterización de los Materiales Granulares Marginales (MGM)	45
3.3	Modelación numérica	45
3.3.1	Definición de la geometría.....	46
3.3.2	Definición de atributos y condiciones.....	48
3.3.2.1	Datos del problema	48
3.3.2.2	Materiales	50
3.3.2.2.1	Parámetros mecánicos del modelo elástico lineal	50
3.3.2.2.2	Parámetros mecánicos del modelo de Superficies de Estado.....	52
3.3.2.2.3	Parámetros mecánicos del modelo Básico de Barcelona	53
3.3.2.2.4	Parámetros hidráulicos	56
3.3.2.3	Condiciones del problema	58
3.3.2.3.1	Porosidad inicial.....	59
3.3.2.3.2	Presión de fluido inicial	59
3.3.2.3.3	Condiciones de fuerza/desplazamiento y límites de flujo.....	59
3.3.2.4	Intervalos de trabajo	61
3.3.3	Generación de enmallado	63
3.3.4	Ejecución y visualización de las simulaciones numéricas	63
3.4	Análisis de resultados	65
3.5	Discusión	66

3.6	Conclusiones y recomendaciones.....	66
3.7	Redacción y Presentación del Trabajo de Aplicación	66
4.	Proceso de modelación numérica y análisis de resultados	67
4.1	Preparación del modelo numérico.....	67
4.1.1	Definición de geometría y datos del problema	67
4.1.1.1.1	Geometría del modelo.....	67
4.1.1.1.2	Datos del problema	67
4.1.2	Parámetros de entrada para los materiales.....	68
4.1.3	Definición de condiciones	71
4.1.3.1	Condiciones de Contorno Mecánicas	72
4.1.3.2	Condiciones de contorno de flujo	72
4.1.3.2.1	Implementación del efecto de saturación y succión.....	72
4.1.3.2.2	Implementación de fronteras impermeables.....	73
4.1.3.3	Incógnitas iniciales.....	74
4.1.3.4	Esfuerzos iniciales	74
4.1.3.5	Porosidad inicial.....	74
4.1.4	Configuración de escenarios de análisis.....	75
4.2	Calibración de simulaciones numéricas.....	76
4.2.1	Modelo Elástico Lineal	77
4.2.2	Modelo de superficies de estado y viscoplasticidad	81
4.3	Análisis de resultados	87
4.3.1	Respuesta esfuerzo-deformación en función de los diferentes modelos constitutivos	87

4.3.1.1	Modelo elástico lineal.....	89
4.3.1.1.1	Modelos de influencia del módulo elástico del concreto asfáltico y de la base granular marginal.....	96
4.3.1.1.2	Modelos de influencia del módulo elástico del concreto asfáltico y de la subbase granular marginal	100
4.3.1.1.3	Modelos de influencia del módulo elástico del concreto asfáltico y de la subrasante	104
4.3.1.1.1	Grado de sensibilidad de los parámetros de diseño.....	108
4.3.1.2	Modelo de superficies de estado	110
4.3.1.2.1	Modelos de influencia del módulo de rigidez por succión a_1	122
4.3.1.2.2	Modelos de influencia del módulo de rigidez por succión a_2.....	128
4.3.1.2.1	Modelos de influencia de la permeabilidad intrínseca	131
4.3.1.2.2	Grado de sensibilidad de los parámetros de diseño.....	135
4.3.1.3	Modelo de viscoplasticidad	138
4.3.1.3.1	Modelos de influencia del módulo de compresibilidad elastoplástica λ_0	138
4.3.1.3.2	Grado de sensibilidad de los parámetros de diseño.....	145
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	149
5.1	Conclusiones generales	149
5.2	Conclusiones específicas	150
5.3	Implicaciones prácticas	151
5.4	Recomendaciones para trabajos futuros	152
5.4.1	Validación experimental.....	152
5.4.2	Ampliación de escenarios de modelación.....	152

5.4.3 Transferencia a la práctica 153

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1	22
Tabla 2	51
Tabla 3	52
Tabla 4	54
Tabla 5	54
Tabla 6	55
Tabla 7	56
Tabla 8	58
Tabla 9	58
Tabla 10	62
Tabla 11	69
Tabla 12	74
Tabla 13	75
Tabla 14	76
Tabla 15	89
Tabla 16	90
Tabla 17	90
Tabla 18	91
Tabla 19	94
Tabla 20	99
Tabla 21	103

Tabla 22 106

Tabla 23 108

Tabla 24 109

Tabla 25 110

Tabla 26 111

Tabla 27 112

Tabla 28 112

Tabla 29 113

Tabla 30 122

Tabla 31 136

Tabla 32 137

Tabla 33 138

Tabla 34 139

Tabla 35 146

Tabla 32 147

Tabla 33 147

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1	23
Figura 2	25
Figura 3	29
Figura 4	30
Figura 5	35
Figura 6	38
Figura 7	47
Figura 8	48
Figura 9	49
Figura 10	51
Figura 11	53
Figura 12	57
Figura 13	60
Figura 14	61
Figura 15	65
Figura 16	68
Figura 17	71
Figura 18	78
Figura 19	80
Figura 20	82
Figura 21	84

Figura 22	85
Figura 23	88
Figura 24	92
Figura 25	95
Figura 26	97
Figura 27	101
Figura 28	105
Figura 29	115
Figura 30	116
Figura 31	118
Figura 32	120
Figura 33	121
Figura 34	123
Figura 35	124
Figura 36	124
Figura 37	125
Figura 38	126
Figura 39	126
Figura 40	127
Figura 41	127
Figura 42	128
Figura 43	130
Figura 44	130

Figura 45..... 131

Figura 46..... 132

Figura 47..... 133

Figura 48..... 134

Figura 49..... 134

Figura 50..... 141

Figura 51..... 142

Figura 52..... 144

Glosario

Capas de pavimento: Capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados. Constituido por, capa base, capa de subbase, capa de subrasante.

Code_Bright®: Programa de Método de Elemento Finito (FEM) capaz de realizar análisis acoplados termo-hidromecánicos (THM) en medios geológicos. Desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y trabajos combinados con el pre-procesador GiD, con el acompañamiento del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

Deflexiones (δ): Es el grado en el que un elemento estructural se desplazó bajo la aplicación de una fuerza o una carga.

Deformaciones unitarias (ϵ): Se puede definir como la relación existente entre la deformación total y la longitudinal inicial del elemento, la cual permitirá determinar la deformación del elemento sometido a esfuerzos de tensión o compresión axial.

Esfuerzos (σ): Es la fuerza que actúa sobre un cuerpo para deformarlo.

GiD®: Procesador universal, de uso fácil y adaptación para simulaciones numéricas en ciencia e ingeniería. Diseñado para cubrir todas las necesidades comunes en el campo de simulaciones numéricas de pre a post-procesamiento.

Materiales granulares marginales (MGM): Los materiales marginales son aquellos que no cumplen por completo con las especificaciones de los materiales viales normales que se usarán en un país o región, pero que aún tienen el potencial para usarse con éxito en algunas aplicaciones.

Método de elementos finitos (MEF): El Método de Elementos Finitos (MEF) es una

herramienta versátil a disposición de los investigadores para el análisis del comportamiento de materiales y estructuras sometidas a diversos estados de carga. Su mayor ventaja consiste en la posibilidad de simular de forma realista la respuesta de un sistema bajo diversos estímulos mecánicos sin tener que recurrir a métodos experimentales que pueden ser en algunos casos excesivamente costosos o incluso imposibles de realizar debido a la propia naturaleza del fenómeno estudiado.

Pavimento Flexible: Está formado por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase.

Resumen

Título: Modelación numérica de estructuras de pavimento conformadas con capas de materiales granulares marginales incluyendo efectos de succión**

Autor: Jose Alberto Durán Baquero ††

Palabras Clave: Terraplén, material granular marginal, succión, modelación numérica, análisis de sensibilidad.

Descripción: Los avances en la Mecánica de Suelos No Saturados han facilitado el desarrollo de métodos innovadores para analizar la respuesta de estructuras de pavimentos y terraplenes frente a variaciones ambientales, como lluvia y humedad, así como ante la acción del tráfico. En este estudio se llevó a cabo un análisis del comportamiento esfuerzo-deformación en terraplenes utilizando materiales granulares marginales (MGM) a través de modelación numérica, considerando los efectos de ciclos de humedecimiento y secado. El análisis utilizó GiD y CODE_BRIGHT para evaluar el impacto de la succión en suelos parcialmente saturados, aplicando modelos constitutivos elásticos y no lineales. Se simularon procesos de infiltración y secado para estudiar las deformaciones inducidas. Los resultados subrayan la importancia del contenido de finos y la permeabilidad en la rigidez y deformación de los terraplenes, evidenciando su influencia en el rendimiento estructural con variaciones de humedad.

** Análisis de sensibilidad de variables de diseño sobre estructuras de pavimentos conformados por materiales granulares marginales a partir de simulaciones numéricas

†† Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Pregrado. Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes. Doctor en Ingeniería. Codirector: Alex Eduardo Álvarez Lugo. Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Sensitivity analysis of design variables on pavement structures composed of marginal granular materials based on numerical simulations**

Author(s): Jose Alberto Durán Baquero ††

Key Words: Embankment, marginal granular material, suction, numerical modeling, sensitivity analysis.

Description: Advances in Unsaturated Soil Mechanics have facilitated the development of innovative methods for analyzing the response of pavement and embankment structures to environmental variations, such as rainfall and humidity, as well as traffic loading. In this study, a stress-strain behavior analysis was conducted on embankments using marginal granular materials (MGM) through numerical modeling, considering the effects of wetting and drying cycles.

The analysis was performed using GiD and CODE_BRIGHT software, employing both linear and nonlinear constitutive models to assess the influence of suction in partially saturated soils. To simulate the behavior of MGMs under these conditions, infiltration and drying processes were modeled, evaluating the induced deformations according to the analysis intervals. The results highlight the significance of fines content and permeability in the stiffness and deformation capacity of embankments, demonstrating their impact on structural performance under changing moisture conditions.

Introducción

El desarrollo de la infraestructura vial del país tiene gran importancia en el crecimiento de la economía nacional y regional, debido a que la mayoría de bienes y servicios en Colombia se transportan y comercializan a través de las carreteras, lo cual permite generar relaciones comerciales entre las diferentes regiones del país. En este contexto, la red vial terciaria cuenta con un papel importante, pues es la que permite la conectividad de los centros de producción agrícola y agroindustrial con el resto del país.

El Ministerio de Transporte (2022) afirma que de los 205.109 km que componen la red vial nacional, el 69% corresponde a vías terciarias representando 142.284 km. Sin embargo, únicamente se ha inventariado el 20.6% (29.336 km) del total de la red vial terciaria estimada. Esto refleja las limitaciones existentes para garantizar niveles de funcionalidad adecuadas en esta red vial. Dichas limitaciones se deben, entre otros aspectos, a la dificultad de obtener materiales locales que cumplan con lo especificado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), el alto costo de transportar los materiales desde otras regiones, y limitaciones técnicas y presupuestales de los municipios a cargo de estas vías.

Estas vías de bajo volumen de tránsito (VBVT) se encuentran conformadas en buena parte con capas de material granular no ligado (MGNL) o empleando el material natural como superficie de circulación, sin capas de rodadura de concreto asfáltico o hidráulico (Rincón Morantes et al., 2022, p.94). Lo anterior indica que la red vial terciaria en las MGNLs exige una alta demanda, lo que implicaría costos elevados para construir estructuras de pavimento en áreas rurales utilizando materiales convencionales.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, es necesario la implementación de soluciones innovadoras para la construcción y mantenimiento de la red vial terciaria del país, que garanticen que los proyectos sean costo-efectivos y que se adapten a las necesidades de cada región; esto significa, por ejemplo, hacer uso en lo posible de materiales locales. Entre estos materiales locales se encuentran los materiales granulares marginales (MGM), que básicamente son aquellos materiales que no cumplen con algún criterio de las especificaciones definidas para bases y subbase granulares (e.g., alta plasticidad, baja resistencia intrínseca de partículas, o granulometría, entre otros) (Rincón Morantes et al., 2022, p.94). Estos materiales están disponibles en una gran variedad de canteras a nivel nacional, y podrían ser una solución para el mejoramiento de vías de vías terciarias (o VBVT).

Para implementar y validar el uso de estos materiales no convencionales, es fundamental evaluar las condiciones específicas de cada proyecto y fuente de material. Esto incluye analizar el comportamiento esfuerzo-deformación de las capas que constituyen la estructura del pavimento bajo las cargas proyectadas, tomando en cuenta los efectos de las condiciones ambientales, climáticas y topo-hidráulicas de la región de estudio. Esta evaluación permitirá estimar el comportamiento esperado en campo de los MGMs en la conformación de estructuras de pavimento.

En este sentido, emplear herramientas como la modelación numérica en software especializado permite obtener el comportamiento de deformaciones y esfuerzos en estructuras de pavimento de vías terciarias con capas de MGMs, a partir de una caracterización geotécnica detallada. Este análisis debe considerar la interacción del medio ambiente y el tiempo de análisis con el fin de elaborar un modelo hidromecánico acoplado.

La importancia de involucrar análisis numéricos en estructuras de pavimentos que incluyan estos materiales es de suma importancia dado que actualmente existen diversos estudios sobre la implementación de materiales no convencionales en la red vial terciaria del país, en los que se han evaluado técnicas de estabilización o mejoras del suelo existente (Caro & Caicedo, 2017). Sin embargo, no se aprecian avances significativos en la implementación de modelación numérica que permita cuantificar el comportamiento esfuerzo-deformación de estructuras de pavimento en vías terciarias que incluyan MGM, y que adicionalmente consideren los efectos ambientales en la respuesta de estos materiales.

Los resultados obtenidos de este proyecto constituirán una base de información técnica que servirá para apoyar procesos de toma de decisiones referentes a la implementación de MGM para vías de bajo volumen de tránsito.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Desarrollar un análisis de sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación de estructuras de pavimento, conformadas con MGMs, incluyendo el efecto de la succión y modelos elásticos lineales y no lineales, mediante el software CODE_BRIGHT ®.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar un análisis comparativo de la respuesta esfuerzo-deformación de estructuras de pavimento conformadas con MGMs, incluyendo los modelos lineales elástico, superficies de estado, y modelo básico de Barcelona.

- Establecer la influencia de las variables de entrada en la respuesta esfuerzo-deformación de estructuras de pavimento conformadas con MGMs sometidas a diferentes escenarios de carga y succión.

2. Marco de referencia

2.1 Vía terciarias

El Ministerio de Transporte (2008) afirma que la vías terciarias en Colombia:

Son aquellas vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como Terciarias deben funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías Secundarias. (p.5).

2.2 Materiales granulares marginales

2.2.1 Definición y características

Los Materiales Granulares Marginales (MGM) de acuerdo al Instituto Nacional de Vías (2022) debe tenerse en cuenta aquellos que no se pueden categorizar como suelos seleccionados, adecuados o tolerables debido al incumplimiento de ciertas condiciones específicas, pero que cumplen con otras condiciones establecidas

Tabla 1

Condiciones características de Materiales Granulares Marginales (MGM)

Condición	Requisito
Granulometría	Porcentaje de material que pasa el tamiz de 19,0 mm (3/4 de pulgada) mayor al setenta por ciento (> 70 %) o porcentaje que pasa el tamiz de 0,075 mm (nro. 200) mayor al treinta y cinco por ciento (> 35 %), según la norma INV E-la norma INV E-123.

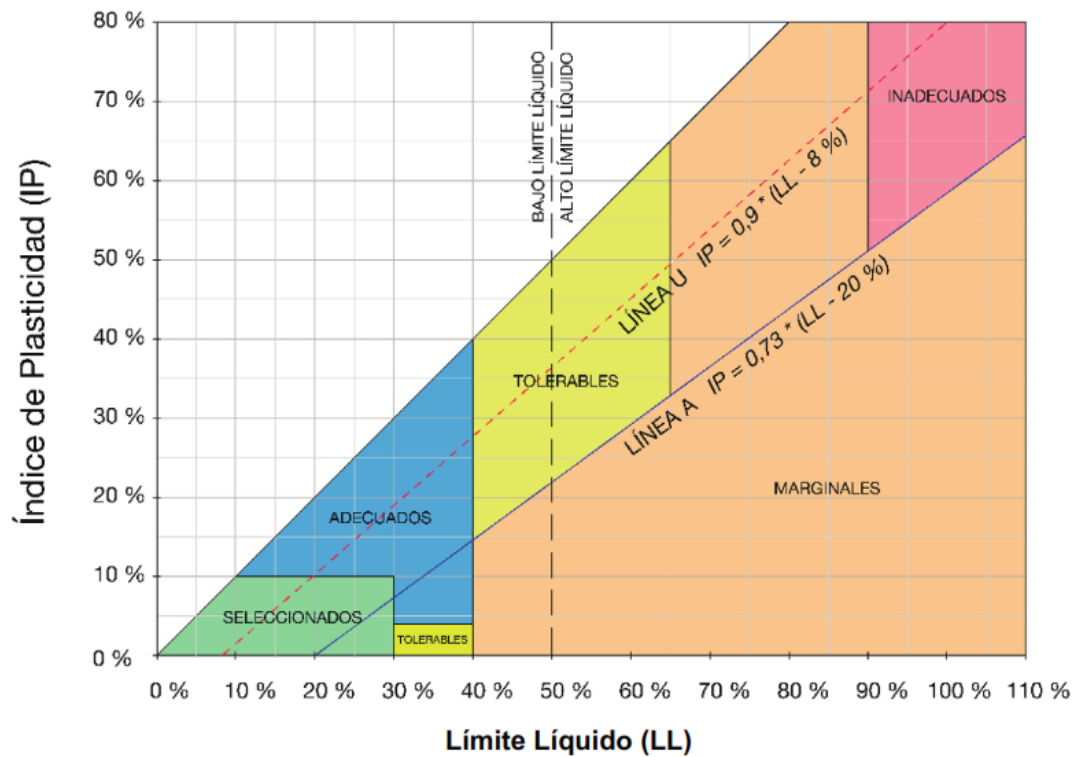
Condición	Requisito
Materia orgánica	Contenido en materia orgánica inferior al cinco por ciento (MO < 5 %), según la norma INV E-121 o UNE 103204.
Expansión libre	Expansión libre en edómetro inferior al cinco por ciento (< 5 %), según la norma ASTM 4546.
Límite líquido	Límite líquido superior o igual a cuarenta por ciento (LL ≥ 40 %). Si el límite líquido está entre cuarenta por ciento y sesenta y cinco por ciento (40 % ≤ LL < 65 %), el índice de plasticidad debe ser menor o igual a cero coma setenta y tres del valor resultante de la resta de veinte por ciento al límite líquido (IP ≤ 0,73 * (LL - 20 %)) de acuerdo con las normas INV E-125 e INV E-126. Si el límite líquido es superior a noventa por ciento (LL > 90 %), el índice de plasticidad debe ser inferior a cero coma setenta y tres del valor resultante de la resta de veinte por ciento al límite líquido (IP < 0,73 * (LL - 20 %)) de acuerdo con las normas INV E-125 e INV E-126 (ver Figura 220-1).

Nota. adaptado de (Instituto Nacional de Vías, 2022)

La Figura 1 presenta la carta de plasticidad de los suelos, que muestra las diversas categorías de materiales comúnmente utilizados en la construcción de terraplenes, clasificándolos según sus características intrínsecas, donde se puede observar las zonas aplicables a Materiales Granulares Marginales (MGM).

Figura 1

Criterios de clasificación de materiales según Plasticidad.



Nota. Adaptada de (Instituto Nacional de Vías, 2022)

2.2.2 Usos y aplicaciones en pavimentos

El uso de suelos marginales o aquellos con un índice CBR inferior a tres ($CBR < 3$) debe estar sujeto a problemas de resistencia, deformabilidad y ejecución, por lo que su empleo debe ser justificado mediante un estudio especial. La posible utilización de suelos colapsables, expansivos, con sales solubles, con materia orgánica o cualquier otro tipo de material marginal (según la clasificación del numeral 220.2.2) debe cumplir con lo indicado en el numeral 220.2.4 de este artículo. (Instituto Nacional de Vías, 2022).

El estudio de usos de este tipo de materiales marginales debe contemplar explícitamente y con detalle al menos los siguientes aspectos:

- (a) Determinación y valoración de las propiedades que confieren al suelo su carácter marginal.
- (b) Influencia de dichas características en los diferentes usos del suelo dentro de la obra. Posible influencia en el comportamiento o evolución de otras zonas o elementos de la obra.
- (c) Estudio detallado donde se indiquen las características resistentes del material y los asentamientos totales y diferenciales esperados, así como la evolución futura de estas características.
- (d) Conclusión justificada de los posibles usos del material en estudio.
- (e) Cuidados, disposiciones constructivas y prescripciones técnicas por adoptar para los diferentes usos del suelo dentro de la obra.

2.3 Suelos parcialmente saturados

2.3.1 *Conceptos básicos*

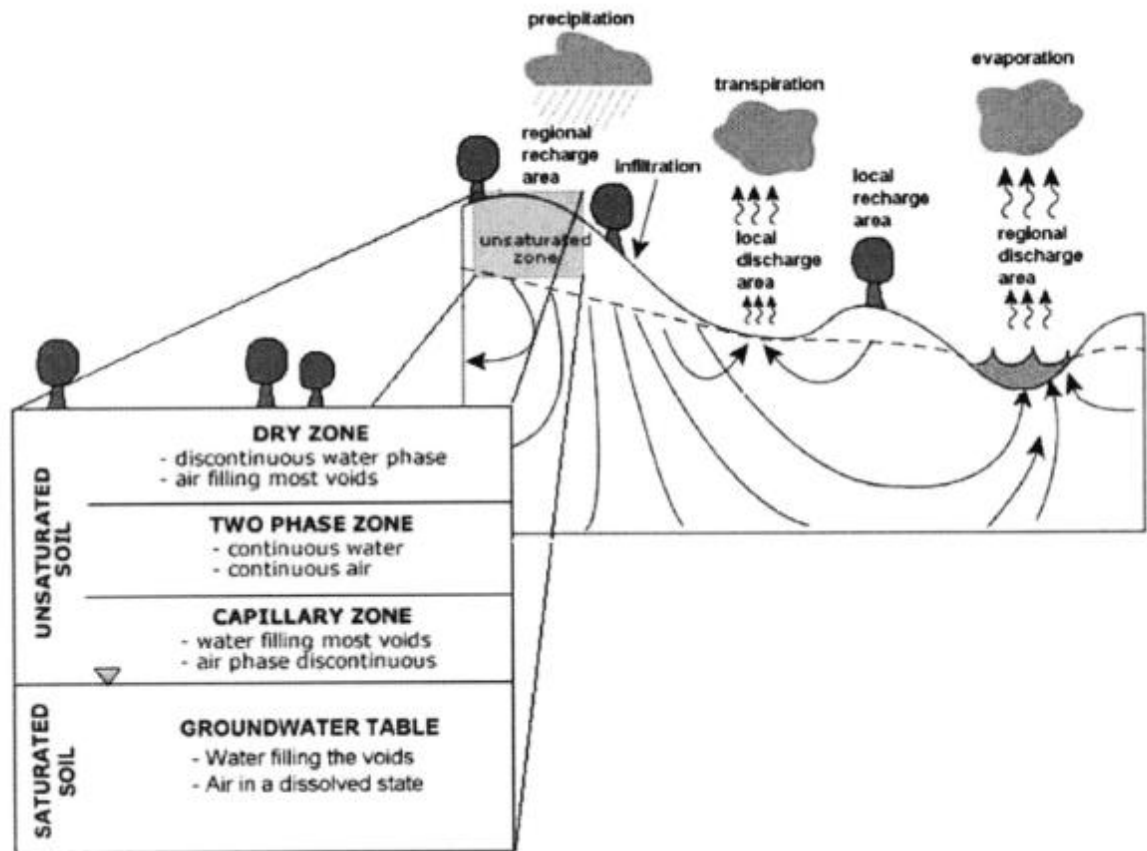
Los suelos saturados y los suelos secos se componen de dos fases: partículas sólidas y agua, o partículas sólidas y aire, respectivamente. En cambio, cuando el suelo está parcialmente saturado, interactúan tres fases: partículas sólidas, agua y aire. Fredlund et al., (2012) sugieren que se puede considerar una cuarta fase: la interfase aire-agua, o membrana contráctil.

La interacción entre estas fases requiere no solo los principios de la mecánica y la hidráulica, sino también los de la termodinámica, lo que complica el estudio de los suelos parcialmente saturados.

La Figura 2 muestra el modelo propuesto por Fredlund (2006) que ilustra los distintos estados del suelo según las fases que lo componen.

Figura 2

Zonas de suelo saturado y parcialmente saturado.



Nota. Adaptada de (Fredlund, 2006)

Los suelos ubicados debajo del nivel freático se consideran saturados, ya que sus vacíos están completamente llenos de agua. De acuerdo con las leyes de la hidráulica, en este estado, el agua en los poros tiene una presión positiva que se ejerce uniformemente en todas las direcciones. Esta fuerza se denomina presión de poros debido al agua.

La capa de suelo seco se encuentra más cerca de la superficie y, según Fredlund et al., (2012), la mayoría de los vacíos están llenos de aire, aunque puede haber pequeñas cantidades de agua en forma de gotas aisladas. En este estado, el grado de saturación del suelo seco es prácticamente 0%.

Fredlund (2006) indica que la zona adyacente al nivel freático es conocida como la franja capilar, donde la mayoría de los vacíos están llenos de agua de forma continua, aunque también pueden contener burbujas de aire, representando una fase gaseosa discontinua. En esta franja, el grado de saturación del suelo es casi del 100%, pero no se considera completamente saturado. A diferencia de los suelos saturados, el agua en estos vacíos está a una presión negativa, denominada presión de poros negativa, y está influenciada por el fenómeno de la capilaridad.

Entre la zona del suelo seco y la franja capilar, se encuentra una región intermedia que Fredlund (2006) denomina zona de dos fases, correspondiente al suelo parcialmente saturado. En esta área, tanto el agua como el aire llenan los poros de manera continua, con un grado de saturación que varía entre el 20% y el 80%. La presión en los poros es negativa, resultado de la diferencia entre la presión del agua en los poros y la presión del aire en los poros.

2.3.2 *Succión*

La succión total es referida como la cantidad de energía asociada a la capacidad del suelo para retener agua (Lee & Wray, 1995).

La energía requerida para extraer el agua del suelo, conocida como succión total, tiene dos componentes. Una es la succión matricial, que está relacionada con el efecto de la capilaridad, y la otra es la succión osmótica, causada por las sales disueltas en el agua. La succión matricial se refiere a la parte de la succión total atribuida a la capilaridad, que resulta de la tensión superficial en la interfase agua-aire y de la adsorción en la superficie de las partículas del suelo. Esta succión matricial se calcula como la diferencia entre la presión del aire en los poros y la presión del agua en los poros.

$$\psi_m = \mu_a - \mu_w$$

Donde:

ψ_m = succión matricial

μ_a = presión de aire en los poros del suelo

μ_w = presión de agua en los poros del suelo

La succión matricial varía en función del tamaño y distribución de las partículas, el tamaño de los poros y el grado de saturación (Dineen, 1997). A medida que el grado de saturación disminuye, el menisco del agua se retrae en los poros más pequeños, lo que reduce su radio de curvatura y, como resultado, aumenta la succión matricial.

Dado que la succión total se define como un estado energético, se puede expresar la succión del suelo en términos de energía por unidad de masa. En el campo de la ingeniería geotécnica, esta succión se mide en unidades de presión, específicamente en kilopascales (kPa) dentro del sistema internacional de unidades (SI).

2.3.3 Relación contenido de agua y succión en el suelo

La relación entre la cantidad de agua presente en un suelo y la succión se representa mediante la Curva Característica de Succión del Suelo (SWCC, por sus siglas en inglés: Soil Water Characteristic Curve). En la mecánica de suelos, esta relación también se denomina curva de retención de agua.

La comprensión y análisis de la Curva Característica de Succión del Suelo (SWCC) es crucial para el estudio de la mecánica de suelos que no están completamente saturados. Por este motivo, varias investigaciones se han centrado en establecer vínculos entre la SWCC de un suelo y sus características físicas. Además, estas investigaciones buscan correlaciones entre la SWCC y parámetros como la resistencia al corte y el coeficiente de permeabilidad del suelo.

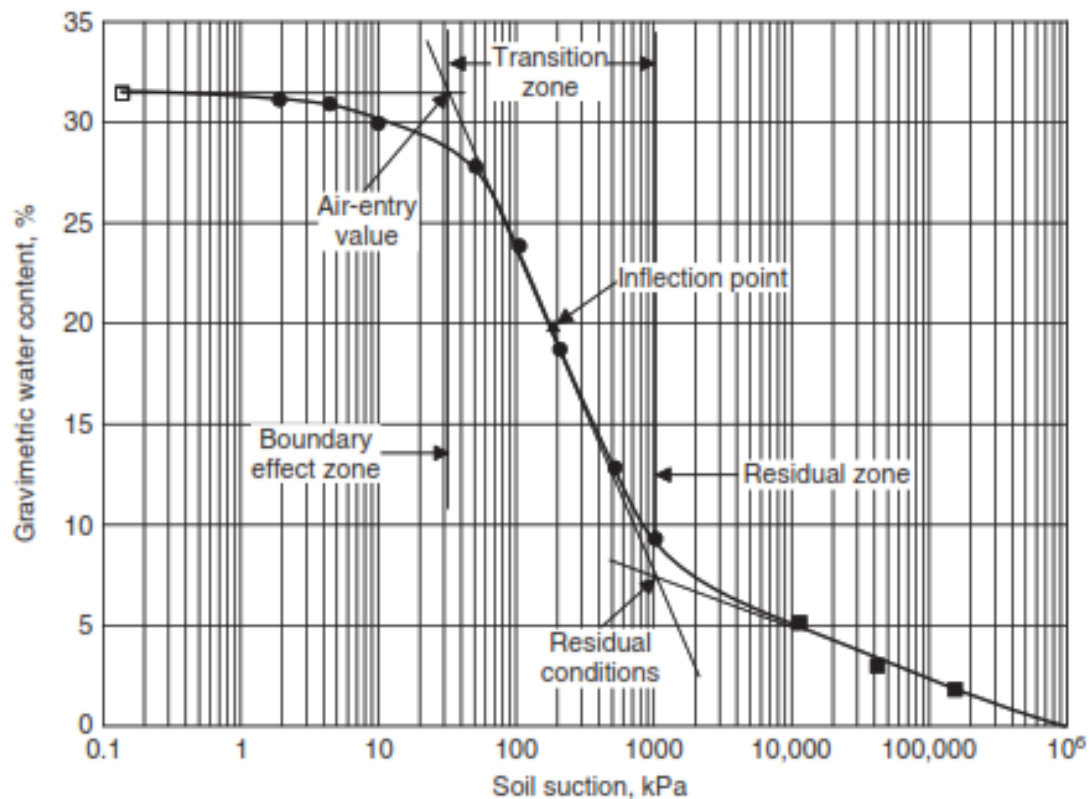
La cantidad de agua en el suelo puede expresarse en términos de humedad gravimétrica (w) grado de saturación (S) o humedad volumétrica (θ) y se grafica en las ordenadas, mientras que las abscisas se grafica la succión total. En la práctica geotécnica, se representa la SWCC en términos de la succión matricial, puesto que la mayoría de los problemas ingenieriles son el resultado de cambios ambientales (succión matricial), mientras que los cambios en la succión osmótica son relevantes en el comportamiento del suelo en los casos donde se presente alteración del contenido de sales del suelo por efecto de contaminación química (Fredlund et al., 2012).

En la SWCC en términos del grado de saturación existen tres zonas claramente identificables, como se muestra en la Figura 3, la zona de efecto de borde, zona de transición y zona de saturación residual, y existen dos puntos característicos que marcan el límite entre cada etapa, el valor de entrada de aire y el grado de saturación residual.

En la zona de efecto de borde, la gráfica es inicialmente horizontal, es decir, el suelo permanece saturado. El valor de entrada de aire, es la succión requerida para que el aire entre a los poros más grandes del suelo y se inicia la desaturación o pérdida de la saturación. En este punto se inicia la zona de transición, en la cual existe una interfase aire-agua, pero agua se encuentra de manera continua. Finalmente, al seguir disminuyendo el contenido de agua dentro de los poros, se llega al grado de saturación residual, donde se inicia la zona desaturación residual. El grado de saturación residual corresponde al contenido de agua para el cual, la fase líquida deja de ser continua y los poros se encuentran ocupados principalmente por aire.

Figura 3.

Curva típica de retención del suelo mostrando las diferentes zonas de desaturación.

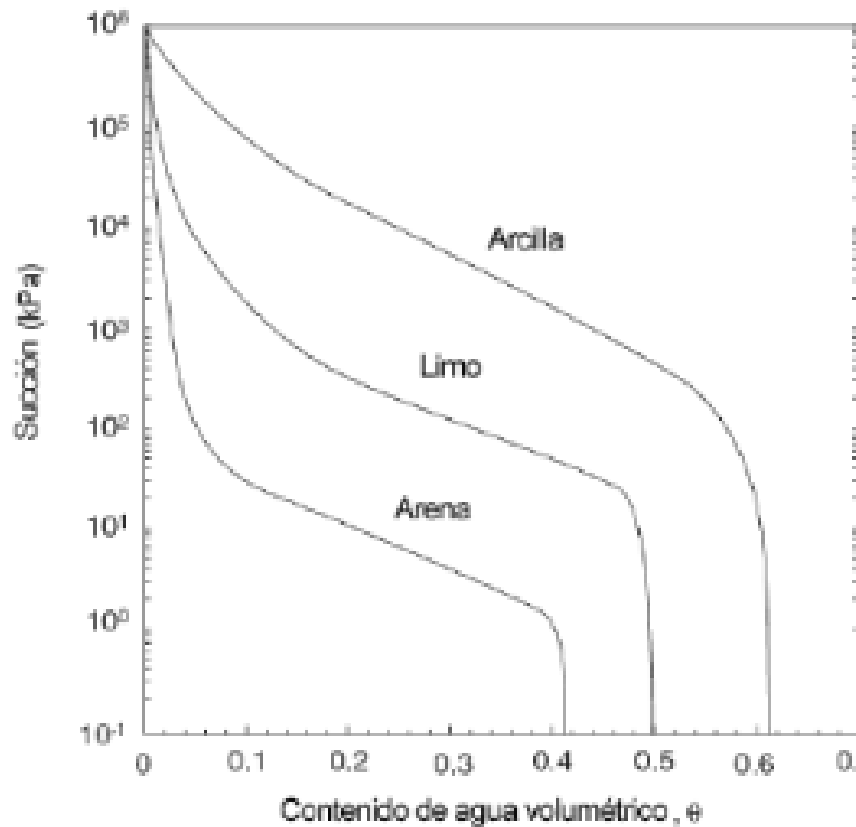


Nota. Adaptada de (Fredlund et al., 2012)

La relación contenido de agua-succión y por tanto, la forma de la SWCC, se ve influenciada por la distribución de los tamaños de poros, la distribución de tamaños de partículas, la densidad, el contenido de arcilla y la mineralogía del suelo (Likos et al., 2014). La Figura 4, muestra curvas características de succión, representativas de arenas, limos y arcilla donde se observa la forma de la curva, asociada al tipo de suelo, que indirectamente indica influencia del tamaño de partículas y el tamaño de poros. El valor de entrada de aire de los suelos gruesos es menor que para los suelos finos, debido a la presencia de poros de mayor tamaño, predominio de la capilaridad en la succión matricial y menor requerimiento de succión para iniciar la desaturación del suelo.

Figura 4.

Curvas de retención del suelo representativas para diferentes tipos de suelo.



Nota. Adaptada de (Likos et al., 2014)

La curva característica de succión en el suelo se puede obtener de mediciones en laboratorio se puede estimar a partir de otras propiedades del suelo como la granulometría o la plasticidad (Fredlund et al., 2012).

Para obtener la curva característica de retención de agua (SWCC) en laboratorio, es necesario medir la succión en muestras de suelo con diferentes niveles de contenido de agua. Estas mediciones de succión pueden realizarse mediante diversas técnicas desarrolladas por la ciencia del suelo. Sin embargo, es crucial comprender que la SWCC no puede emplearse para estimar la succión en condiciones "in situ", ya que las circunstancias de las muestras durante las pruebas de laboratorio no reflejan con exactitud las condiciones reales del terreno

2.4 Modelación numérica

Para la realización de los modelos planteados en la presente tesis, se empleó un software especializado que permite la inclusión de modelos numéricos termo-hidro-mecánicos acoplados. Este enfoque es fundamental para considerar los efectos ambientales en el comportamiento del suelo. Dichos efectos incluyen, entre otros, la influencia en la resistencia al corte y la deformación volumétrica del suelo. Este tipo de modelación avanzada permite una representación más precisa y realista del comportamiento del suelo bajo diversas condiciones ambientales, lo que es esencial para el desarrollo de soluciones ingenieriles efectivas y seguras.

A continuación, se describen los softwares empleados y los modelos constitutivos que permiten reproducir de manera precisa las condiciones del suelo sujeto a variaciones en los grados de saturación. Para este propósito, se seleccionaron herramientas de simulación numérica que integran módulos de análisis multifísico capaces de acoplar los efectos térmicos, hidráulicos y mecánicos. Entre los softwares utilizados se encuentra el [nombre del software], que destaca por su capacidad para modelar interacciones complejas entre el flujo de calor, el movimiento de agua y las tensiones mecánicas en medios porosos.

2.4.1 Softwares para modelación numérica

2.4.1.1 CODE_BRIGHT ®

La Universitat Politècnica de Catalunya (2023) en el Manual del Usuario 2023 expone que el software:

CODE_BRIGHT ® es una herramienta diseñada para manejar problemas acoplados en medios geológicos. El código informático, originalmente, fue desarrollado sobre la base de una

nueva teoría general para medios salinos. Posteriormente, el programa se ha generalizado para modelar procesos termo-hidro-mecánicos (THM) de manera acoplada en medios geológicos. Básicamente, el código acopla problemas mecánicos, hidráulicos y térmicos en medios geológicos (p.4).

CODE_BRIGTH[®] emplea el software GiD[®] para las fases de preprocesamiento y post-procesamiento. Desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), GiD[®] es una interfaz gráfica interactiva utilizada para la definición, preparación y visualización de todos los datos necesarios para las simulaciones numéricas. Estos datos abarcan la definición de la geometría, materiales, condiciones, información de solución y otros parámetros relevantes. El programa tiene la capacidad de generar la malla de elementos finitos y exportar la información en el formato adecuado para CODE_BRIGTH[®]. Además, permite ejecutar directamente la simulación numérica y visualizar los resultados obtenidos sin necesidad de transferir archivos (Universitat Politècnica de Catalunya, 2023).

2.4.1.2 GiD[®]

GiD[®] es un sistema geométrico en el sentido de que, una vez definida la geometría, todos los atributos y condiciones (es decir, asignaciones de materiales, cargas, condiciones, etc.) se aplican a la geometría sin ninguna referencia o conocimiento de una malla. Solo después de que todo esté definido, se debe realizar el mallado del dominio geométrico. Esta metodología facilita las alteraciones en la geometría manteniendo las definiciones de atributos y condiciones. Las alteraciones en los atributos o condiciones también se pueden realizar simultáneamente sin necesidad de reasignar a la geometría. Si es necesario, se pueden generar nuevas mallas o hacer pequeñas modificaciones en la malla obtenida, y toda la información se asignará automáticamente de manera correcta (Universitat Politècnica de Catalunya, 2023).

El sistema ofrece la opción de definir atributos y condiciones directamente en la malla una vez que se haya generado. Sin embargo, si la malla se regenera, no es posible mantener estas definiciones y, por lo tanto, todos los atributos y condiciones deben redefinirse. En general, el proceso completo de solución puede describirse como:

- (f) Definir la geometría: puntos, líneas, superficies, volúmenes.
- (g) Utilizar otras facilidades.
- (h) Importar desde CAD.
- (i) Definir atributos y condiciones.
- (j) Generar la malla.
- (k) Realizar la simulación.
- (l) Ver los resultados.

2.4.2 Modelos constitutivos

Los modelos constitutivos empleados en esta tesis abarcan desde el comportamiento elástico lineal del suelo hasta los modelos no lineales avanzados que involucran los cambios volumétricos del suelo debido a efectos ambientales, como el cambio en el grado de saturación del suelo. Estos modelos son cruciales para capturar tanto los comportamientos lineales como no lineales del suelo bajo diferentes estados de humedad. Además, permiten un análisis detallado de cómo las variaciones en el contenido de agua afectan la resistencia al corte, la rigidez y la capacidad de deformación del suelo.

2.4.2.1 Modelo Elástico Lineal

El uso de un modelo constitutivo elástico lineal en simulaciones numéricas de terraplenes es fundamental como punto de partida debido a varias razones. En primer lugar, la mayoría de los software de análisis geotécnico adoptan este modelo por su simplicidad y facilidad de

implementación. Esto permite obtener una comprensión inicial del comportamiento del terraplén bajo diversas condiciones de carga, proporcionando una base sólida para la interpretación de los resultados. Además, el modelo elástico lineal facilita la calibración de parámetros de resistencia y deformación.

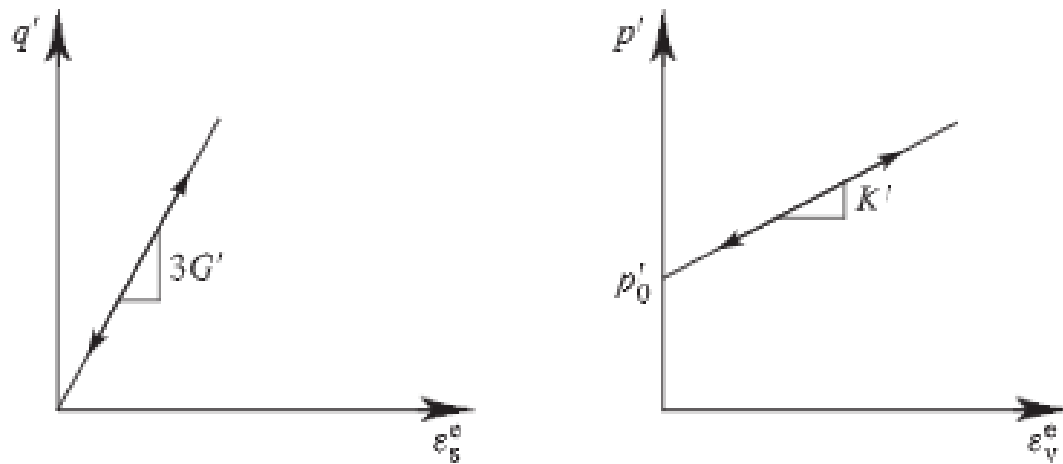
De acuerdo a Atkinson (2017) los materiales que son elásticos son conservativos, de modo que todo el trabajo realizado por los esfuerzos externos durante un incremento de deformación se almacena y se recupera al descomprimir: esto significa que todas las deformaciones que ocurren durante un incremento de carga se recuperan si el incremento se elimina. Una característica importante de los materiales isotrópicos y elásticos es que los efectos de corte y volumétricos están desacoplados, por lo que la matriz de riGiD[®] es como se presenta en la siguiente ecuación.

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_p^e \\ \delta\varepsilon_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{K} & 0 \\ 0 & \frac{1}{3G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p \\ \delta q \end{bmatrix}$$

Donde la $\delta\varepsilon_p^e$ y $\delta\varepsilon_q^e$ denotan deformaciones elásticas volumétricas y por corte respectivamente. Por su parte δp y δq representan los incrementos en las invariantes de esfuerzos. En la Figura 5 se presenta en comportamiento típico de estos materiales.

Figura 5.

Comportamiento de materiales elásticos lineales.



(a) Shearing

(b) Compression and swelling

Nota. Adaptada de (Atkinson, 2017)

Los parámetros elásticos más usuales son el módulo de Young, E , y la relación de Poisson, ν . Los módulos de Bulk (K) y de corte (G), para materiales isotrópicos, se pueden expresar como una función de estos dos parámetros, como se muestra en las siguiente ecuaciones:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Es preferible utilizar los módulos volumétrico y de corte en lugar del módulo de Young y la relación de Poisson porque de esta manera, la relación esfuerzo-deformación desviadora o de corte y la variación de la deformación volumétrica debido a cambios en el esfuerzo isotrópico se consideran por separado.

2.4.2.2 Modelo de Superficies de Estado

Según Alonso & Lloret (1985), en los suelos compactados se suele realizar una selección previa basada en los resultados de ensayos de identificación básica. No obstante, el comportamiento de estos suelos en relación con la deformabilidad, resistencia, erosionabilidad y permeabilidad está determinado por variables de estado, las cuales incluyen principalmente la densidad seca, el índice de poros, el grado de saturación y la microestructura.

Desde la perspectiva del compartimiento volumétrico, una estructura de suelo puede exhibir colapso o hinchamiento en función de las condiciones ambientales (fundamentalmente la succión y el esfuerzo total aplicado). Una alternativa para estudiar este comportamiento es el Modelo de Superficies de Estado desarrollado por Alonso & Lloret (1985), el cual se centra en el comportamiento de suelos no saturados. Este modelo establece que el comportamiento mecánico de los suelos se puede describir a través de superficies que representan diferentes estados de esfuerzos y deformación en función de la succión.

En suelos parcialmente saturados las variables de estado que definen el comportamiento del suelo, se asocian al estado de esfuerzos, porosidad y grado de saturación (Alonso & Lloret, 1985).

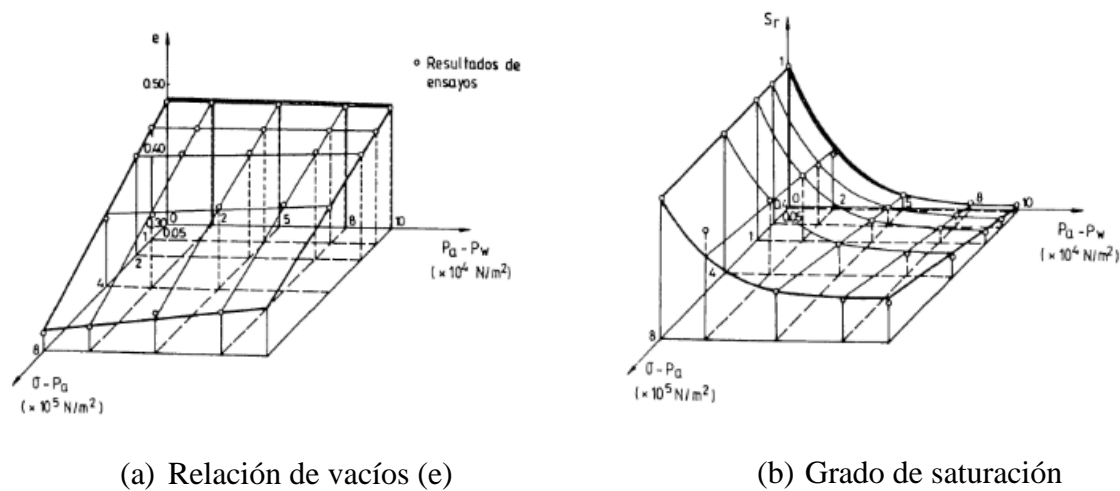
El conocimiento de la forma de estas superficies es útil para elaborar cualquier modelo de comportamiento para suelos parcialmente saturados que pretenda incorporar los fenómenos de hinchamiento y colapso. Por lo tanto, es de gran interés encontrar formulaciones matemáticas sencillas que puedan reflejar dicha superficies.

En la Figura 6 se presentan superficies de estado encontradas para materia clasificado como arena arcillosa que constituye el núcleo de la presa del Limonero, en Málaga, España, cuando se le somete a carga con confinamiento total. De dichas superficies puede observarse como la

deformabilidad del suelo aumenta a medida que disminuye la succión. Asimismo, puede cuantificarse la magnitud del colapso que se produce cuando disminuye la succión bajo carga constante.

Figura 6.

Superficies de estado interpoladas sobre resultados experimentales correspondiente a material arcilloso del núcleo de la presa del Limonero.



(a) Relación de vacíos (e)

(b) Grado de saturación

Nota. Adaptada de Alonso & Lloret (1985).

Tras estudiar desde un punto de vista estadístico la bondad de diversas formulaciones para predecir resultados encontrados por varios autores para diferentes suelos, Alonso & Lloret (1985) proponen la siguiente relación para estimar la deformación volumétrica inducida por la saturación del suelo, en efecto a partir de un estado inicial (e_0) y otro final saturado (e)

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

A partir de:

$$\frac{\Delta e}{1 + e} = a_1 \Delta \ln(-p') + a_2 \Delta \ln\left(\frac{s + 0,1}{0,1}\right) + a_3 \Delta \left[\ln(-p') \left(\frac{s + 0,1}{0,1}\right) \right]$$

Donde p' es el esfuerzo efectivo promedio (el esfuerzo promedio más el máximo entre la presión del líquido y la del gas) y s es la succión (presión del gas menos la presión del líquido).

$a_1: \frac{-K}{1+e}$, donde K es la pendiente de la curva carga/descarga en el diagrama ($e - \ln p'$)

$a_2: \frac{-K_s}{1+e}$, donde K_s es la pendiente de la curva carga/descarga en el diagrama ($e - \ln \left(\frac{s+0,1}{0,1} \right)$)

a_3 : termino de acople

2.4.2.3 Modelo de viscoplasticidad

Una versión viscoplástica del Modelo Básico de Barcelona (BBM) fue implementada en CODE_BRIGHT ® en la forma propuesta por Desai' A N & Zhang (1987) para suelos saturados y posteriormente extendida para suelos no saturados por Yin et al., (2010). El enfoque asume que la tasa de deformación ($\dot{\epsilon}$) es calculada como la suma de la deformación elástica ($\dot{\epsilon}^e$) y la viscoplastica ($\dot{\epsilon}^{vp}$).

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{vp}$$

La parte elástica puede considerarse lineal o no lineal (como en el BBM original). En las simulaciones presentadas en este trabajo, el modelo no lineal elástico fue escogido. Las deformaciones volumétricas ($\dot{\epsilon}_v$) debido a la succión se consideraron elásticas empleando la siguiente ecuación.

$$\Delta \epsilon_v = -3a_s \Delta s$$

Donde a_s es el coeficiente de expansión lineal inducido por la succión.

Este parámetro es positivo siguiendo el criterio de signos de la mecánica de sólidos continua. El componente viscoplástico se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \Gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial G}{\partial \sigma'}$$

Donde Γ es un parámetro de fluidez y $\langle \rangle$ son los corchetes de Macaulay. La fluidez Γ puede ser una función de la succión.

$$\Gamma = \Gamma_0 e^{\delta s}$$

Donde Γ_0 es el valor de Γ cuando la succión es cero y δ es un parámetro. Una expresión típica para la función de flujo Φ es:

$$\Phi(F) = \left(\frac{F}{F_0} \right)^N$$

Donde la función de fluencia se define como:

$$F(J_1, J_{2D}, J_{3D}, s) = a J_{2D} - \mu^2 F_b F_s$$

Con la siguiente expresiones para F_b y F_s :

$$F_b = \gamma [-(J_1^0(s) + k_2 s + k_4)^{2-n} (j_1 + k_1 s + k_4)^n + (j_1 + k_1 s + k_4)^2 - k_3 J_1^0(s)]$$

$$F_s = (1 - \beta_s s)^m$$

$$S = \frac{\sqrt{27}}{2} j_{3D} j_{2D}^{-\frac{3}{2}}$$

Donde s es la succión, S es una función de los invariantes de esfuerzo desviador (segundo y tercero) y J_1^0 es una variable interna. El potencial viscoplástico se define de manera similar como:

$$F(J_1, J_{2D}, J_{3D}, s) = a J_{2D} - b \mu^2 F_b F_s$$

Donde b es un parámetro no asociativo. El endurecimiento se describe con la función BBM para la compresibilidad elastoplástica:

$$\lambda(s) = \lambda(0) [(1 - r) \exp(-\beta s) + r]$$

$\lambda(0)$ es la pendiente de la curva relación de vacíos (e) vs esfuerzo neto medio en condiciones saturadas, r define la rigidez máxima del suelo, β controla la tasa de incremento de la

rigidez del suelo con la succión. La modelización se ha realizado en condiciones isotérmicas, por lo que no se han considerado los términos dependientes de la temperatura.

Se consideran la succión y el esfuerzo neto medio en condiciones no saturadas, así como el esfuerzo efectivo en condiciones saturadas, y los invariantes correspondientes son:

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = p - \max(p_g, p_l) = \frac{J_1}{3} - \max(p_g, p_l)$$

$$J_{2D} = \frac{1}{2} \text{tr}(s:s) = \frac{1}{3} q^2$$

$$s = \sigma' - p'I$$

El endurecimiento depende de las deformaciones volumétricas viscoplásticas de acuerdo con:

$$dJ_1^{0*} = \frac{1+e}{(\lambda(0)-k)} J_1^{0*} d\varepsilon_v^{vp}$$

$$dp_0^* = \frac{1+e}{(\lambda(0)-k)} p_0^* d\varepsilon_v^{vp}$$

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{1+e}{\chi(0)} d\varepsilon_v^{vp}$$

Donde p_0^* es el esfuerzo de preconsolidación para condición saturadas.

Lo cual es equivalente al modelo BBM. Cabe destacar que al usar $k_1 = 3k$, $k_2 = 3k$, $k_3 = 0$, $k_4 = 0$, $a = 3$, $\gamma = -\frac{1}{9}$ y $F_s = 1$:

$$F(q, p, s) = q^2 + \mu^2 [-(p_0(s) + ks)^{2-n} (p + ks)^n (p + ks)^2]$$

El valor de k tiene en cuenta el aumento de la resistencia a tracción debido a la succión. De la misma manera, el potencial viscoplástico se describe como:

$$G(q, p, s) = q^2 + b\mu^2 [-(p_0(s) + ks)^{2-n} (p + ks)^n (p + ks)^2]$$

2.4.2.4 Modelos constitutivos Hidráulicos

Debido a que las simulaciones son hidromecánicas, es necesario definir las leyes constitutivas hidráulicas relacionadas con el flujo de agua.

2.4.2.4.1 Curva de retención de agua

La relación entre la succión ($P_g - P_l$), donde P_g es la presión del gas considerada constante, y el grado de saturación (S_r) sigue el modelo de Van Genuchten, (1980).

$$S_e = \frac{S_r - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{-\lambda}$$

Donde: S_{rl} es el grado de saturación residual (igual a 0), S_{ls} es el grado máximo de saturación (igual a 1), por lo tanto $S_e = S_r$. P y λ son los parámetros del modelo. Estos parámetros pueden depender de la porosidad según las siguientes ecuaciones:

$$P_0(\phi) = P_0 \exp(a(\phi_0 - \phi))$$

$$\lambda(\phi) = \lambda_0 \exp(a(\phi_0 - \phi))$$

Donde a , b y ϕ_0 son parámetros. P depende de la temperatura. Debido a que las simulaciones se realizaron en condiciones isotérmicas, $P = P_0$.

2.4.2.4.2 Flujo de agua

El flujo de líquido q_l sigue la ley de Darcy.

$$q_l = -\frac{k k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l g)$$

donde k es la permeabilidad intrínseca, μ_l la viscosidad del líquido, ρ la densidad del líquido y k_{rl} la permeabilidad relativa.

$$k = k_0 \exp(b(\phi - \phi_0))$$

El líquido es la fase cuyos componentes son agua y aire disuelto. Dado que las simulaciones son isotérmicas y la presión del gas es constante, el flujo no advectivo es nulo y las fases de gas y líquido pueden identificarse como los componentes aire y agua, respectivamente.

3. Metodología

El presente Trabajo de Aplicación consistió en realizar un análisis de sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación de estructuras de pavimento, conformadas con MGMs, incluyendo el efecto de la succión y modelos elásticos lineales y no lineales, mediante el software CODE_BRIGHT[®] y GiD[®].

Con base en el objetivo principal de este Trabajo de Aplicación la metodología se estructuró en varias etapas claves, comenzando con una revisión exhaustiva de la literatura técnica, la cual permitió establecer un marco teórico sólido y obtener parámetros típicos de materiales granulares marginales. Posteriormente, se realizó la caracterización de estos materiales, basada en estudios previos, enfocándose en propiedades críticas para la modelación numérica, como la succión y la curva de retención de agua. Utilizando el software CODE_BRIGHT[®], se desarrolló un modelo numérico que simuló el comportamiento de estructuras de pavimento bajo distintas condiciones de succión, seguido de un análisis detallado de los resultados obtenidos. Finalmente, se discutieron los hallazgos en el contexto de la ingeniería de pavimentos, ofreciendo conclusiones y recomendaciones basadas en el desempeño de los materiales modelados. La investigación concluyó con la redacción y presentación detallada del proceso y los resultados.

3.1 Revisión bibliográfica

Se llevó a cabo una exhaustiva revisión de la literatura existente, con el fin de establecer un marco teórico robusto en torno a los materiales granulares marginales, los efectos de succión en suelos no saturados y su influencia en el comportamiento de las estructuras de pavimento. Se revisaron estudios previos relacionados con la modelación numérica de MGMs, particularmente aquellos que emplearon el software CODE_BRIGHT[®] para simular comportamientos geotécnicos bajo condiciones hidromecánicas.

3.2 Caracterización de los Materiales Granulares Marginales (MGM)

La caracterización de los materiales granulares marginales se basó en una revisión exhaustiva de la literatura técnica, con el objetivo de identificar y obtener parámetros típicos para este tipo de materiales. Se consideraron estudios previos que documentaron propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de materiales granulares marginales utilizados en la construcción de terraplenes viales. La recopilación de datos incluyó parámetros como granulometría, límites de Atterberg, resultados de ensayos Proctor y desgaste en la máquina de los ángeles.

Adicionalmente, se prestó especial atención a la evaluación de propiedades succión-dependientes, tales como la curva de retención de agua y la permeabilidad en función del grado de saturación, que son esenciales para modelar el comportamiento de estos materiales bajo condiciones no saturadas. Esta aproximación se fundamentó en la necesidad de utilizar datos representativos y verificados, garantizando así que los parámetros de entrada para el modelado en CODE_BRIGHT® reflejaran adecuadamente las características típicas de los MGMs.

3.3 Modelación numérica

Se desarrolló un modelo numérico para simular el comportamiento de estructuras de pavimento que incluyeran capas de materiales granulares marginales MGMs, considerando los efectos de succión. La geometría del problema y las condiciones de contorno se definieron con base a un caso de estudio representativo.

Utilizando CODE_BRIGHT®, se implementó el modelo con los parámetros obtenidos durante la caracterización de los materiales. Se consideraron diferentes escenarios de succión para analizar su influencia en la respuesta estructural del pavimento. Finalmente, se llevó a cabo una validación del modelo, comparando los resultados numéricos con datos experimentales o de campo disponibles.

A continuación, se detalla de manera breve el flujo de trabajo y las consideraciones contempladas en las modelaciones numéricas.

- Definición de la geometría: puntos, líneas y superficies
- Definir atributos y condiciones: datos del problema, materiales, condiciones y datos del intervalo.

- Generación de la malla
- Ejecutar simulaciones
- Visualización de resultados

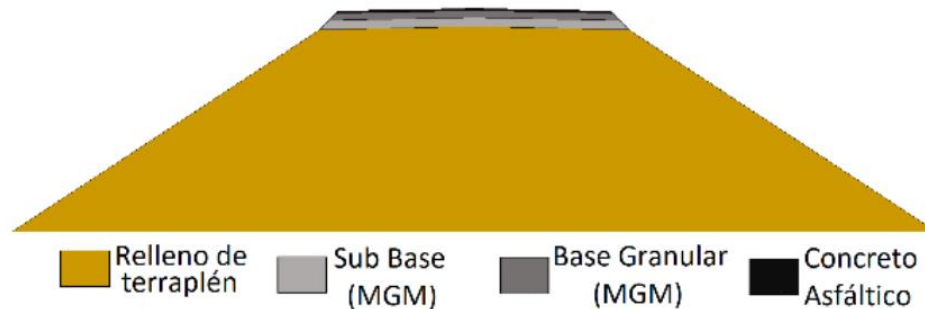
3.3.1 Definición de la geometría

Al definir la geometría, el software GiD ® trabaja esencialmente como un simple (Computer Aided Design) por sus siglas en inglés, con la diferencia que GiD ® construye la geometría en un modo jerárquico. Esto quiere decir que una entidad de mayor nivel (i.e. volumen) es construido por entidades de menor nivel (i.e. superficies).

El modelo multicapa que se adoptó corresponde al presentado por Leiva & Solano (2022), el cual se expone en la Figura 7. En este modelo, se simula uno de los carril de la estructura de pavimento con una inclinación de 2% de la capas por efecto de bombeo y se presenta un terraplén con una inclinación en la SBR de 1,5H:1,0V y en el CA, BG y SBG de 1,0H:1,0V. El modelo considero dos llanta del eje sencillo rueda doble. Las capas corresponden a 10 cm de concreto asfáltico, base y subbase de MGM de 25 cm respectivamente, desplantadas sobre un material de relleno de profundidad 4,0 m que conforma el terraplén. Esta geometría de análisis corresponde a una estructura de pavimento en vía de bajo volumen de tránsito.

Figura 7.

Geometría de la sección de análisis



Nota. Adaptada de Leiva & Solano (2022)

Al generar la geometría de la sección transversal de la vía, se identificó una simetría respecto al eje central. Aprovechando esta característica, se optó por modelar únicamente la mitad del terraplén (véase Figura 8), lo cual optimiza los recursos computacionales y reduce el tiempo de procesamiento necesario para las simulaciones. Adicionalmente, la modelación numérica se realizó en 2D, dado que se cumple con la condición de deformación plana en el eje perpendicular a la sección del terraplén, permitiendo una representación adecuada del comportamiento estructural.

puede determinar si el programa realizará copias de seguridad de las simulaciones y si existe axisimetría en el modelo (véase Figura 9.-a).

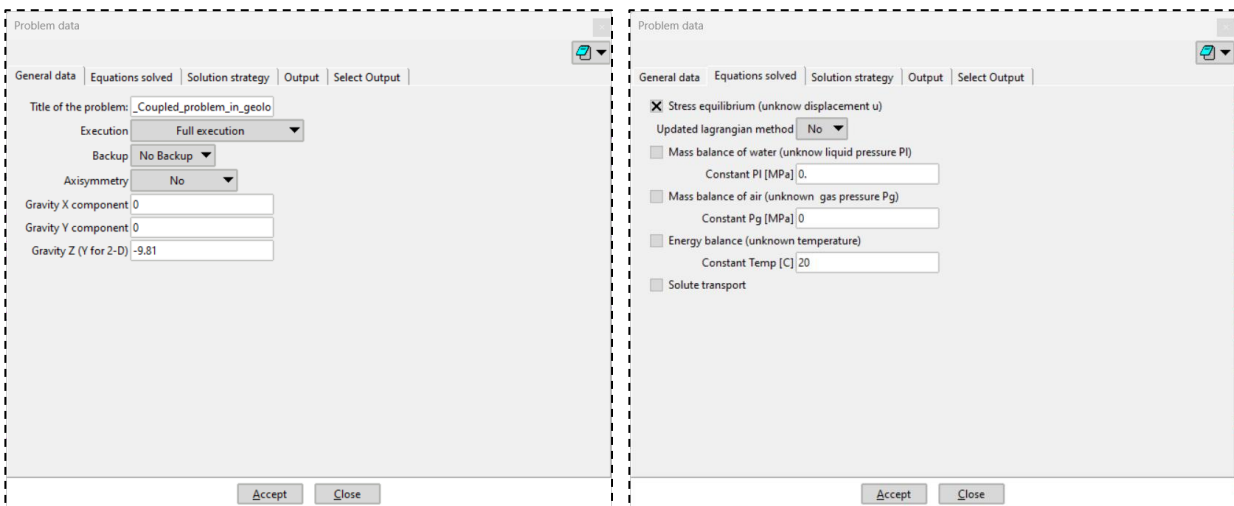
Ecuaciones empleadas: Esta opción permite definir las ecuaciones a resolver, cualquier combinación entre el equilibrio de esfuerzos, el balance de masa de agua, el balance de masa de aire, el balance de energía y el balance de especies conservativas (véase Figura 9.-b).

Estrategia de solución: La estrategia de solución contiene los parámetros que definen la estrategia utilizada para lograr la solución de la simulación (véase Figura 9.-c).

Salidas: Esta opción permite definirle a programa el de frecuencia de escritura o de datos de salida de la simulación numérica (véase Figura 9.-d)

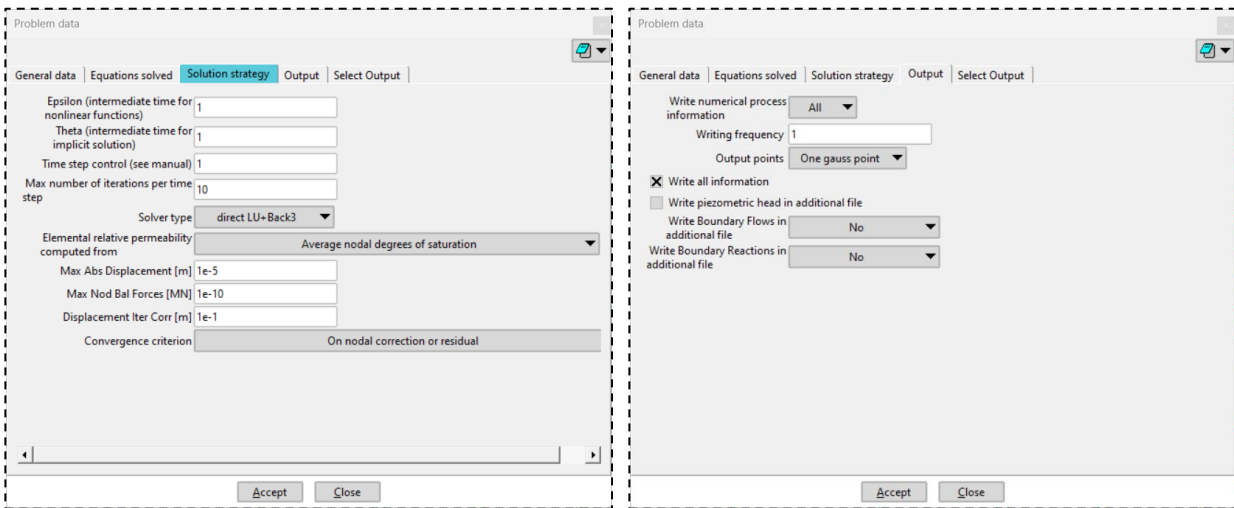
Figura 9

Ventana de Datos del Problema: Ventana general



(m) Datos generales

(n) Ecuaciones empleadas



(o) Estrategia de solución

(p) Salidas

Nota. Elaboración Propia.

3.3.2.2 Materiales

Para definir los materiales de la sección vial propuesta, se asignó en el software CODE_BRIGHT ® las propiedades y características tanto mecánicas como hidráulicas que describen de manera aproximada un material específico.

En este contexto, en CODE_BRIGHT ® Los materiales deben definirse a partir de un material genérico, validando los datos antes de asignarlos a la geometría y respetando la estructura jerárquica para evitar conflictos. Las propiedades de los materiales pueden variar en intervalos o mantenerse constantes, y cada ley constitutiva se define por un número de intervalos, un índice ICL que la identifica y una serie de parámetros específicos (ITYCL y P1 a P10) que deben configurarse según la opción deseada.

3.3.2.2.1 *Parámetros mecánicos del modelo elástico lineal*

En primera instancia, se llevaron a cabo simulaciones empleando la ley constitutiva de análisis elástico lineal con el fin de analizar el comportamiento de todos los materiales que

conforman la estructura. Los parámetros fundamentales utilizados por el software para definir este comportamiento mecánico se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros mecánicos del modelo elástico lineal

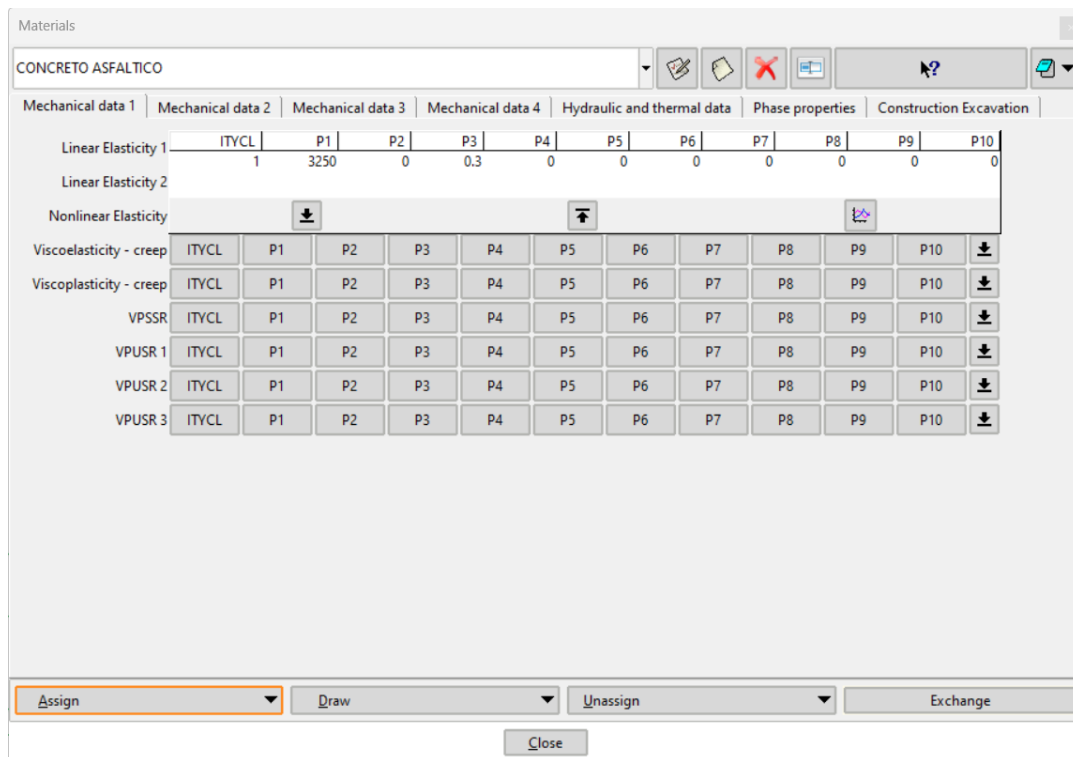
ITYCL	1
P1	Módulo elástico (E)
P3	Relación de Poisson (ν)

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 10 se presenta a modo de ejemplo la ventana de asignación de materiales para el modelo elástico lineal.

Figura 10.

Ventana de asignación de materiales para modelos elásticos lineales en CODE_BRIGHT®



Nota. Elaboración Propia

3.3.2.2.2 *Parámetros mecánicos del modelo de Superficies de Estado*

Para simular comportamientos no lineales, se utilizó la ley constitutiva propuesta por Alonso & Lloret (1985), que está incorporada en CODE_BRIGHT ®. Este software emplea la deformación volumétrica y define los parámetros presentados en la Tabla 3.

Tabla 3

Parámetros mecánicos del modelo de Superficies de Estado

ITYCL	1
P1	a ₁ , coeficiente que controla los cambios de deformación con los cambios de esfuerzos
P2	a ₂ , coeficiente que controla los cambios de deformación con los cambios de succión
P3	a ₃ , coeficiente de acoplamiento que relaciona los dos coeficientes a ₁ y a ₂
P7	Módulo Bulk mínimo (MPa)

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 11 se presenta a modo de ejemplo la ventana de asignación de materiales para el modelo de Superficies de Estado.

Figura 11.

Ventana de asignación de materiales para modelo de superficies de estado en *CODE_BRIGHT*®

The screenshot shows the 'Materials' window for 'BASE MGM'. The 'Mechanical data 1' tab is selected, displaying the following parameters:

Property	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Linear Elasticity 1											
Linear Elasticity 2											
Nonlinear Elasticity											
Viscoelasticity - creep	1	-1E-2	-1E-3	0	0	0.35	0	100	0	0	0
Viscoplasticity - creep											
VPUSSR											
VPUSR 1											
VPUSR 2											
VPUSR 3											

At the bottom of the window, there are buttons for 'Assign', 'Draw', 'Unassign', 'Exchange', and 'Close'.

Nota. Elaboración Propia

3.3.2.2.3 Parámetros mecánicos del modelo Básico de Barcelona

Para simular comportamientos no lineales e incluir leyes constitutivas para suelo no saturados, se empleó el Modelo Básico de Barcelona (BBM), que es un modelo para suelos no saturados basado en la teoría de esai' A N & Zhang (1987). Este modelo se implementa en *CODE_BRIGHT*® mediante las tres opciones de VPUSR 1, 2 y 3, configuradas con ICL = 34, 35 y 36. En la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 se presentan los diferentes parámetros considerados.

Tabla 4*Parámetros mecánicos del modelo constitutivo de viscoplasticidad BBM (VPUSR 1)*

ITYCL	1
P1	$\Gamma_0 = \text{Fluididad} = 1/\text{Viscosidad}$ (para plasticidad, utiliza un valor suficientemente grande)
P2	N: función de esfuerzos
P3	$F_0 = 1 \text{ MPa}$
P4	$\Gamma = \Gamma_0 \exp(\delta s)$
P5	B = parámetro no asociativo

*Nota. Elaboración Propia***Tabla 5***Parámetros mecánicos del modelo constitutivo de viscoplasticidad BBM (VPUSR 2)*

ITYCL		1
P1	n	Potencia en F y G (valor entero)
P2	γ	Parámetro en F y G
P3	β_s	Valor típico: 0 (entonces $F_s = 1$, y J3D no es considerado)
P4	m	Valor típico: -0.5
P5	μ_{DRY}	Para algunos casos, $\mu = \text{MDRY}$, que corresponde aproximadamente al modelo Cam-Clay.
P6	-	

P7	$(J_1^{0*})_F$	Valor positivo, tamaño inicial de F (nota que este es el primer invariante)
P8	$(J_1^{0*})_G$	Valor positivo, tamaño inicial de G (nota que este es el primer invariante)
P9	a	Parámetro en F y G
P10	μ_{SAT}	Para algunos casos, $\mu = MSAT$, que corresponde aproximadamente al modelo Cam-Clay.

Nota. Elaboración Propia

Tabla 6

Parámetros mecánicos del modelo constitutivo de viscoplasticidad BBM (VPUSR 3)

ITYCL	1	
P1	κ	Parámetro de compresión elástica
P2	$\lambda(0)$	Parámetro de compresión viscoelástica
P3	r	Parámetro en la curva LC
P4	β	Parámetro en la curva LC
P5	p^c	Parámetro en la curva LC
P6	k_1	
P7	k_2	
P8	k_3	
P9	k_4	

Nota. Elaboración Propia

3.3.2.2.4 *Parámetros hidráulicos*

Las leyes constitutivas que utiliza el programa *CODE_BRIGHT*® para este tipo de análisis son la curva de retención, la permeabilidad intrínseca y la permeabilidad relativa de la fase líquida.

Curva de Retención: Para vincular la succión con el grado de saturación en los materiales analizados, se tomaron como referencia los datos de curvas de retención para materiales de relleno de terraplenes publicados por Lloret et al., (2010). La curva de retención utilizada corresponde al modelo de Van Genuchten (1980) que depende principalmente del valor de presión de entrada de aire del suelo (P_0), la succión ($P_g - P_l$), un parámetro de forma " λ " y el grado de saturación efectivo " S_e ", dichos parámetros se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7

Parámetros de la curva de retención

ITYCL	1
P1	P_0 , presión del valor de entrada de aire (MPa)
P2	Tensión superficial (Nm^{-1})
P3	λ , función de forma
P4	S_{rl} , Saturación residual
P5	S_{ls} , Saturación máxima

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 12 se presenta a modo de ejemplo la ventana de asignación de los parámetros para la curva de retención de cada material.

Figura 12

Ventana de asignación de parámetros para curva de retención en CODE_BRIGTH®

The screenshot shows the 'Materials' window for 'BASE MGM'. The 'Hydraulic and thermal data' tab is active. The 'Retention Curve' section shows values for ITYCL, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, and P10. Below this, there are several rows of parameters, each with a grid for assigning values to ITYCL and P1 through P10. The 'Close' button is at the bottom.

Property	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Retention Curve	1	1	0.072	0.5	0.1	0.99	0	0	0	0	0
Retention Curve 2											
Intrinsic Permeability											
Liquid Phase Relative Permeability											
Gas Phase Relative Permeability											
Diffusive Flux of Vapour											
Diffusive Flux of Dissolved											
Dispersive Flux of Mass and Energy											
Conductive Flux of Heat 1											
Conductive Flux of Heat 2											

Nota. Elaboración Propia

Permeabilidad Intrínseca: *CODE_BRIGTH®* no emplea la conductividad hidráulica como un dato de entrada. En su lugar, esta se calcula a partir de la permeabilidad intrínseca del material en cuestión, la viscosidad dinámica del fluido y la permeabilidad relativa del fluido. En este contexto, se adoptaron valores típicos de permeabilidad relativa para materiales granulares, considerando una magnitud uniforme en todas las direcciones. La Tabla 8 muestra los parámetros necesarios en el software para simular la permeabilidad intrínseca de los materiales.

Tabla 8*Parámetros de permeabilidad intrínseca*

ITYCL	1
P1	k_{11} , permeabilidad intrínseca en la primera dirección
P2	k_{22} , permeabilidad intrínseca en la segunda dirección
P3	k_{33} , permeabilidad intrínseca en la tercera dirección

Nota. Elaboración Propia

Permeabilidad relativa en fase líquida: Por defecto, se emplea la forma coherente de la permeabilidad relativa según el modelo de Van Genuchten (1980). Para este parámetro, se utilizaron los valores de referencia establecidos por Lloret et al., (2010). Los parámetros de permeabilidad relativa aplicados en la modelación se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9*Parámetros de permeabilidad relativa en fase líquida*

ITYCL	5
P2	Constante - A
P3	λ , función de forma
P4	S _{rl} , Saturación residual
P5	S _{ls} , Saturación máxima

Nota. Elaboración Propia

3.3.2.3 Condiciones del problema

Las condiciones son todas las propiedades de un problema —excluyendo los materiales— que pueden asignarse a una entidad. En el modelo numérico se han incluido varios tipos de

condiciones: condiciones de fuerza/desplazamiento, condiciones de flujo, incógnitas iniciales, porosidad (y otras variables), esfuerzos iniciales, ancho de elemento de unión, ubicación de evolución temporal, etc. Adicionalmente, la ventana de condiciones permite elegir entidades a las que se les asignarán (punto, línea, superficie o volumen en modo de visualización de geometría; y nodo o elemento en modo de visualización de malla) y seleccionar diferentes tipos de condiciones.

3.3.2.3.1 Porosidad inicial

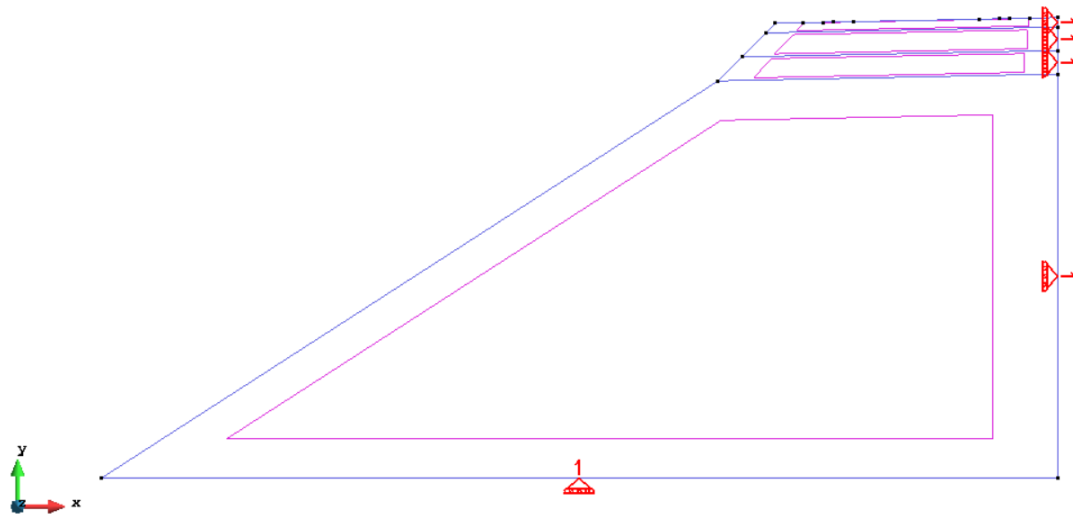
Es fundamental considerar la porosidad de cada material de forma individual, estimando estos valores a partir de materiales que ya han sido caracterizados y que se utilizan comúnmente en la construcción de vías.

3.3.2.3.2 Presión de fluido inicial

Para evaluar las variaciones de presión del líquido en la modelación, es fundamental asignar esta variable a la entidad superficie de cada material, simulando una presión de agua inicial con valores de -0.2 MPa para el concreto asfáltico y el material de relleno del terraplén, y de -0.15 MPa para la base y subbase de MGM. Además, se considera que hay una interacción con el entorno, que incluye los efectos de la presión atmosférica, cuantificados en 0.1 MPa, que actúan sobre todas las superficies.

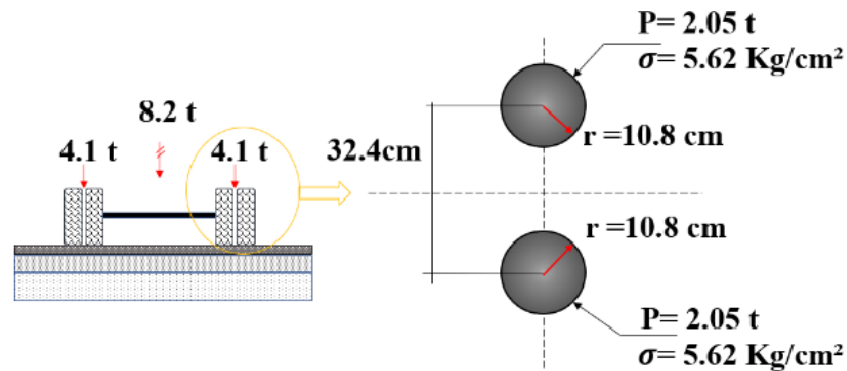
3.3.2.3.3 Condiciones de fuerza/desplazamiento y límites de flujo

Las condiciones fundamentales de restricción de desplazamiento indican que la sección vial, en términos generales, debe tener limitaciones en su movimiento. En este caso, dichas restricciones se aplican a los ejes principales "x" y "y". En la Figura 13 se presenta un esquema general de las restricciones de desplazamiento aplicados a todas las simulaciones numéricas ejecutadas.

Figura 13*Restricciones de desplazamiento*

Nota. Elaboración Propia

En el problema planteado, se consideró la aplicación de fuerzas distribuidas; estas abarcan el efecto de la presión atmosférica en el contorno de los materiales, cuantificando este valor en 0,1 MPa, que se asigna a las líneas que representan el borde del material expuesto al entorno. Otra condición de frontera para evaluar el comportamiento de los materiales es el impacto causado por el paso de vehículos. En este caso, se utilizan las cargas del eje de referencia de 80 kN (eje simple con rueda doble); se tomó en cuenta la distancia del eje trasero de un camión, la cual corresponde a 1,88 m. En la Figura 14 se muestra la configuración de carga del eje de referencia, usada para analizar esfuerzos y deformaciones. Estas cargas se incorporaron a la simulación como fuerzas distribuidas en las líneas modeladas como improntas sobre el concreto asfáltico.

Figura 14*Configuración de carga del eje de referencia**Nota. Adaptada de Leiva & Solano (2022)*

Por otro lado, para simular variaciones en el grado de saturación de los materiales, es fundamental asignar las condiciones de flujo. Para simular la saturación del talud, se estableció una condición de entrada de masa y flujo de agua en los borde de los taludes del terraplén. Asimismo, se definió la condición de succión al aplicar humedad relativa y fronteras impermeables en la corona del talud correspondiente al concreto asfáltico.

Por lo tanto, las condiciones de frontera de flujo son:

- Entrada de masa para una presión de fase prescrita en una línea y cara de filtración en los taludes del terraplén.
- Condición impermeable en la corona del terraplén (concreto asfáltico)
- Condición de secado asignado valor positivo a la presión de líquido en los taludes del terraplén.

3.3.2.4 Intervalos de trabajo

Para realizar los cambios en las condiciones y propiedades de los materiales, se establecen intervalos de tiempo que permiten modificar de manera acoplada los parámetros mencionados

anteriormente. En términos generales, los modelos se desarrollan en las fases de equilibrio, humedecimiento y secado; cada fase cuenta con tiempos determinados que permiten al software ejecutar una serie de ecuaciones para lograr la convergencia de los resultados.

En la Tabla 10 se presenta un resumen de los diferentes intervalos de trabajo establecidos para las simulaciones numéricas realizadas. Además, se incluye el modelo constitutivo utilizado en cada intervalo, el cual se indica con la letra "x".

Tabla 10

Intervalos de trabajo

Intervalo	Tiempo (días)		Objetivo	Modelo constitutivo		
	Inicio	Fin		Elástico lineal	Elástico no lineal	BBM
1	-10	0	Equilibrio geo estático	x	x	x
2	0	24	Equilibrio geo estático	x	x	x
3	24	48	Aplicación de carga	x	x	x
4	48	58	Humedecimiento		x	x
5	58	78	Secado		x	x
6	78	88	Humedecimiento		x	x
7	88	100	Secado		x	x

Nota. Elaboración Propia

3.3.3 *Generación de enmallado*

Una vez que se han incorporado los parámetros y condiciones del problema, se procedió con generación del mallado en toda la geometría propuesta. Esto permite definir una cantidad específica de nodos y elementos que el programa *CODE_BRIGHT*® utilizará para llevar a cabo los cálculos necesarios para resolver el equilibrio de esfuerzos y el balance de masa de agua que requiere el software.

3.3.4 *Ejecución y visualización de las simulaciones numéricas*

La Figura 15 muestra esquemáticamente el flujo de trabajo definido en *CODE_BRIGHT*® y GiD® para la ejecución del pre- proceso, proceso y post-proceso de las simulaciones planteadas en este Trabajo de Aplicación.

El pre-proceso básicamente incluye la definición de los datos del problema, materiales, condiciones e intervalos de trabajo como se describió anteriormente.

El proceso se ocupa de la etapa que resuelve el problema numérico. El sistema permitiría llamar al programa de Elementos Finitos sin necesidad de salir del entorno de trabajo. Incluye los cálculos y generación de diferentes archivos en formato *ROOT_GEN.DAT* y *ROOT_GRI.DAT* que genera la información general y geométrica respectivamente.

El post-proceso muestra los diferentes resultados

Geometría: GiD® muestra toda la malla volumétrica, los conjuntos de superficie y las superficies de contorno. También puede cortar y dividir estas geometrías, tanto en su estado original como en su estado deformado, y activarlas o desactivarlas. GiD® ilustra cómo se deformarán las mallas/conjuntos según una determinada variable vectorial. GiD® ofrece dos representaciones: en la primera, todos los resultados se dibujan sobre estas mallas originales o

deformadas (Geometría Principal); en la segunda, se proporciona una representación superpuesta (Mostrar Geometría), que también puede deformarse, pero los resultados se dibujarán sobre la representación principal. El usuario puede comparar las mallas/conjuntos originales/deformados con la segunda representación, que también puede deformarse con la misma o diferente deformación vectorial, o sin deformación. La escala de todas las visualizaciones se puede modificar de manera interactiva.

Mostrar mínimo y máximo: Los valores mínimo y máximo de la variable para las mallas/conjuntos actualmente visualizados pueden aparecer, señalando todos los nodos donde se calculan estos límites, en azul oscuro para los valores mínimos y en rojo para los máximos.

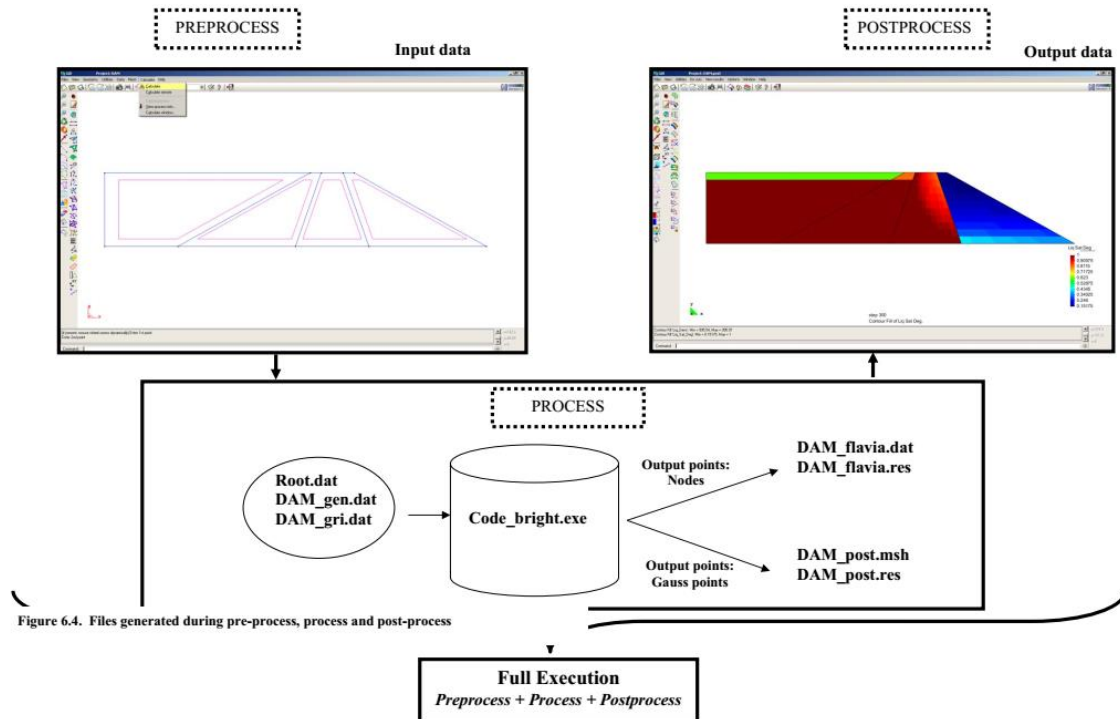
Vectores: GiD ® presenta una distribución de vectores según las variables vectoriales o matriciales en cada nodo, mostrando sus magnitudes y direcciones. La escala de los vectores se puede modificar de manera interactiva.

Campos de contorno: GiD ® representa las variables a través de isosuperficies o contornos que comprenden todos los valores entre dos valores dados. GiD ® aprovecha las capacidades gráficas de la máquina, permitiendo un suavizado de los resultados cuando se utiliza un alto número de colores.

Líneas de contorno: Esta representación es bastante similar a la anterior, pero las bandas uniformes se sustituyen aquí por isolíneas, donde cada una conecta varios puntos con el mismo valor.

Figura 15

Archivos generados durante el pre-proceso, proceso y post-proceso



Nota. Adaptada de Universitat Politècnica de Catalunya (2023)

3.4 Análisis de resultados

Se analizaron los resultados obtenidos de la modelación numérica, evaluando el comportamiento esfuerzo-deformación del terraplén bajo distintas condiciones de succión. Se examinó la distribución de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en las diversas capas del pavimento. Además, se comparó el desempeño de los materiales granulares marginales con el de materiales convencionales utilizados en la construcción de pavimentos. Se realizó una evaluación de la sensibilidad del modelo ante variaciones en los parámetros succión-dependientes.

3.5 Discusión

Se interpretaron los resultados en el contexto de vías de bajo volumen de tránsito, discutiendo la aplicabilidad de los materiales granulados marginales en la construcción de pavimentos bajo diferentes condiciones ambientales. Asimismo, se evaluó la robustez del modelo numérico utilizado, identificando sus limitaciones. Sobre la base de estos análisis, se propusieron recomendaciones para el diseño y construcción de pavimentos que consideren los efectos de succión.

3.6 Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se sintetizaron los hallazgos más relevantes de las simulaciones numéricas y se establecieron las conclusiones correspondientes. También se plantearon recomendaciones prácticas, así como posibles líneas de investigación futura para abordar las limitaciones identificadas en el estudio.

3.7 Redacción y Presentación del Trabajo de Aplicación

Finalmente, se documentó todo el proceso de investigación de manera detallada y coherente, siguiendo el formato establecido por la institución.

4. Proceso de modelación numérica y análisis de resultados

4.1 Preparación del modelo numérico

En este apartado se describió de manera detallada el proceso de preparación y generación del modelo numérico propuesto. A diferencia de lo expuesto en la metodología, la explicación se centró en la creación de la geometría del modelo, la aplicación de las condiciones de contorno y la definición de los parámetros de los materiales utilizados en el análisis. Asimismo, se abordó la configuración de las diferentes etapas o escenarios de análisis, incluyendo la implementación de la succión o la saturación en el talud, de acuerdo con la etapa correspondiente. Este proceso se desglosó para cada modelo constitutivo analizado, proporcionando una descripción exhaustiva de los enfoques utilizados en el Trabajo de Aplicación.

4.1.1 Definición de geometría y datos del problema

4.1.1.1 Geometría del modelo

La geometría del modelo se mantuvo constante para todos los escenarios de análisis y los modelos constitutivos evaluados, correspondiendo a la presentada en la en la Figura 8.

4.1.1.2 Datos del problema

Dado que se planteó un análisis hidromecánico acoplado, en la ventana de 'Datos del Problema', asociada a las ecuaciones a resolver, se asignó al software la utilización de las ecuaciones de equilibrio de esfuerzos (stress equilibrium) y las de balance de masa de agua. En el caso de los modelos puramente mecánicos, únicamente se habilitó la opción para que el software empleara las ecuaciones de equilibrio de esfuerzos.

Figura 16

Ventana de datos del problema: Ecuaciones a resolver. (a) modelo hidromecánico (b) modelo mecánico

(a) Modelos hidromecánicos

(b) Modelos mecánicos

Nota. Elaboración Propia

4.1.2 Parámetros de entrada para los materiales

La Tabla 11 presenta los parámetros asociados a las distintas leyes constitutivas utilizadas para modelar los diferentes materiales que conforman el terraplén evaluado (concreto asfáltico, MGMs y el propio terraplén) en la simulación numérica. En relación con el problema planteado, se ha considerado necesario únicamente completar los datos correspondientes a las variables mecánicas e hidráulicas de los materiales involucrados. Los parámetros mostrados representan los valores iniciales evaluados; además, se realizó un análisis de sensibilidad en aquellos resaltados en color rojo dentro de la Tabla 11, con el propósito de cumplir con el objetivo general de este

Trabajo de Aplicación. Este análisis busca evaluar el impacto de las variaciones en dichos parámetros sobre el comportamiento global del sistema modelado.

Tabla 11

Leyes constitutivas y parámetros necesarios para establecer las propiedades de los materiales

CONCRETO ASFÁLTICO		BASE GRANULAR MGM		SUB-BASE MGM		TERRAPLEN	
<i>Datos mecánicos</i>		<i>Datos mecánicos</i>		<i>Datos mecánicos</i>		<i>Datos mecánicos</i>	
Elasticidad lineal		Elasticidad lineal		Elasticidad lineal		Elasticidad lineal	
ITYCL	1	ITYCL		ITYCL		ITYCL	1
P1	E (MPa) 3250,00	P1	E (MPa)	P1	E (MPa)	P1	E (MPa) 250,00
P3	n 0,30	P3	n	P3	n	P3	n 0,50
Elasticidad no lineal (Superficies de Estado)		Elasticidad no lineal (Superficies de Estado)		Elasticidad no lineal (Superficies de Estado)		Elasticidad no lineal (Superficies de Estado)	
ITYCL	-	ITYCL	1	ITYCL	1	ITYCL	-
P1	a_1 -	P1	a_1 - 1,00E-02	P1	a_1 - 1,00E-02	P1	a_1 -
P2	a_2 -	P2	a_2 - 1,00E-03	P2	a_2 - 1,00E-03	P2	a_2 -
P3	a_3 -	P3	a_3 0,00	P3	a_3 0,00	P3	a_3 -
P4	G (MPa) -	P4	G (MPa) 0,00	P4	G (MPa) 0,00	P4	G (MPa) -
P5	n -	P5	n 0,35	P5	n 0,35	P5	n -
P6	$tens$ (kPa) -	P6	$tens$ (kPa) 0,00	P6	$tens$ (kPa) 0,00	P6	$tens$ (kPa) -
P7	K_{min} -	P7	K_{min} 100,00	P7	K_{min} 100,00	P7	K_{min} -
Modelo básico de Barcelona (BBM)		Modelo básico de Barcelona (BBM)		Modelo básico de Barcelona (BBM)		Modelo básico de Barcelona (BBM)	
VPUSR	1	VPUSR	1	VPUSR	1	VPUSR	1
ITYCL	-	ITYCL	1	ITYCL	1	ITYCL	-
P1	Γ_0 (1/s) -	P1	Γ_0 (1/s) 1000	P1	Γ_0 (1/s) 1000	P1	Γ_0 (1/s) -
P2	N -	P2	N 5	P2	N 5	P2	N -
P3	F_0 (MPa) -	P3	F_0 (MPa) 1	P3	F_0 (MPa) 1	P3	F_0 (MPa) -
P4	δ -	P4	δ -	P4	δ -	P4	δ -
P5	b -	P5	b 0,3	P5	b 0,3	P5	b -
VPUSR	2	VPUSR	2	VPUSR	2	VPUSR	2
ITYCL	-	ITYCL	1	ITYCL	1	ITYCL	-
P1	n -	P1	n 1	P1	n 1	P1	n -
P2	γ -	P2	γ -0.111	P2	γ -0.111	P2	γ -
P5	μ_{DRY} -	P5	μ_{DRY} -	P5	μ_{DRY} -	P5	μ_{DRY} -
P7	$\sigma^*_{(J_1)_F}$ (MPa) -	P7	$\sigma^*_{(J_1)_F}$ (MPa) 0.06	P7	$\sigma^*_{(J_1)_F}$ (MPa) 0.06	P7	$\sigma^*_{(J_1)_F}$ (MPa) -

CONCRETO ASFÁLTICO		BASE GRANULAR MGM		SUB-BASE MGM		TERRAPLEN		
<i>Datos mecánicos</i>		<i>Datos mecánicos</i>		<i>Datos mecánicos</i>		<i>Datos mecánicos</i>		
P8	σ_c (J_1)G (MPa)	-	P8	σ_c (J_1)G (MPa)	0.06	P8	σ_c (J_1)G (MPa)	-
P9	a	-	P9	a	3	P9	a	-
P10	μ_{SAT}	-	P10	μ_{SAT}	0.85	P10	μ_{SAT}	-
	<i>VPUSR</i>	3		<i>VPUSR</i>	3		<i>VPUSR</i>	3
	<i>ITYCL</i>	-		<i>ITYCL</i>	1		<i>ITYCL</i>	-
P1	κ	-	P1	κ	0.000 1	P1	κ	0.000 1
P2	$\lambda(0)$	-	P2	$\lambda(0)$	0.02	P2	$\lambda(0)$	0.02
P3	r	-	P3	r	0.70	P3	r	0.70
P4	β (MPa -1)	-	P4	β (MPa -1)	12	P4	β (MPa -1)	12
P5	p^c (MPa)	-	P5	p^c (MPa)	0.02	P5	p^c (MPa)	0.02
P7	k_2	-	P7	k_2	-0.301	P7	k_2	-0.301
P8	k_3	-	P8	k_3	0.301	P8	k_3	0.301
<i>Datos hidráulicos</i>		<i>Datos hidráulicos</i>		<i>Datos hidráulicos</i>		<i>Datos hidráulicos</i>		
<i>Curva de retención</i>		<i>Curva de retención</i>		<i>Curva de retención</i>		<i>Curva de retención</i>		
	<i>ITYCL</i>	1		<i>ITYCL</i>	1		<i>ITYCL</i>	1
P1	P_0 (MPa)	5	P1	P_0 (MPa)	1	P1	P_0 (MPa)	1
P2	σ_0 (N m ⁻¹)	0,072	P2	σ_0 (N m ⁻¹)	0,072	P2	σ_0 (N m ⁻¹)	0,072
P3	λ	0,5	P3	λ	0,5	P3	λ	0,5
P4	Srl	0,1	P4	Srl	0,1	P4	Srl	0,1
P5	Sls	0,99	P5	Sls	0,99	P5	Sls	0,99
<i>Permeabilidad intrínseca</i>		<i>Permeabilidad intrínseca</i>		<i>Permeabilidad intrínseca</i>		<i>Permeabilidad intrínseca</i>		
	<i>ITYCL</i>	1		<i>ITYCL</i>	1		<i>ITYCL</i>	1
P1	$(k_{11})_0$ (m ²)	1,00E -17	P1	$(k_{11})_0$ (m ²)	1,00E -16	P1	$(k_{11})_0$ (m ²)	1,00E -15
P2	$(k_{22})_0$ (m ²)	1,00E -17	P2	$(k_{22})_0$ (m ²)	1,00E -14	P2	$(k_{22})_0$ (m ²)	1,00E -15
P3	$(k_{33})_0$ (m ²)	1,00E -17	P3	$(k_{33})_0$ (m ²)	1,00E -12	P3	$(k_{33})_0$ (m ²)	1,00E -12
P4	Φ_0	0	P4	Φ_0	0	P4	Φ_0	0
<i>Permeabilidad relativa a la fase líquida</i>		<i>Permeabilidad relativa a la fase líquida</i>		<i>Permeabilidad relativa a la fase líquida</i>		<i>Permeabilidad relativa a la fase líquida</i>		
	<i>ITYCL</i>	5		<i>ITYCL</i>	5		<i>ITYCL</i>	5
P3	λ	0,5	P3	λ	0,5	P3	λ	0,5
P4	Srl	0,1	P4	Srl	0,1	P4	Srl	0,1
P5	Sls	0,99	P5	Sls	0,99	P5	Sls	0,99

Nota. Elaboración Propia

4.1.3 Definición de condiciones

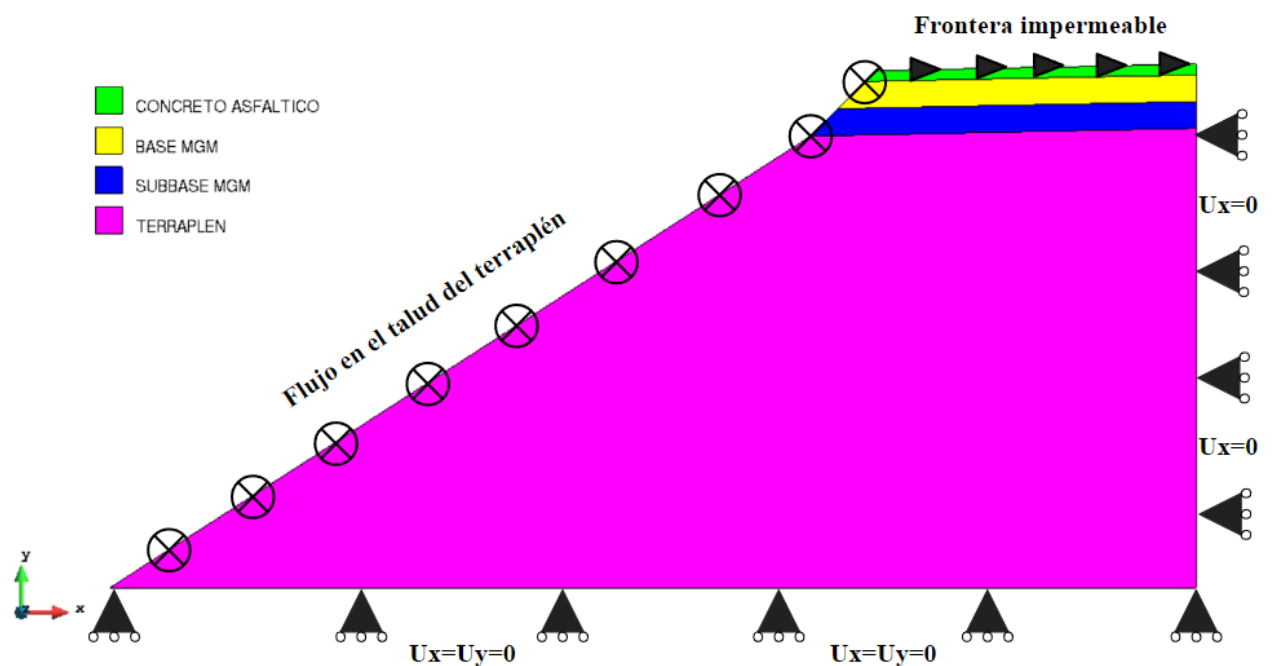
Dado que el modelo propuesto en este Trabajo de Aplicación corresponde a un problema hidromecánico (HM), es imprescindible definir las siguientes condiciones para garantizar la correcta simulación del comportamiento del sistema:

- Condiciones de Contorno Mecánicas
- Condiciones de Contorno de Flujo
- Incógnitas Iniciales
- Esfuerzos Iniciales
- Porosidad Inicial

La Figura 17 muestra esquemáticamente tanto las condiciones de contorno mecánicas como las condiciones de contorno de flujo aplicadas al modelo numérico.

Figura 17

Condiciones de contorno mecánicas y de flujo aplicadas al modelo



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1 Condiciones de Contorno Mecánicas

Para resolver el problema, se establecieron dos restricciones de desplazamiento clave. La primera se implementó en la base del terraplén, prescribiéndose tanto los desplazamientos horizontales como los verticales. La segunda restricción se aplicó en el lado derecho del modelo, limitando únicamente el desplazamiento horizontal.

Por lo tanto, las condiciones de contorno mecánicas definidas fueron:

a) Restricción de los desplazamientos vertical y horizontal a lo largo de la frontera inferior del terraplén $x=0$ y $y=0$

b) Restricción del desplazamiento horizontal a lo largo del lado derecho del modelo $x=0$.

4.1.3.2 Condiciones de contorno de flujo

Para simular los efectos de saturación, secado por aplicación de succión y la implementación de fronteras impermeables en el modelo, se establecieron condiciones de contorno específicas que permiten representar estos fenómenos de manera precisa. A continuación, se detallan los procedimientos y configuraciones implementadas en el modelo para cada uno de estos casos.

4.1.3.2.1 Implementación del efecto de saturación y succión

Para definir el flujo de agua a través de los taludes del terraplén, en el campo de tasa de flujo (Flow Rate) en CODE_BRIGHT®, se seleccionó la tasa de flujo en el contorno (Boundary Flow Rate) y se configuró el campo Gamma para líquido (Gamma for liquid). Se estableció un valor de $-1,0E06$ en el campo Gamma para líquido. Este signo negativo indicaba que las líneas con este tipo de condición de contorno permitían la filtración. Al establecer esta condición, se definió la cara de filtración (Seepage Face) en la pendiente aguas abajo. El coeficiente Gamma para el

líquido (γ_l) actuó como un coeficiente de fuga, es decir, una constante que permitió prescribir la presión con mayor o menor intensidad.

La succión en el talud se aplicó considerando la concentración de vapor de agua en el suelo, la cual está directamente relacionada con la humedad relativa del aire en los poros del suelo. La humedad relativa (HR) es un parámetro que describe la cantidad de vapor de agua presente en el aire en comparación con la cantidad máxima que el aire puede contener a una temperatura específica Fredlund et al., (2012). En el contexto de los suelos, la HR influye en el equilibrio entre la fase líquida y la fase gaseosa dentro de los poros, lo que tiene un impacto directo sobre la succión. La Humedad Relativa se calculó mediante la siguiente ecuación.

$$HR = hr = \frac{u_v}{u_{v0}} * 100$$

Donde,

HR: Humedad relativa, hr: %

u_v : Presión parcial del vapor de agua en el aire, kPa

u_{v0} : presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura, kPa.

Considerando una Humedad Relativa de 98% se aplicó al modelo una presión de líquido de -3,0 MPa.

4.1.3.2.2 Implementación de fronteras impermeables

Para definir la condición de borde impermeable en la capa de concreto asfáltico, se deben seguir los siguientes pasos en el software CODE_BRIGHT®. Primero, seleccione tasa de flujo en el contorno (Boundary Flow Rate) en el campo de tasa de flujo (Flow Rate). Es importante que todos los valores en este campo se mantengan en 0 para garantizar que no haya flujo permitido a

través de la capa. Luego, asigne esta nueva condición a la capa de concreto asfáltico, lo que establecerá un comportamiento impermeable para dicha capa.

4.1.3.3 Incógnitas iniciales

En el problema que se modeló, existieron una incógnita inicial principal. Esta hace referencia a que los MGMs inicialmente se encuentran a la humedad óptima de compactación, por lo tanto, no se encuentran saturados. Por consiguiente, se asignó un valor específico de presión de agua y aire a cada uno de ellos. Dichos valores se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Presión de agua y aire inicial adoptada en los diferentes materiales del modelo

Variable		C.A.	B.G.	S.B.G.	Terraplén
Presión de Agua inicial	Pw (MPa)	-0,4	0,05	0,05	0,05
Presión de aire inicial	Pg (MPa)	0,1	0,1	0,1	0,1

Nota. Elaboración Propia

4.1.3.4 Esfuerzos iniciales

Para establecer un estado de tensión inicial inexistente en el terraplén, se asignó el valor de -0.01 en los campos de tensión X, Y y Z. Este valor se aplicó en toda la estructura vial.

4.1.3.5 Porosidad inicial

Se asignó un valor inicial constante de porosidad en las superficies correspondiente a cada material de la geometría. El valor de la porosidad debe ser menor de 1.

Para los cálculos de esfuerzos totales y efectivos en el suelo, CODE_BRIGHT® utiliza la porosidad del suelo en lugar del peso unitario total. Con el fin de relacionar ambas variables y determinar la porosidad a partir del peso unitario conocido, se empleó la siguiente ecuación.

$$\gamma_{total} = n \times S_r \times \gamma_{agua} + (1 - n) \times \gamma_{solidos}$$

Donde

γ_{total} = peso unitario total del suelo (kN/m^3)

n: porosidad del suelo (-)

γ_{agua} : peso unitario del agua (kN/m^3)

$\gamma_{sólidos}$: peso unitario de lo sólidos (kN/m^3)

La Tabla 13 presenta los valores de porosidad inicial adoptados en el modelo para todos los materiales, así como su respectivo peso unitario total para un grado de saturación del 0%.

Tabla 13

Porosidad inicial adoptada en los diferentes materiales del modelo

Variable		C.A.	B.G.	S.B.G.	Terraplén
Porosidad inicial	n	0,05	0,26	0,26	0,26
Peso unitario total (kN/m^3)	γ_{total}	19,5	15,2	15,2	15,2

Nota. Elaboración Propia

4.1.4 Configuración de escenarios de análisis

Una vez definidos los datos del problema, los materiales y las condiciones del modelo, resulta necesario establecer los intervalos de tiempo para la simulación numérica. En el contexto del modelo propuesto en este Trabajo de Aplicación, las condiciones de contorno deben ajustarse en función del intervalo de tiempo analizado. Es fundamental establecer un intervalo inicial en el que no se aplique ninguna carga (de -10 a 0), lo que permite que el sistema alcance el equilibrio de las condiciones iniciales antes de iniciar el análisis bajo condiciones de carga. Para el primer intervalo de tiempo, se debe seleccionar la opción de fijar los desplazamientos en cero, asegurando así un estado de equilibrio adecuado para la fase posterior del análisis.

La Tabla 14 presenta los valores adoptados en el modelo numérico para cada uno de los intervalos de trabajo planteados.

Tabla 14

Valores ingresados en la ventana de datos de intervalo

Intervalo	Tiempo (días)		Objetivo	Paso de tiempo inicial (días)	Máximo paso de tiempo (días)	Resetear Desplazamiento cero
	Inicio	Fin				
1	-10	0	Equilibrio geo estático	0,01	0,05	Sí
2	0	24	Equilibrio geo estático	0,01	0,05	No
3	24	48	Aplicación de carga	0,01	0,05	No
4	48	58	Humedecimiento	0,01	0,5	No
5	58	78	Secado	0,01	0,5	No
6	78	90	Humedecimiento	0,01	0,5	No
7	90	100	Secado	0,01	0,5	No

Nota. Elaboración Propia

4.2 Calibración de simulaciones numéricas

Inicialmente para todos los modelos planteados, se desarrollaron unas fases o intervalos iniciales con el objetivo de calibrar el comportamiento del sistema.

La calibración de los modelos estuvo directamente relacionada con el tipo de modelo constitutivo empleado. Para el modelo elástico lineal, la calibración se enfocó exclusivamente en las deformaciones iniciales del sistema. En contraste, los modelos no lineales, como el de Superficies de Estado y el Modelo Básico de Barcelona, requirieron una calibración más compleja,

que incluyó tanto las condiciones hidromecánicas como la variación del grado de saturación en el terraplén. Esta calibración hidromecánica se ajustó según los intervalos de trabajo definidos, permitiendo capturar de manera precisa la interacción entre la deformación del terreno y las variaciones en las condiciones de humedad del suelo.

En los siguientes numerales, se presentan la calibración asociadas a cada modelo constitutivo.

4.2.1 Modelo Elástico Lineal

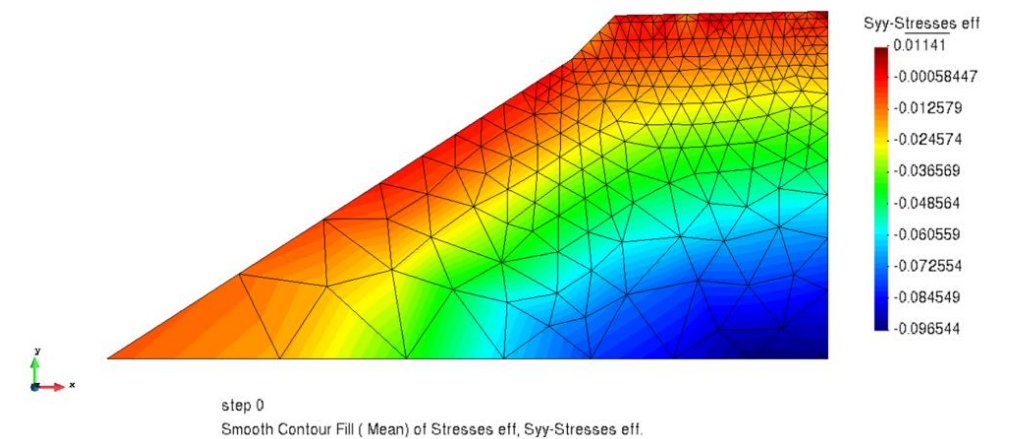
En la calibración de las simulaciones para este modelo constitutivo, se consideraron únicamente las condiciones mecánicas, omitiendo las hidráulicas. El enfoque estuvo en las etapas de equilibrio geostático, descartando las deformaciones asociadas a la construcción del terraplén y centrando el análisis en las inducidas por la aplicación de cargas. Como se muestra en la Tabla 14, la primera etapa (intervalos 1 y 2) incluyó la aplicación de la gravedad y la generación del estado de esfuerzos inicial. Los desplazamientos de esta fase no se consideraron, ya que corresponden al equilibrio de los materiales simulados, y solo se analizaron los causados por la carga vehicular.

En la Figura 18 se presentan los resultados correspondientes a los isocontornos de esfuerzos y desplazamientos verticales obtenidos durante la fase de equilibrio geostático. En las subfiguras Figura 18 (a) y (b), se muestran los resultados del intervalo de trabajo 1, al cual se le asignó una duración de 10 días. En este intervalo, se observa que los desplazamientos aún no están completamente calibrados, ya que se registran deformaciones de hasta 7,0 mm en la carpeta asfáltica del modelo, lo que indica un desajuste inicial en las condiciones de equilibrio.

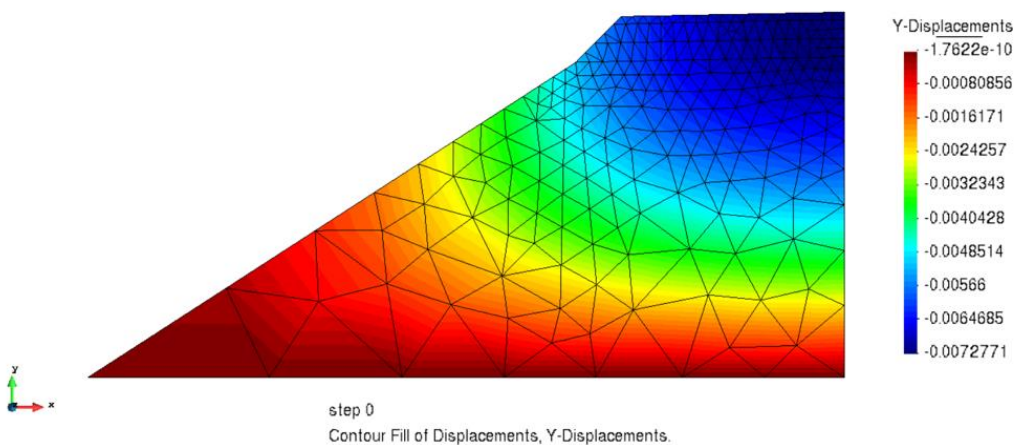
Por otro lado, en la Figura 18 (c) y (d) se presentan los resultados del intervalo de trabajo 2, que tiene una duración de 24 días. En este caso, se evidencia que el modelo ha alcanzado el equilibrio geostático, dado que, bajo las mismas condiciones de esfuerzos, los desplazamientos son prácticamente nulos. Esto sugiere que el sistema ha logrado estabilizarse en cuanto a las deformaciones inducidas por las condiciones geostáticas

Figura 18

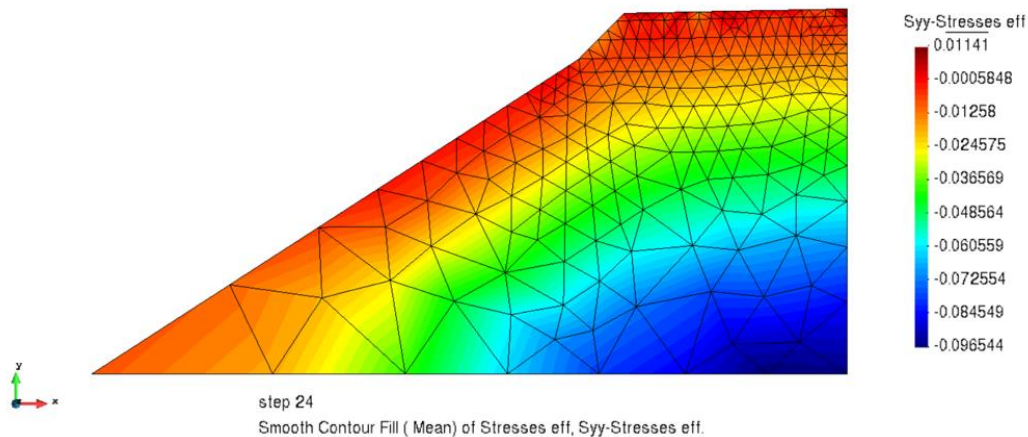
Salidas gráficas de isocontornos de equilibrio geostático en el intervalo 1 y 2



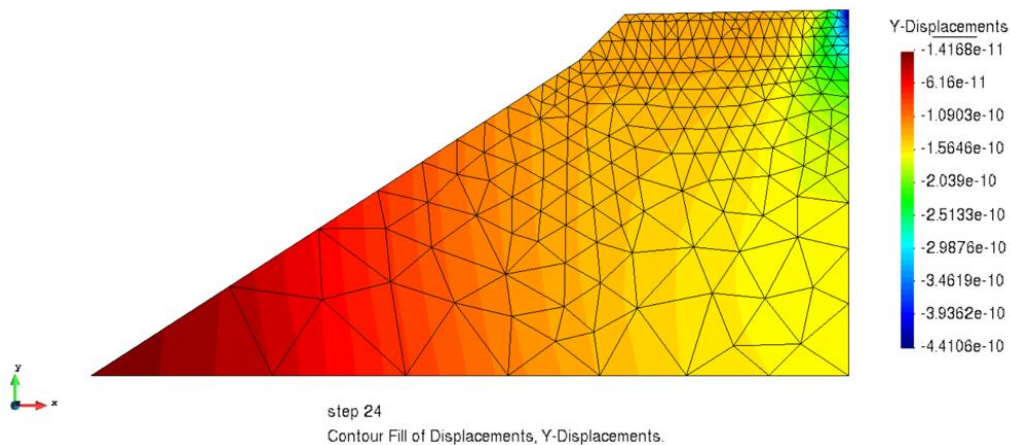
(a) Esfuerzos efectivos – intervalo 1



(b) Desplazamiento vertical – intervalo 1



(c) Esfuerzo efectivo – intervalo 2



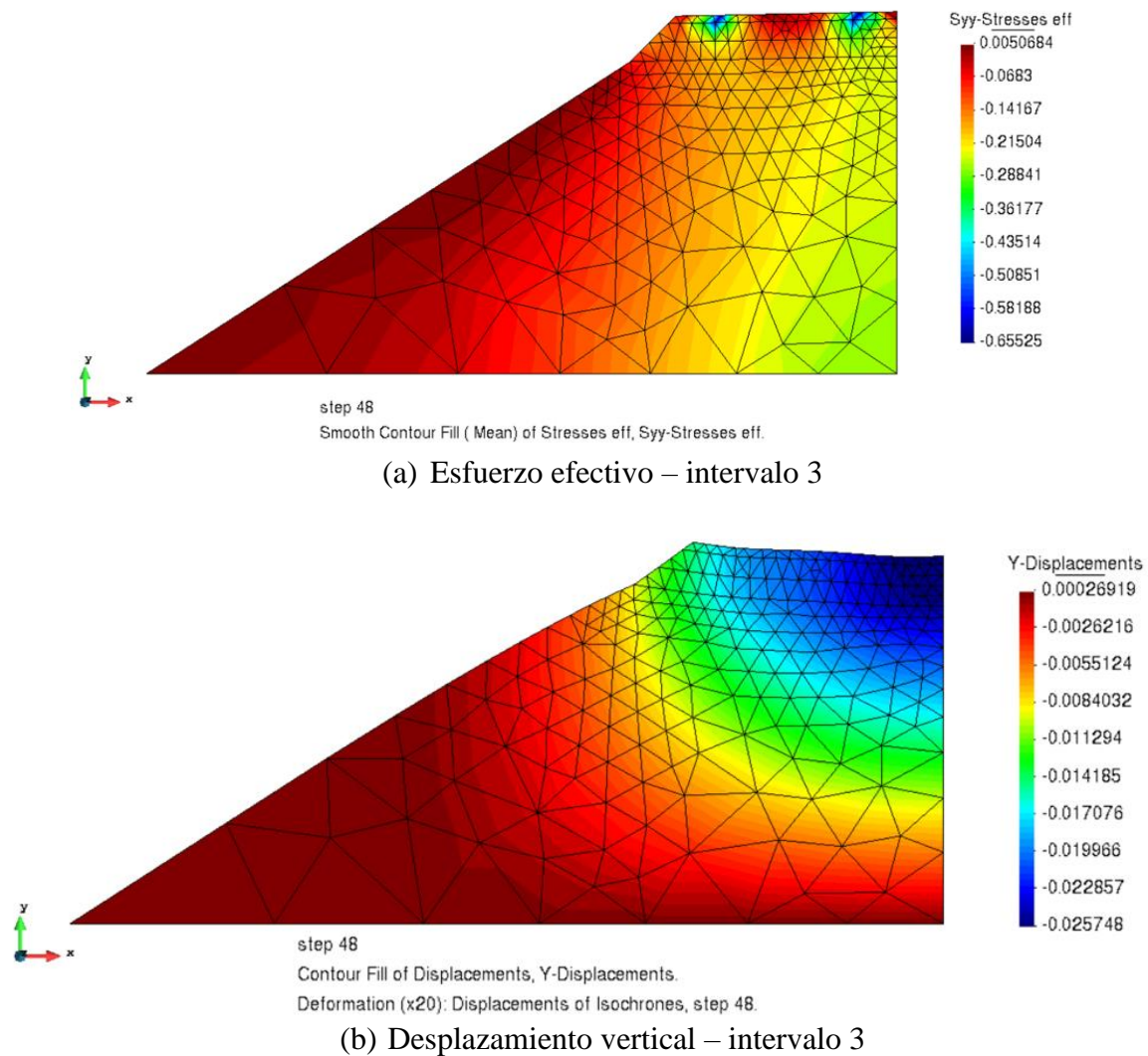
(d) Desplazamiento vertical – intervalo 2

Nota. Elaboración Propia

El intervalo 3 corresponde a la fase en la que se aplicó la carga vehicular sobre el terraplén, lo cual generó una redistribución de esfuerzos en las diferentes capas que lo conforman, tal como se muestra en la Figura 19 (a). Esta aplicación de carga indujo deformaciones en el sistema, siendo más pronunciadas en la cresta del terraplén y, específicamente, en las zonas internas cercanas a la huella de rodadura (véase Figura 19 (b)). Estos resultados indican que esta región del terraplén es la más afectada debido a la transmisión directa de las cargas vehiculares.

Figura 19

Salidas gráficas de isocontornos de esfuerzos y desplazamiento en el intervalo 3



Nota. Elaboración Propia

Con los modelos ya calibrados, se procedió a la ejecución de toda la combinatoria de simulaciones, con el objetivo de realizar análisis de sensibilidad sobre los diferentes parámetros que afectan el comportamiento esfuerzo-deformación del terraplén. Estos análisis se llevaron a

cabo considerando el modelo elástico lineal, permitiendo evaluar la influencia de las variaciones en los parámetros clave sobre el sistema modelado.

4.2.2 Modelo de superficies de estado y viscoplasticidad

En la calibración de las simulaciones para estos modelos constitutivos, se incorporaron de manera integral las condiciones hidromecánicas del suelo. Este proceso consistió en el acoplamiento de los parámetros mecánicos, que gobiernan la respuesta del suelo ante esfuerzos, con los parámetros que regulan el flujo de agua en la matriz porosa. De esta forma, se logró una representación más precisa del comportamiento del suelo bajo condiciones de cambio en su grado de saturación y la consiguiente interacción entre esfuerzos y flujo hidráulico.

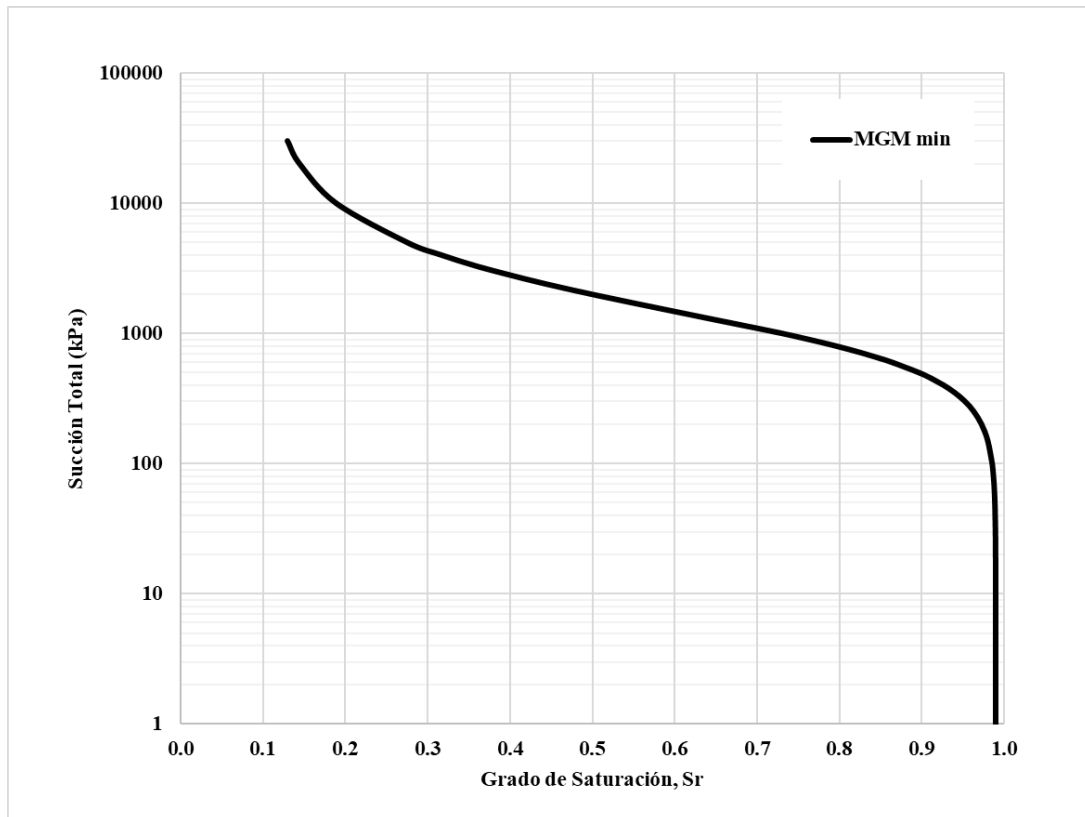
Similarmente al modelo constitutivo elástico lineal, la calibración se enfocó en las etapas de equilibrio geostático, dejando de lado las deformaciones generadas por la construcción del terraplén. En este contexto, se priorizó el análisis de las deformaciones inducidas específicamente por la aplicación de cargas externas y aquellas resultantes de cambios volumétricos relacionados con variaciones en el grado de saturación del suelo. Este enfoque permite una evaluación detallada de los efectos combinados de las cargas y de la succión en la evolución del estado de esfuerzos y deformaciones en el medio granular.

La calibración del modelo se logró mediante la definición precisa de las condiciones de flujo en los contornos de los taludes. La condición inicial del problema, en términos del grado de saturación, corresponde al estado del terraplén tal como fue compactado. Para establecer la succión en el material compactado, se utilizó la curva de retención de agua para materiales granulares marginales, presentada en la Figura 20. A partir de esta curva de retención, se determinó inicialmente el grado de saturación objetivo. Basado en este valor, se definió la succión total a

aplicar en el modelo, asegurando así una representación precisa de las condiciones de humedad y comportamiento hidráulico del material.

Figura 20

Curva de retención característica de materiales granulares marginales



Nota. Elaboración Propia

Con base en lo anteriormente planteado, se definió la condición de flujo correspondiente para cada etapa del análisis, las cuales están asociadas a un equilibrio hidromecánico determinado principalmente por el grado de saturación alcanzado durante la compactación de los materiales. Posteriormente, se establecieron etapas específicas de humedecimiento, correspondientes a eventos de lluvia, y etapas de secado, asociadas a periodos de sequía. Para las etapas de lluvia, se definió un grado de saturación cercano a 1,0, permitiendo así el flujo a través de los taludes del

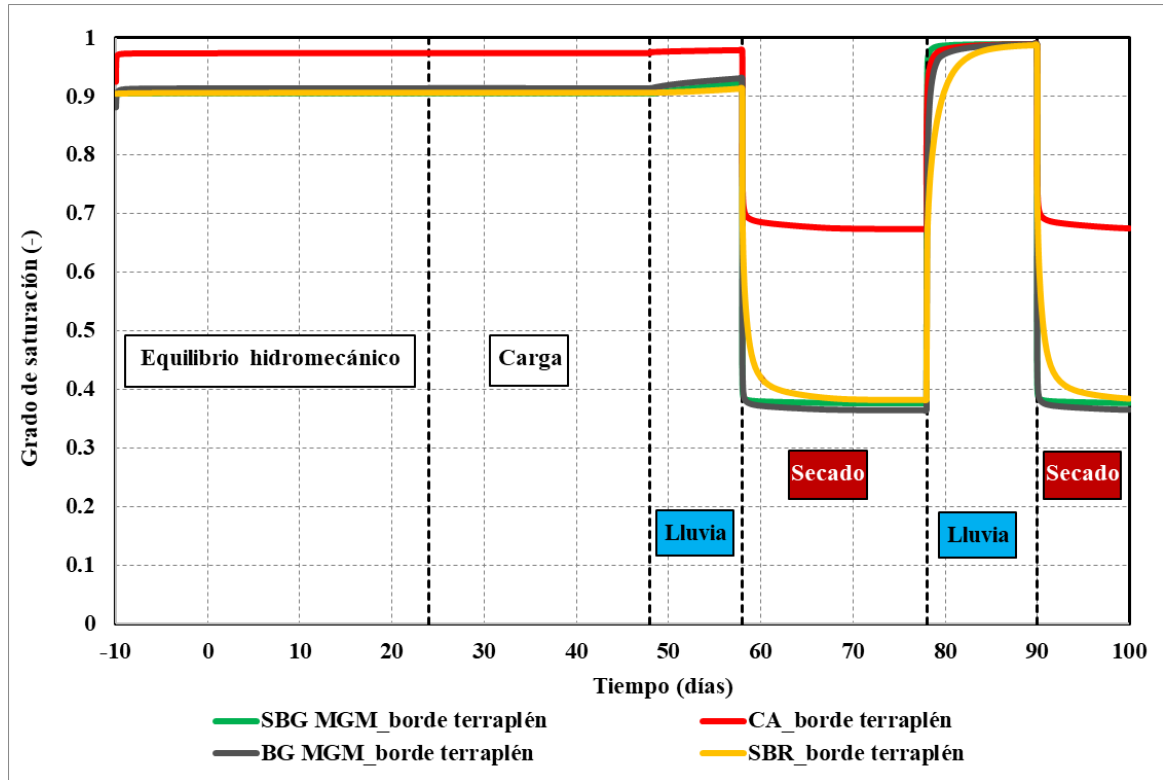
terraplén. En contraste, durante las etapas de sequía o secado, la condición de flujo se determinó en función de la humedad relativa, asignando un valor de succión (presión de líquido negativa) en los contornos de los taludes, con el fin de replicar las condiciones de secado en el material.

La Figura 21 ilustra la evolución del grado de saturación en los distintos materiales considerados en los modelos a lo largo de las etapas definidas en el análisis. En esta figura, se observa claramente cómo el grado de saturación varía en función de las condiciones ambientales simuladas, particularmente en respuesta a los ciclos de secado y humedecimiento. Durante las etapas de secado, los resultados muestran una disminución significativa en el grado de saturación de los materiales, lo cual es coherente con el incremento de la succión aplicada. Este proceso refleja las condiciones de pérdida de humedad asociadas a periodos de sequía y altos niveles de succión en los contornos del modelo. Por otro lado, en las etapas de humedecimiento, correspondientes a periodos de lluvia, se evidencia un incremento en el grado de saturación de los materiales, alcanzando valores cercanos a la unidad. Este comportamiento representa la respuesta de los materiales a la saturación inducida por la infiltración de agua, lo cual permite aproximar la condición de saturación total del terraplén en estas etapas.

Esta variabilidad en el grado de saturación a lo largo de las distintas fases del análisis es fundamental para evaluar el comportamiento hidromecánico de los materiales granulares marginales bajo condiciones cíclicas de humedad, proporcionando una visión detallada del impacto que las fluctuaciones ambientales tienen sobre la estructura del terraplén.

Figura 21

Evolución del grado de saturación en la diferentes materiales del terraplén

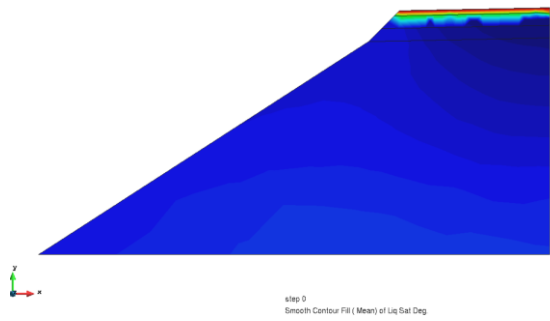


Nota. Elaboración Propia

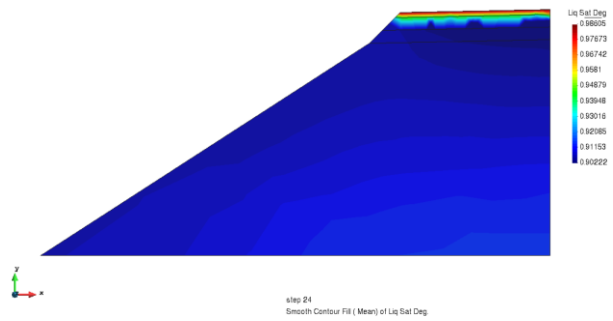
La Figura 22 muestra las representaciones gráficas de los isocontornos correspondientes a la evolución del grado de saturación a lo largo de las diferentes etapas del modelo. Estas visualizaciones fueron fundamentales para verificar la precisión de la calibración del modelo numérico, ya que permiten observar las variaciones espaciales y temporales del grado de saturación en los materiales. Este análisis visual facilita la identificación de zonas críticas de saturación y secado, confirmando que el modelo reproduce adecuadamente las condiciones hidromecánicas esperadas en cada etapa del proceso simulado.

Figura 22

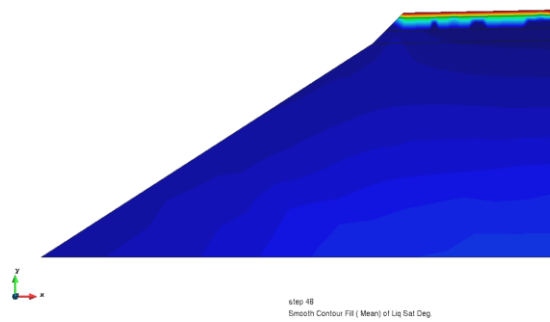
Salidas gráficas de isocontornos de variación del grado de saturación en los diferentes intervalos de trabajo



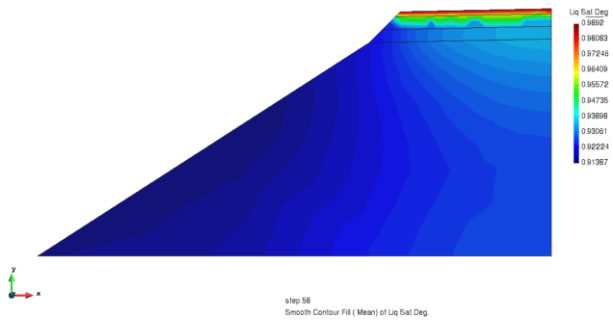
(a) Intervalo 1 (paso 0)



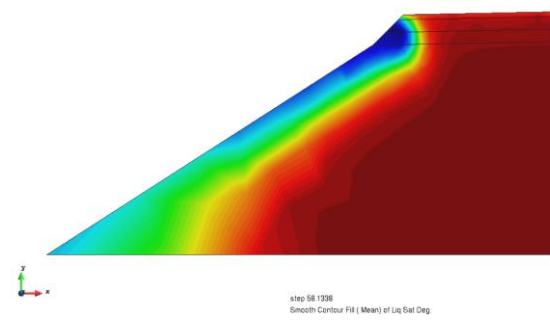
(b) Intervalo 2 (paso 24)



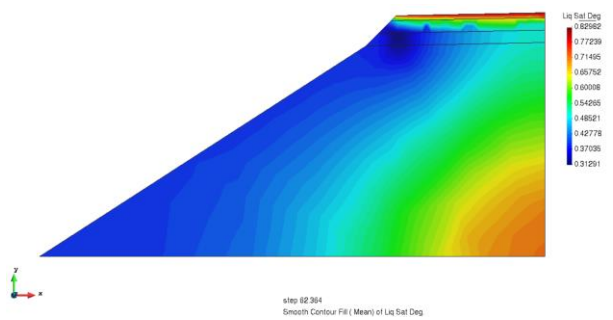
(c) Intervalo 3 (paso 48)



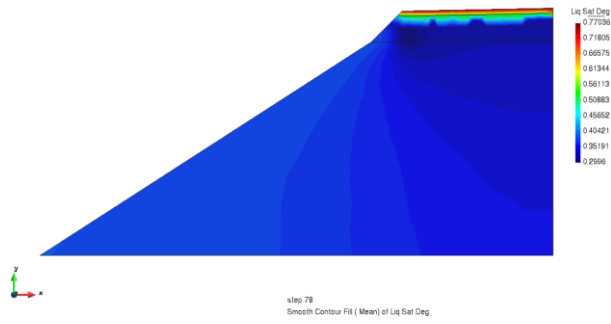
(d) Intervalo 4 (paso 58)



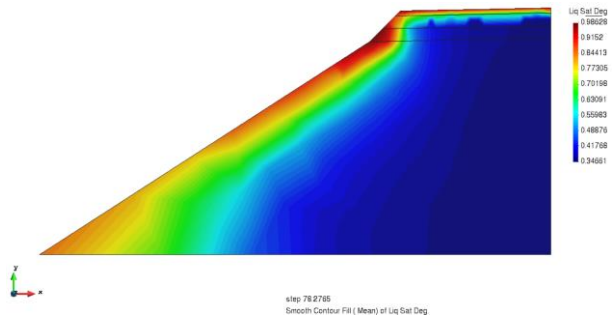
(e) Intervalo 4 (paso 58.13)



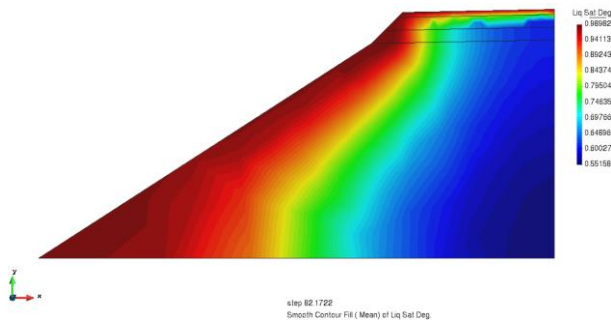
(f) Intervalo 4 (paso 62.36)



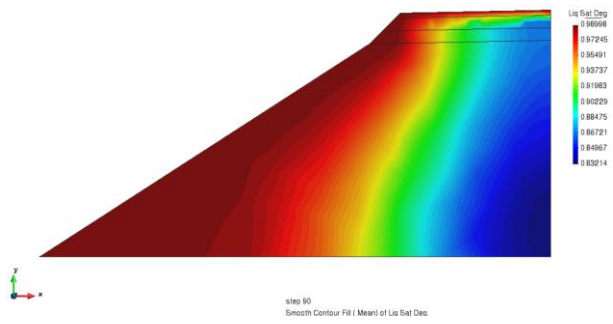
(g) Intervalo 6 (paso 78)



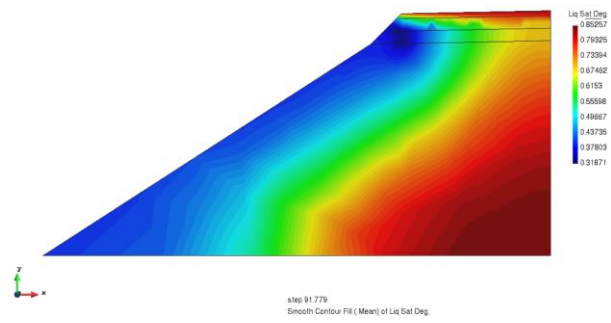
(h) Intervalo 6 (paso 78.2)



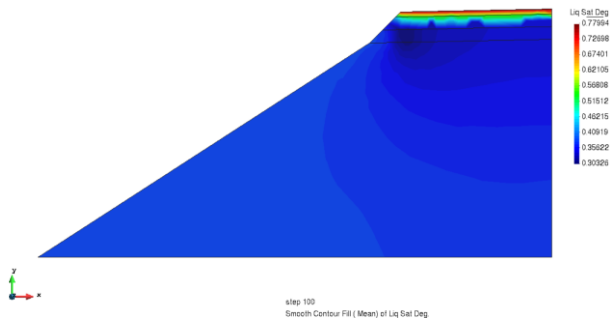
(i) Intervalo 6 (paso 82.17)



(j) Intervalo 6 (paso 90)



(k) Intervalo 7 (paso 91.77)



(l) Intervalo 7 (paso 100)

Nota. Elaboración Propia

4.3 Análisis de resultados

Los análisis de resultados presentados en este estudio poseen dos limitaciones importantes que deben ser tenidas en cuenta al interpretar los hallazgos. La primera corresponde a la precisión de los esfuerzos obtenidos, los cuales no son completamente exactos debido a que el problema fue modelado en dos dimensiones (2D). En este esquema, la distribución tridimensional de los esfuerzos generados por la carga de tráfico no está siendo representada de manera adecuada, lo que introduce discrepancias respecto al comportamiento real de la estructura.

Esta limitación conduce a la segunda, relacionada con los desplazamientos y/o deformaciones unitarias calculadas. Debido a la simplificación dimensional del modelo, las magnitudes obtenidas pueden no reflejar completamente las características tridimensionales del sistema real, especialmente en términos de la interacción entre capas y el desarrollo de las deformaciones bajo condiciones de carga complejas. Estas consideraciones son fundamentales para interpretar los resultados en el contexto del problema estudiado.

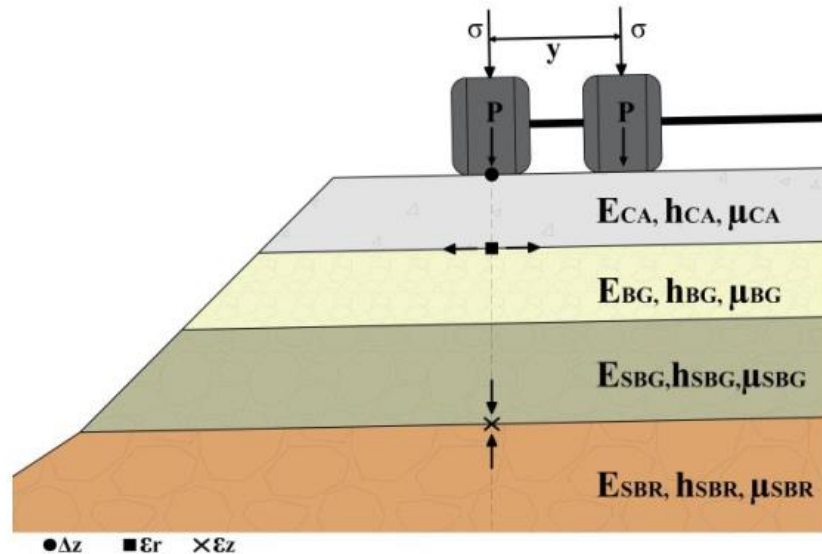
4.3.1 Respuesta esfuerzo-deformación en función de los diferentes modelos constitutivos

La respuesta esfuerzo-deformación correspondiente a cada uno de los modelos constitutivos propuestos en este trabajo de aplicación fue evaluada considerando tres variables clave empleadas en el diseño de pavimentos flexibles. Estas variables son: la deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δ_z), la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r). La Figura 23 presenta el modelo de referencia del terraplén utilizado, así como la

localización precisa de los puntos de análisis considerados para la evaluación de la sensibilidad de cada variable.

Figura 23

Puntos evaluación del comportamiento esfuerzo deformación en el terraplén de referencia



Nota. Adaptada de (Páez Arenas, 2023)

Con el fin de realizar la variación de los parámetros asociados al comportamiento esfuerzo-deformación del terraplén, se desarrolló un modelo de referencia con valores típicos de diseño. Este modelo sirvió como base para llevar a cabo los análisis de sensibilidad establecidos en los objetivos de este trabajo. Para determinar el grado de sensibilidad de las distintas variables evaluadas (Δz , ϵ_r , y ϵ_z) en el modelo de referencia con respecto a los diferentes modelos constitutivos, se utilizó la escala de sensibilidad propuesta por Higuera (2007). Los detalles de esta escala se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15*Escala de definición del grado de sensibilidad*

Grado de sensibilidad	% Variación
Baja	< 15
Media	15 – 30
Alta	> 30

Nota. Elaboración Propia

En los siguientes numerales se presentan los resultados asociados a los diferentes modelos constitutivos planteados.

4.3.1.1 Modelo elástico lineal

Para la implementación de los modelos elásticos lineales y la ejecución de los correspondientes análisis de sensibilidad, se desarrollaron un total de 28 simulaciones. Estas simulaciones se derivan de la variación de los parámetros que influyen en el comportamiento esfuerzo-deformación, particularmente el módulo de elasticidad (E) de los distintos materiales involucrados. Para cada material, se evaluaron tres valores representativos del módulo de elasticidad, abarcando rangos típicos establecidos en la literatura técnica para el concreto asfáltico, la base y subbase granular marginal, así como para la subrasante.

Con el objetivo de compilar tanto los archivos de análisis como los resultados obtenidos, se elaboraron 28 archivos correspondientes a los modelos numéricos y una hoja de cálculo en Excel con el procesamiento detallado de los resultados.

La Tabla 16 muestra la matriz de modelos desarrollados para el análisis de sensibilidad del comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales del terraplén, considerando la variación en el módulo de elasticidad del concreto asfáltico y de la base granular marginal. En dicha tabla se

presentan los rangos de valores utilizados para el módulo de elasticidad de cada material, junto con la nomenclatura asignada a cada grupo de simulación y escenario evaluado.

Tabla 16

Matriz de modelos para evaluar la variación del módulo de elasticidad en el CA y BG marginal

E_{CA} (MPa)	E_{BG} (MPa)	E_{SBG} (MPa)	E_{SBR} (MPa)	Nombre del modelo
3250	250*	150*	100*	M1E1*
	200			M1E2
	150			M1E3
2500	250			M2E1
	200			M2E2
	150			M2E3
1500	250			M3E1
	200			M3E2
	150			M3E3

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 17 presenta la información y la nomenclatura correspondiente al grupo de modelos utilizados para evaluar la influencia de la variación del módulo de elasticidad del concreto asfáltico y de la subbase granular marginal en el comportamiento esfuerzo-deformación.

Tabla 17

Matriz de modelos para evaluar la variación del módulo de elasticidad en el CA y SBG marginal

E_{CA} (MPa)	E_{BG} (MPa)	E_{SBG} (MPa)	E_{SBR} (MPa)	Nombre del modelo
3250	200	200	100	M4E1
		150		M4E2
		100		M4E3
2500		200		M5E1
		150		M5E2
		100		M5E3
1500		200		M6E1
		150		M6E2
		100		M6E3

Nota. Elaboración Propia

Además, se analizó el comportamiento esfuerzo-deformación al modificar el módulo de elasticidad de la subrasante. La matriz correspondiente a estos modelos se presenta en la en la Tabla 18.

Tabla 18

Matriz de modelos para evaluar la variación del módulo de elasticidad en el CA y SBR marginal

E_{CA} (MPa)	E_{BG} (MPa)	E_{SBG} (MPa)	E_{SBR} (MPa)	Nombre del modelo
3250	200	150	150	M7E1
			100	M7E2
			50	M7E3
2500			150	M8E1
			100	M8E2
			50	M8E3
1500			150	M9E1
			100	M9E2
			50	M9E3

Nota. Elaboración Propia

La simulación de referencia presenta en este documento corresponde a la Simulación codificada M1E1, la cual corresponda a un módulo $E_{CA}=3250$ MPa, $E_{BG}=250$ MPa, $E_{SBG}=150$ MPa y $E_{SBR}=100$ MPa.

La Figura 24 (a) muestra los isocontornos de desplazamientos verticales en profundidad obtenidos del modelo. Se observa que los mayores desplazamientos se concentran en la zona de la huella vehicular, ubicada hacia el centro del terraplén. Por esta razón, la evaluación de la variación de los desplazamientos en los análisis de sensibilidad se centró en esa región.

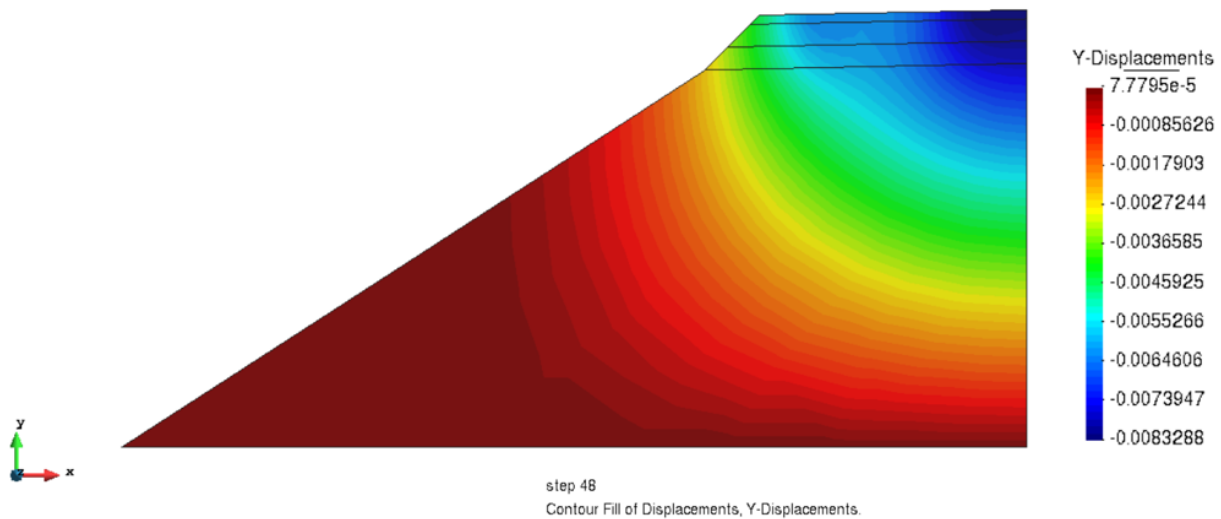
En cuanto a las deformaciones unitarias, tanto la deformación por tracción horizontal en la parte inferior del concreto asfáltico (CA) como la deformación unitaria por compresión vertical en la superficie de la subrasante se presentan en las Figura 24 (a) y (b), respectivamente. Para la

tracción horizontal en el CA, se observa que las mayores deformaciones se concentran en la zona de la huella vehicular cercana al talud del terraplén. Por otro lado, la deformación por compresión en la subrasante muestra un comportamiento más uniforme a lo largo del terraplén, con ligeros incrementos hacia la huella interna.

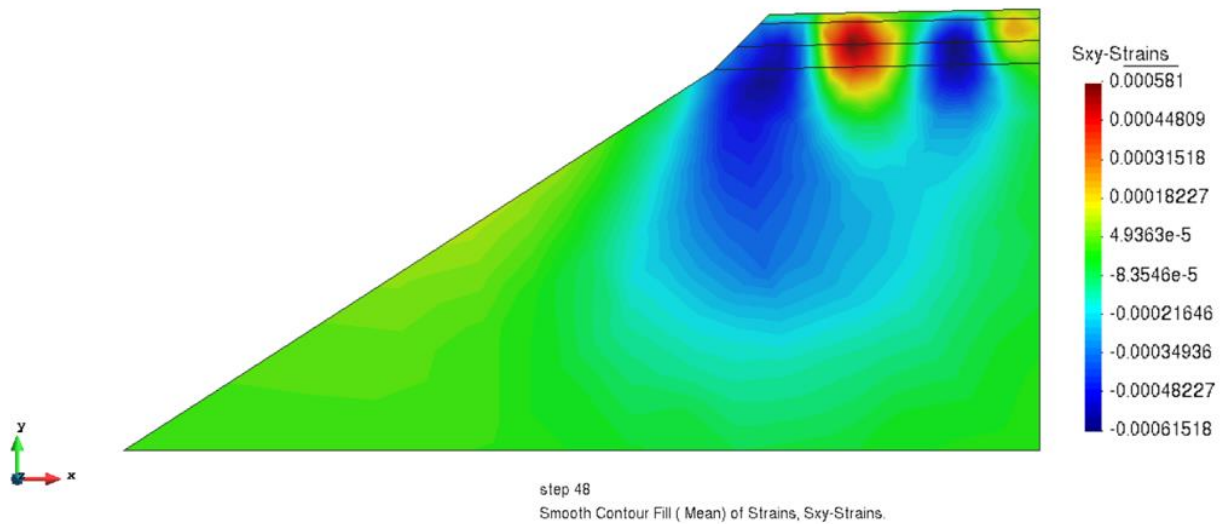
Los análisis de sensibilidad se llevaron a cabo en las zonas del modelo donde se registraron los valores máximos en las variables de interés, basados en el comportamiento del modelo de referencia. Este enfoque permite una evaluación más precisa del efecto de la variación de los parámetros, ya que en estas áreas críticas es donde el sistema estructural experimenta las mayores solicitaciones y deformaciones.

Figura 24

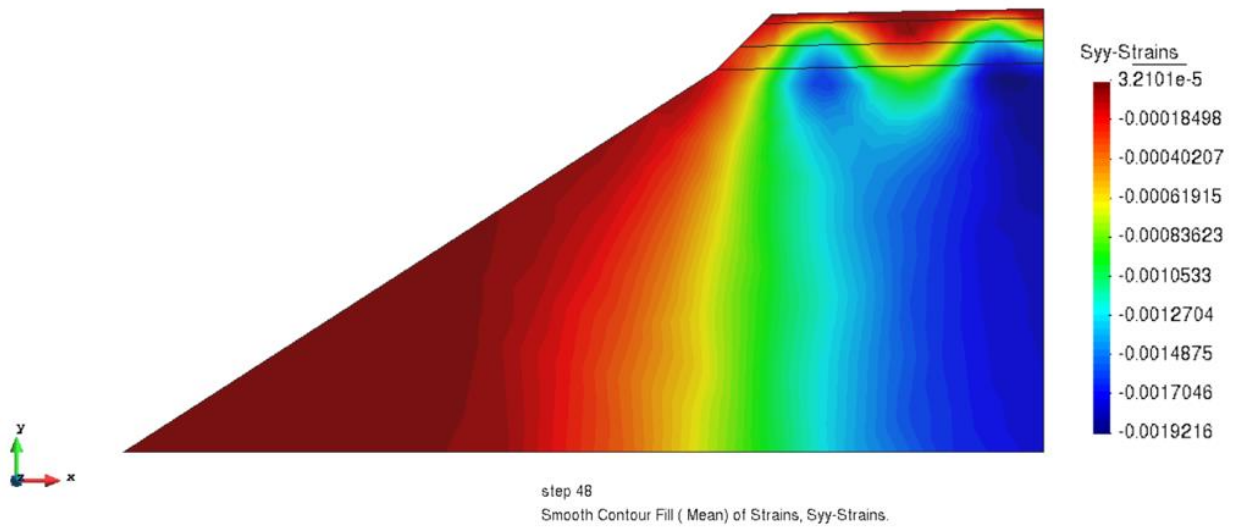
Isocontornos de resultados obtenidos de Δ_z , ϵ_r , y ϵ_z para el modelo de referencia M1E1



(a) Deflexión total en función del módulo de elasticidad del CA y de la BG Marginal



(b) Deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico



(c) Deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante

Nota. Elaboración Propia

Los valores obtenidos (Δ_z , ϵ_r , y ϵ_z) del modelo M1E1 en las zonas específicas de análisis se presentan en la Tabla 19, mientras que en la Figura 25 se presenta la variación en profundidad.

Tabla 19

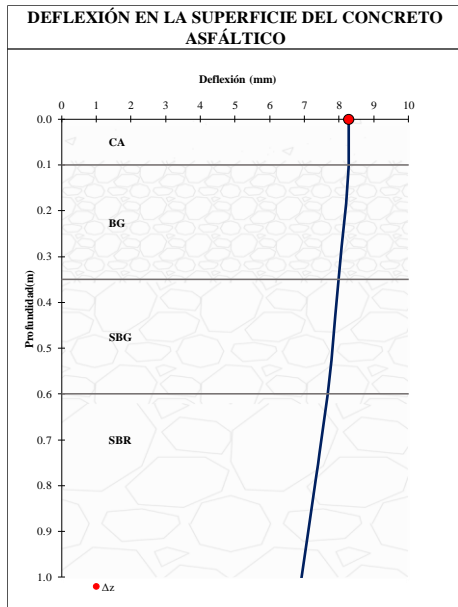
Isocontornos de resultados obtenidos de Δ_z , ϵ_r , y ϵ_z para el modelo de referencia M1E1

SIMULACIÓN 1	PARÁMETROS	CRITERIOS DE DISEÑO		
	E (MPa)	Δ_z (mm)	ϵ_r	ϵ_z
CA	3250			
BG	200			
SBG	200	8.28	1.38E-04	1.56E-03
SBR	100			

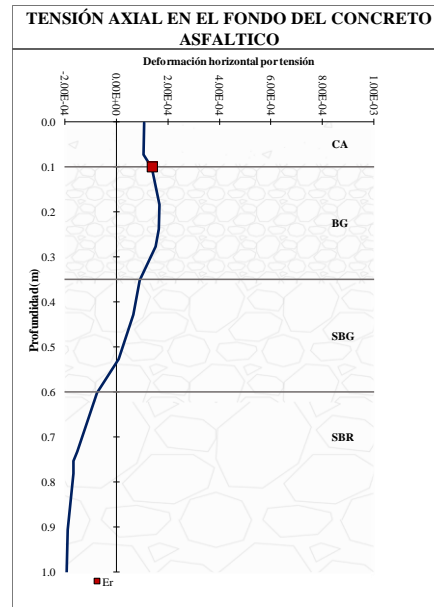
Nota. Elaboración Propia

Figura 25

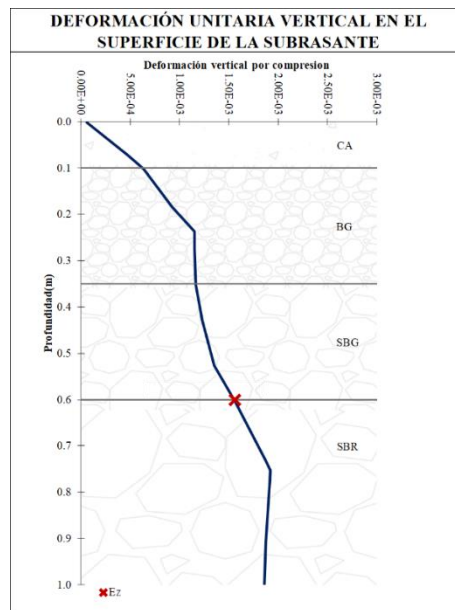
Variación en profundidad de las variables evaluadas en el modelo numérico de referencia



(a)



(b)



(c)

Nota. Elaboración Propia

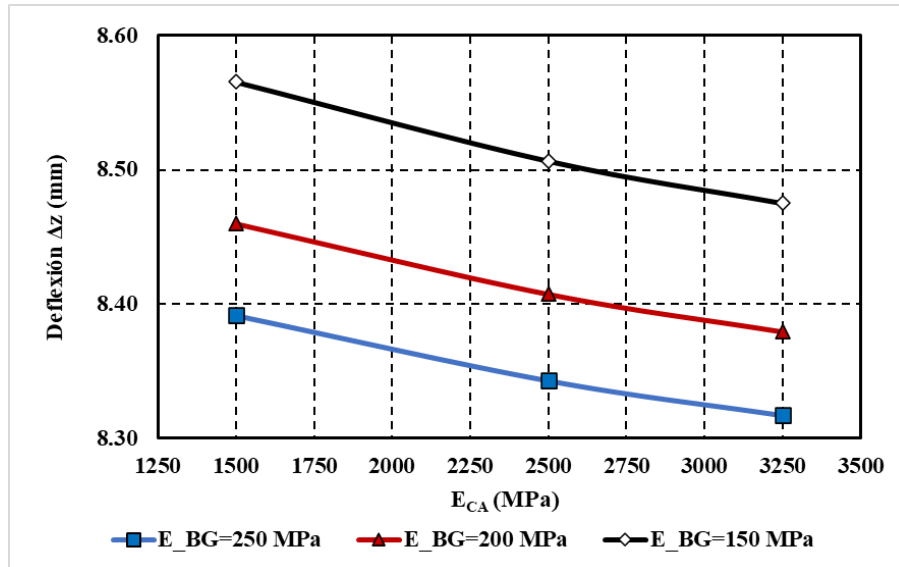
Con base en los resultados generados en el modelo de referencia, se llevaron a cabo análisis de sensibilidad específicos. En la Figura 26 (a), (b) y (c) se presentan los resultados de la variación de los valores obtenidos de deformación vertical (Δ_z), deformación en tensión (ϵ_t) y deformación a compresión (ϵ_z) al modificar el módulo de elasticidad del concreto asfáltico (E_{CA}) y de la base granular marginal (E_{BG}). En estos análisis, se mantuvieron constantes los espesores de las diferentes capas, las condiciones de carga, y los módulos de elasticidad de la subbase granular marginal ($E_{SBG} = 150$ MPa) y de la subrasante ($E_{SBR} = 100$ MPa).

4.3.1.1.1 Modelos de influencia del módulo elástico del concreto asfáltico y de la base granular marginal

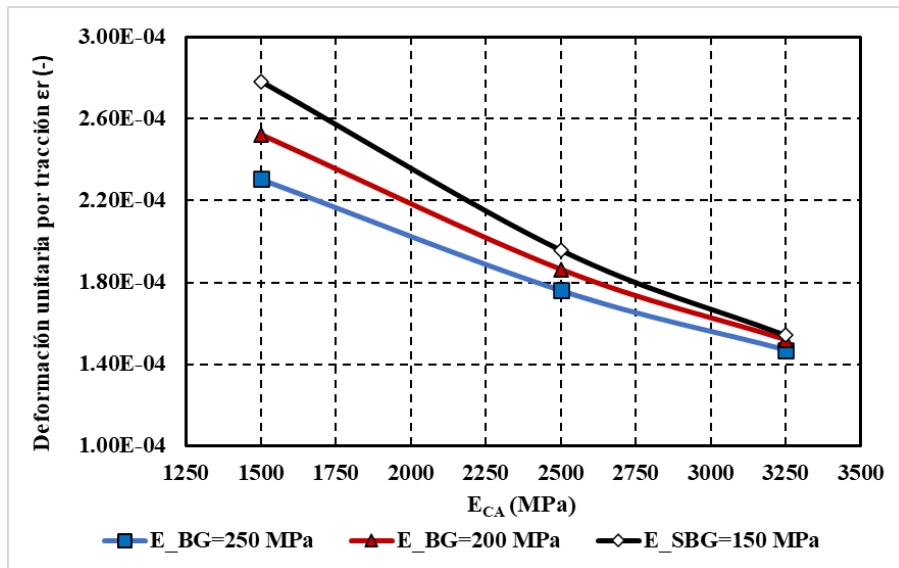
Las gráficas presentadas en la Figura 26 (a), (b) y (c) se evidencian tres respuestas mecánicas diferenciadas en distintas configuraciones estructurales de pavimento, cada una definida por una variación específica del módulo de elasticidad de la base granular marginal (E_{BG}). Las tendencias observadas indican un comportamiento decreciente general, en el cual, a medida que aumenta el módulo de elasticidad en las capas de concreto asfáltico (CA) y base granular (BG), las deflexiones y las deformaciones unitarias se reducen de manera significativa. Este comportamiento confirma la influencia directa del E_{BG} sobre la rigidez estructural del sistema de pavimento.

Figura 26

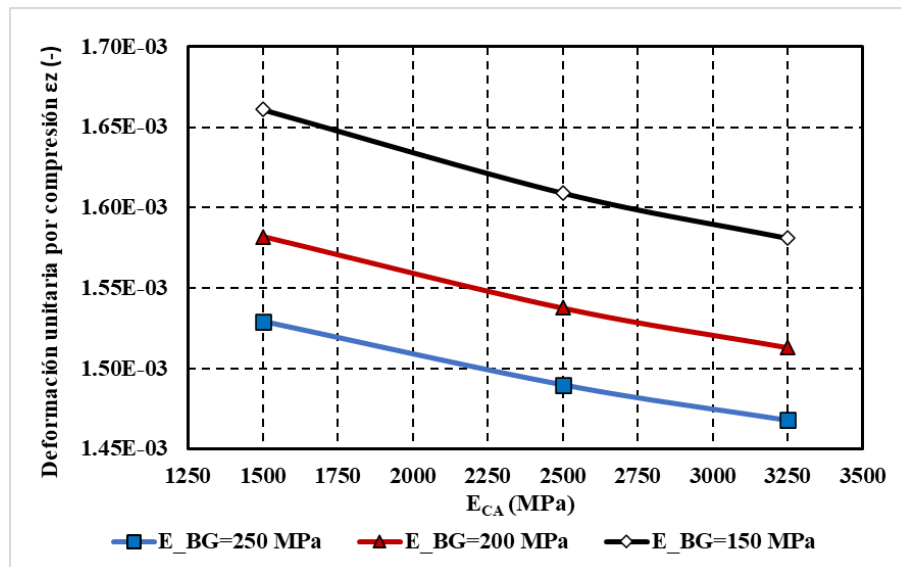
Deflexión total en función del módulo de elasticidad del CA y de la BG Marginal



(a) Deflexión en la superficie del concreto asfáltico



(b) Deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico



(c) Deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 20 presenta de manera detallada las propiedades mecánicas, resultados desplazamientos, deformaciones y porcentaje de variación de distintas estructuras pavimentos consideradas para el análisis de sensibilidad en función del módulo de elasticidad del CA y de la BG marginal. En cuanto a los criterios de diseño, la deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δ_z) aumenta ligeramente al disminuir la rigidez de las capas inferiores, presentado valores máximos de 8,57 mm para la estructuras mas flexible y de 8,32 mm para la más rígida. La misma tendencia se evidencia para el caso de la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r). Cabe destacar que la sensibilidad es más marcada en el caso de la deformación por tracción horizontal en la capa de concreto asfáltico.

Tabla 20

Resultados de deflexiones, deformaciones y grado de sensibilidad en función del módulo de elasticidad del CA y de la BG Marginal

CAPA	PARÁMETROS			CRITERIOS DE DISEÑO			% VARIACIÓN		
	E (MPa)	ν	ΔH (cm)	Δz (mm)	ϵ_r (-)	ϵ_z (-)	Δz (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	250	0,35	25	8,32	1,47E-04	1,74E-03	0,00	0,00	0,00
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,38	1,52E-04	1,75E-03	0,75	3,48	0,60
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	150	0,35	25	8,48	2,78E-04	1,75E-03	1,90	89,50	0,60
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	250	0,35	25	8,34	1,76E-04	1,76E-03	0,00	0,00	0,00
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,41	1,86E-04	1,77E-03	0,77	5,90	0,67
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	150	0,35	25	8,51	1,96E-04	1,78E-03	1,96	11,21	1,33
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	250	0,35	25	8,39	2,31E-04	1,79E-03	0,00	0,00	0,00
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,46	2,52E-04	1,80E-03	0,82	9,41	0,77
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						

CAPA	PARÁMETROS			CRITERIOS DE DISEÑO			% VARIACIÓN		
	E (MPa)	ν	ΔH (cm)	Δz (mm)	ϵ_r (-)	ϵ_z (-)	Δz (%)	ϵ_r (%)	ϵ_z (%)
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	150	0,35	25	8,57	2,78E-04	1,81E-03	2,07	20,64	1,57
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						

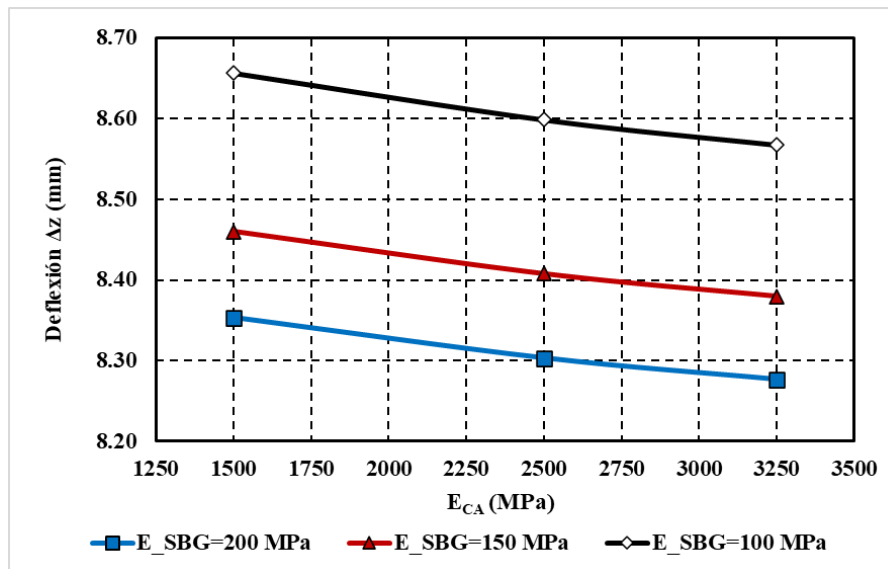
Nota. Elaboración Propia

4.3.1.1.2 Modelos de influencia del módulo elástico del concreto asfáltico y de la subbase granular marginal

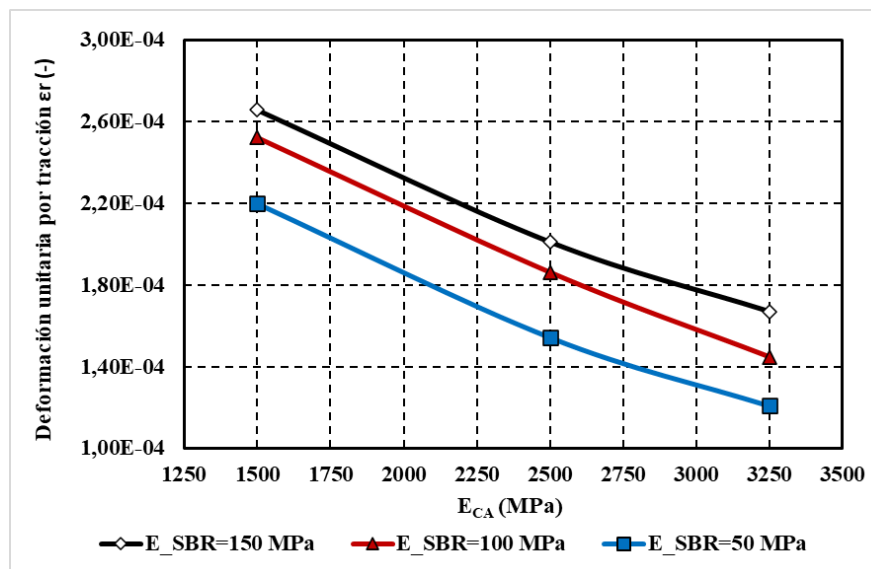
Los datos presentados en la Figura 27 (a), (b) y (c), así como en la Tabla 21 revelan una tendencia uniforme en los resultados obtenidos, en los cuales se observa que el incremento en el módulo de elasticidad de las capas estructurales del pavimento, tanto en concreto asfáltico como en la subbase granular marginal, se asocia consistentemente con una reducción en las deflexiones y deformaciones unitarias. Esta tendencia se repite en todas las configuraciones evaluadas, proporcionando una comprensión integral de cómo la variación en el módulo de elasticidad afecta el comportamiento mecánico de las diferentes capas del pavimento y permite validar la consistencia de los resultados entre las distintas representaciones gráficas y tabulares.

Figura 27

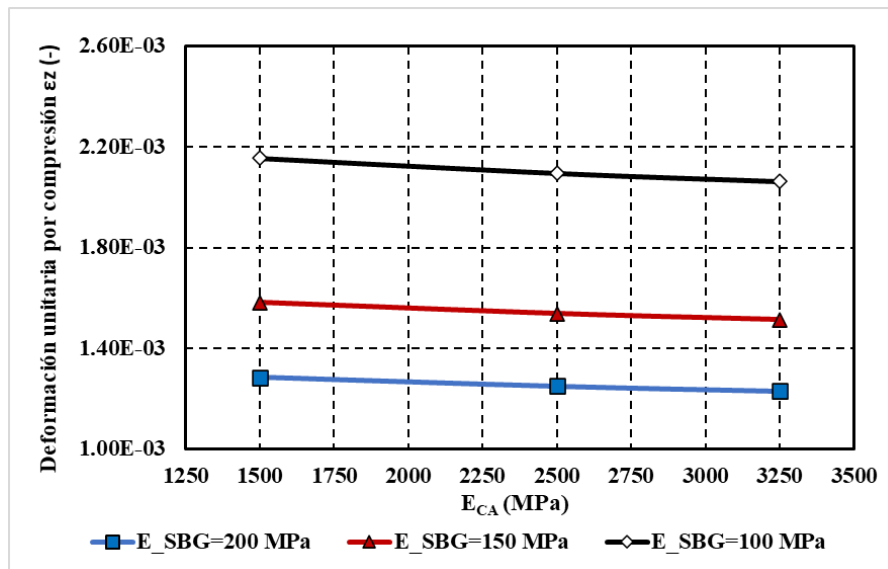
Deformación por tensión en el fondo del CA en función del módulo de elasticidad de CA y de SBG marginal



(a) Deflexión en la superficie del concreto asfáltico



(b) Deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico



(c) Deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante

Nota. Elaboración Propia

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 21 a diferencia del análisis de sensibilidad en el cual se variaba el módulo de elasticidad de la BG marginal, en el caso en que se modifica el módulo de elasticidad de la SBG marginal se observa un incremento en las deflexiones y las deformaciones unitarias en la estructura de pavimento. Este comportamiento evidencia que una menor rigidez en la subbase reduce la capacidad de soporte del sistema, generando mayores desplazamientos y deformaciones bajo las mismas condiciones de carga, lo cual resalta la sensibilidad de la respuesta estructural ante variaciones en las propiedades mecánicas de esta capa.

Tabla 21

Resultados de deflexiones, deformaciones y grado de sensibilidad en función del módulo de elasticidad del CA y de la SBG Marginal

CAPA	PARÁMETROS			CRITERIOS DE DISEÑO			% VARIACIÓN		
	E (MPa)	ν	ΔH (cm)	Δz (mm)	ϵ_r	ϵ_z	$\Delta z(\text{mm})$	ϵ_r	ϵ_z
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,28	1,38E-04	1,56E-03	0,00%	0,00%	0,00%
S.B.G.	200	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,38	1,56E-04	1,75E-03	1,24%	13,17%	12,08%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,57	1,69E-04	2,11E-03	3,51%	22,62%	35,19%
S.B.G.	100	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,30	1,70E-04	1,58E-03	0,00%	0,00%	0,00%
S.B.G.	200	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,41	1,86E-04	1,77E-03	1,26%	9,40%	12,17%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,60	2,07E-04	2,13E-03	3,56%	21,56%	35,39%
S.B.G.	100	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,35	2,32E-04	1,60E-03	0,00%	0,00%	0,00%
S.B.G.	200	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,46	2,52E-04	1,80E-03	1,28%	8,95%	12,31%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						

CAPA	PARÁMETROS			CRITERIOS DE DISEÑO			% VARIACIÓN		
	E (MPa)	ν	ΔH (cm)	Δz (mm)	ϵ_r	ϵ_z	Δz (mm)	ϵ_r	ϵ_z
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,66	2,80E-04	2,18E-03	3,63%	20,98%	35,74%
S.B.G.	100	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						

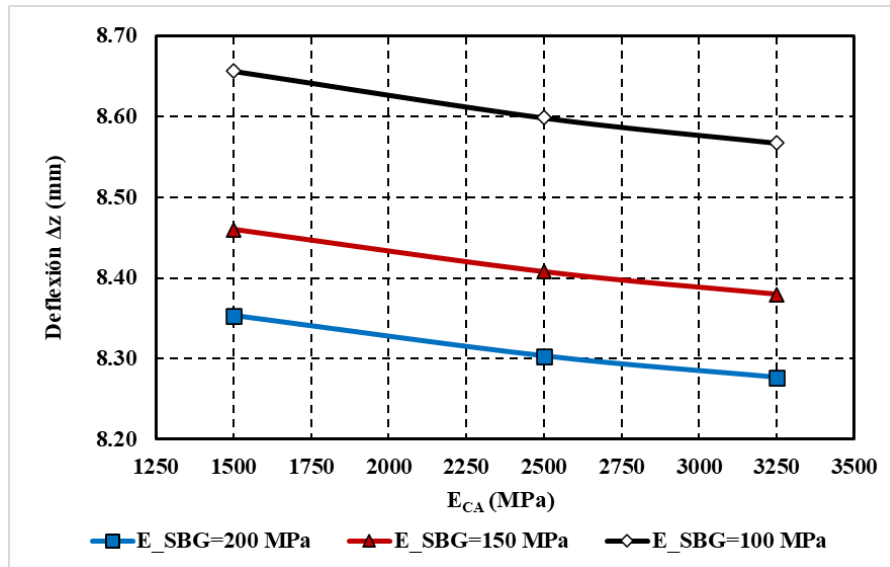
Nota. Elaboración Propia

4.3.1.1.3 Modelos de influencia del módulo elástico del concreto asfáltico y de la subrasante

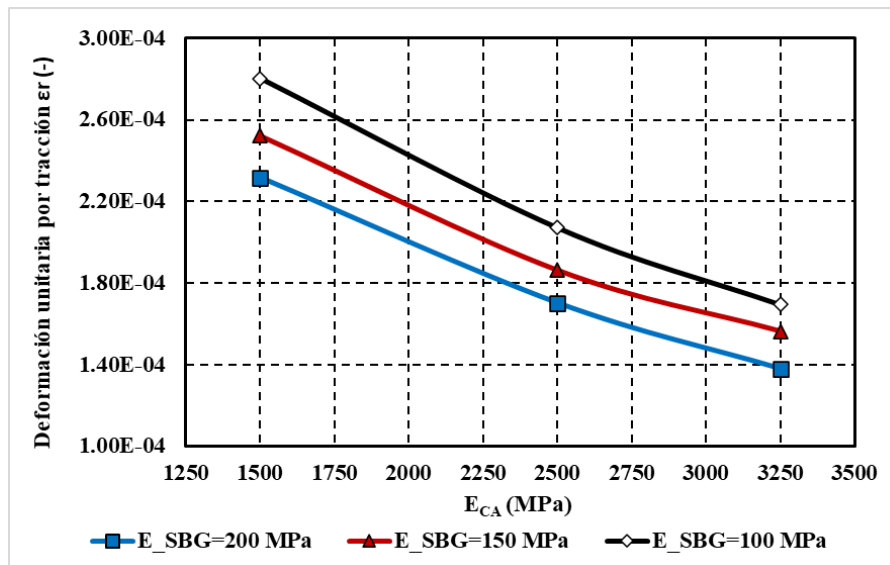
Asimismo, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de la variación en las variables de diseño al modificar el módulo de elasticidad de la subrasante. En este caso, el módulo de la subrasante se varió en tres valores específicos, 150 MPa, 100 MPa y 50 MPa, con el objetivo de examinar cómo estas variaciones afectan el desempeño estructural del pavimento. Los resultados obtenidos mostraron un mayor grado de variación en las deflexiones y deformaciones unitarias en comparación con los obtenidos al modificar los módulos de la BG y SBG marginal, lo que demuestra una influencia significativa de la rigidez de la subrasante en la respuesta global de la estructura. Figura 28 (a), (b) y (c) muestran los resultados obtenidos.

Figura 28

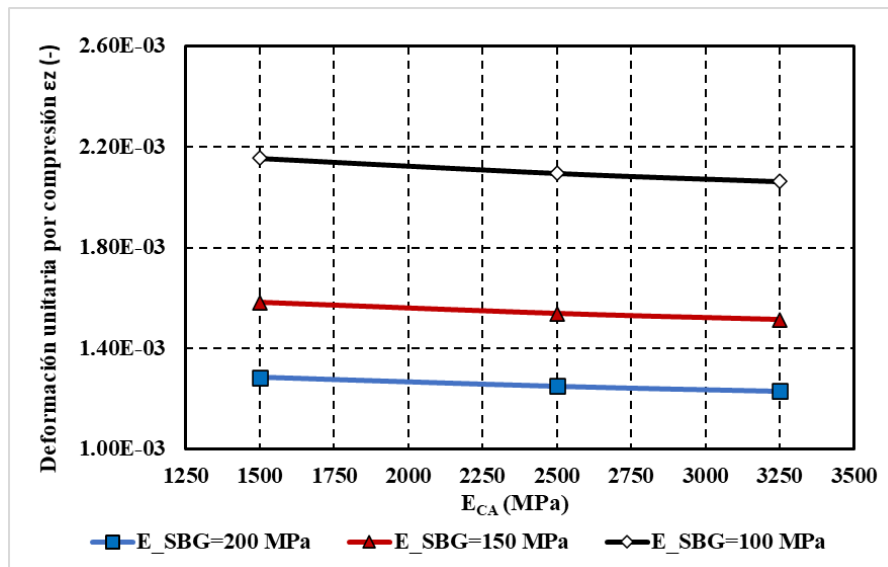
Deformación vertical de compresión actuante sobre la SBR en función del módulo de elasticidad de CA y de SBR



(a) Deflexión en la superficie del concreto asfáltico



(b) Deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico



(c) Deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 22 presenta los resultados obtenidos de los modelos numéricos asociados al análisis de sensibilidad de las variables de diseño en función del módulo de elasticidad del CA y de la SBR. Los resultados evidencian un incremento significativo en los valores de deflexiones y deformaciones unitarias, lo cual se atribuye a que este material presenta las propiedades mecánicas más bajas dentro de la estructura evaluada.

Tabla 22

Resultados de deflexiones, deformaciones y grado de sensibilidad en función del módulo de elasticidad del CA y de la SBR

CAPA	PARÁMETROS			CRITERIOS DE DISEÑO			% VARIACIÓN		
	E (MPa)	n	DH (cm)	Δz (mm)	ϵ_r	ϵ_z	Δz (mm)	ϵ_r	ϵ_z
C.A.	3250	0,3	10	5,84	1,67E-04	1,45E-03	0,00%	0,00%	0,00%
B.G.	200	0,35	25						

CAPA	PARÁMETROS			CRITERIOS DE DISEÑO			% VARIACIÓN		
	E (MPa)	n	DH (cm)	Δz (mm)	ϵ_r	ϵ_z	$\Delta z(\text{mm})$	ϵ_r	ϵ_z
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	150	0,35							
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,38	1,45E-04	1,75E-03	43,40%	19,86%	20,86%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35							
C.A.	3250	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	15,89	1,21E-04	2,61E-03	171,86%	38,22%	80,45%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	50	0,35	-						
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	5,87	2,01E-04	1,46E-03	0,00%	0,00%	0,00%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	150	0,35							
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,41	1,86E-04	1,77E-03	43,31%	20,70%	20,79%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35							
C.A.	2500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	15,93	1,54E-04	2,63E-03	171,53%	30,22%	80,08%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	50	0,35							
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,35	2,32E-04	1,60E-03	0,00%	0,00%	0,00%
S.B.G.	200	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,46	2,52E-04	1,80E-03	1,28%	14,72%	12,31%
S.B.G.	150	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						
C.A.	1500	0,3	10						
B.G.	200	0,35	25	8,66	2,80E-04	2,18E-03	3,63%	20,77%	35,74%
S.B.G.	100	0,35	25						
Terraplén	100	0,35	-						

Nota. Elaboración Propia

4.3.1.1.1 *Grado de sensibilidad de los parámetros de diseño*

Al realizar el análisis de sensibilidad de las variables involucradas en el diseño de la estructura de un pavimento flexible, como se expuso anteriormente, se evaluó el grado de sensibilidad de cada variable, clasificándolas y organizándolas en función de su influencia, de mayor a menor. Las Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25 presentan las variables analizadas en términos de los parámetros Δ_z , ε_r y ε_z , respectivamente.

Para en el caso de la deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δ_z) se ha determinado que la variable con mayor influencia es el módulo de elasticidad de la subrasante. No obstante, al examinar las capas granulares, se observa que ambas presentan un bajo grado de sensibilidad, ya que el porcentaje de variación en la deflexión no supera el 3.6 %. Según los criterios de sensibilidad establecidos, esta magnitud de variación se clasifica como un grado de sensibilidad bajo, lo que indica que las variaciones en las propiedades mecánicas de las capas granulares tienen un impacto limitado en la respuesta estructural del pavimento. Esto sugiere que, dentro del contexto del diseño, el módulo de la subrasante debe considerarse con mayor énfasis en comparación con las capas granulares.

Tabla 23

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de Δ_z

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z	Grado de sensibilidad
ESBR	170,0	ALTO
ESBG	3,6	BAJO
EBG	2,0	BAJO

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z	Grado de sensibilidad
E_{CA}	1,0	BAJO

Nota. Elaboración Propia

En el análisis de la deformación unitaria por tensión en la base del concreto asfáltico (CA), se ha identificado que las variables con mayor grado de sensibilidad son los módulos de elasticidad de la base granular (BG) marginal y del concreto asfáltico (CA), con porcentajes de sensibilidad del 71 % y 68 %, respectivamente. Aunque estos valores son elevados, la subrasante presenta un grado de variación del 38 %, lo que sugiere una influencia significativa, aunque inferior a las capas anteriores. Por otro lado, el módulo de elasticidad de la subbase granular marginal (SBG) muestra un grado de sensibilidad medio, alcanzando un 21 %.

Tabla 24

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de ε_r

Variable de diseño	Máximo % Variación ε_r	Grado de sensibilidad
E_{BG}	71,0	ALTO
E_{CA}	68,0	ALTO
E_{SBR}	38,0	ALTO
E_{SBG}	21,0	MEDIO

Nota. Elaboración Propia

Para el caso de la deformación unitaria por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ε_r) se ha observado que la variable con mayor influencia es el módulo de elasticidad de la subrasante (ESBR), que presenta un grado de sensibilidad del 80 %. Este resultado es

coherente con las expectativas, dado que la subrasante actúa como la base fundamental de la estructura del pavimento, y su rigidez juega un papel crucial en el comportamiento mecánico del sistema.

Tabla 25

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de ε_z

Variable de diseño	Máximo % Variación ε_z	Grado de sensibilidad
ESBR	80,0	ALTO
ESBG	36,0	ALTO
ECA	2,8	BAJO
EBG	1,6	BAJO

Nota. Elaboración Propia

4.3.1.2 Modelo de superficies de estado

A diferencia del modelo elástico lineal, el modelo constitutivo de superficies de estado permitió realizar análisis hidromecánicos acoplados, lo cual brindó la ventaja de presentar los resultados en función del tiempo mediante puntos de evolución, en lugar de limitarlos a un instante específico. Esta capacidad facilitó un análisis detallado de la variación temporal de parámetros de diseño, como los esfuerzos, deformaciones, porosidad, permeabilidad y grado de saturación, en respuesta a las condiciones de contorno definidas en el modelo.

Se llevaron a cabo 27 simulaciones numéricas mediante un análisis de sensibilidad de los módulos a_1 y a_2 , con el objetivo de cuantificar el grado de influencia de estas variables en el comportamiento esfuerzo-deformación. Los rangos de variación de estas variables oscilaron entre $-1.00E-04$ y $-1.00E-02$, donde los valores menores son característicos de materiales más rígidos.

Dado que el enfoque de este trabajo se centra en los materiales granulares marginales, el concreto asfáltico y la subrasante se modelaron utilizando un enfoque elástico lineal, empleando los parámetros medios de deformación $E_{CA}=3250$ MPa y $E_{SBR}=100$ MPa.

Con el fin de tener resultados de un espectro amplio del comportamiento esfuerzo deformación, se realizaron tres matrices de modelos numéricos, donde cada una estaba asociadas a un valor de a_2 correspondiente a un porcentaje de valor de a_1 . La Tabla 26 presentan los modelos asociados a materiales con fracción fina con potencial de expansión bajo, lo que representan que el parámetro que tiene en cuenta los cambios volumétricos por succión a_2 es el 1% del parámetros puramente mecánico a_1 .

Tabla 26

Matriz de modelos considerando $a_2 = 1\% a_1$

	Base granular marginal		Subbase granular marginal		Nombre del modelo	
	a_1	a_2	a_1	a_2		
$E_{CA} = 3250$ MPa	$E_{SBR} = 100$ MPa	-1.00E-02	-1.00E-04	-1.00E-02	-1.00E-04	M1E1
		-1.00E-02	-1.00E-04	-1.00E-03	-1.00E-05	M1E2
		-1.00E-02	-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-06	M1E3
		-1.00E-03	-1.00E-05	-1.00E-02	-1.00E-04	M1E4
		-1.00E-03	-1.00E-05	-1.00E-03	-1.00E-05	M1E5
		-1.00E-03	-1.00E-05	-1.00E-04	-1.00E-06	M1E6
		-1.00E-04	-1.00E-06	-1.00E-02	-1.00E-04	M1E7
		-1.00E-04	-1.00E-06	-1.00E-03	-1.00E-05	M1E8
		-1.00E-04	-1.00E-06	-1.00E-04	-1.00E-06	M1E9

Nota. Elaboración Propia

En el caso de materiales con fracción fina con potencial de expansión medio se representan que el parámetro que tiene en cuenta los cambios volumétricos por succión a_2 es el 10% del parámetros puramente mecánico a_1 , lo cual se presenta en la Tabla 27.

Tabla 27*Matriz de modelos considerando $a_2 = 10\% a_1$*

		Base granular marginal		Subbase granular marginal		Nombre del modelo
		a_1	a_2	a_1	a_2	
		$E_{CA} = 3250$ MPa	$E_{SBR} = 100$ MPa	-1.00E-02	-1.00E-03	
-1.00E-02	-1.00E-03			-1.00E-03	-1.00E-04	M2E2
-1.00E-02	-1.00E-03			-1.00E-04	-1.00E-05	M2E3
-1.00E-03	-1.00E-04			-1.00E-02	-1.00E-03	M2E4
-1.00E-03	-1.00E-04			-1.00E-03	-1.00E-04	M2E5
-1.00E-03	-1.00E-04			-1.00E-04	-1.00E-05	M2E6
-1.00E-04	-1.00E-05			-1.00E-02	-1.00E-03	M2E7
-1.00E-04	-1.00E-05			-1.00E-03	-1.00E-04	M2E8
-1.00E-04	-1.00E-05			-1.00E-04	-1.00E-05	M2E9

Nota. Elaboración Propia

La Tabla 28 presenta la matriz de simulaciones numéricas donde se incluye materiales con fracción fina expansivos que representan que el parámetro que tiene en cuenta los cambios volumétricos por succión a_2 es el 100% del parámetros puramente mecánico a_1 .

Tabla 28*Matriz de modelos considerando $a_2 = 100\% a_1$*

		Base granular marginal		Subbase granular marginal		Nombre del modelo
		a_1	a_2	a_1	a_2	
		$E_{CA} = 3250$ MPa	$E_{SBR} = 100$ MPa	-1.00E-02	-1.00E-02	
-1.00E-02	-1.00E-02			-1.00E-03	-1.00E-03	M3E2
-1.00E-02	-1.00E-02			-1.00E-04	-1.00E-04	M3E3
-1.00E-03	-1.00E-03			-1.00E-02	-1.00E-02	M3E4
-1.00E-03	-1.00E-03			-1.00E-03	-1.00E-03	M3E5
-1.00E-03	-1.00E-03			-1.00E-04	-1.00E-04	M3E6
-1.00E-04	-1.00E-04			-1.00E-02	-1.00E-02	M3E7
-1.00E-04	-1.00E-04			-1.00E-03	-1.00E-03	M3E8
-1.00E-04	-1.00E-04			-1.00E-04	-1.00E-04	M3E9

Nota. Elaboración Propia

A partir de las simulaciones planteadas, se evaluaron los parámetros de diseño en los intervalos de trabajo especificados en la Tabla 29. Inicialmente, se considera la etapa de equilibrio

geo estático y la aplicación de carga bajo el estado de compactación del material en su condición "as compacted", en intervalos que abarcan desde el día 0 hasta el día 48. Esta fase establece un estado inicial de tensiones y condiciones hidráulicas de referencia para el modelo, asegurando la estabilidad geo estática previa a la imposición de cargas adicionales.

Posteriormente, se incorporaron los efectos de los ciclos de lluvia y evaporación, que representaron condiciones ambientales variables sobre el sistema modelado. Los períodos de lluvia fueron simulados con intensidades clasificadas como moderadas e intensas, regulando estos valores en función de la precipitación diaria medida en milímetros. De manera similar, en los períodos de evaporación se evaluaron distintas humedades relativas, lo que permitió analizar los efectos de la desecación en el suelo.

Tabla 29

Intervalos de trabajo configurados para el modelo hidromecánico

Intervalo	Tiempo (días)		Objetivo	Humedad relativa (%)	Cantidad de lluvia (mm/día)
	Inicio	Fin			
1	-10	0	Equilibrio geo estático	-	-
2	0	24	Equilibrio geo estático	-	-
3	24	48	Aplicación de carga	-	-
4	48	58	Humedecimiento Lluvia moderada	-	1
5	58	78	Secado Evaporación moderada	96	-
6	78	90	Humedecimiento Intensa	-	10
7	90	100	Secado Evaporación intensa	93	-

Nota. Elaboración Propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelo hidromecánico acoplado correspondiente a la simulación codificada como M3E1. Los principales resultados evaluados en este Trabajo de Aplicación incluyen la evolución temporal del grado de saturación y la porosidad de los materiales que conforman el terraplén, el comportamiento de los esfuerzos efectivos y de la presión de agua, así como las deformaciones a lo largo del tiempo.

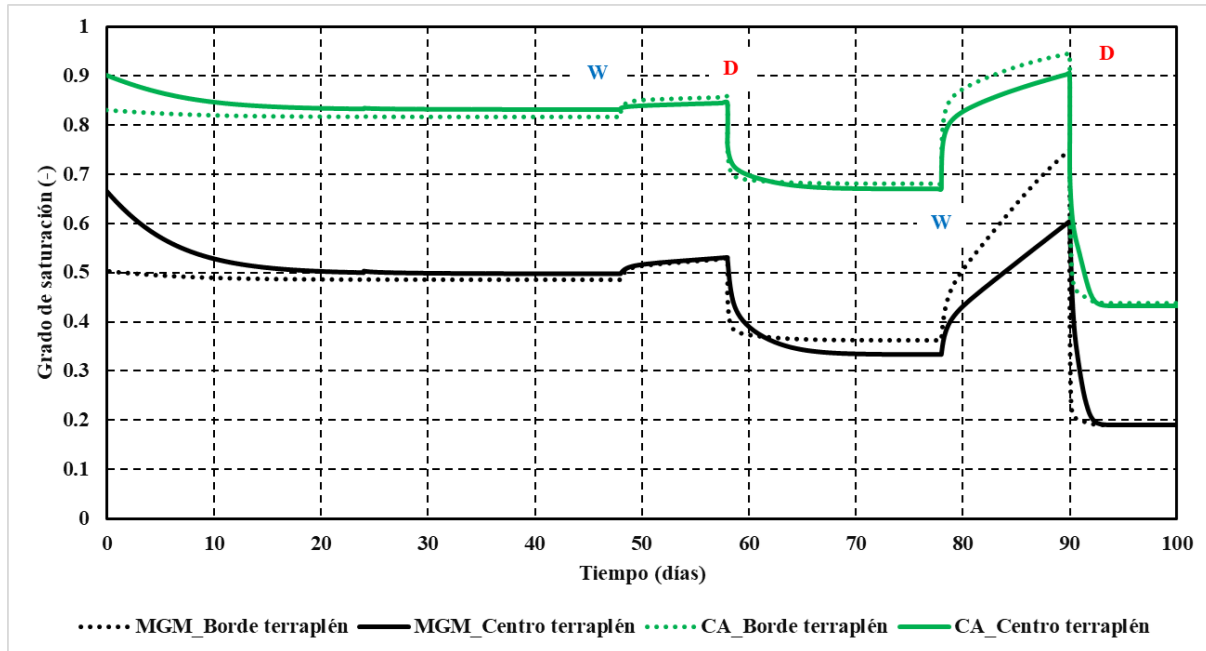
La Figura 28 muestra la variación del grado de saturación en función del tiempo, medida en días, en distintos puntos de un terraplén: el borde y el centro, tanto para materiales granulares marginales (MGM) como para una capa de asfalto (CA). En el eje vertical se representa el grado de saturación (valores entre 0 y 1), mientras que en el eje horizontal se mide el tiempo transcurrido en días.

Los puntos marcados con "W" y "D" representan eventos específicos de lluvia (W) y de evaporación (D), respectivamente. Se observa que, durante los periodos de lluvia, el grado de saturación tiende a incrementarse, lo que indica una ganancia de humedad en los materiales de acuerdo al nivel de lluvia empleado. Por el contrario, durante los periodos de evaporación, el grado de saturación disminuye debido a la pérdida de agua por efecto del secado.

Un aspecto notable en esta gráfica es que no existe una diferencia significativa en el grado de saturación entre los puntos del borde y del centro del terraplén para ambos materiales (MGM y CA). Esto sugiere una respuesta homogénea en cuanto a la saturación, independientemente de la posición dentro del terraplén, lo cual podría deberse a una distribución uniforme de los efectos de infiltración y evaporación en toda la estructura.

Figura 29

Evolución del grado de saturación en los MGM y en el CA



Nota. Elaboración Propia

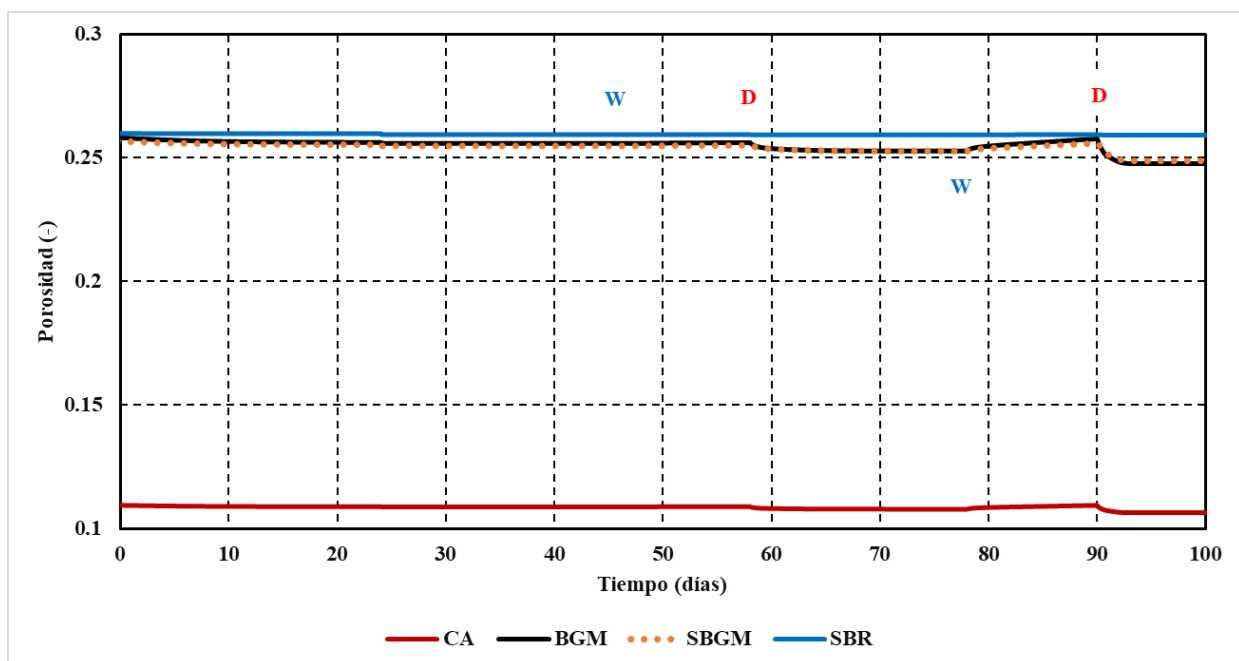
La Figura 30 presenta la evolución de la porosidad de varios materiales a lo largo de los intervalos de trabajo, destacando la respuesta de cada uno a cambios en las condiciones ambientales de secado y humedecimiento. El CA (línea roja) muestra una porosidad constante y baja, alrededor de 0.05, sin variaciones significativas a lo largo del tiempo. Esta estabilidad sugiere que se trata de un material con una estructura densa, con poca capacidad para almacenar agua en sus poros y con alta resistencia a la modificación de su volumen bajo fluctuaciones de humedad.

Por otro lado, los materiales BGM (línea negra sólida), SBGM (línea naranja punteada) y SBR (línea azul sólida) presentan porosidades similares, cercanas a 0.26. A lo largo del periodo, el material SBR muestra una porosidad constante, sin fluctuaciones notables, lo que sugiere una estructura relativamente estable frente a las variaciones de humedad. En cambio, los materiales

BGM y SBGM exhiben ligeras fluctuaciones de porosidad en los puntos específicos de secado y humedecimiento. Estas pequeñas variaciones sugieren que BGM y SBGM tienen una estructura porosa que permite ciertos ajustes ante cambios en las condiciones de humedad, lo que implica una capacidad adaptativa moderada frente a la acción de fenómenos de succión o absorción de agua.

Figura 30

Evolución de la porosidad en los diferentes materiales que conforman el terraplén



Nota. Elaboración Propia

En la Figura 31 se presenta las distribuciones de presión de poros y esfuerzos efectivos en diferentes etapas de análisis, permitiendo visualizar cómo cambian estas magnitudes en función de las condiciones aplicadas al suelo. En el primer escenario, se observa la distribución de la presión de poros bajo condiciones de equilibrio geo estático. En esta etapa inicial, el sistema está en un estado de estabilidad sin la influencia de cargas externas o factores adicionales. La presión

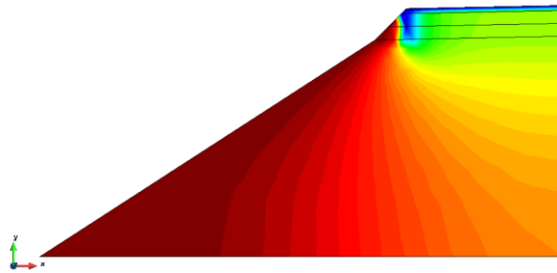
de poros se distribuye de manera que refleja el peso propio del suelo, mostrando un incremento hacia la base del talud debido a la profundidad, lo cual es característico en condiciones de equilibrio. Posteriormente, cuando ya se ha comenzado a aplicar una carga o a influir en el sistema por factores externos. En esta etapa, los esfuerzos efectivos presentan un gradiente desde la superficie hacia la base del suelo, con mayores valores indicados en colores rojo y amarillo, asociados a un incremento en las tensiones debido a la carga aplicada. Este cambio sugiere que el suelo está comenzando a responder a la acción de las nuevas condiciones.

La Figura 31 (c) y (d) representa la distribución de la presión de poros bajo una condición de lluvia moderada. Aquí, se evidencia un aumento en la presión de poros, especialmente en las zonas cercanas a la superficie. Este incremento se debe a la infiltración de agua, que eleva la presión interna en los poros del suelo.

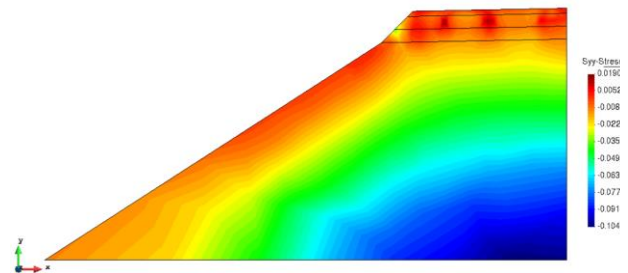
Finalmente, se muestra la distribución de esfuerzos efectivos en una situación de análisis avanzada, donde se combinan las condiciones de lluvia moderada con una carga adicional aplicada. Esta combinación provoca una reducción en los esfuerzos efectivos en comparación con la etapa anterior. En particular, se observa que las áreas en verde y amarillo presentan un esfuerzo efectivo reducido.

Figura 31

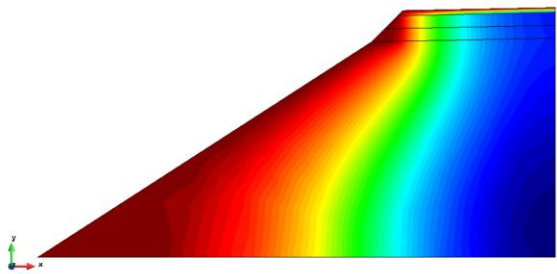
Esfuerzos efectivos y presiones de poros desarrolladas en los diferentes intervalos de análisis



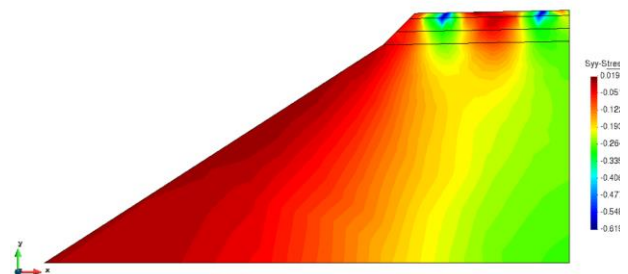
(a) Presión de poros (equilibrio geostático)



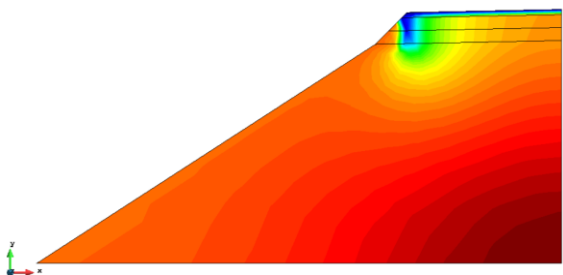
(b) Esfuerzos efectivos (día 24)



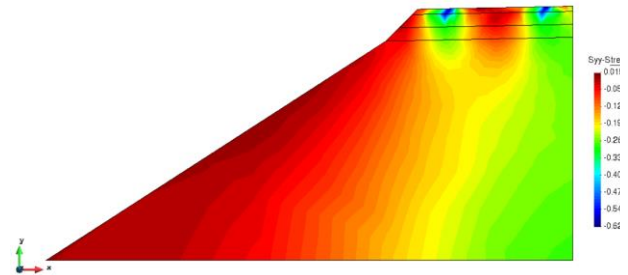
(c) Presión de poros (lluvia moderada)



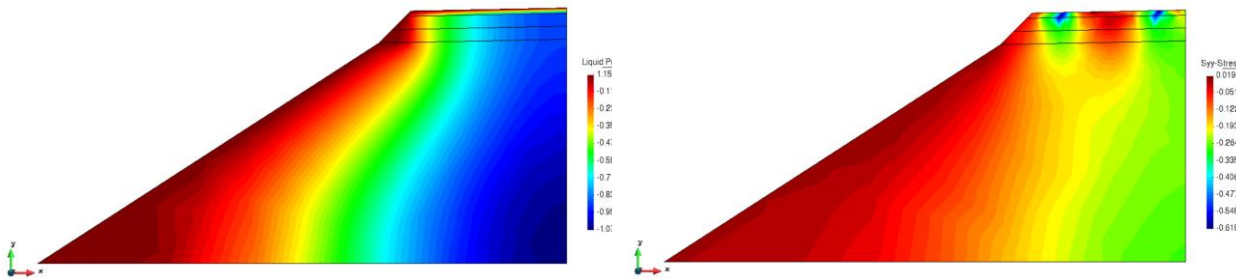
(d) Esfuerzos efectivos (lluvia moderada + carga)



(e) Presión de poros (evaporación moderada)



(f) Esfuerzos efectivos (evaporación moderada)



(g) Presión de poros lluvia intensa

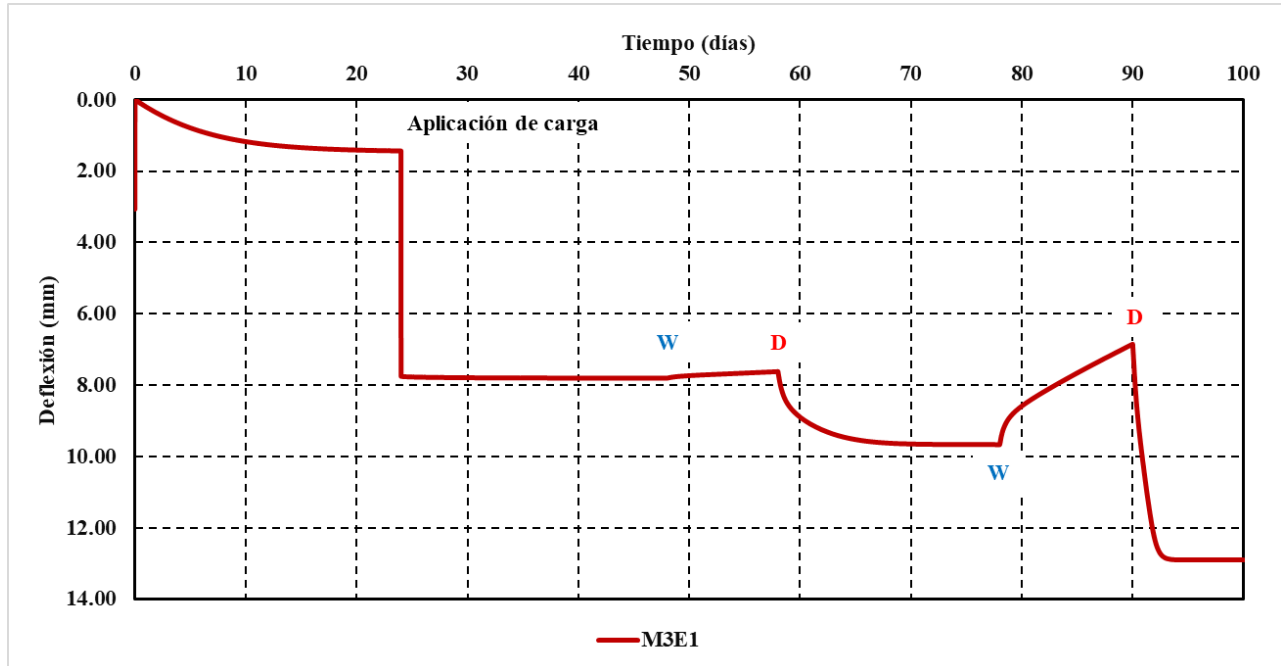
(h) Esfuerzos efectivos (lluvia intensa)

Nota. Elaboración Propia

La Figura 32 muestra la evolución de la deflexión en la parte superior del CA en función del tiempo en respuesta a cambios de humedad en el suelo. Al inicio, se observa una deflexión inicial significativa, resultado de la aplicación de carga sobre la estructura. A medida que avanza el tiempo, se alternan fases de secado y humedecimiento, marcadas con "D" y "W", respectivamente. En las fases de secado, el suelo pierde humedad, lo que incrementa la succión interna del material. Este aumento de succión eleva la resistencia del suelo, causando que se compacte más bajo la misma carga y, por lo tanto, se observe un aumento en la deflexión. En cambio, durante las fases de humedecimiento, el suelo absorbe agua, reduciendo la succión y disminuyendo su rigidez. Esto permite que el material se expanda o se reacomode, lo que se refleja en una disminución de la deflexión en la gráfica.

Figura 32

Evolución de la deflexión (Δ_z) en la parte superior del concreto asfáltico para el modelo M3E1

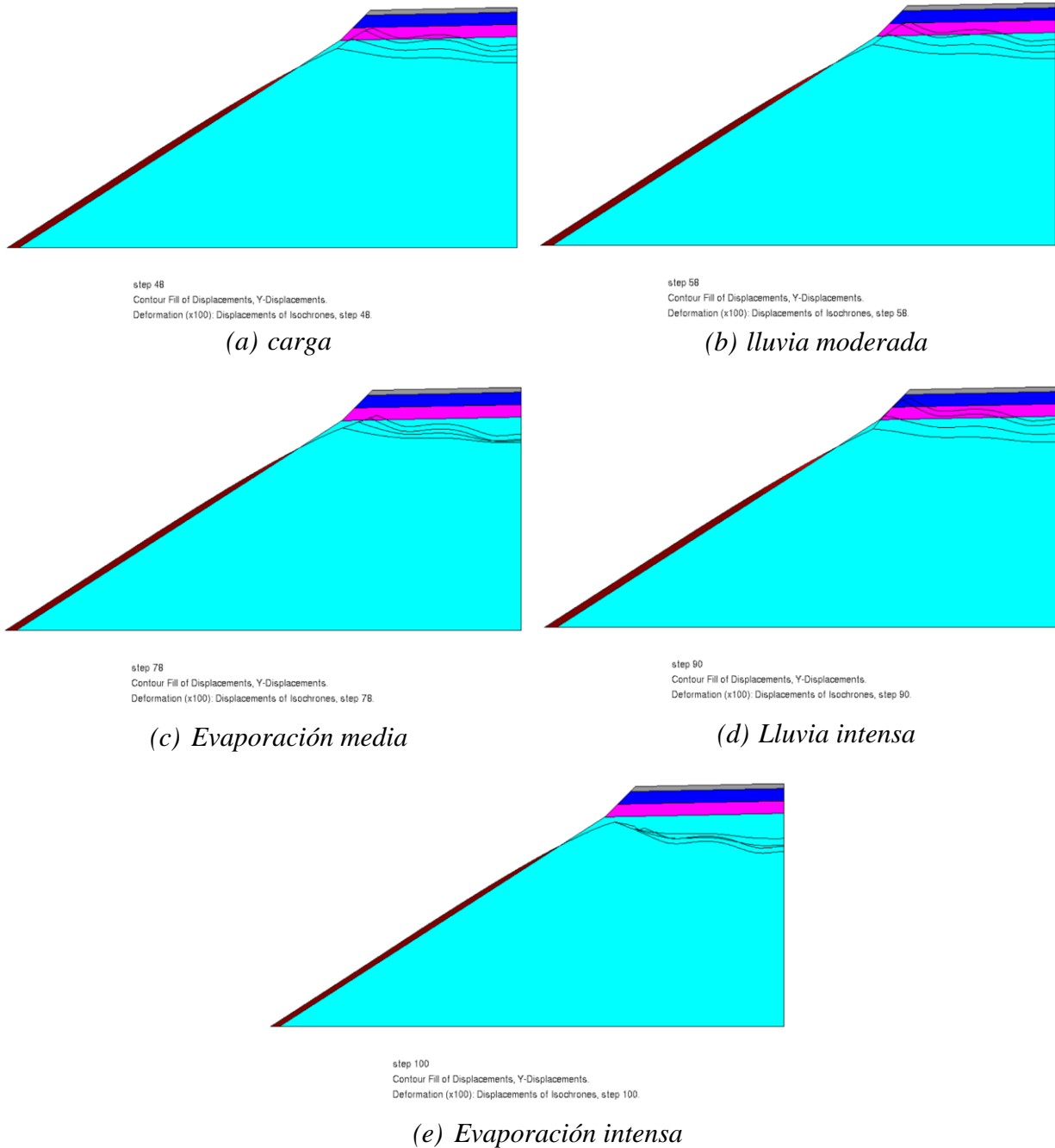


Nota. Elaboración Propia

Lo anteriormente expuesto también se observa en las deformaciones del terraplén durante las diferentes etapas de análisis, como se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Deformadas del terraplén en las diferentes etapas de análisis



Nota. Elaboración Propia

Asimismo, se evaluó la sensibilidad de la permeabilidad intrínseca de los materiales granulares marginales, permitiendo determinar cómo estas propiedades afectan el rendimiento general del sistema bajo diversas condiciones de carga y saturación. Para este análisis de sensibilidad en específico se utilizó el modelo codificado M3E1.

Tabla 30

Valores de permeabilidad intrínseca empleadas en el modelo M3E1

Material	CA	BGM	SBM	SBR
Permeabilidad intrínseca	1.0E-17	1.0E-16	1.0E-16	1.0E-15
	1.0E-17	1.0E-14	1.0E-14	1.0E-15
	1.0E-17	1.0E-12	1.0E-12	1.0E-15

Nota. Elaboración Propia

4.3.1.2.1 Modelos de influencia del módulo de rigidez por succión a_1

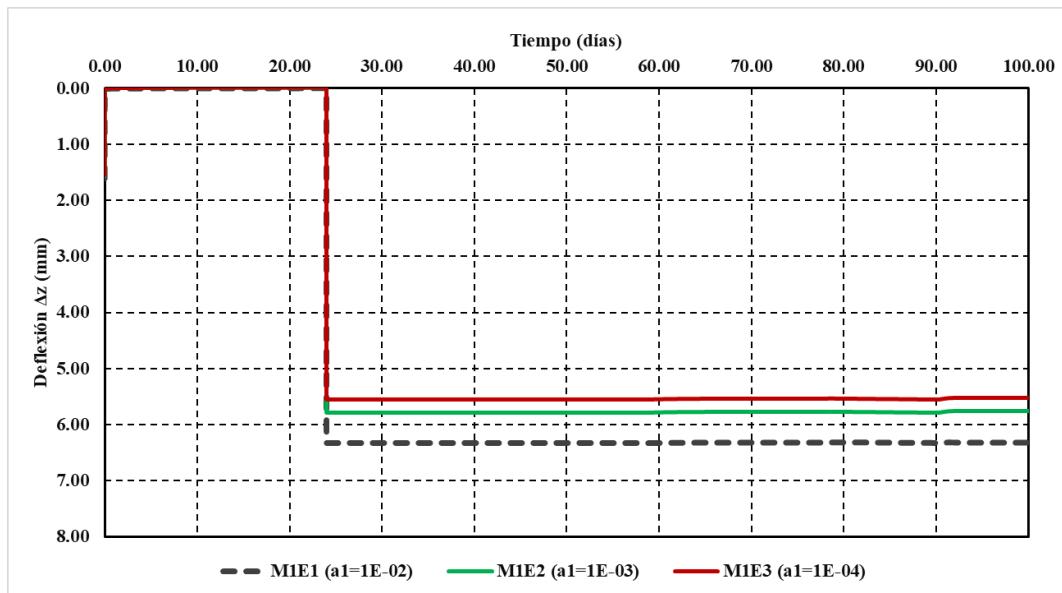
La evaluación de la influencia de la variación del parámetro de rigidez mecánica a_1 se llevó a cabo mediante el análisis de puntos de evolución ubicados en la zona interna del terraplén, donde se concentran las mayores sollicitaciones. De manera similar al análisis realizado en el modelo elástico, para el modelo basado en superficies de estado se analizó la evolución de los principales parámetros de diseño: deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δz), la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r).

En el caso de la deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δz), se presentan las Figura 34, Figura 35 y Figura 36. La comparación entre las figuras muestra la evolución de la deflexión vertical para las configuraciones de modelos M1, M2 y M3, evaluadas bajo distintos valores del parámetro de rigidez a_1 que se asocian a las configuraciones E1, E2 y E3. En todas las figuras se evidencia como la deflexión inicial es la más pronunciada y esta obedece a la imposición de la carga vehicular. La Figura 34 presenta los resultados para una combinación de modelos que

representan configuraciones más rígidas, donde no se evidencia que el efecto del ciclo de humedecimiento y secado a lo largo del tiempo impacte la rigidez del material. En este caso, la respuesta del sistema está determinada únicamente por los parámetros mecánicos asignados. Se observa que el modelo M1E1 exhibe la mayor deflexión, lo que indica una menor rigidez, mientras que el modelo más rígido, M1E3, muestra la menor deflexión, reflejando su capacidad superior para resistir las deformaciones bajo carga.

Figura 34

Evolución de la deflexión en el CA para la serie de modelos M1E1, M1E2 y M1E3

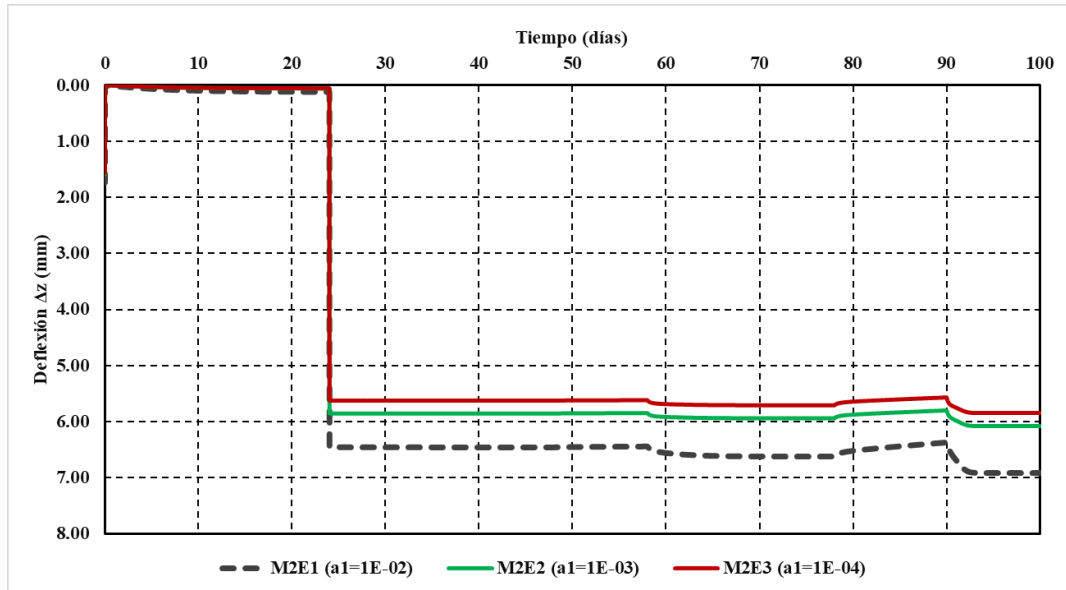


Nota. Elaboración Propia

En el caso de los modelos representados en la Figura 35 y Figura 36 se observa una dependencia significativa del parámetro mecánico a_1 . Sin embargo, a diferencia de los modelos previos, en estos casos también se incorpora la influencia del parámetro de rigidez por succión a_2 cuya descripción y análisis detallado se abordará en el capítulo siguiente.

Figura 35

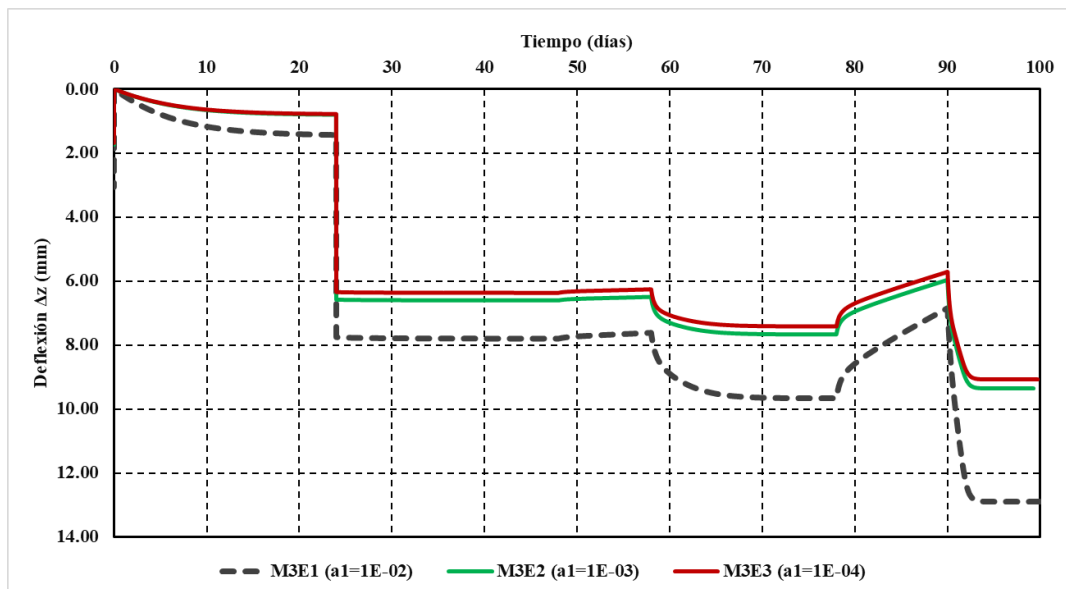
Evolución de la deflexión en el CA para la serie de modelos M2E1, M2E2 y M2E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 36

Evolución de la deflexión en el CA para la serie de modelos M3E1, M3E2 y M3E3

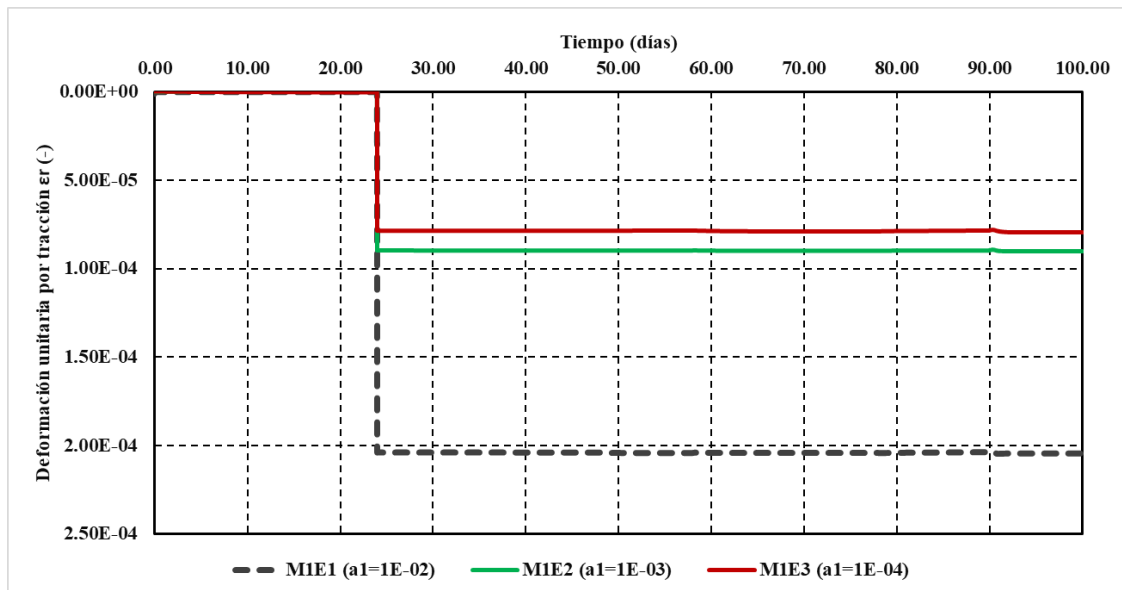


Nota. Elaboración Propia

El comportamiento previamente descrito para la variable de deflexión en la superficie de concreto asfáltico se extiende de manera similar a la, la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r), tal como se presenta en las siguientes figuras. Esto indica que las tendencias observadas en términos de rigidez y respuesta del material bajo diferentes parámetros son consistentes tanto para la deflexión como para las deformaciones unitarias evaluadas.

Figura 37

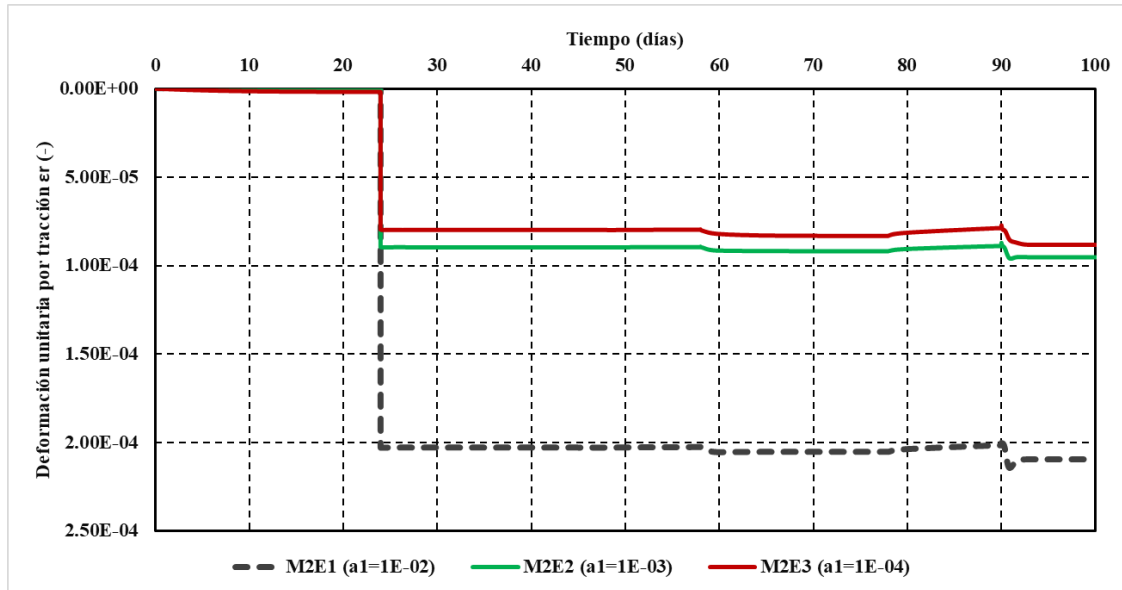
Evolución de la deformación unitaria por tracción en la serie de modelos M1E1, M1E2 y M1E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 38

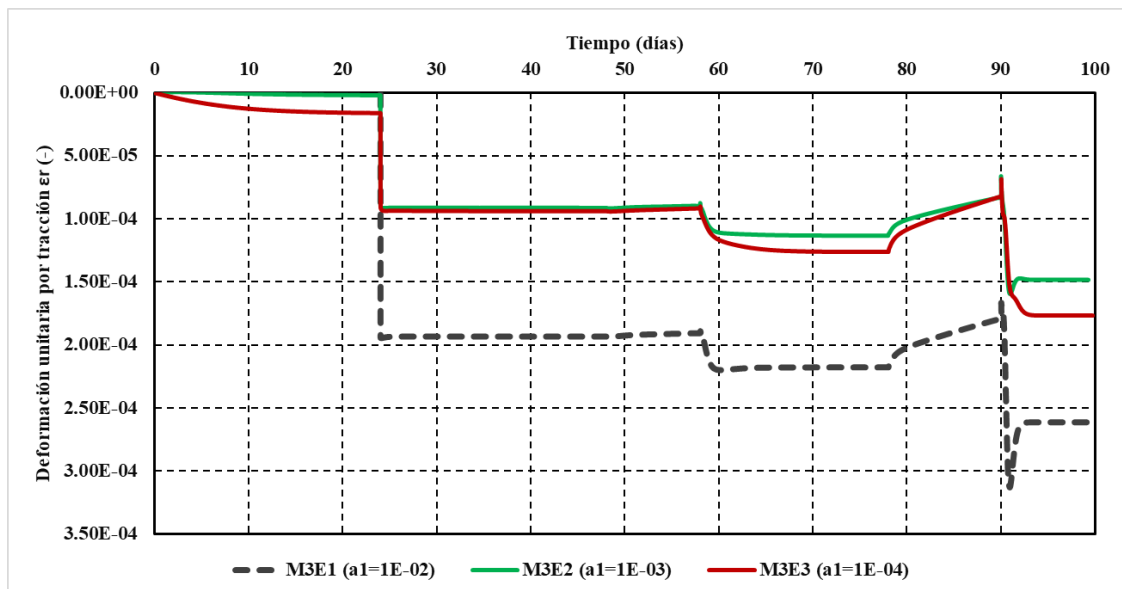
Evolución de la deformación unitaria por tracción en la serie de modelos M2E1, M2E2 y M2E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 39

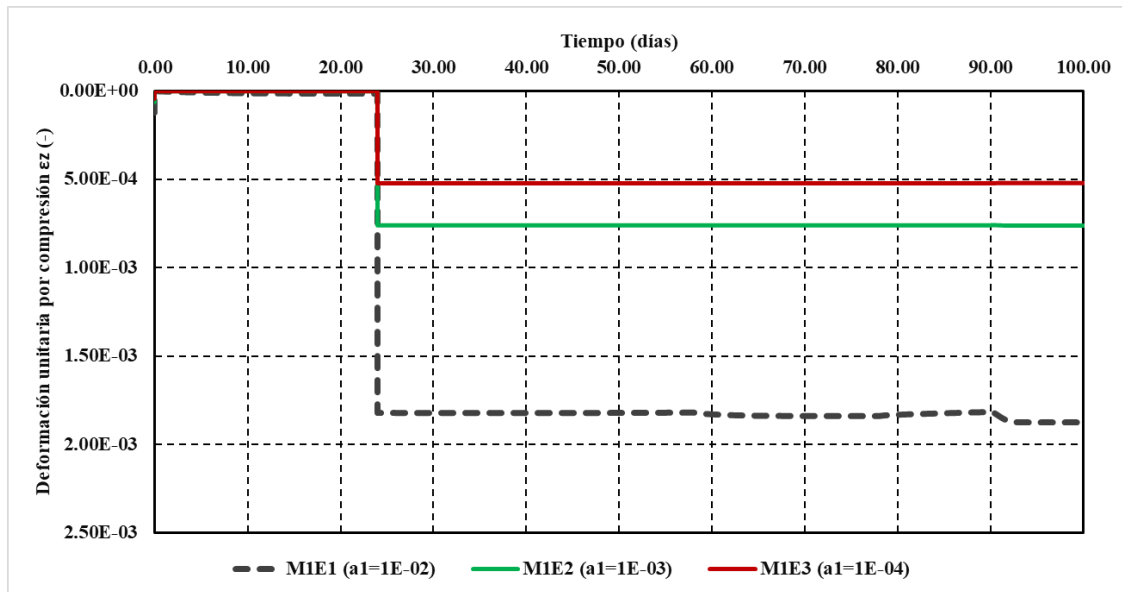
Evolución de la deformación unitaria por tracción en la serie de modelos M3E1, M3E2 y M3E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 40

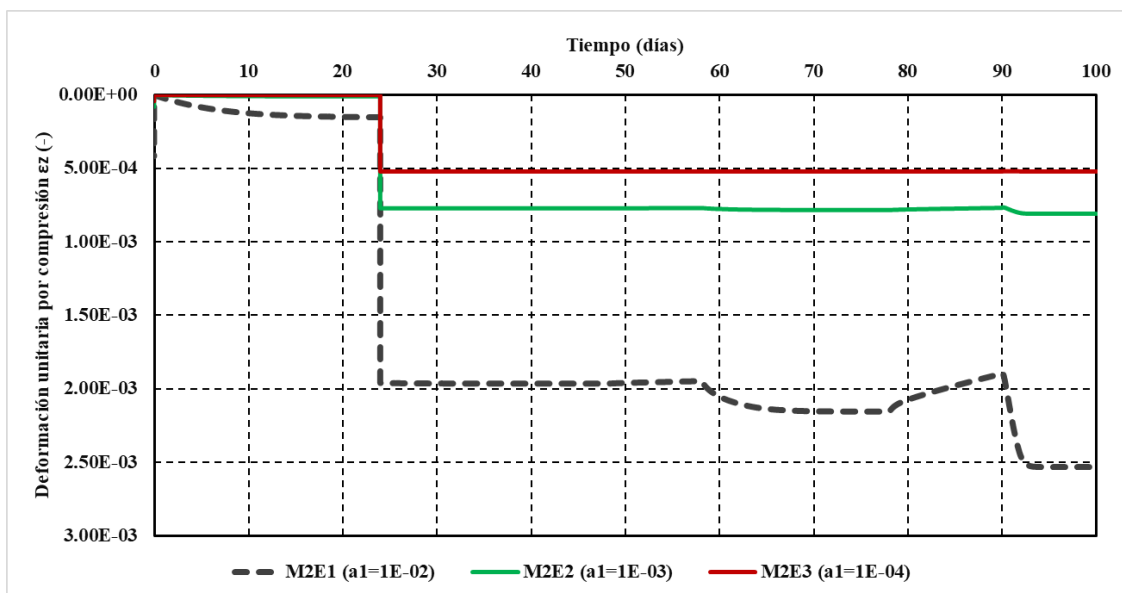
Evolución de la deformación unitaria por compresión en la serie de modelos M1E1, M1E2 y M1E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 41

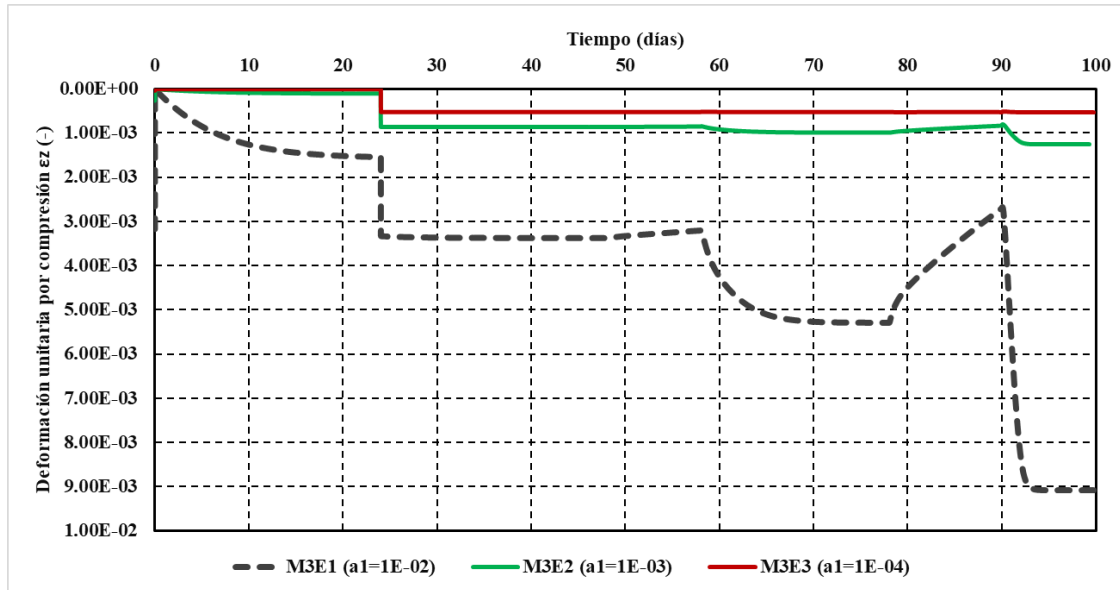
Evolución de la deformación unitaria por compresión en la serie de modelos M2E1, M2E2 y M2E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 42

Evolución de la deformación unitaria por compresión en la serie de modelos M2E1, M2E2 y M2E3



Nota. Elaboración Propia

4.3.1.2.2 Modelos de influencia del módulo de rigidez por succión a_2

La Figura 43 presentada muestra la evolución de la deflexión vertical (Δz) a lo largo del tiempo para tres modelos diferentes, cada uno representando variaciones en el parámetro a_2 como un porcentaje de parámetro a_1 . Las curvas corresponden a tres escenarios: el primero (M1E1) con a_2 igual al 1% de a_1 representando por la línea punteada negra, el segundo (M2E1) con a_2 igual al 10% de a_1 representado por la línea verde, y el tercero (M3E1) con a_2 igual al 100% de a_1 mostrado por la línea roja.

En el caso de la simulación M1E1, donde a_2 es solo un 1% de a_1 , la deflexión se mantiene prácticamente constante alrededor de los 6 mm a lo largo de todo el periodo de 100 días, la cual corresponde principalmente a la acción de la carga vehicular. Este comportamiento refleja una

mínima influencia del parámetro a_2 , mostrando que, con valores bajos de este parámetro, el modelo se ve influenciado únicamente por la componente mecánica, es decir a_1 .

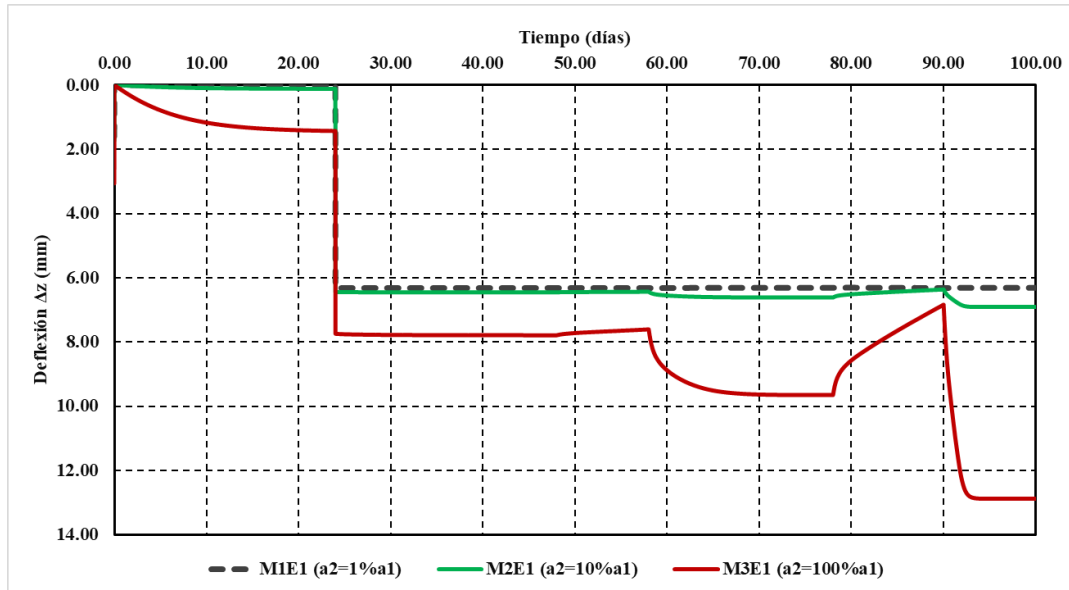
En la simulación M2E1, donde el parámetro a_2 se incrementa al 10% de a_1 , se observa un ligero aumento inicial en la deflexión que rápidamente se estabiliza también cerca de los 6 mm. Aunque se aprecia un ajuste inicial un poco más pronunciado en comparación con M1E1, la deflexión muestra ligeras variaciones asociadas a las condiciones externas impuestas de lluvias y periodos de secado. Esto sugiere que, si bien aumentar a_2 al 10% tiene un efecto intermedio en el comportamiento de la deflexión en la superficie del concreto asfáltico.

Por otro lado, en la simulación M3E1, donde a_2 es igual al 100% de a_1 , se observa un comportamiento marcadamente diferente. En este caso, la deflexión inicial es mucho mayor, alcanzando casi los 12 mm, seguida de periodos de carga y descarga específicas a lo largo del periodo simulado. Estas fluctuaciones indican que el comportamiento esfuerzo-deformación del material está fuertemente influenciado por la rigidez asociada a la succión, la cual actúa como el factor predominante en el control de los cambios volumétricos del modelo.

El comportamiento previamente descrito para la variable de deflexión en la superficie de concreto asfáltico se extiende de manera similar a la, la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r), tal como se presenta en las siguientes figuras. Esto indica que las tendencias observadas en términos de rigidez y respuesta del material bajo diferentes parámetros son consistentes tanto para la deflexión como para las deformaciones unitarias evaluadas. Estos resultados se presentan en la Figura 44 y Figura 45.

Figura 43

Evolución de la deflexión en el CA para la serie de modelos M1E1, M2E1 y M3E1 – $a_2 = 1\% a_1$

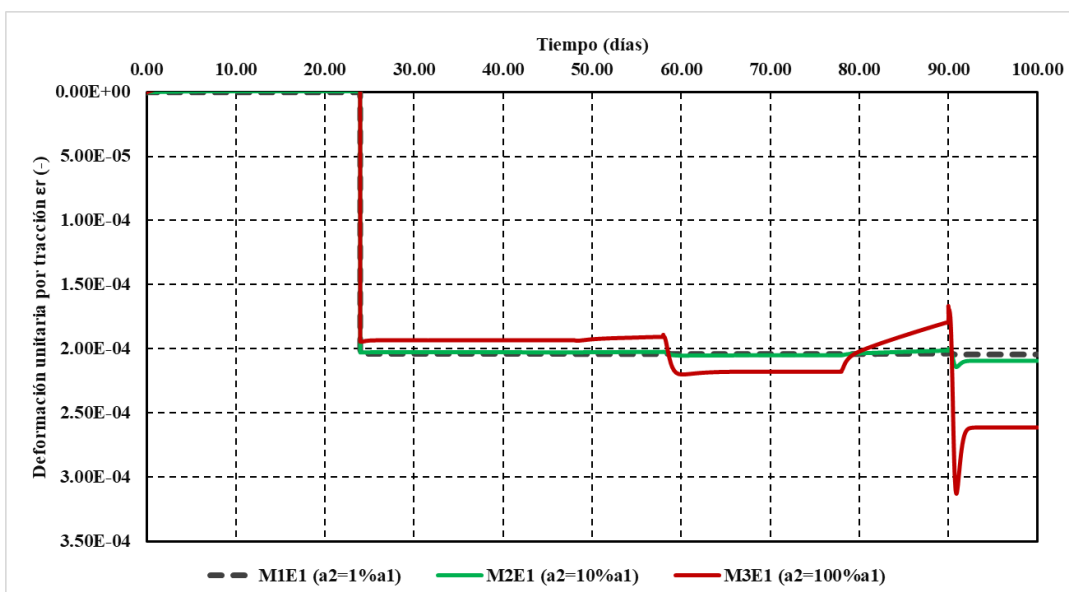


Nota. Elaboración Propia

Figura 44

Evolución de la deformación unitaria por tracción en la serie de modelos M1E1, M2E1 y M3E1 –

$a_2 = 10\% a_1$

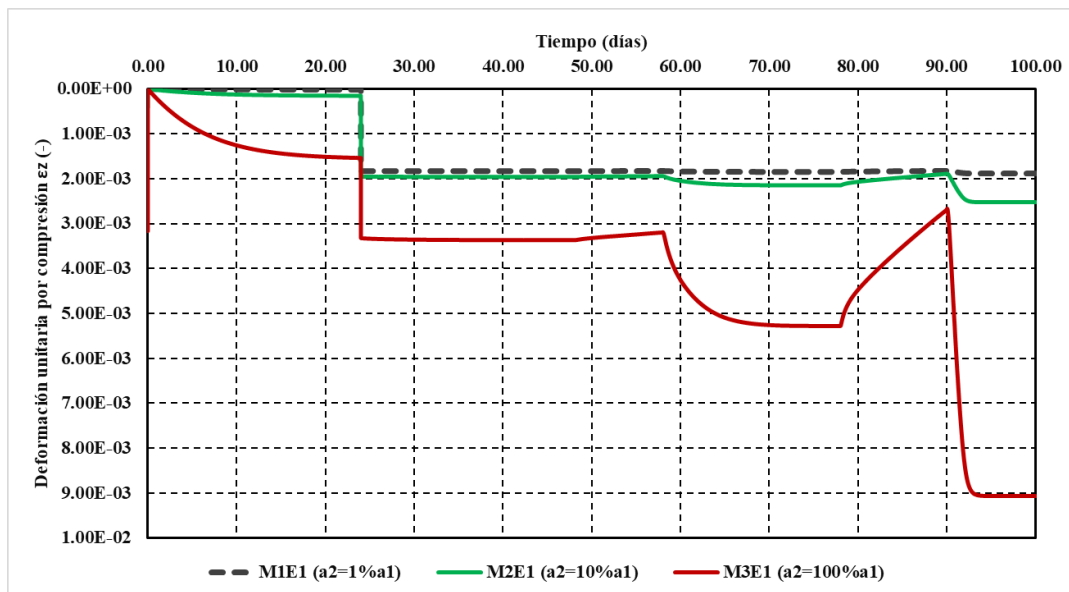


Nota. Elaboración Propia

Figura 45

Evolución de la deformación unitaria por compresión en la serie de modelos M1E1, M2E1 y M3E1

– $a_2 = 100\% a_1$



Nota. Elaboración Propia

4.3.1.2.1 Modelos de influencia de la permeabilidad intrínseca

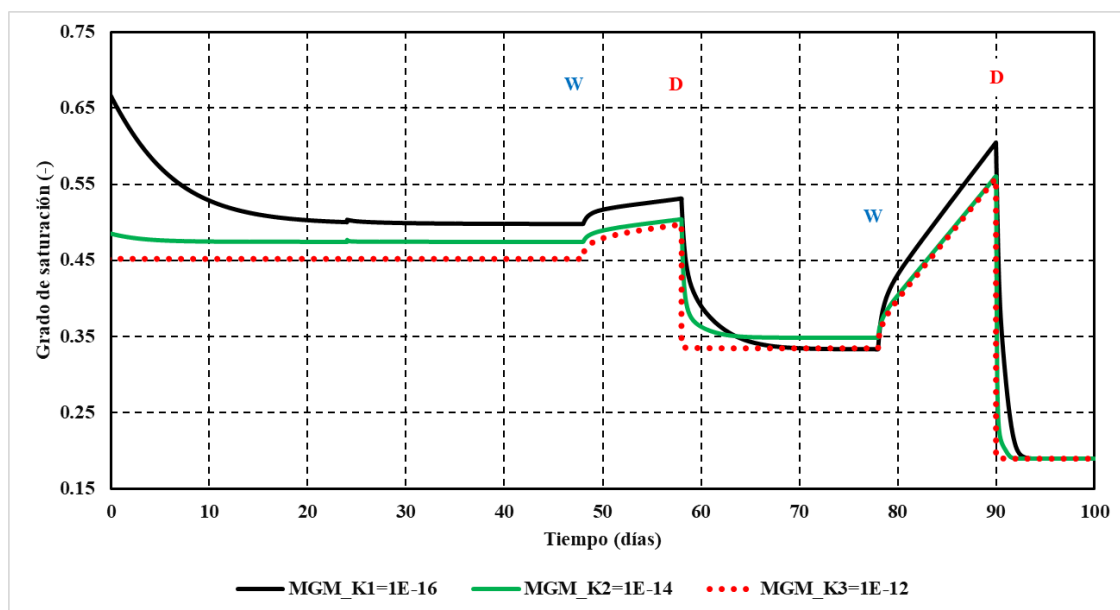
Se realizaron tres simulaciones numérica para desarrollar un análisis de sensibilidad sobre la permeabilidad intrínseca del materia granular marginal MGM, partiendo de un valor de cálculo de $1,0E-16$ m², y modelando los casos correspondientes a $1,0E-14$ y $1,0E-12$. En todos los modelos se consideraron los intervalos de análisis mencionados en los numerales anteriores con el fin de evaluar la evolución en el tiempo del grado de saturación de los MGM y de las variables de diseño: la deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δ_z), la deformación por tracción horizontal en

la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r).

El efecto de la permeabilidad en el grado de saturación de los MGM durante los diferentes escenarios de análisis se presenta en la Figura 46. De estos resultados se puede interpretar que el desarrollo del grado de saturación en estos materiales está directamente asociado a la permeabilidad intrínseca. Para el caso $K_1=1E-16$ muestra mayores niveles de saturación debido a su baja permeabilidad, lo que dificulta el drenaje del agua y mantiene altos niveles de humedad por más tiempo. En contraste, el caso $K_3=1E-12$ tiene el grado de saturación más bajo, ya que la alta permeabilidad permite que el agua drene rápidamente, reduciendo su capacidad de retención. El caso $K_2=1E-14$ presenta un comportamiento intermedio, mostrando fluctuaciones moderadas en la saturación.

Figura 46

Evolución del grado de saturación en los MGM

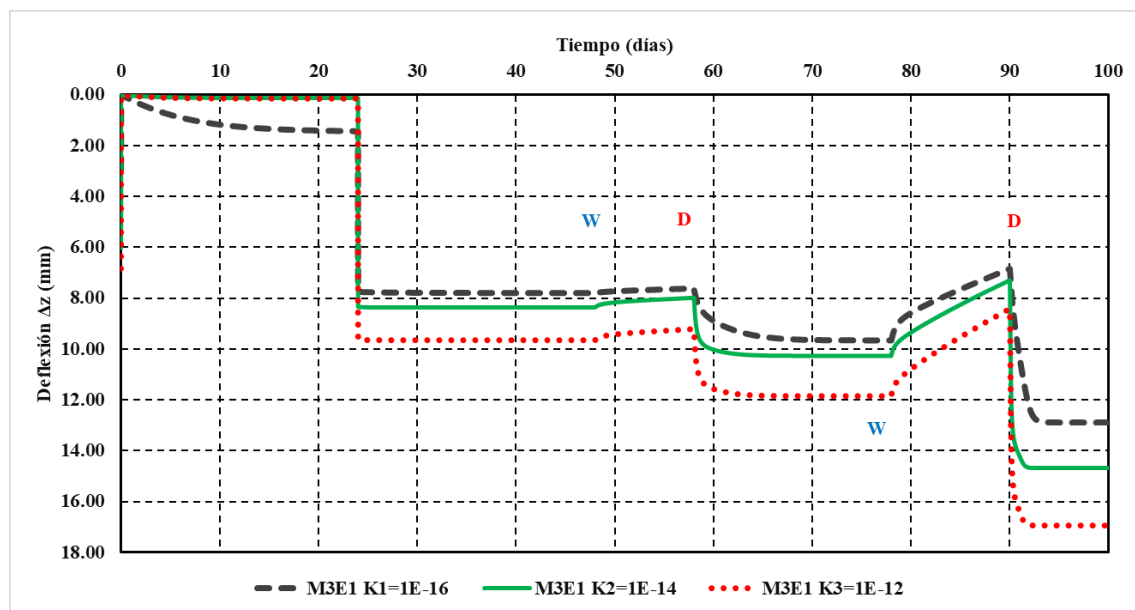


Nota. Elaboración Propia

La Figura 47 muestra que la deflexión en la parte superior de la capa asfáltica (CA) depende tanto de la magnitud de los cambios de saturación como de la permeabilidad intrínseca de los materiales granulares marginales (MGM). Se observa que, cuando la penetración del agua es limitada debido a una baja permeabilidad, la deflexión tiende a reducirse. En contraste, con una permeabilidad más alta, durante los intervalos de secado, se producen variaciones significativas en la succión dentro del terraplén, lo que induce cargas adicionales en su estructura.

Figura 47

Evolución de la deflexión en el CA para la serie de modelos MIE3

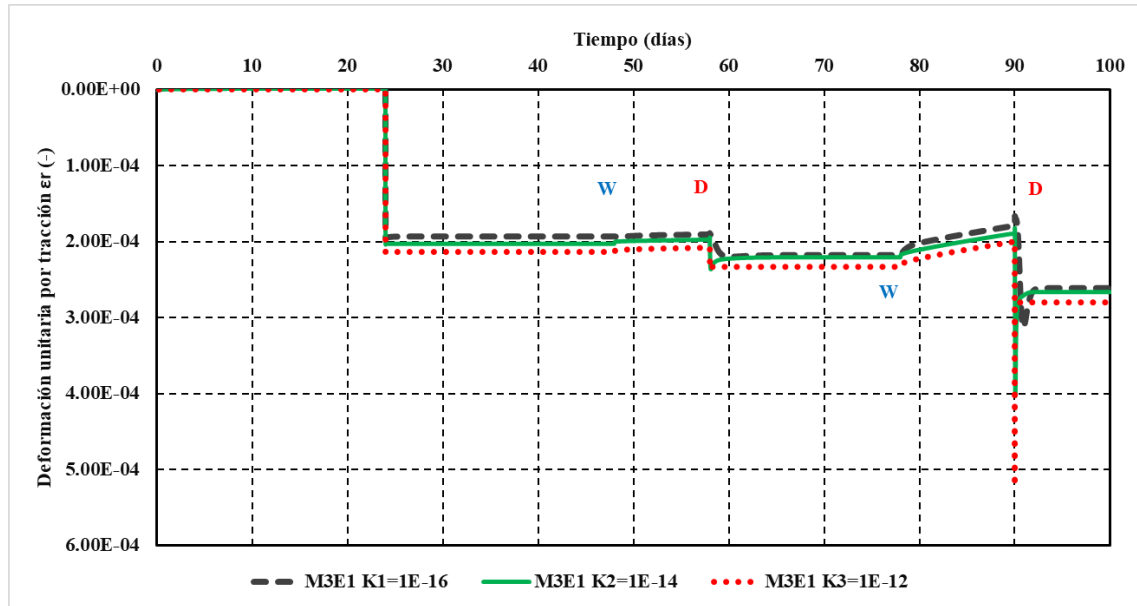


Nota. Elaboración Propia

El comportamiento previamente descrito para la variable de deflexión en la superficie de concreto asfáltico se extiende de manera similar a la, la deformación por tracción horizontal en la parte inferior de la capa de concreto asfáltico (ϵ_r) y la deformación por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r), tal como se presenta en la Figura 48y Figura 49.

Figura 48

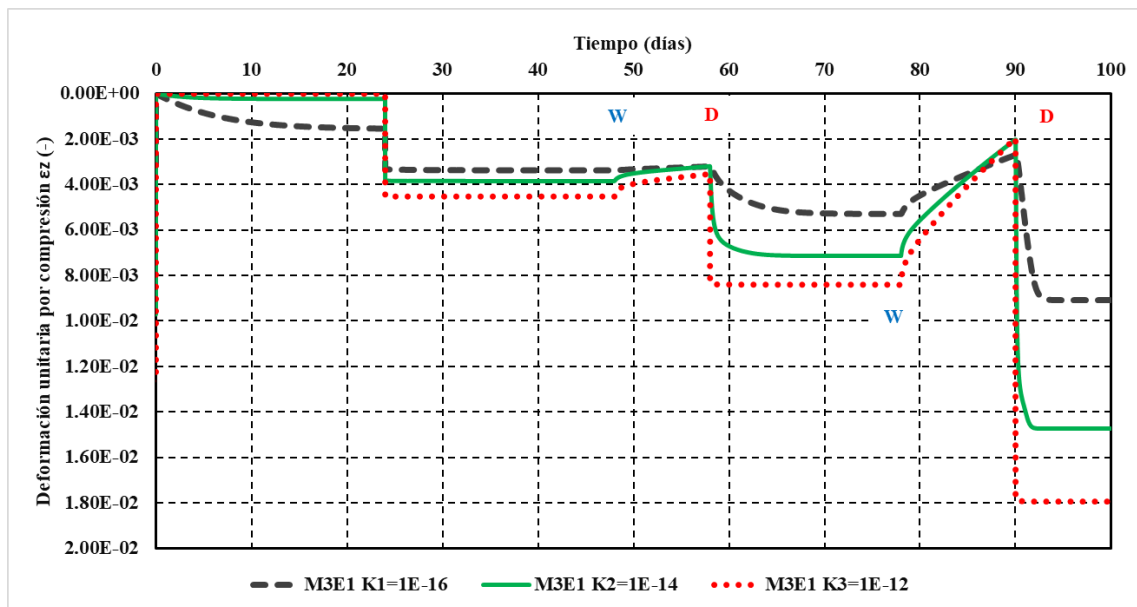
Evolución de la deformación unitaria por tracción en la serie de modelos M1E3



Nota. Elaboración Propia

Figura 49

Evolución de la deformación unitaria por compresión en la serie de modelos M1E3



Nota. Elaboración Propia

4.3.1.2.2 Grado de sensibilidad de los parámetros de diseño

Al realizar el análisis de sensibilidad de las variables involucradas en el diseño de la estructura de un pavimento flexible, como se expuso anteriormente, se evaluó el grado de sensibilidad de cada variable, clasificándolas y organizándolas en función de su influencia, de mayor a menor. Las Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33 presentan las variables analizadas en términos de los parámetros Δ_z , ε_r y ε_z , respectivamente. Cabe destacar que este análisis se realizó considerando las distintas etapas del modelo, abarcando tanto periodos de precipitación como de secado, lo que permite un enfoque detallado sobre cómo las condiciones de humedad afectan la sensibilidad de las variables a lo largo del tiempo.

En el análisis de la deflexión vertical en la superficie del pavimento (Δ_z), se determinó que la variable con mayor influencia es el módulo de rigidez que controla los cambios volumétricos por succión a_2 , como se presenta en la Tabla 31. Esto indica que, para materiales granulares marginales (MGM) con un alto contenido de finos, como los evaluados en este Trabajo de Aplicación, las variaciones debidas a los ciclos de humedecimiento y secado tienen un impacto más significativo que los cambios asociados a la rigidez general, representados por el parámetro a_1 .

Asimismo, se observa que el grado de sensibilidad varía según el contenido de finos del material. En el caso de los MGM con un contenido de finos que presenta un buen comportamiento (específicamente, cuando a_2 equivale al 1% de a_1), el terraplén muestra menores deflexiones en la superficie en comparación con los modelos que emplean finos expansivos, donde a_1 alcanza el 100%. Esto sugiere que, en materiales con finos no expansivos, la rigidez del pavimento se ve

menos afectada por los ciclos de humedecimiento y succión, resultando en una mayor estabilidad de la superficie.

Asimismo, se evidencia que la permeabilidad intrínseca de los materiales presenta un grado de sensibilidad bajo a medio en la variación de la deflexión vertical en la superficie del pavimento. Esto sugiere que la capacidad de infiltración y drenaje del terraplén influye en su comportamiento general, ya que afecta la forma en que el agua se infiltra y se evacúa, impactando indirectamente las deformaciones asociadas a los ciclos de humedecimiento y secado.

Tabla 31

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de Δ_z

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia	Sequia	Lluvia	Sequia	
	moderada	moderada	intensa	intensa	
a1	12	11	13	15	BAJO
a2	25	45	35	50	MEDIO - ALTO
Kxx = Kyy = Kzz	14	22	26	28	BAJO - MEDIO

Nota. Elaboración Propia

En el análisis de la deformación unitaria por tensión en la base del concreto asfáltico (CA), se identificó que las tres variables de diseño evaluadas muestran un grado de sensibilidad bajo ante la aplicación de ciclos de secado y humedecimiento. Esto indica que las tensiones generadas en la

base del pavimento no se ven significativamente afectadas por estas variaciones en las condiciones de humedad como se presenta en la Tabla 32.

Tabla 32

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de ϵ_r

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia moderada	Sequia moderada	Lluvia intensa	Sequia intensa	
a1	5	4	6	6	BAJO
a2	12	10	13	12	BAJO
K_{xx} = K_{yy} = K_{zz}	3	4	5	5	BAJO

Nota. Elaboración Propia

Para el caso de la deformación unitaria por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ϵ_r) se ha observado que presenta el mismo grado de sensibilidad que la deflexión vertical en la superficie del CA de acuerdo a lo presentando en la Tabla 33.

Tabla 33*Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de ε_z*

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia	Sequia	Lluvia	Sequia	
	moderada	moderada	intensa	intensa	
a1	10	14	12	17	BAJO - MEDIO
a2	25	45	32	47	MEDIO - ALTO
Kxx = Kyy = Kzz	16	22	18	28	MEDIO - ALTO

Nota. Elaboración Propia

4.3.1.3 Modelo de viscoplasticidad

4.3.1.3.1 Modelos de influencia del módulo de compresibilidad elastoplástica $\lambda(0)$

De manera alternativa también se desarrollaron modelos numéricos incorporando la versión viscoplástica del Modelo Básico de Barcelona (BBM) que fue implementada en CODE_BRIGHT® en la forma propuesta por Desai' A N & Zhang (1987) para suelos saturados y posteriormente extendida para suelos no saturados por Yin et al., (2010). Para los modelos considerados se incorporó una ecuación no lineal en su tramo elástico para modelar la dependencia de las expansiones o contracciones con el esfuerzo de confinamiento.

Como referencia se tomaron 9 modelos desarrollados para el modelo de estado de superficies presentados anteriormente. Sin embargo, al incluirle los parámetros del Modelo Básico

de Barcelona (BBM) se realizó una sensibilidad en el parámetro $\lambda(0)$ en los MGM, el cual describe el endurecimiento que se describe con la función BBM para la compresibilidad elastoplástica con la pendiente de la curva relación de vacíos (e) vs esfuerzo neto medio en condiciones saturadas. Los valores considerados para $\lambda(0)$ corresponde a 0,002, 0,02 y 0,2, donde los valores más bajos corresponden a suelos con menor contenidos de finos expansivos y el mayor valor corresponde a suelos granulares con alto contenido de finos expansivos.

En la Tabla 34 se presenta la matriz de modelos considerados para el BBM.

Tabla 34

Matriz de modelos para el modelo BBM

		Base granular marginal		Subbase granular marginal		$\lambda(0)$	Nombre del modelo		
		a_1	a_2	a_1	a_2				
$E_{CA} =$ 3250 MPa	$E_{SBR} =$ 100 MPa	-1.00E-02	-1.00E-02	-1.00E-02	-1.00E-02	0,002	M1E1_BBM		
		-1.00E-03	-1.00E-03	-1.00E-03	-1.00E-03		M1E2_BBM		
		-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-04		M1E3_BBM		
				-1.00E-02	-1.00E-02	-1.00E-02	-1.00E-02	0,02	M1E4_BBM
				-1.00E-03	-1.00E-03	-1.00E-03	-1.00E-03		M1E5_BBM
				-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-04		M1E6_BBM
				-1.00E-02	-1.00E-02	-1.00E-02	-1.00E-02	0,2	M1E7_BBM
				-1.00E-03	-1.00E-03	-1.00E-03	-1.00E-03		M1E8_BBM
				-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-04	-1.00E-04		M1E9_BBM

Nota. Elaboración Propia

A partir de las simulaciones planteadas, se evaluaron los parámetros de diseño en los intervalos de trabajo especificados en la Tabla 29. Inicialmente, se considera la etapa de equilibrio geo estático y la aplicación de carga bajo el estado de compactación del material en su condición "as compacted", en intervalos que abarcan desde el día 0 hasta el día 48. Esta fase establece un estado inicial de tensiones y condiciones hidráulicas de referencia para el modelo, asegurando la estabilidad geo estática previa a la imposición de cargas adicionales.

Posteriormente, se incorporaron los efectos de los ciclos de lluvia y evaporación, que representaron condiciones ambientales variables sobre el sistema modelado. Los períodos de lluvia fueron simulados con intensidades clasificadas como moderadas e intensas, regulando estos valores en función de la precipitación diaria medida en milímetros. De manera similar, en los períodos de evaporación se evaluaron distintas humedades relativas, lo que permitió analizar los efectos de la desecación en el suelo.

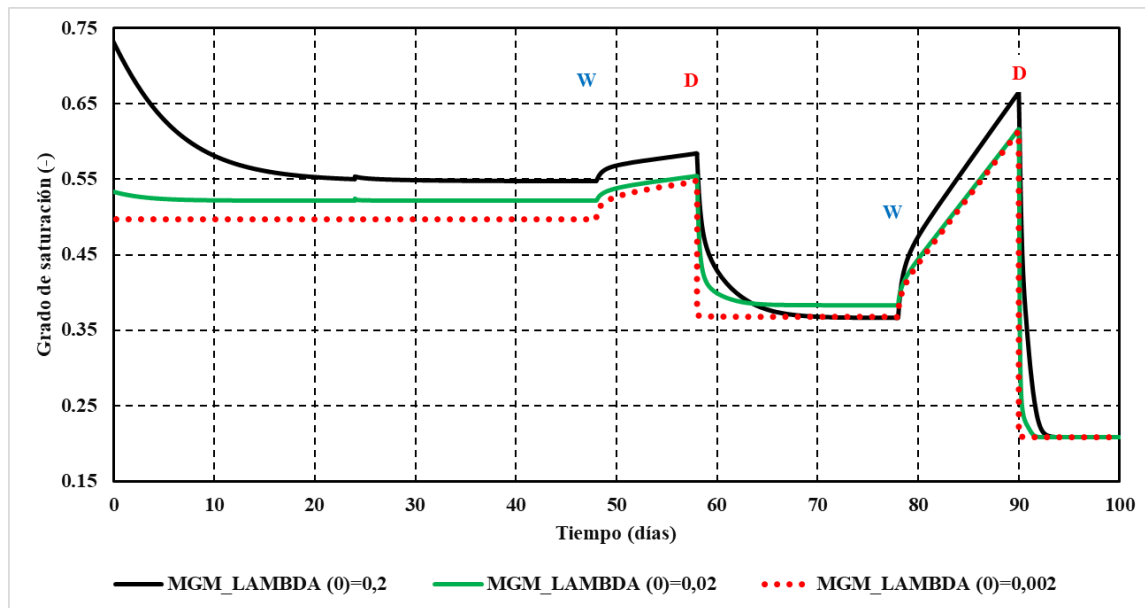
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los modelos hidromecánicos acoplado correspondientes a la simulación codificada como M1E1_BBM, M1E4_BBM y M1E7_BBM. Los principales resultados evaluados en este Trabajo de Aplicación incluyen la evolución temporal del grado de saturación y la porosidad de los materiales que conforman el terraplén, el comportamiento de los esfuerzos efectivos y de la presión de agua, así como las deformaciones a lo largo del tiempo.

La Figura 50 muestra la variación del grado de saturación en función del tiempo, medida en días para materiales granulares marginales (MGM). En el eje vertical se representa el grado de saturación (valores entre 0 y 1), mientras que en el eje horizontal se mide el tiempo transcurrido en días.

La gráfica muestra la evolución del grado de saturación en función del tiempo para materiales granulares marginales (MGM) con diferentes valores del parámetro asociado a la proporción de finos. Se analizan tres escenarios: 0.2 (línea negra), 0.02 (línea verde) y 0.002 (línea punteada roja). Al inicio, el grado de saturación es mayor para los materiales con el valor más alto del parámetro, lo que indica que estos tienen mayor capacidad de retención de agua debido a la influencia de los finos.

Figura 50

Evolución del grado de saturación en el MGM para los modelos M1E1_BBM, M1E4_BBM y M1E7_BBM.



Nota. Elaboración Propia

En la Figura 51 muestra las distribuciones de presión de poros y esfuerzos efectivos en distintas etapas del análisis para el modelo M1E1_BBM, evidenciando cómo estas magnitudes varían según las condiciones aplicadas al suelo. Inicialmente, bajo equilibrio geostático, la presión de poros refleja el peso propio del suelo, incrementándose con la profundidad hacia la base del talud.

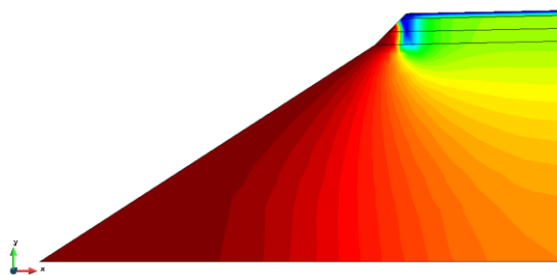
Al aplicar una carga externa, los esfuerzos efectivos presentan un gradiente creciente hacia la base, destacándose mayores tensiones en colores rojo y amarillo. Bajo condiciones de lluvia moderada, se observa un aumento en la presión de poros, especialmente cerca de la superficie, debido a la infiltración de agua. Finalmente, la combinación de lluvia moderada y carga adicional

reduce los esfuerzos efectivos en comparación con etapas previas, con zonas en verde y amarillo indicando menores valores.

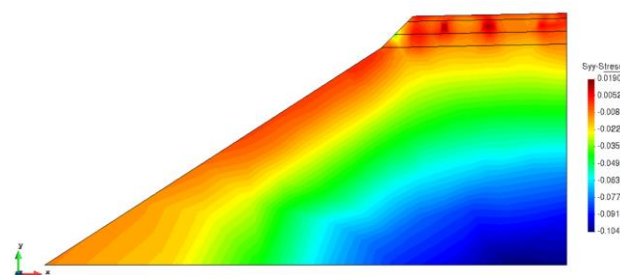
Estos resultados son coherentes con los obtenidos para el modelo de superficie de estado. Esto evidencia que el desarrollo y comportamiento de estas magnitudes están alineados con las condiciones del modelo, confirmando la validez del análisis.

Figura 51

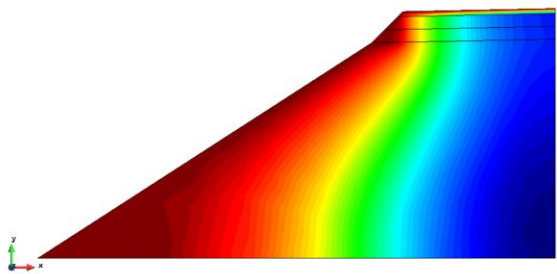
Esfuerzos efectivos y presiones de poros desarrolladas en los diferentes intervalos de análisis



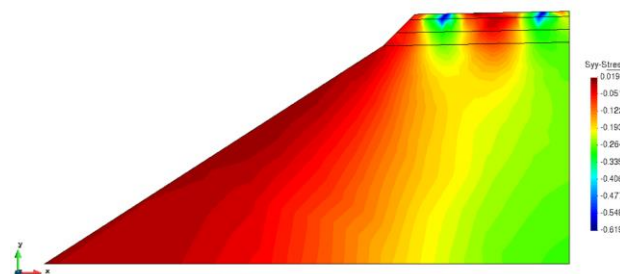
(i) Presión de poros (equilibrio geostático)



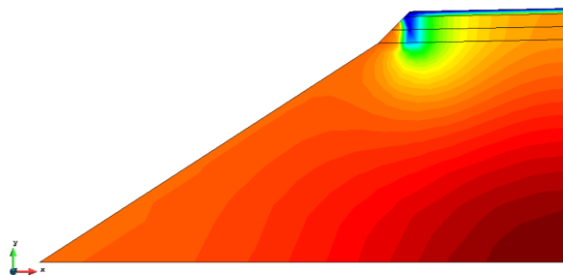
(j) Esfuerzos efectivos (día 24)



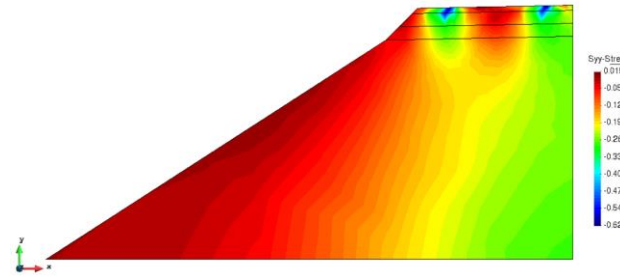
(k) Presión de poros (lluvia moderada)



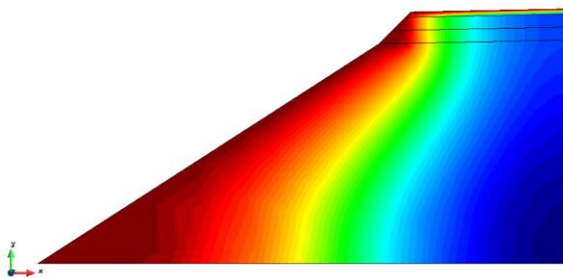
(l) Esfuerzos efectivos (lluvia moderada + carga)



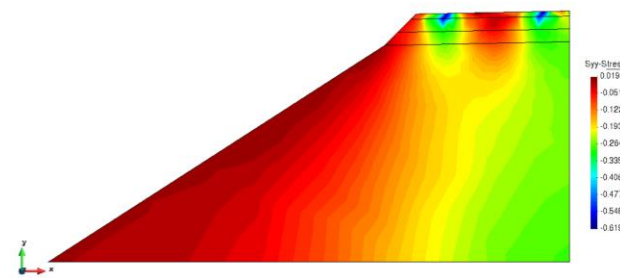
(m) Presión de poros (evaporación moderada)



(n) Esfuerzos efectivos (evaporación moderada)



(o) Presión de poros lluvia intensa



(p) Esfuerzos efectivos (lluvia intensa)

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 52 se presenta las deformadas en diferentes etapas de la deflexión en la parte superior del CA en función del tiempo, como respuesta a los cambios de humedad en el suelo. Estos resultados, obtenidos previamente con modelo de estado de superficies, son comparables a los del modelo básico de Barcelona y muestran un alto grado de ajuste entre ambos enfoques. Inicialmente, se registra una deflexión significativa debido a la aplicación de la carga sobre la estructura.

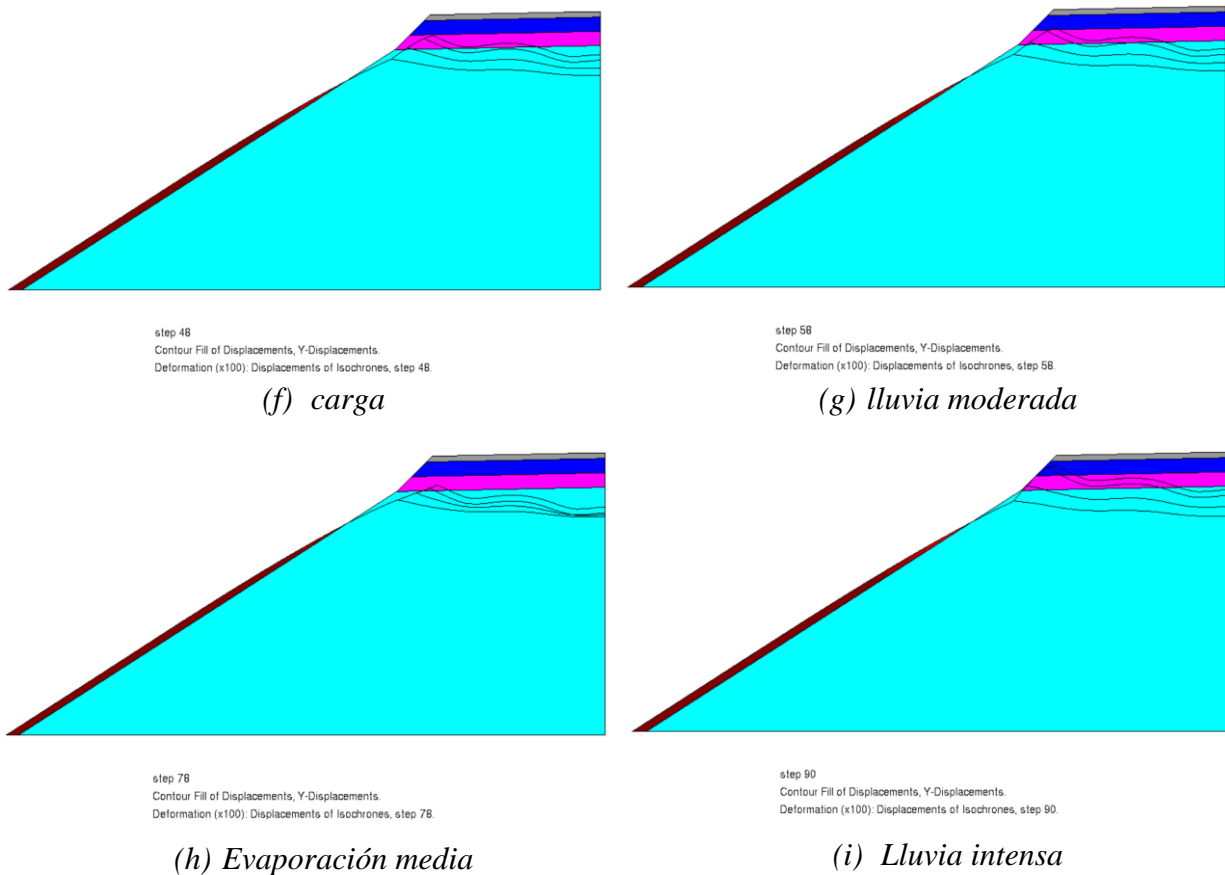
A lo largo del tiempo, se identifican fases alternas de secado y humedecimiento, marcadas como "D" y "W", respectivamente. Durante las fases de secado, la pérdida de humedad incrementa la succión interna del suelo, lo que mejora su resistencia. Este fenómeno favorece una mayor compactación bajo la misma carga, generando un aumento en la deflexión. Por el contrario, en las fases de humedecimiento, la absorción de agua por el suelo reduce la succión y disminuye su

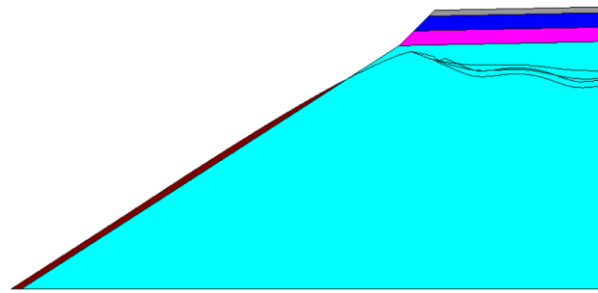
rigidez, permitiendo su expansión o reacomodo, lo cual se refleja en una disminución de la deflexión observada en la gráfica.

La concordancia entre los resultados obtenidos con ambos modelos evidencia la capacidad del modelo básico de Barcelona para capturar de manera efectiva los mecanismos de comportamiento del suelo frente a las variaciones de humedad, reafirmando su validez para representar fenómenos complejos bajo condiciones de succión.

Figura 52

Deformadas del terraplén en las diferentes etapas de análisis





(j) *Evaporación intensa*

Nota. Elaboración Propia

4.3.1.3.2 *Grado de sensibilidad de los parámetros de diseño*

El análisis de sensibilidad de las variables involucradas en el diseño de la estructura de un pavimento flexible, como se explicó anteriormente, permitió identificar y clasificar dichas variables según su grado de influencia, organizándolas de mayor a menor impacto. Las Tabla 35, Tabla 36 y Tabla 37 muestran los resultados del análisis, detallando el comportamiento de las variables estudiadas en función de los parámetros evaluados.

Este estudio se desarrolló considerando las diferentes etapas del modelo, incluyendo tanto periodos de precipitación como de secado. Este enfoque integral permite analizar cómo las condiciones de humedad influyen en la sensibilidad de las variables a lo largo del tiempo, ofreciendo información valiosa para optimizar el diseño y desempeño de las estructuras de pavimento flexible.

En el análisis de la deflexión vertical en la superficie del pavimento ($\square z$), se determinó que la variable con mayor influencia es el módulo de rigidez que controla los cambios volumétricos por succión a_2 y el parámetro de rigidez elastoplásticas por cambios en succión $\lambda(0)$, como se presenta en la Tabla 35. Esto indica que, para materiales granulares marginales (MGM) con un alto contenido de finos, como los evaluados en este Trabajo de Aplicación, las

variaciones debidas a los ciclos de humedecimiento y secado tienen un impacto más significativo que los cambios asociados a la rigidez general, representados por el parámetro a_1 .

Tabla 35

Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de Δ_z

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia moderada	Sequia moderada	Lluvia intensa	Sequia intensa	
a1	13	10	14	15	BAJO
a2	18	38	33	50	MEDIO - ALTO
$\lambda(0)$	22	35	32	54	MEDIO - ALTO

Nota. Elaboración Propia

El estudio de la deformación unitaria por tensión en la base del concreto asfáltico (CA) reveló que las tres variables de diseño analizadas presentan una sensibilidad limitada frente a los ciclos de secado y humedecimiento. Este comportamiento sugiere que las tensiones desarrolladas en la base del pavimento permanecen relativamente estables, incluso ante fluctuaciones en las condiciones de humedad. Los resultados que sustentan esta observación se resumen en la Tabla 36.

Tabla 36*Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de ε_r*

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia	Sequia	Lluvia	Sequia	
	moderada	moderada	intensa	intensa	
a1	5	4	6	6	BAJO
a2	12	10	13	12	BAJO
$\lambda(0)$	5	5	7	9	BAJO

Nota. Elaboración Propia

Para el caso de la deformación unitaria por compresión vertical en la superficie de la subrasante (ε_r) se ha observado que presenta el mismo grado de sensibilidad que la deflexión vertical en la superficie del CA de acuerdo a lo presentando en la Tabla 37.

Tabla 37*Grado de sensibilidad variables de diseño en términos de ε_z*

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia	Sequia	Lluvia	Sequia	
	moderada	moderada	intensa	intensa	
a1	10	14	12	17	BAJO - MEDIO

Variable de diseño	Máximo % Variación Δ_z				Grado de sensibilidad
	Lluvia moderada	Sequia moderada	Lluvia intensa	Sequia intensa	
a₂	25	45	32	47	MEDIO - ALTO
$\lambda(0)$	16	22	18	28	MEDIO - ALTO

Nota. Elaboración Propia

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

De manera general, los análisis realizados en este trabajo demuestran cómo las herramientas de la moderna Mecánica de Suelos no saturados pueden ser aplicadas al estudio de casos prácticos, específicamente en vías rurales de bajo volumen de tránsito. Este enfoque resalta el potencial de los materiales granulares marginales (MGM) para ser utilizados en estructuras de pavimento, incluso cuando no cumplen completamente con las especificaciones tradicionales para materiales viales.

La modelación numérica validó que, bajo un diseño y manejo adecuados, los MGM pueden desempeñarse de manera efectiva, optimizando los recursos disponibles en regiones rurales. Este análisis se basa en la caracterización detallada de los MGM, destacando que propiedades fundamentales como la granulometría, los límites de Atterberg y la curva de retención de agua son esenciales para entender su comportamiento frente a diferentes condiciones de succión y carga.

Un aspecto crítico identificado es la influencia de la succión sobre la rigidez, la resistencia y la capacidad de deformación de los MGM. En particular, los ciclos de humedecimiento y secado inducen deformaciones volumétricas que pueden alterar significativamente el comportamiento estructural del pavimento. Este fenómeno subraya la importancia de considerar los efectos de la succión en el diseño de pavimentos que incorporen MGM.

Asimismo, los resultados del análisis numérico muestran que las propiedades hidráulicas, como la permeabilidad y el grado de saturación, tienen un impacto directo en la respuesta esfuerzo-deformación de las capas de pavimento. Estos parámetros deben ser cuidadosamente evaluados durante el proceso de diseño, ya que influyen en la estabilidad y el desempeño de las estructuras analizadas.

La utilización de herramientas avanzadas como CODE_BRIGHT® y GiD® permitió una representación precisa de los fenómenos hidromecánicos acoplados en suelos parcialmente saturados. Además, la implementación de modelos constitutivos, como el Modelo Elástico Lineal, el Modelo de Superficies de Estado y el Modelo Básico de Barcelona (BBM), proporcionó una visión integral de las respuestas mecánicas de los MGM bajo diversas condiciones ambientales y de carga.

Finalmente, la validación de los modelos numéricos mostró una alta concordancia con estudios previos, lo que confirma la capacidad predictiva y la aplicabilidad de los enfoques empleados. Este trabajo demuestra que, mediante el uso de técnicas de modelación avanzadas y una adecuada caracterización de los materiales, es posible diseñar soluciones sostenibles y eficaces para vías rurales de bajo volumen de tránsito.

5.2 Conclusiones específicas

El uso de modelos constitutivos avanzados permitió capturar distintos aspectos del comportamiento mecánico e hidráulico de los materiales granulares marginales (MGM) bajo condiciones complejas. El Modelo Elástico Lineal, aunque adecuado para obtener estimaciones iniciales del comportamiento estructural, presenta limitaciones al abordar escenarios donde predominan efectos no lineales, por lo que su capacidad predictiva resulta insuficiente en situaciones más representativas del comportamiento real de los suelos.

Por su parte, el Modelo de Superficies de Estado mostró una capacidad superior para capturar los cambios volumétricos inducidos por la succión, especialmente durante ciclos de humedecimiento y secado, permitiendo así una representación más precisa de los fenómenos de deformación asociados a las variaciones en el contenido de humedad. Complementando esto, el

Modelo Básico de Barcelona (BBM) proporcionó un marco robusto para analizar el comportamiento viscoplástico de los suelos no saturados. Este modelo incorporó efectos críticos, como la rigidez elástica dependiente de la succión y las deformaciones elastoplásticas, permitiendo explorar con mayor profundidad la respuesta mecánica de los MGM en condiciones de carga y succión acopladas.

En cuanto a las simulaciones realizadas, los análisis de taludes destacaron que las condiciones de saturación inicial, así como la entrada de agua en los bordes, tienen un impacto significativo en las deformaciones y el estado tensional de las estructuras. Este hallazgo subraya la importancia de controlar las condiciones de drenaje y la interacción del pavimento con el entorno natural para garantizar un desempeño adecuado.

Las restricciones mecánicas y de flujo definidas en el modelo numérico permitieron replicar de manera efectiva las condiciones reales de carga y succión en los pavimentos rurales. Además, los análisis de sensibilidad realizados identificaron parámetros clave en el desempeño de los MGM, tales como la presión de entrada de aire, la curva de retención de agua y el contenido de finos. Estos factores demostraron ser determinantes en la respuesta esfuerzo-deformación y en la capacidad de los materiales para mantener su estabilidad estructural.

5.3 Implicaciones prácticas

El uso de materiales granulares marginales (MGM) representa una alternativa eficiente y sostenible para la construcción de infraestructura vial en zonas rurales. Su disponibilidad en canteras locales permite reducir significativamente los costos asociados al transporte de materiales convencionales desde regiones distantes, optimizando así los recursos económicos y minimizando el impacto ambiental de los proyectos. Esto refuerza el potencial de los MGM como una solución viable para proyectos de pavimentación en áreas con acceso limitado a materiales tradicionales.

En cuanto al diseño de las estructuras de pavimento, este trabajo subraya la importancia de considerar los efectos de los ciclos de humedecimiento y secado, particularmente en regiones con alta variabilidad climática. Dichos ciclos influyen directamente en el comportamiento de los MGM y en la durabilidad de los pavimentos, por lo que las recomendaciones obtenidas en este estudio pueden servir como base para mejorar los códigos de diseño actuales, incorporando criterios que garanticen un desempeño adecuado bajo estas condiciones dinámicas.

Además, este trabajo valida la utilidad y el alcance de herramientas avanzadas de simulación, como CODE_BRIGHT®, en la ingeniería de pavimentos. Su capacidad para modelar interacciones acopladas termo-hidromecánicas permite abordar problemas complejos de manera integral, asegurando un diseño más preciso y adaptable a las condiciones ambientales cambiantes. Esto resalta la relevancia de la modelación numérica como un apoyo clave en el desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles para la infraestructura vial en el contexto de las tecnologías modernas de ingeniería.

5.4 Recomendaciones para trabajos futuros

5.4.1 Validación experimental

Es necesario llevar a cabo pruebas en laboratorio y en campo para confirmar los hallazgos obtenidos en las simulaciones. Esto incluye ensayos para medir la curva de retención de agua, la resistencia al corte y la deformación en materiales marginales bajo condiciones controladas.

5.4.2 Ampliación de escenarios de modelación

Explorar el impacto de ciclos prolongados de carga y descargas en la durabilidad de pavimentos con MGM.

Incluir variaciones térmicas y otros factores ambientales que puedan influir en el comportamiento de las capas de pavimento.

5.4.3 Transferencia a la práctica

Diseñar proyectos piloto que implementen MGM en diferentes regiones del país, evaluando su desempeño a largo plazo bajo condiciones reales de tráfico y clima.

Referencias

- Alonso, E., & Lloret, A. (1985). Comportamiento de suelo parcialmente saturados. *Revista de Obras Públicas*, 435–461.
- Atkinson, J. (2017). *The Mechanics of Soil and Foundations*. CRC Press.
- Caro, S., & Caicedo, B. (2017). *Tecnologías para Vías Terciarias: Perspectivas y Experiencias desde la Academia*.
- Desai, A. N., C. S., & Zhang, D. D. (1987). *VISCOPLASTIC MODEL FOR GEOLOGIC MATERIALS WITH GENERALIZED FLOW RULE* (Vol. 11).
- Dineen, K. (1997). *The influence of soil suction on compressibility and swelling*. University of London.
- Fredlund, D. G. (2006). Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING ASCE*, 286–321.
<https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:3286>
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. www.wiley.com/go/permissions.
- Instituto Nacional de Vías. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022*.
- Lee, H. C., & Wray, W. K. (1995). *Techniques to evaluate soil suction-a vital unsaturated soil water variable*. 615–622.
- Leiva, O., & Solano, S. (2022). *Modelación numérica de estructuras de pavimento incorporando capas de materiales granulares marginales en una sección vial típica sobre terraplén, con consideración de los efectos de succión*.

- Likos, W. J., Lu, N., & Godt, J. W. (2014). Hysteresis and Uncertainty in Soil Water-Retention Curve Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001071](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001071)
- Lloret, A., Ortega, J., Olivella, S., & Romero, E. (2010). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE TERRAPLENES CONFORMADOS CON MATERIALES POTENCIALMENTE EXPANSIVOS*.
- Ministerio de Transporte. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*.
- Ministerio de Transporte. (2022). *Transporte en cifras 2022*. www.mintransporte.gov.co
- Páez Arenas, M. J. (2023). *Análisis de sensibilidad de variables de diseño sobre estructuras de pavimento conformados por materiales granulares marginales*.
- Rincón Morantes, J. F., Alvarez Lugo, A. E., & Reyes Ortiz, O. J. (2022). Estimación de la rigidez de materiales granulares marginales no ligados mediante ensayo CBR dinámico. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(01), 92–113. <https://doi.org/10.14482/inde.40.01.621.992>
- Higuera, C. H. (2007). *Mecánica de pavimentos: principios básicos*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Universitat Politècnica de Catalunya. (2023). *CODE_BRIGHT 2023 User's Guide*. https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*.
- Yin, Z. Y., Karstunen, M., & Hicher, P. Y. (2010). Evaluation of the Influence of Elasto-Viscoplastic Scaling Functions on Modelling Time-Dependent Behaviour of Natural Clays. *Soils and Foundations*, 50(2), 203–214. <https://doi.org/10.3208/SANDF.50.203>