

SIMULACIONES NUMÉRICAS DE PROCESOS DE EQUILIBRIO DE SUCCIÓN
DE SUELOS COMPACTADOS EN TRAYECTORIAS DE HUMEDECIMIENTO Y
SECADO

RENE ALEJANDRO UTRERA PÉREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2023

SIMULACIONES NUMÉRICAS DE PROCESOS DE EQUILIBRIO DE SUCCIÓN
DE SUELOS COMPACTADOS EN TRAYECTORIAS DE HUMEDECIMIENTO Y
SECADO

RENÉ ALEJANDRO UTRERA PÉREZ

Trabajo de grado modalidad investigativa para optar por el título de.
Ingeniero Civil

Director

VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES

Doctor en Geotecnia

Codirector

ALLEX EDUARDO ALVAREZ LUGO

Doctor en Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA

2023

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, Margarita Pérez y René Utrera, por creer en mí, por brindarme ese amor incondicional, no sería nadie sin ellos.

A mi hermana Vilma Zarate, por apoyarme a lo largo de este proceso.

A Julissa Pérez, gracias por ser esa persona incondicional.

A Francisco Luna, por aconsejarme y brindarme su apoyo a lo largo de la carrera.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron de manera significativa durante este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento hacia:

La Universidad Industrial de Santander por permitirme crecer como persona y profesionalmente.

A la Escuela de Ingeniería Civil y a su personal docente por contribuir exitosamente con mi formación profesional.

Al Ingeniero Vladimir Merchán Jaimes, director de este proyecto, quién mediante su conocimiento, disposición y asesoría, fue el guía ideal para poder culminar la tesis.

A Música y Danzas UIS, que mediante la danza me permitió conocer personas y lugares maravillosos.

A mis familiares y amigos, muchas gracias por el apoyo y tiempo compartido.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	13
1. OBEJTIVOS.....	15
1.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO TEORICO – ASPECTOS FUNDAMENTALES	16
2.1. POTENCIAL DE AGUA O SUCCION	16
2.2. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA	17
2.3. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y PERMEABILIDAD	19
2.3.1. Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados.....	20
2.4. LEY PSICROMETRICA	20
2.5. MATERIALES MARGINALES	21
2.6. CARACTERITICAS DEL MATERIAL.....	22
2.6.1. Proceso de compactación en laboratorio	22
2.6.2. Proceso de secado en laboratorio.....	23
3. PROCESO DE MODELACION NUMÉRICA.....	27
3.1. DEFINICION DE LA GEOMETRIA.....	29
3.2. DATOS DEL PROBLEMA.....	29
3.3. CONDICIONES DE CONTORNO	30
3.4. GENERACIÓN DE MALLA Y POST PROCESO	35
4. RESULTADOS OBTENIDOS	37
4.1. PROCESO DE SECADO	37
4.2. PROCESO DE HUMEDECIMIENTO	38
4.3. INFLUENCIA DEL FACTOR DE IMPEDANCIA EN LA MODELACIÓN.....	40

4.4. ANALISIS DE RESULTADOS.....	41
5. CONCLUSIONES.....	43
6. BIBLIOGRAFIA.....	44
ANEXOS.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva característica de retención de agua en un suelo limoso.....	18
Figura 2. Curvas características de retención de agua para suelos arenosos, limosos y arcillosos.	19
Figura 3. Clasificación SUCS para curva promedio.	22
Figura 4. Curva de compactación de material marginal.....	23
Figura 5. Valores de humedad relativa y temperatura durante proceso de secado al aire.....	24
Figura 6. Evolución del grado de saturación debido al proceso de secado al aire.	25
Figura 7. Curvas de retención ajustadas con aproximación de Van Genuchten para muestras compactadas con porcentaje de finos entre 8% a 24%.....	25
Figura 8. Parámetros modelo mecánico	27
Figura 9. Parámetros modelo hidráulico	28
Figura 10. Geometría establecida para el modelo de simulación	29
Figura 11. Datos del problema - Ecuaciones a resolver	30
Figura 12. Condiciones de contorno aplicable en las 3 etapas.....	31
Figura 13. Condiciones de flujo – 1ra, 2da y 3ra etapa.....	32
Figura 14. Metodología para la aplicación de la succión desde el punto de vista de fracción másica.....	33
Figura 15. Asignación de condiciones de flujo en el modelo	34
Figura 16. Generación de malla.....	35
Figura 17. Distribución del grado de saturación a través del tiempo durante proceso de secado al aire.....	37
Figura 18. Grafica comparativa para valores obtenidos durante el proceso de secado.	38
Figura 19. Distribución del grado de saturación en proceso de humedecimiento.	39
Figura 20. Trayectoria de humedecimiento y secado a través de transferencia de vapor.....	39
Figura 21. Trazabilidad completa de trayectoria de secado y humedecimiento.....	40

Figura 22. Influencia en el factor de impedancia en el modelo.41

Figura 23. Geometría, mallado y post proceso para una muestra de 15 cm de altura
.....49

Figura 24. Geometría, mallado y post proceso para una muestra de 10 cm de altura
.....49

Figura 25. Gráfico comparativo de trayectoria de secado y humedecimiento para
muestras con alturas de 10, 15 y 20 cm de altura50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones del PG-3 Art. 330 para uso de materiales granulares marginales	21
Tabla 2. Parámetros de entrada de las curvas de retención ajustadas.	26
Tabla 3. Resumen de parámetros empleados en el modelo.....	28
Tabla 4. Resumen de parámetros de condiciones de flujo por transferencia de vapor	33

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Cálculo de datos parámetros para aplicación de la succión desde el punto de vista de fracción másica.	47
ANEXO B: Resultados obtenidos de modelos de simulación para muestras con alturas de 10 cm y 15 cm.	50

RESUMEN

TITULO: SIMULACIONES NUMÉRICAS DE PROCESOS DE EQUILIBRIO DE SUCCIÓN DE SUELOS COMPACTADOS EN TRAYECTORIAS DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO*

AUTOR: RENE ALEJANDRO UTRERA PÉREZ**

PALABRAS CLAVE: SUELOS COMPACTADOS, HUMEDECIMIENTO, SECADO, SIMULACIÓN, EQUILIBRIO, SUCCIÓN.

DESCRIPCIÓN

El presente documento tiene como finalidad determinar el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio en diferentes valores de succión para suelos compactados, con características de tipo marginal, en trayectorias de secado y humedecimiento empleando simulaciones numéricas, a fin de obtener información relevante de parámetros hidromecánicos que permitan demostrar el comportamiento observado en ensayos de laboratorio. Se toma como material de referencia un material proveniente de cantera ubicada en las inmediaciones de la ciudad de Bucaramanga, que constituye un material granular marginal, es decir que no cumple con las iniciativas de la normatividad INVIAS.

Las simulaciones fueron realizadas en base al código de elementos finitos Code_Bright, el cual es capaz de realizar análisis termo-hidromecánicos acoplados en medios geológicos y que combinado con el Pre/Post procesador GiD, una interfaz gráfica empleada para la definición, preparación y visualización de los datos, permita realizar un análisis del comportamiento del grado de saturación a través del tiempo. Se realiza la calibración de parámetros hidráulicos a fin de obtener resultados precisos a partir de la succión desde el punto de vista de la fracción másica. Se obtiene que los tiempos que tarda en obtener el equilibrio en procesos de humedecimiento netamente por humedad relativa del medio, son mayores a los procesos de secado.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Codirector Alex Eduardo Álvarez

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL SIMULATIONS OF SUCTION EQUILIBRIUM PROCESSES OF COMPACTED SOILS IN WETTING AND DRYING TRAJECTORIES*.

AUTHOR: RENE ALEJANDRO UTRERA PÉREZ**

KEYWORDS: COMPACTED SOILS, WETTING, DRYING, SIMULATION, EQUILIBRIUM, SUCTION.

DESCRIPTION

The purpose of this paper is to determine the time required to reach equilibrium at different suction values for compacted soils, with marginal characteristics, in drying and wetting trajectories using numerical simulations, in order to obtain relevant information of hydromechanical parameters that allow to demonstrate the behavior observed in laboratory tests. A material from a quarry located in the vicinity of the city of Bucaramanga, which is a marginal granular material, that is to say, it does not comply with the initiatives of the INVIAS regulations, is taken as reference material.

The simulations were performed based on the finite element code Code_Bright, which is capable of performing coupled thermo-hydromechanical analysis in geological media and combined with the Pre/Post processor GiD, a graphical interface used for the definition, preparation and visualization of the data, allows an analysis of the behavior of the degree of saturation over time. The calibration of hydraulic parameters is performed in order to obtain accurate results from the suction from the point of view of the mass fraction. It is obtained that the time it takes to obtain the equilibrium in wetting processes purely by relative humidity of the medium is longer than in drying processes.

*Bachelor Thesis

**Physicomechanical Engineering Faculty, Department of Civil Engineering. Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes, Codirector Alex Eduardo Álvarez.

INTRODUCCION

El constante desarrollo de la humanidad y la innovación en las nuevas tecnologías, hace posible el enfrentar y dar solución a nuevos desafíos debido al sin número de herramientas a disposición que existen en la actualidad. Este desarrollo no ha sido ajeno en el estudio de la mecánica de suelos, que a pesar de tener un mayor avance en la teoría como en la práctica en suelos saturados, gracias al modelo denominado Barcelona Basic Model (BBM) por Alonso, *et al* (1990), que está basado en la existencia de unas curvas de fluencia LC (loading – collapse) y SI (suction increase), permitió entender con mayor facilidad el comportamiento de los suelos parcialmente saturados y así obtener un desarrollo considerable en la evolución en laboratorio para este tipo de condición, como a su vez el avance en equipos de laboratorio para estudiar diferentes fenómenos relacionados a estos.

La variedad de los equipos para el estudio de los fenómenos de colapso e hinchamiento, así como para el estudio general del comportamiento de los suelos compactados es muy amplia, se han utilizado células edométricas y triaxiales convencionales; modificados o con nuevos diseños de estos equipos con control de succión. De forma análoga, los procedimientos de ensayos han variado, desde los aspectos relacionados con las trayectorias de esfuerzos utilizados, hasta los identificados con la instrumentación y el control. Sin embargo, sólo muy recientemente se ha empezado a estudiar el acoplamiento existente entre la deformación volumétrica y el cambio de humedad durante los procesos de carga o cambio de succión en estos suelos.¹

Para realizar un análisis de laboratorio que tenga en cuenta la succión como variable, es necesario el imponer y mantener las condiciones de humedad relativa

¹ Influencia de la succión en los cambios volumétricos de un suelo compactado: Comportamiento de los suelos parcialmente saturados. Publicación técnica No.238. Sanfadilla. 2004. págs. 5-47. ISBN 0188-7297.

y temperatura, esto se logra al aislar la muestra del ambiente normal, a fin de lograr que el volumen total de la muestra adopte las condiciones impuestas de succión.

Sin embargo, a pesar que los desarrollos experimentales permiten controlar variables principales que se quieren estudiar, es difícil hacer un seguimiento de la evolución de la misma dentro de la muestra. Es por esto que es necesario emplear herramientas que permitan realizar el seguimiento de las variables en un experimento, como lo son las simulaciones numéricas.

En este documento se presentan simulaciones numéricas basadas en el código de elementos finitos CODE_BRIGTH y que combinado con el Pre/Post Procesador GiD, permita evaluar en determinados puntos de la muestra los tiempos necesarios para alcanzar el equilibrio en diferentes valores de succión empleando trayectorias de humedecimiento y secado para suelos compactados y obtener información relevante de parámetros hidromecánicos que permitan demostrar el comportamiento observado en ensayos de laboratorio.

1. OBEJTIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar los tiempos necesarios para alcanzar el equilibrio de diferentes valores de succión en muestras cilíndricas de al menos 3 tamaños convencionales.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las propiedades hidráulicas necesarias para las simulaciones numéricas.
- Evaluar el tiempo de equilibrado en trayectorias de humedecimiento y secado mediante simulaciones numéricas de flujo.
- Realizar un análisis de sensibilidad de las variables involucradas como la permeabilidad del material, la curva de retención del suelo y densidad seca.

2. MARCO TEORICO – ASPECTOS FUNDAMENTALES

2.1. POTENCIAL DE AGUA O SUCCION

El término “succión del suelo” fue usado por Schofield (1935)² para representar la “deficiencia de presión” en el agua de poros de algunos suelos (saturados o no saturados) que tenían la capacidad de absorber agua si se le adicionaba agua a la presión atmosférica. El término succión o potencial de agua designa a la Integrante del estado de esfuerzo que tiene en cuenta aquellos efectos de superficie capaces de retener agua dentro de la estructura de un suelo. Sin su participación resulta imposible definir el estado de esfuerzo y entender la respuesta deformacional de un suelo parcialmente saturado. Para Blight (1965)³, el efecto de la succión en un suelo no saturado es equivalente al de una presión exterior aplicada. La succión total se representa en unidades de presión y puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\Psi = S_m + S_o$$

Donde: Ψ = Succión total, S_m = Succión matricial y S_o = Succión osmótica.

La diferencia entre presión de aire de poros y presión de agua de poros ($U_a - U_w$) se define como la succión matricial. El valor de esta succión matricial depende de la tensión superficial y del radio de curvatura del menisco. A mayor grado de saturación, el menisco se retrae en espacios de poros pequeños haciendo que su radio de curvatura se reduzca y por ende la succión matricial aumente. Debido a las características de los materiales arcillosos y granulares, la succión matricial es mayor en los primeros.

² 3RD INT. CONG. SOIL SCIENCE. 1935. The pF of the water in soil. 2, págs. 37- 48.

³ BLIGHT, G.E. 1965. A study of effective stress for volume change, in Moisture equilibrium and moisture changes in soils beneath covered areas. Sydney : Butterworths, 1965, págs. 259-269.

El flujo de agua a través de los suelos no saturados se controla por el gradiente del potencial de agua total, el cual puede expresarse como la suma de tres componentes: a) *Potencial gravitacional*, causado por la elevación del agua del suelo con respecto a un nivel de referencia, b) *Potencial matricial*, causado por efectos de tensión superficial, c) *Potencial osmótico*, causado por la concentración de iones disueltos en el agua del suelo.

En base a resultados experimentales sugieren que la resistencia al corte y comportamiento del cambio de volumen de suelos no saturados son dependientes de la succión matricial más que de la succión total. ⁴

2.2. CURVA DE RETENCIÓN DE AGUA

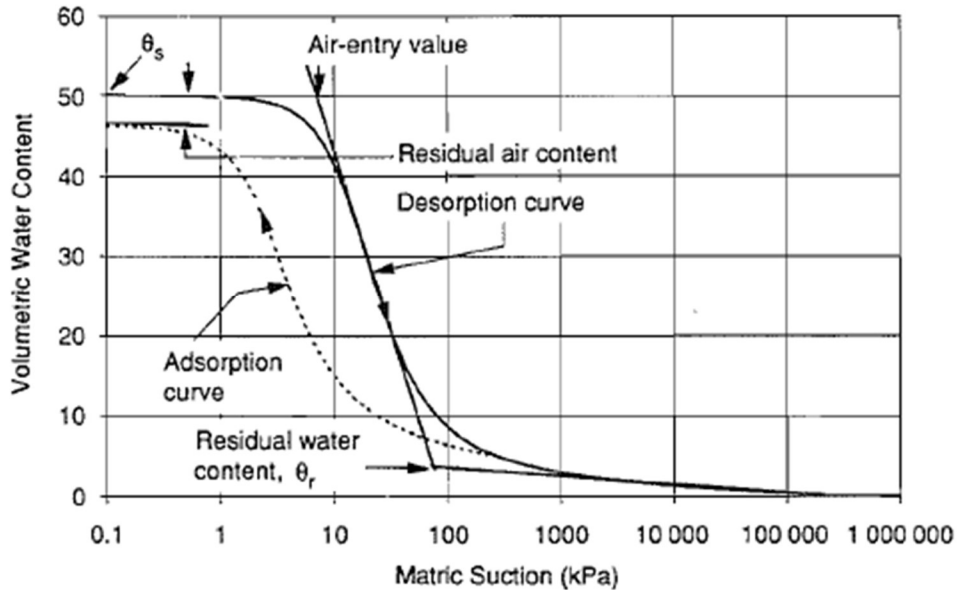
La curva de retención de agua de un suelo se define como la relación entre el contenido de agua y succión en un suelo. El contenido de agua define la cantidad de agua almacenada dentro de los poros del suelo. En la ciencia de los suelos el contenido volumétrico de agua (θ) es el más utilizado. En la práctica de la ingeniería geotécnica, el contenido gravimétrico de agua (w), que es la relación entre la masa de agua y la masa de sólidos, es el más utilizado. El grado de saturación (S) es otra medida comúnmente utilizada para indicar el porcentaje de vacíos que están llenos de agua. Las variables anteriores también se han utilizado en una forma normalizada donde el contenido de agua se refiere a un contenido de agua residual (cero contenido de agua).

La figura 1 muestra un gráfico típico de una curva de retención de agua para un suelo limoso, junto con algunas de sus principales características. ⁵

⁴ 9TH EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. Special problem soils. Dublin, 1987, Vol 3. págs. 1087 - 1146.

⁵ FREDLUND, D.G. y XING, A. 1994. Equations for the soil - water characteristic curve. Saskatchewan. 1994. págs. 521-532. Vol. 31.

Figura 1. Curva característica de retención de agua en un suelo limoso.



Fuente: FREDLUND, D.G. y XING, A. 1994. Equations for the soil - water characteristic curve. Saskatchewan. 1994. págs. 521-532. Vol. 31.

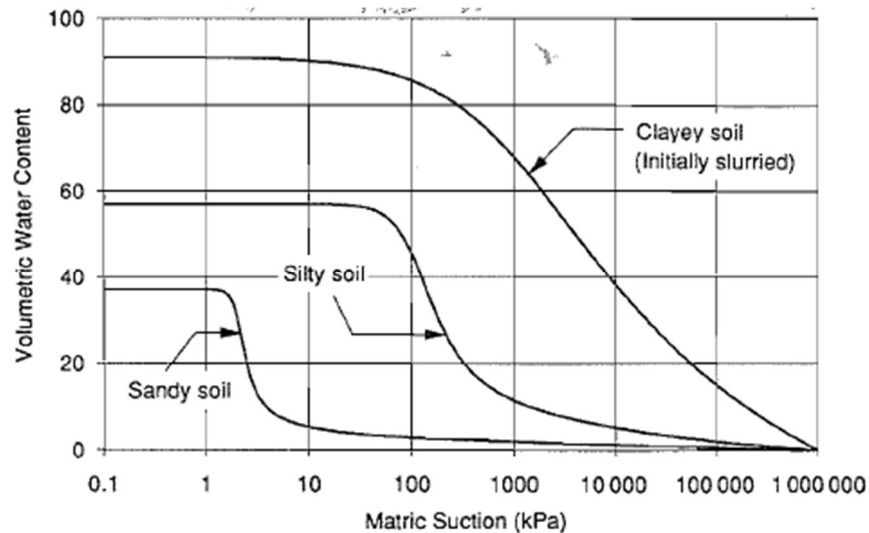
El valor de entrada de aire del suelo es la succión matricial donde el aire empieza a entrar en los poros más grandes del suelo. El contenido de agua residual es el contenido de agua donde se requiere un gran cambio de succión para eliminar el agua adicional del suelo.

La curva principal mostrada en la Figura 1. Es una curva de desorción. La curva de adsorción difiere de la curva de desorción como un resultado de la histéresis. El punto final de la curva de adsorción puede diferir del punto inicial de la curva de desorción debido al atrapamiento de aire en el suelo.

En la Fig. 2 se muestran las curvas características típicas de suelo-agua para diferentes suelos. El contenido de agua saturada (θ), y el valor de entrada de aire o la presión de burbujeo ($u_a - u_w$), generalmente aumentan con la plasticidad del

suelo. Otros factores como el comportamiento de la tensión también afectan a la forma de las curvas características del agua del suelo.⁶

Figura 2. Curvas características de retención de agua para suelos arenosos, limosos y arcillosos.



Fuente: FREDLUND, D.G. y XING, A. 1994. Equations for the soil - water characteristic curve. Saskatchewan. 1994. págs. 521-532. Vol. 31.

2.3. CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y PERMEABILIDAD.

La conductividad hidráulica bajo condiciones saturadas es constante en cada punto bajo una gran cantidad de suposiciones, independientemente de la presión del agua. Sin embargo, para condiciones parcialmente saturadas la conductividad hidráulica es variable y depende del contenido de humedad del suelo y en consecuencia de la succión del agua en el suelo.

La conductividad hidráulica ($K=pgk/\mu$) puede ser dividida en dos términos, la fluidez (pg/μ) y la permeabilidad intrínseca (k). La permeabilidad intrínseca es función de la estructura del poro y su geometría y es una propiedad solamente del medio.

⁶ FREDLUND, D.G. y XING, A. 1994. Equations for the soil - water characteristic curve. Saskatchewan. 1994. págs. 521-532. Vol. 31.

2.3.1. Conductividad hidráulica en suelos parcialmente saturados

Es bien reconocido y confirmado experimentalmente el hecho de que la ley de Darcy es válida para flujo de agua en medios parcialmente saturados siempre y cuando se tenga en cuenta la dependencia de la conductividad hidráulica con el contenido de humedad. Algunos científicos como Childs y Collis – George (Juang & Holtz, 1986) encontraron experimentalmente que el valor de K es función de la humedad volumétrica del suelo, θ .⁷ La validez de esta teoría radica en la suposición que el arrastre de fluido en la interfase aire – agua es despreciable. Se ha encontrado que K decrece muy rápidamente a medida que el contenido de humedad disminuye respecto al valor de saturación. Algunas de las razones para este comportamiento son las siguientes:

- La sección transversal disponible para el flujo decrece con θ .
- Los poros de mayor tamaño son los primeros que se desocupan al disminuir la humedad. El cambio de la conductividad hidráulica de un medio poroso es directamente proporcional al cuadrado del radio de los poros, mientras que la humedad es proporcional a la primera potencia de dicho radio, por lo que se puede esperar que K decrezca mucho más rápidamente que θ .
- A medida que θ decrece, se incrementa la posibilidad de que parte del agua quede atrapada en poros y cuñas aisladas de la red tridimensional general de agua. Una vez la continuidad ha sido rota, no puede haber flujo en fase líquida.

2.4. LEY PSICROMETRICA

En general, la ley psicrométrica estudia las propiedades termodinámicas de mezclas de gas con vapor. En particular, la mayoría de las aplicaciones se refieren al aire

⁷ JUANG, C. H.; HOLTZ R. D. (1986) Fabric, pore size distribution, and permeability of sandy soils. Citado por DONADO, Leonardo. Modelo de conductividad hidráulica de los suelos. Tesis de Magister. Bogotá, D.C: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y agrícola. 2004. p. 16-17

húmedo, considerado como la mezcla de aire seco y vapor de agua. Matemáticamente se define como:

$$\psi = -\frac{RT}{M_w V_w} \ln\left(\frac{u_v}{u_{vo}}\right)$$

Donde R es la constante universal de los gases (8.314472 J/mol*K), T es la temperatura en grados Kelvin, Mw la masa molecular del agua (18015g/mol), Vw es el inverso de la densidad de agua (0.998mg/m³ a 20°C), Uv es la presión de vapor controlada por la solución y Uvo es la presión de vapor de saturación del solvente, que depende de la temperatura y de la presión de la fase gaseosa. El cociente entre Uv y Uvo corresponde al valor de la humedad relativa.

2.5. MATERIALES MARGINALES

En el artículo 330 del Pliego Español de Carreteras (PG-3), clasifica los suelos en cinco grupos (seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados), mientras que en el artículo 320 -13 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) clasifica los suelos en cuatro grupos (seleccionados, adecuados, tolerables e inadecuados), por lo que el grupo de los llamados marginales se encuentra dentro de los suelos inadecuados. Para realizar esta clasificación la normatividad española se basa en función de las siguientes características:

Tabla 1 Especificaciones del PG-3 Art. 330 para uso de materiales granulares marginales

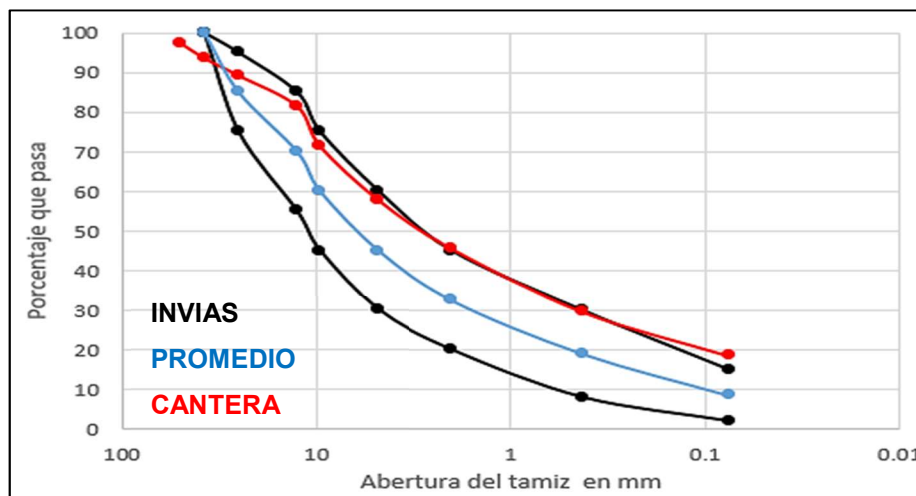
Parámetro	Tolerancia
Contenido de materia orgánica	<5%
Asiento en ensayo de colapso	>1%
Hinchamiento (expansión) libre (HL)	3%<HL<5%
Relación de soporte de California, CBR	≥3%

Fuente: *Rutas: Revista de la asociación*. Principales innovaciones en el PG-3 sobre geotecnia vial y drenaje. Madrid. 2001, Vol. 84, págs. 15-28.

2.6. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

Para este proyecto se toma como referencia resultados experimentales obtenidos en materiales compactados utilizando materiales granulares marginales (MGMs) de sub-base granular. Los MGMs en este caso se definen como materiales que no cumplen con alguna de las especificaciones del INVIAS como el desgaste en la máquina de los ángeles, porcentaje de fino, índice de plasticidad, entre otros. La figura 3 muestra la clasificación SUCS de la cantera utilizada, los límites inferior y superior de la distribución de tamaños especificadas por INVIAS, y el valor promedio al cual se lleva el material de cantera, como punto de partida del análisis.

Figura 3. Clasificación SUCS para curva promedio.



Fuente: MARTÍNEZ Jeisi y VARGAS Juan. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1

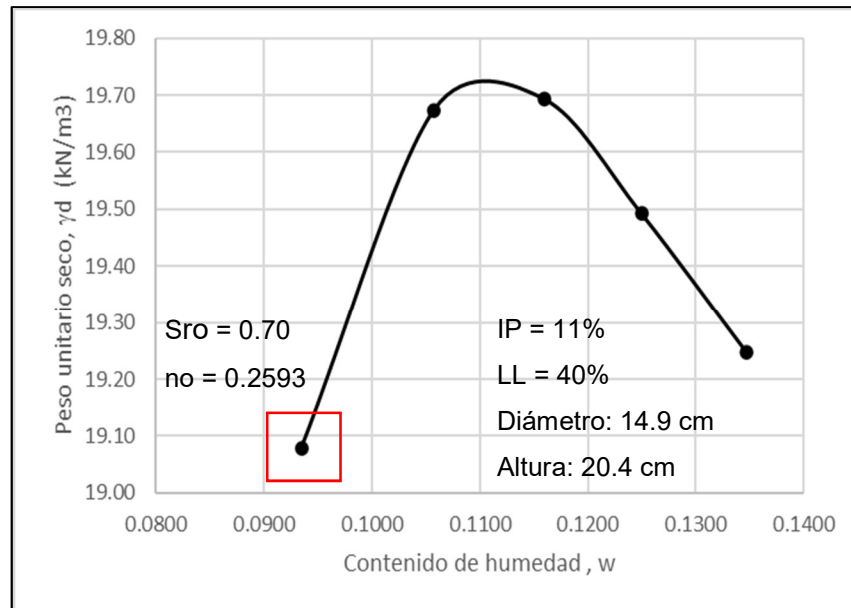
2.6.1. Proceso de compactación en laboratorio

A partir de la granulometría obtenida, se establece la cantidad de material requerido de cada fracción para la elaboración de probetas. Se crean 4 probetas con humedades diferentes, esto se consigue al realizar mezclas homogéneas del material, empleando el mezclador giratorio y adicionando la cantidad de agua necesaria de acuerdo a la humedad deseada. Terminada la mezcla, se realiza un proceso de curado el cual permita igualar la humedad en toda la mezcla. Acabado

el curado de las muestras, se ingresa en el molde del compactador giratorio, se establece un ángulo de giro de 1.25° y presión de contacto de 600kPa. Con base a las humedades extremas (mínima y máxima) se establece el número de giros en 180 y en 140 para las humedades intermedias. A partir de los resultados obtenidos se realiza la curva de compactación (figura 4).

A partir de la curva de compactación obtenida, se elige la muestra en el lado seco para realizar la evaluación de la evolución de la curva de secado experimental.

Figura 4. Curva de compactación de material marginal



Fuente: MARTÍNEZ Jeisi y VARGAS Juan. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1

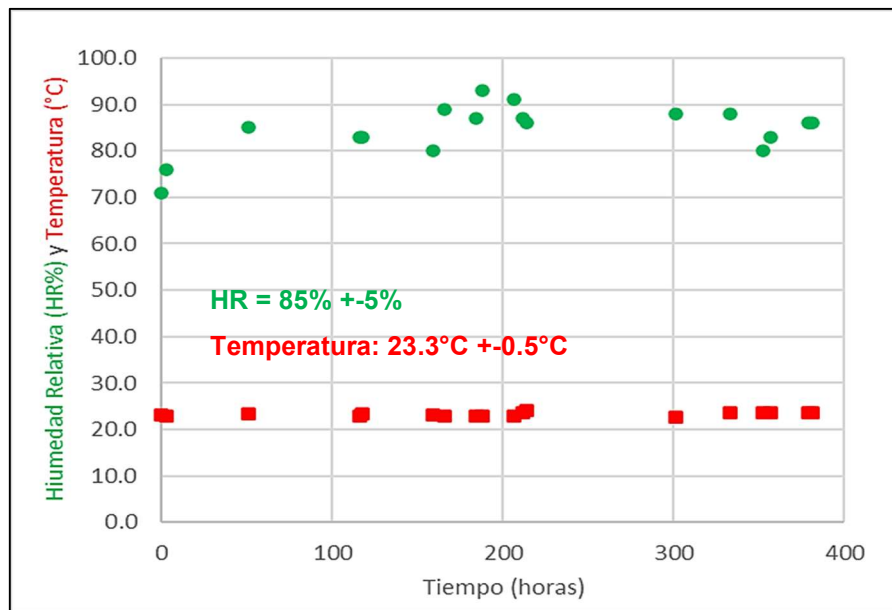
2.6.2. Proceso de secado en laboratorio

Con la muestra de suelo compactado mencionada anteriormente, se inicia un proceso de secado al aire, teniendo en cuenta la variación de la temperatura y la humedad relativa respecto al ambiente. Como resultado se obtiene que la temperatura se mantiene en un valor casi constante de $23^\circ \pm 0.5^\circ$, mientras que la

humedad relativa presenta mayor dispersión, con un valor promedio de $85\% \pm 5\%$, tal cual se observa en la figura 5.

Con base a los resultados obtenidos de humedad relativa (HR) y la temperatura del ambiente (T°), y la aplicación de la ley psicrométrica, es posible determinar el valor de la succión que impone el ambiente a la muestra durante el proceso de secado. Teniendo en cuenta lo anterior, se realiza un seguimiento al contenido de agua y grado de saturación que posee la muestra a través del tiempo (figura 6).

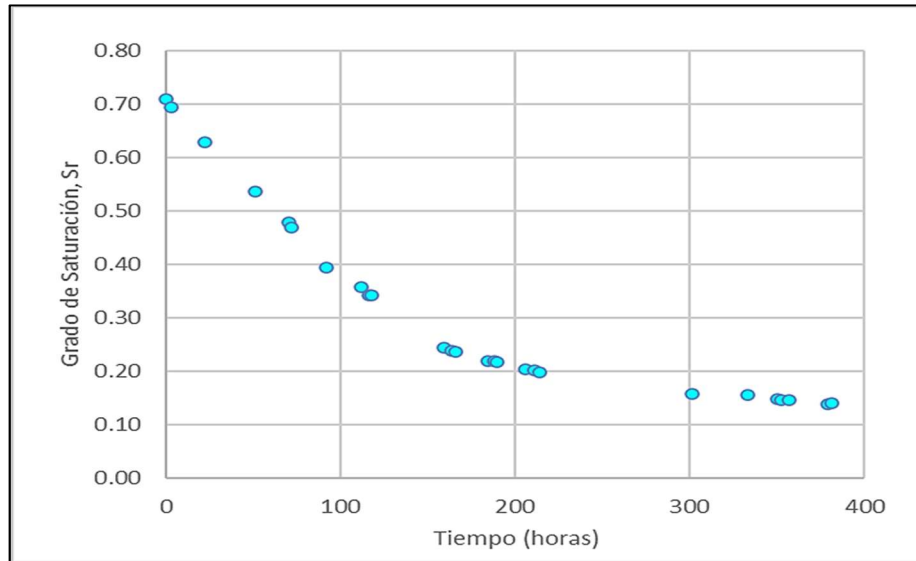
Figura 5. Valores de humedad relativa y temperatura durante proceso de secado al aire.



Fuente: MARTÍNEZ Jeisi y VARGAS Juan. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1

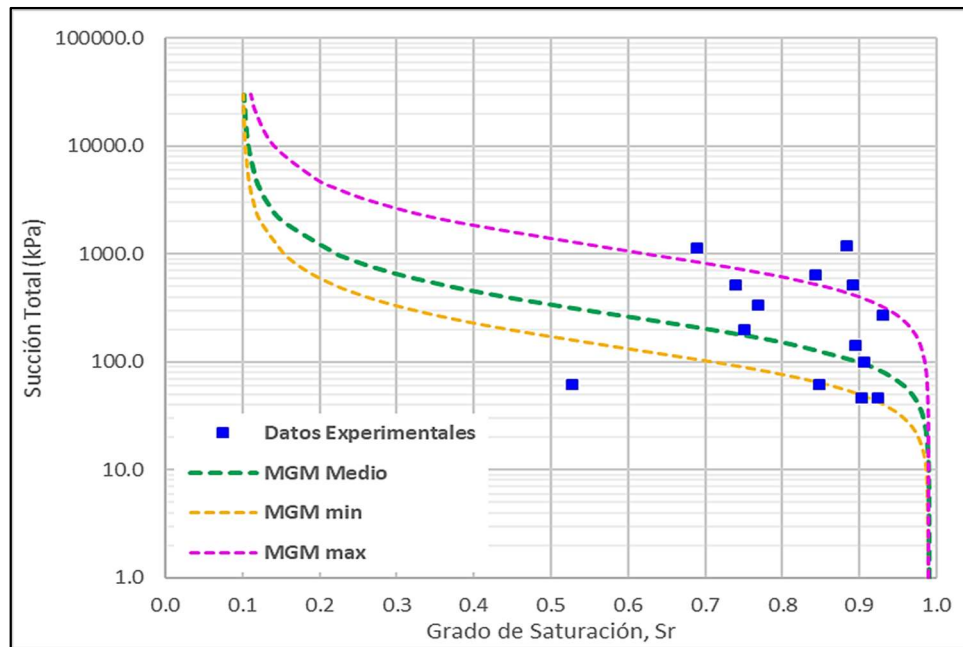
A partir de las diversas mediciones obtenidas de succión total mediante la técnica de papel de filtro especificado por INVIAS (INV E-159-13) aplicado a MGMS, se ha podido establecer algunas curvas preliminares de retención para diferentes materiales (figura 7).

Figura 6. Evolución del grado de saturación debido al proceso de secado al aire



Fuente: MARTÍNEZ Jeisi y VARGAS Juan. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1

Figura 7. Curvas de retención ajustadas con aproximación de Van Genuchten para muestras compactadas con porcentaje de finos entre 8% a 24%



Fuente: MARTÍNEZ Jeisi y VARGAS Juan. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1

Cabe aclarar que dichas curvas, surgen a partir de ajustes realizados a los datos experimentales obtenidos mediante la propuesta de Van Genuchten (ecuación 1), donde la succión es la diferencia entre la presión de gas y la presión del líquido ($P_g - P_l$), pero los que controlan el comportamiento de la curva de retención es el valor de la presión de entrada (P_o) y lambda (λ) que se define como una función de forma. En la tabla 2, se puede evidenciar los parámetros de entrada empleados para la realización de las curvas.

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

Tabla 2. Parámetros de entrada de las curvas de retención ajustadas.

Modelo de Van Genuchten	Medio	Min.	Max.
Po [MPa]	0.2	0.1	0.8
Lambda (λ)	0.55	0.55	0.55
Srl	0.1	0.1	0.1
Sls	0.99	0.99	0.99

Fuente: Registro propio.

3. PROCESO DE MODELACION NUMÉRICA

Code Bright es un método de elementos finitos (MEF) capaz de realizar análisis termo hidromecánicos (THM) acoplados en medios geológicos. Ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y funciona combinado con el pre/post procesador GiD, desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE).⁸ GiD es una interfaz gráfica de usuario que se utiliza para la definición, preparación y visualización de todos los datos relacionados con las simulaciones numéricas. Estos datos incluyen la definición de la geometría, materiales, condiciones, información sobre la solución y otros parámetros.

Partiendo de los resultados obtenidos mediante las pruebas de laboratorio, durante esta fase se enfocó en la calibración de parámetros hidráulicos del modelo a fin de obtener resultados que sean semejantes al comportamiento evidenciado en el proceso de secado experimental, y que a su vez sirvan como base para el proceso de humedecimiento. La tabla 2 muestra un resumen los diferentes parámetros hidráulicos, así como mecánicos, que fueron usados para la simulación. Cabe aclarar que estos parámetros se han ido ajustando a lo largo de la ejecución del proyecto, en cooperación con compañeros que han ejecutados pruebas de laboratorio en el mismo periodo de tiempo.

Figura 8. Parámetros modelo mecánico

Mechanical data 1	Mechanical data 2	Mechanical data 3	Mechanical data 4	Hydraulic and thermal data				Phase properties		Construction Excavation	
Linear Elasticity 1	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	1	3000	0	0.30	0	0	0	0	0	0	0
	1	100	0	0.30	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: propia

⁸ CODE_BRIGHT [Anónimo]. Department of Civil and Environmental Engineering [página web]. [Consultado el 20, octubre, 2022]. Disponible en Internet: <https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright>.

Figura 9. Parámetros modelo hidráulico

Mechanical data 1	Mechanical data 2	Mechanical data 3	Mechanical data 4	Hydraulic and thermal data	Phase properties	Construction Excavation					
Retention Curve	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	1	0.20	0	0.55	0.10	0.99	0	0	0	0	0
Intrinsic Permeability	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	1	1e-10	1e-10	1e-10	0	0	0	0	0	0	0
	1	1.5e-14	1.5e-14	1.5e-14	0	0	0	0	0	0	0
Liquid Phase Relative Permeability	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	6	0	1.0	5.0	0.1	1.0	0	0	0	0	0
Gas Phase Relative Permeability	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	6	0	1	3	0.1	1.0	0	0	0	0	0
Diffusive Flux of Vapour	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conductive Flux of Heat 1	ITYCL	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
	1	0.5	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Propia

Tabla 3. Resumen de parámetros empleados en el modelo

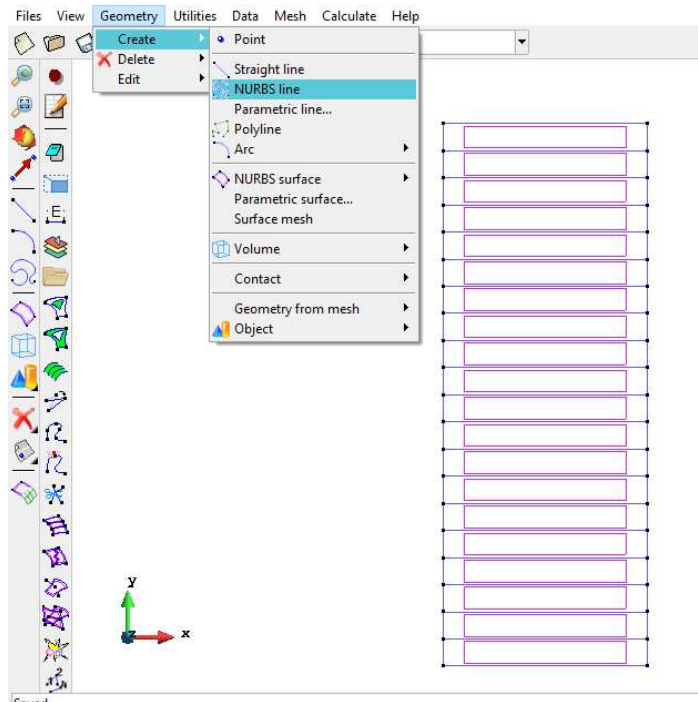
DATOS MECÁNICOS	
Modelo lineal elástico	ITYCL =1
Modulo elástico (P1)	100 MPa
Radio de Poisson [ν] (P3)	0,3
DATOS HIDRÁULICOS	
Curva de retención	ITYCL =1
Po = P1	0,20 MPa
Función de forma = λ (P3)	0,55
Saturación residual = Srl (P4)	0,1
Saturación máxima = Sls (P5)	0,99
Permeabilidad intrínseca	ITYCL =1
K11=P1(Primera dirección)	1.5e-14
K22=P2 (Segunda dirección)	1.5e-14
K33=P3 (Tercera dirección)	1.5e-14
Permeabilidad relativa al liquido	ITYCL =6
A (P2)	1
λ (P3)	5
Saturación residual = Srl (P4)	0,1
Saturación máxima = Sls (P5)	1
Permeabilidad relativa al gas	ITYCL =6
A (P2)	1
λ (P3)	3
Saturación residual = Srl (P4)	0,1
Saturación máxima = Sls (P5)	1
Flujo difusivo de vapor	ITYCL =1
Flujo conductivo de calor	ITYCL =1
λ (seco) [W/mK]	0,5
λ (saturado) [W/mK]	1,5

Fuente: Registro propio

3.1. DEFINICION DE LA GEOMETRIA

La definición de la geometría corresponde a la sección transversal de una muestra convencional con dimensiones de 0.15 metros de ancho por 0.20 metros de alto. A fin de aprovechar la axisimetría del modelo y optimizar tiempos durante la ejecución del mismo, se realiza la simulación con la mitad de la sección transversal de la muestra y se divide en 20 subcapas de 0.01 metros de altura, tal como evidencia la figura 9.

Figura 10. Geometría establecida para el modelo de simulación



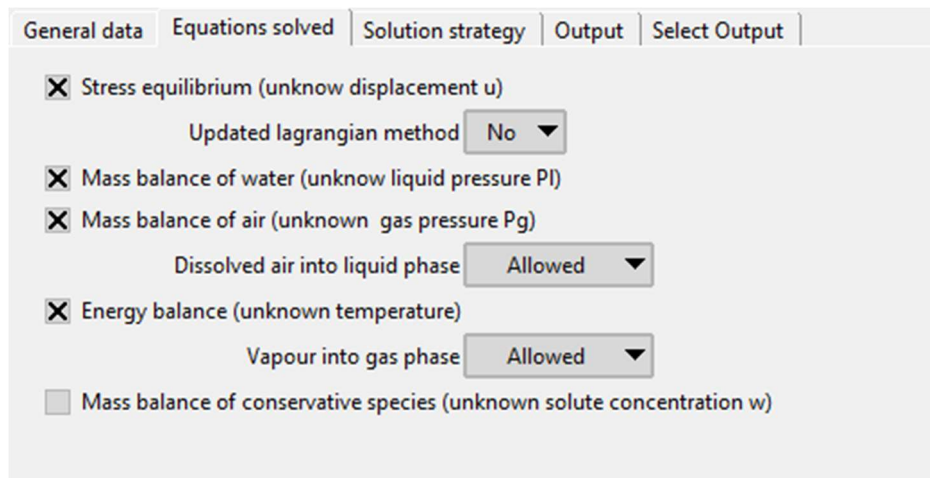
Fuente: Propia del autor.

3.2. DATOS DEL PROBLEMA

Se ajustan todos los datos asociados al problema de estudio, es decir, datos que no están relacionados con la geometría y que tampoco cambian para cada intervalo de análisis.

Se definen parámetros del problema donde se establecen los datos generales, las ecuaciones a resolver y la estrategia de solución. Se utiliza axisimetría a lo largo del eje Y debido a la simetría presente en la muestra convencional, se realiza una combinación de equilibrio de esfuerzos, equilibrio de masas de agua, equilibrio de masas de aire y equilibrio de energía para las ecuaciones a resolver, y se plantean los parámetros para definir una estrategia utilizada para lograr la solución de simulación.

Figura 11. Datos del problema - Ecuaciones a resolver



The screenshot shows a software interface with the following settings under the 'Equations solved' tab:

- Stress equilibrium (unknown displacement u)
Updated lagrangian method: No
- Mass balance of water (unknown liquid pressure P_l)
- Mass balance of air (unknown gas pressure P_g)
Dissolved air into liquid phase: Allowed
- Energy balance (unknown temperature)
Vapour into gas phase: Allowed
- Mass balance of conservative species (unknown solute concentration w)

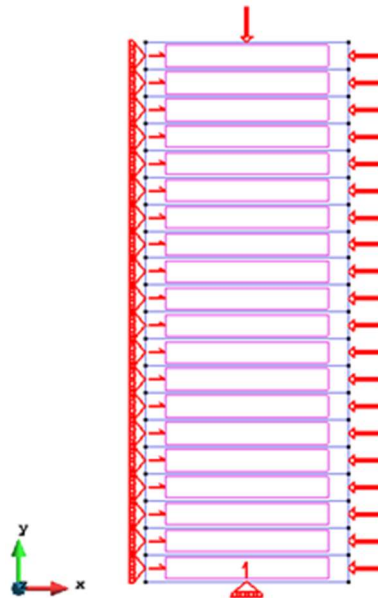
Fuente: Registro propio.

3.3. CONDICIONES DE CONTORNO

Debido a que se quieren simular trayectorias de secado y humedecimiento hasta alcanzar el equilibrio, se deben establecer etapas que permitan ajustar para cada una de estas los diferentes parámetros. La primera etapa, es una etapa de equilibrado o acondicionamiento, donde el programa establece las condiciones iniciales impuestas; la segunda etapa representa el proceso de secado al aire; y la tercera etapa representa el proceso de humedecimiento mediante transferencia de vapor.

Dentro de las condiciones de contorno establecidas y que aplican en las 3 etapas, están las restricciones de desplazamiento horizontal y vertical; condiciones de esfuerzos verticales en la cara superior y esfuerzos horizontales en la cara lateral derecha con valores de -0.1 MPa respectivamente, que representan la presión atmosférica; presión de gas con valor de 0.1 MPa. Figura 11.

Figura 12. Condiciones de contorno aplicable en las 3 etapas.



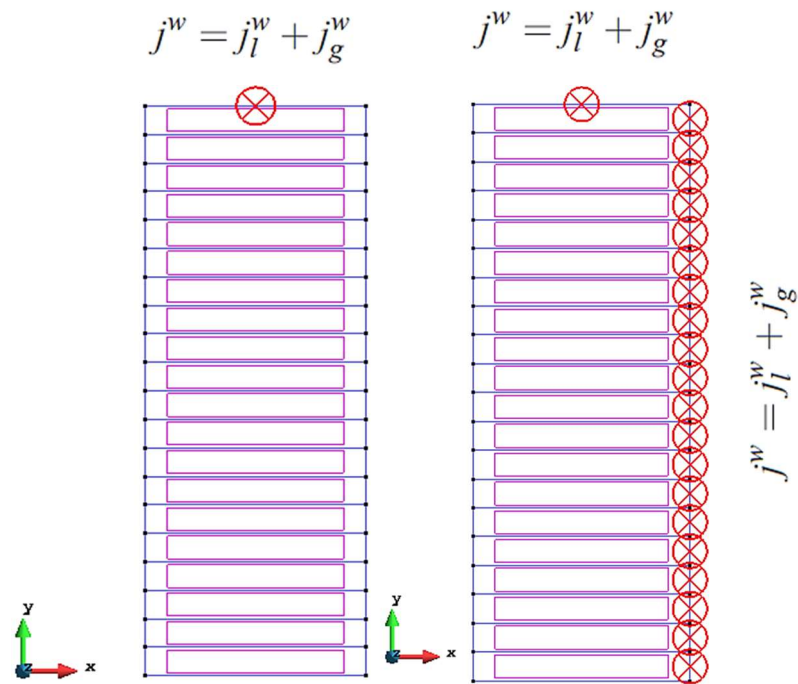
Fuente: Registro propio.

Adicionalmente para la etapa 1 se contempla condiciones de superficie, en la que se contempla la porosidad total de 0.2523 , presión de agua de -0.099 MPa, temperatura de $23,29$ °C y esfuerzos en dirección X, Y y Z con valores de -0.1 MPa, también condición de flujo en la cara superior. Para la etapa 2 y 3, se agrega como condición de contorno adicional, flujo en la cara lateral derecha. Figura 12.

Dado que el proceso de secado y de humedecimiento se realizan mediante transferencia de vapor, ya no se emplea la succión desde el concepto de presión líquida, sino que se emplea la succión a partir del punto de vista de la fracción másica. Esto con el objetivo de tener mayor precisión en los resultados a partir de

los parámetros hidráulicos del modelo. Cabe aclarar que dichos parámetros son variables para cada etapa de simulación.

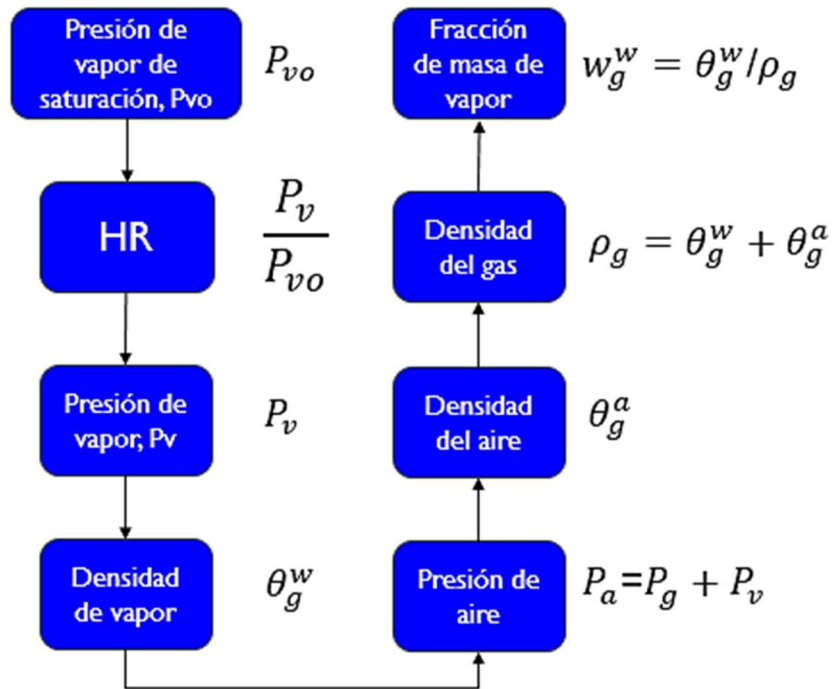
Figura 13. Condiciones de flujo – 1ra, 2da y 3ra etapa.



Fuente: Registro propio.

En la figura 14 se encuentra un diagrama de flujo en el cual se hace una descripción metodológica de la aplicación de la succión desde el punto de vista de la fracción másica, y en la tabla 2 se evidencia un resumen de los parámetros calculados a partir del diagrama metodológico mostrado. Estos cálculos se pueden realizar partiendo de los resultados obtenidos previamente de los ensayos de laboratorio.

Figura 14. Metodología para la aplicación de la succión desde el punto de vista de fracción másica.



Fuente: registro propio.

Tabla 4. Resumen de parámetros de condiciones de flujo por transferencia de vapor

Parámetros	Etapa		
	1	2	3
Fracción másica de vapor [kg/kg]	0.0179520	0.0153209	0.0180219
Beta del gas (factor de impedancia)	0.00001	2.5e-3	2.5e-3
Densidad de gas [kg/m3]	1.16194242	1.16378499	1.1618935
Temperatura [°C]	23.29	23.29	23.29
Gamma para el calor	1e5	1e5	1e5

Fuente: registro propio

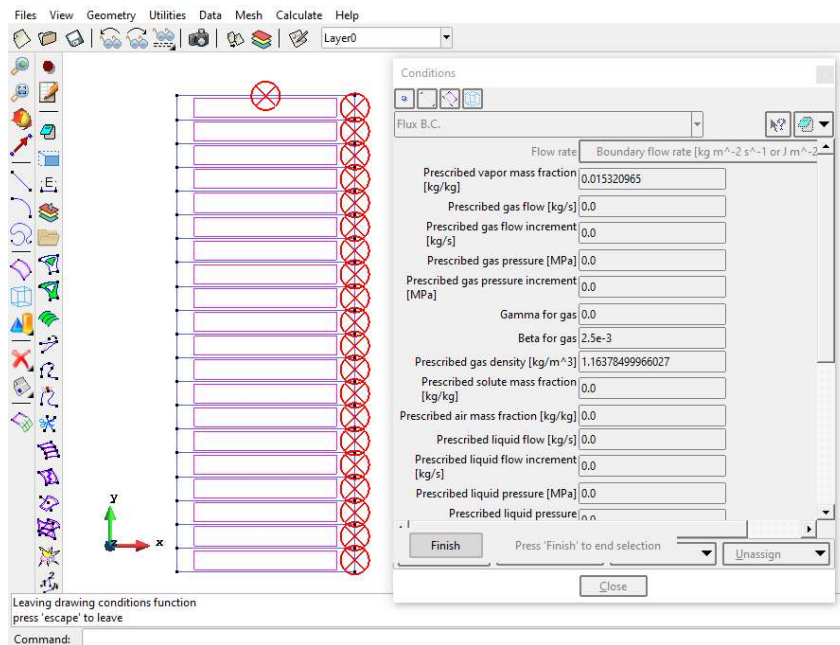
A partir de los valores hallados, se procede a calcular el flujo de agua por transferencias de vapor, el cual se obtiene del resultado del diferencial de presiones entre el ambiente y el suelo, y ser multiplicado por el factor de impedancia. Ecuación 3.

$$j_g^w = \beta_g \left[\rho_g \overline{w}_g^w - \left(\rho_g \overline{w}_g^w \right)^0 \right] \quad (3)$$

Factor de impedancia o eficiencia
Densidad de vapor en el suelo
Densidad de vapor en el ambiente

Cabe aclarar que el factor de impedancia, es un valor que se debe ajustar en base a los resultados obtenidos de las simulaciones y al comparar con resultados experimentales. En la figura 15 se muestra la asignación de los resultados en condición de flujo.

Figura 15. Asignación de condiciones de flujo en el modelo

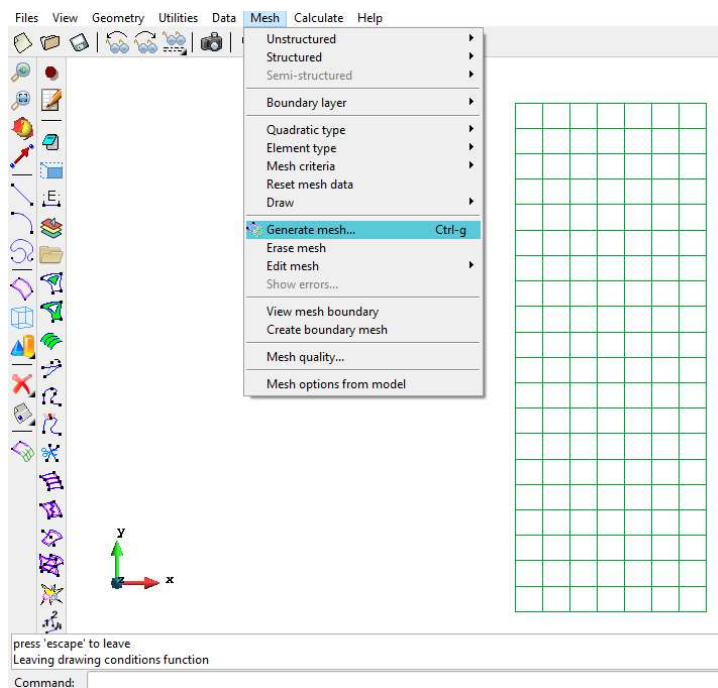


Fuente: Registro propio

3.4. GENERACIÓN DE MALLA Y POST PROCESO

Una vez establecidas todas las condiciones de contorno, propiedades de material e intervalos de tiempo para las simulaciones, se procede a generar la malla. El número de elementos y nodos creados es de 140 y 168 respectivamente. La interfaz GiD, asigna a cada uno de los elementos y nodos generados en el mallado las condiciones de contorno impuestas en el comienzo, así como las demás propiedades o características del material previamente asignadas. En la figura 16 se evidencia el resultado de obtener el modelo mallado.

Figura 16. Generación de malla.



Fuente: Registro propio.

Generada la malla, se procede a calcular el problema mediante la aplicación del código de elementos finitos Code Bright. Una vez culminado el cálculo GiD toma estos resultados obtenidos y los procesa a fin de permitir mediante la interfaz de visualización analizar el comportamiento de ciertas variables a través del tiempo en el modelo, como: saturación, esfuerzos, deformaciones, porosidad, presión líquida,

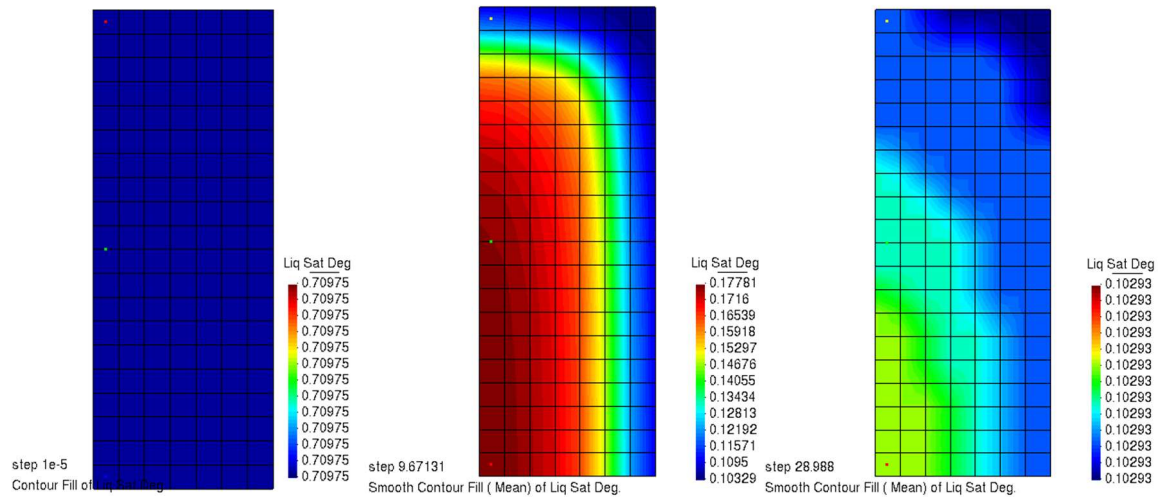
presión de gas, etc. A fin de analizar el comportamiento de la saturación respecto al tiempo en diferentes estratos de la muestra, se eligen 3 puntos de estudio cercanos al eje de axisimetría, con coordenadas en $X=0.005$ y coordenadas en $Y=0.005$, $Y= 0.1$ y $Y= 0.195$.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. PROCESO DE SECADO

Se realiza la modelación numérica contemplando un intervalo de secado de 30 días, en los que se analiza el comportamiento del grado de saturación de la muestra a través del tiempo en tres puntos diferentes, hasta que alcanza el equilibrio y se compara con resultados obtenidos del proceso de secado al aire. En la figura 17 se muestra la distribución del grado de saturación a través del tiempo, para valores de $t=0$ días, $t=8,93$ días y $t=28,98$ días respectivamente.

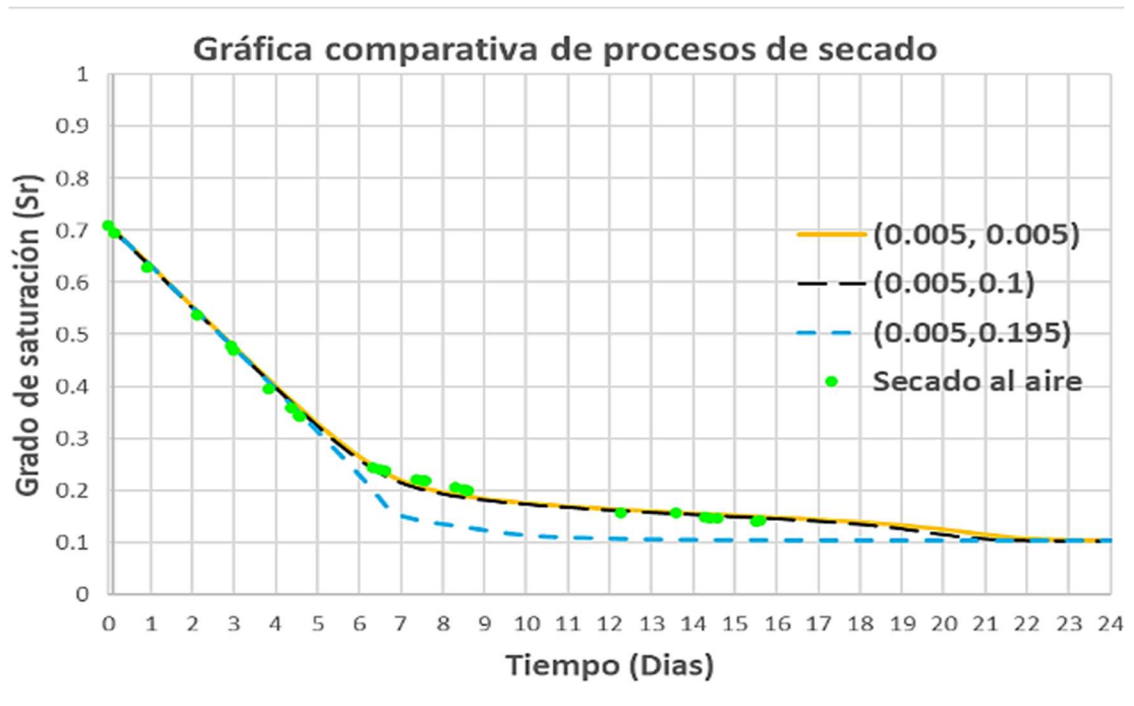
Figura 17. Distribución del grado de saturación a través del tiempo durante proceso de secado al aire



Fuente: registro propio

La figura 18, evidencia un gráfico comparativo entre los datos obtenidos a partir del proceso de secado al aire libre, y los resultados provenientes de la simulación numérica.

Figura 18. Grafica comparativa para valores obtenidos durante el proceso de secado.



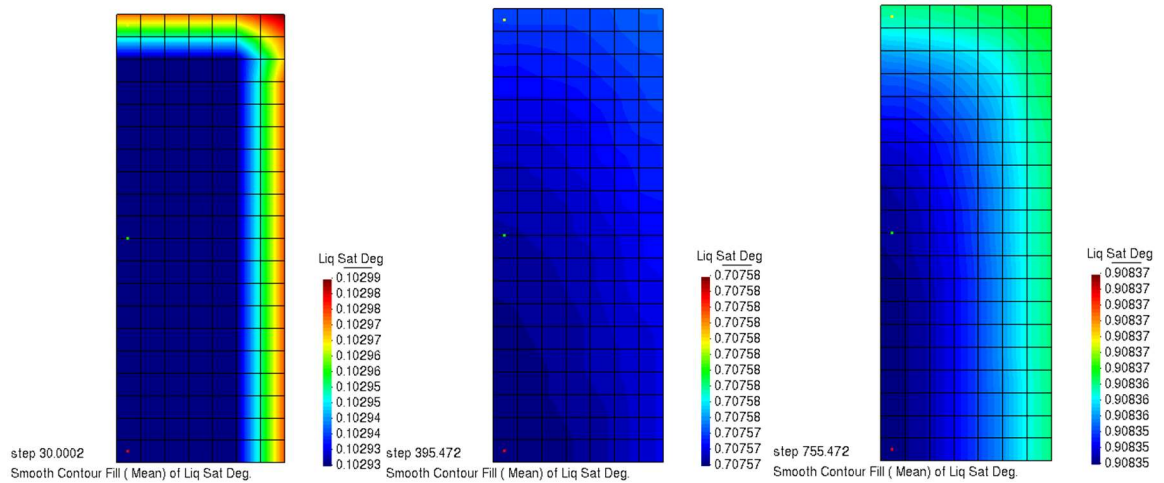
Fuente: registro propio

4.2. PROCESO DE HUMEDECIMIENTO

En este proceso se contempla un intervalo de tiempo de aproximadamente 2,5 años o 940 días, a fin de determinar para qué tiempo, la muestra llega a un grado de saturación igual o superior al 90% empleando únicamente la humedad relativa del ambiente.

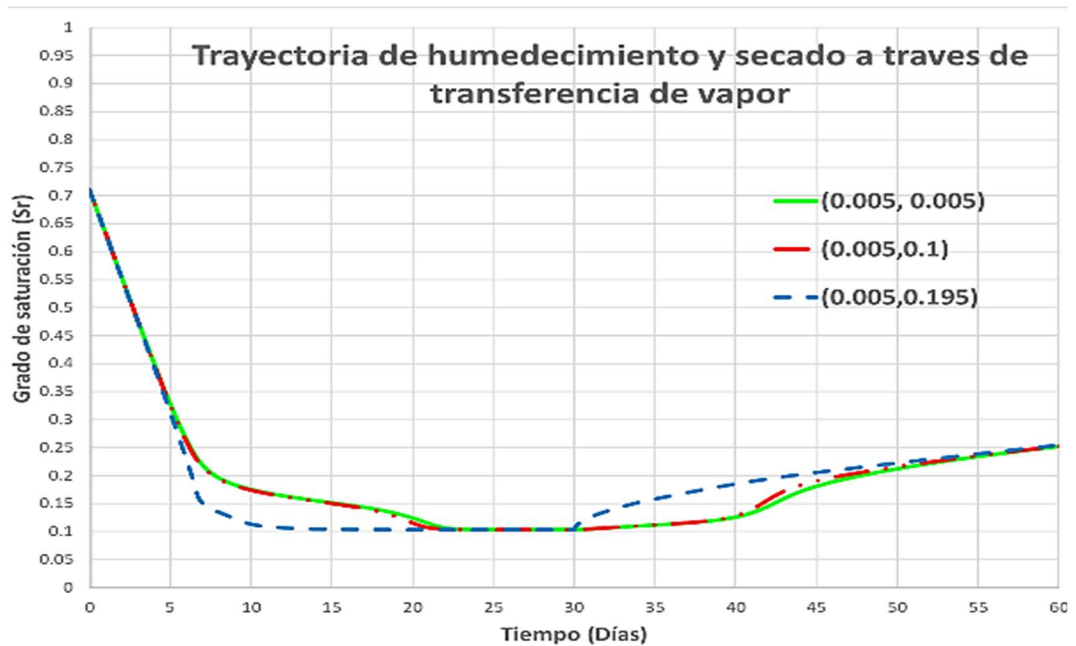
En la figura 19, se evidencia la distribución del grado de saturación a través del tiempo en el proceso de humedecimiento, para valores de $t=30.02$ días, $t=395$ días (1 año) y $t=755$ días (2 años).

Figura 19. Distribución del grado de saturación en proceso de humedecimiento



Fuente: Registro propio.

Figura 20. Trayectoria de humedecimiento y secado a través de transferencia de vapor.

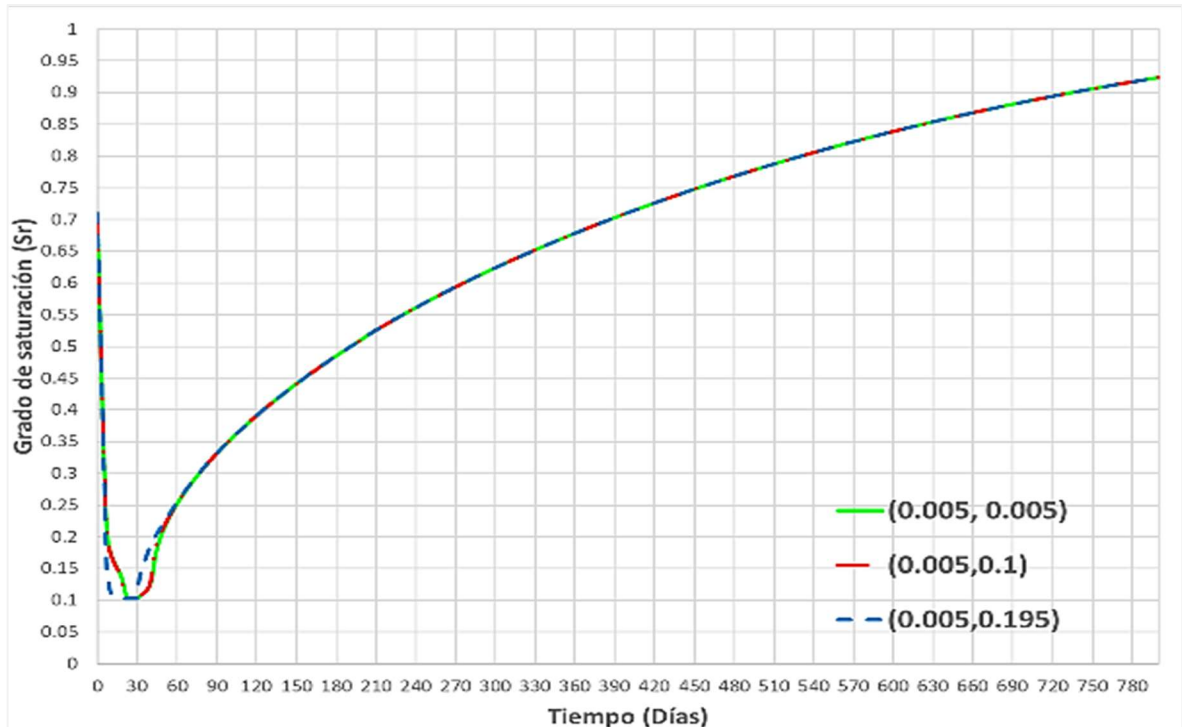


Fuente: Registro propio.

La figura 20, muestra la trayectoria de secado y de humedecimiento analizado en 3 puntos diferentes del modelo hasta un tiempo de 60 días, a fin de analizar detalladamente lo que sucede en los primeros dos meses de simulación.

Por su parte la figura 21, se grafica la trazabilidad de toda la trayectoria de humedecimiento y secado, hasta alcanzar una saturación del 90% en el proceso de humedecimiento.

Figura 21. Trazabilidad completa de trayectoria de secado y humedecimiento.

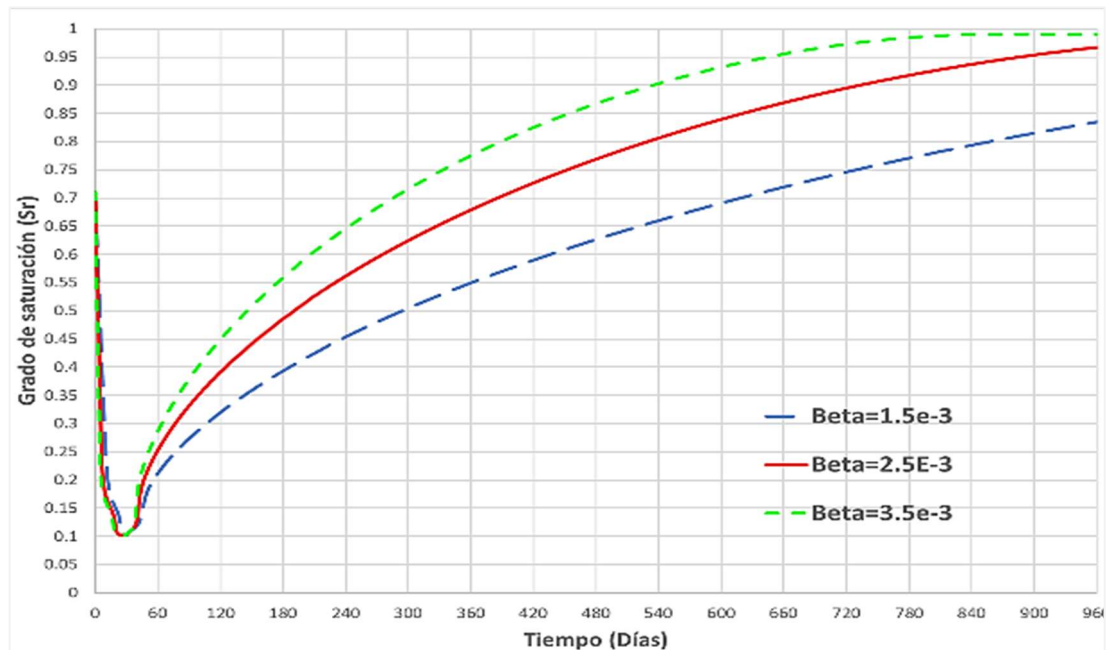


Fuente: registro propio

4.3. INFLUENCIA DEL FACTOR DE IMPEDANCIA EN LA MODELACIÓN

En base a que el factor de impedancia es un dato que se debe ir ajustando a prueba y error en base a los resultados obtenidos, es necesario determinar cuál es la influencia que posee este en los resultados del modelo, por lo anterior en la gráfica 22, se presenta un análisis de sensibilidad de la influencia de la variación de este en el modelo.

Figura 22. Influencia en el factor de impedancia en el modelo.



Fuente: Registro propio.

4.4. ANALISIS DE RESULTADOS

Del resultado comparativo obtenido de la gráfica 18, se establece que la calibración realizada al modelo es adecuada, debido a que el comportamiento del modelo se ajusta a los resultados obtenidos en laboratorio.

En la figura 20 se evidencia el comportamiento del grado de saturación en 3 puntos diferentes del modelo. La línea azul representa el punto más cercano a la frontera superior, por lo cual es afectado en mayor brevedad durante el proceso de secado y humedecimiento, sin embargo, inmediatamente vuelve a agruparse con los otros dos puntos de estudio.

A partir de la gráfica 21, es posible afirmar que el proceso de secado alcanza su estado de equilibrio más rápido que el proceso de humedecimiento.

La grafica 22 evidencia la importancia y precisión que representa el valor de impedancia en el modelo, por lo que es un factor primordial a la hora de obtener resultados precisos.

5. CONCLUSIONES

En este proyecto de grado se ha logrado avanzar en el entendimiento de los procesos de secado y humedecimiento a los cuales pueden eventualmente estar sometidas las capas estructurales que conforman la estructura de pavimento en vías que no cuenten con estructuras de drenaje adecuadas, por ejemplo, las vías terciarias. Dentro de los aspectos a resaltar como resultado del proyecto se tiene:

- Se logró reproducir mediante simulaciones termo-hidro-mecánicas por elementos finitos una curva de secado obtenida en laboratorio para una muestra compactada del lado seco de un material de sub-base granular marginal.
- El resultado de las simulaciones sugiere que es necesario al menos 20 días para lograr establecer un grado de saturación uniforme en toda la sección transversal de la muestra durante un proceso de secado extremo ($S_r=10\%$) en muestras de 15cm de diámetro y 20cm de altura.
- Por otra parte, para establecer una trayectoria de humedecimiento exclusivamente por transferencia de vapor y lograr el equilibrio para toda la sección de la muestra, las simulaciones sugieren tiempos de equilibrado mayores a 2 años. Lo anterior, sugiere que un sistema cerrado con humedad relativa cercana al 100% no es práctico y por tanto se sugiere emplear un sistema de ganancia de humedad soportado por humidificadores, para reducir este proceso.
- La gran diferencia en los tiempos de equilibrado entre la trayectoria de secado y humedecimiento probablemente esté muy relacionada con las diferencias en la permeabilidad relativa al líquido y al gas que tienen una influencia directa sobre la permeabilidad total del sistema.
- Los resultados sugieren la fuerte influencia del parámetro de impedancia dentro del análisis y particularmente afecta los tiempos de equilibrado en trayectoria de humedecimiento más que los de secado. En este caso, se estableció una primera aproximación con $\beta= 2.5E-3$.

6. BIBLIOGRAFIA

BLIGHT, G.E. 1965. A study of effective stress for volume change, in Moisture equilibrium and moisture changes in soils beneath covered areas. Sydney : Butterworths, 1965, págs. 259-269.

DONADO, Leonardo. 2004. Modelo de conductividad hidráulica en suelos. Bogotá, D.C. : Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería civil y agrícola., 2004. pág. 159.

FREDLUND, D.G. y XING, A. 1994. Equations for the soil - water characteristic curve. Saskatchewan. 1994. págs. 521-532. Vol. 31.

Influencia de la succión en los cambios volumetricos de un suelo compactado: Comportamiento de los suelos parcialmente saturados. Publicación técnica No.238. Sanfadilla. 2004. págs. 5-47. ISBN 0188-7297.

LI, W., y otros. 2017. Permanent strain behaviour of marginal granular material. Transportation Research Record, 2017, Vol. 2655, págs. 54-63.

MARTÍNEZ Jeisi y VARGAS Juan. Evaluación del comportamiento hidromecánico de materiales granulares marginales de subbase identificados como MGM-1. [Tesis de pregrado] Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2022.

Rutas: Revista de la asociación. Principales innovaciones en el PG-3 sobre geotecnia vial y drenaje. Madrid. 2001, Vol. 84, págs. 15-28.

3RD INT. CONG. SOIL SCIENCE. 1935. The pF of the water in soil. 2, págs. 37- 48.

9TH EUROPEAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION
ENGINEERING. Special problem soils. Dublin, 1987, Vol 3. págs. 1087 - 1146.

ANEXOS

ANEXO A: Cálculo de datos parámetros para aplicación de la succión desde el punto de vista de fracción másica

Datos de entrada para condición de flujo en etapa de equilibrio.

$$Hr = (p_v/p_{v0}) * 100 = (\exp(-(p_g - p_l) * M_w / (R * T * \rho_l))) * 100$$

$$p_{v0} = 136075 * (\exp(-5239,7/273,15 + T^{\circ}C)) \quad (MPa)$$

$$p_{v0} \text{ (MPa)} = 0.0028671 \quad p_{v0} \text{ (Pa)} = 2867.102215$$

$$M_w \text{ (kg/mol)} = 0.018 \quad \rho_l \text{ (kg/m}^3\text{)} = 994.603 \quad \rho_l = \rho_{l0} * \exp(\dots)$$

$$R \text{ (J/Mol}^{\circ}K\text{)} = 8.314 \quad T^{\circ}C = 23.29$$

$$P_l \text{ (MPa)} = -0.099133027$$

$$HR \text{ (\%)} = 99.85$$

$$\theta_g^w \text{ (kg/m}^3\text{)} = 0.020909026$$

$$\theta_g^a = M_a * P_a / (R * (273,15 + T))$$

$$p_g \text{ [MPa]} = 0.1 \quad p_v \text{ [MPa]} = 0.002862913$$

$$M_a \text{ (kg/mol)} = 0.02895 \quad p_a \text{ [MPa]} = (p_g - p_v) = 0.097137087$$

$$\theta_g^a \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1.141003087$$

$$\rho_g = \theta_g^w + \theta_g^a = 1.161912113 \text{ kg/m}^3 \quad 1.161942422$$

$$\omega_g^w \text{ (kg/kg)} = 0.01799536 \quad \omega_g^w = \theta_g^w / \rho_g$$

$$0.017952011$$

Datos de entrada para condición de flujo en etapa de secado.

$$Hr = (p_v/p_{v0}) * 100 = (\exp(-(\rho_g - p_l) * M_w / (R * T * \rho_l))) * 100$$

$$p_{v0} = 136075 * (\exp(-5239,7/273,15+T^{\circ}C)) \quad (MPa)$$

p_{v0} (MPa) = 0.0028671 p_{v0} (Pa) = 2867.102215

Mw (kg/mol) = 0.018 ρ_l (kg/m³) = 985.035

R (J/Mol* °K) = 8.314 T ° C = 23.29

PI (MPa) = -21.58

HR (%) = 85.15

θ_g^w (kg/m³) = 0.017830309

$$\theta_g^a = Ma * Pa / (R * (273,15 + T))$$

p_g [MPa] = 0.1 p_v [MPa] = 0.002441368

Ma (kg/mol) = 0.02895 p_a [MPa] = ($p_g - p_v$) = 0.097558632

θ_g^a (kg/m³) = 1.145954691

$\rho_g = \theta_g^w + \theta_g^a = 1.163785$ kg/m³ = 1.163785

ω_g^w (kg/kg) = 0.015320965 $\omega_g^w = \theta_g^w / \rho_g$

0.015320965

Datos de entrada para condición de flujo en etapa de humedecimiento.

$$p_{vo} = 136075 * (\exp(-5239,7/273,15+T^{\circ}\text{C})) \quad (\text{MPa})$$

$$p_{vo} \text{ (MPa)} = 0.0028671 \quad p_{vo} \text{ (Pa)} = 2867.102215$$

$$M_w \text{ (kg/mol)} = 0.018 \quad \rho_l \text{ (kg/m}^3\text{)} = 994.692$$

$$R \text{ (J/Mol}^{\circ}\text{K)} = 8.314 \quad T^{\circ}\text{C} = 23.29$$

$$P_l \text{ (MPa)} = 0.1$$

$$HR \text{ (\%)} = 100.00$$

$$\theta_g^w \text{ (kg/m}^3\text{)} = 0.020939623$$

$$\theta_g^a = Ma * Pa / (R * (273,15 + T))$$

$$p_g \text{ [MPa]} = 0.1 \quad p_v \text{ [MPa]} = 0.002867102$$

$$Ma \text{ (kg/mol)} = 0.02895 \quad p_a \text{ [MPa]} = (p_g - p_v) = 0.097132898$$

$$\theta_g^a \text{ (kg/m}^3\text{)} = 1.140953877$$

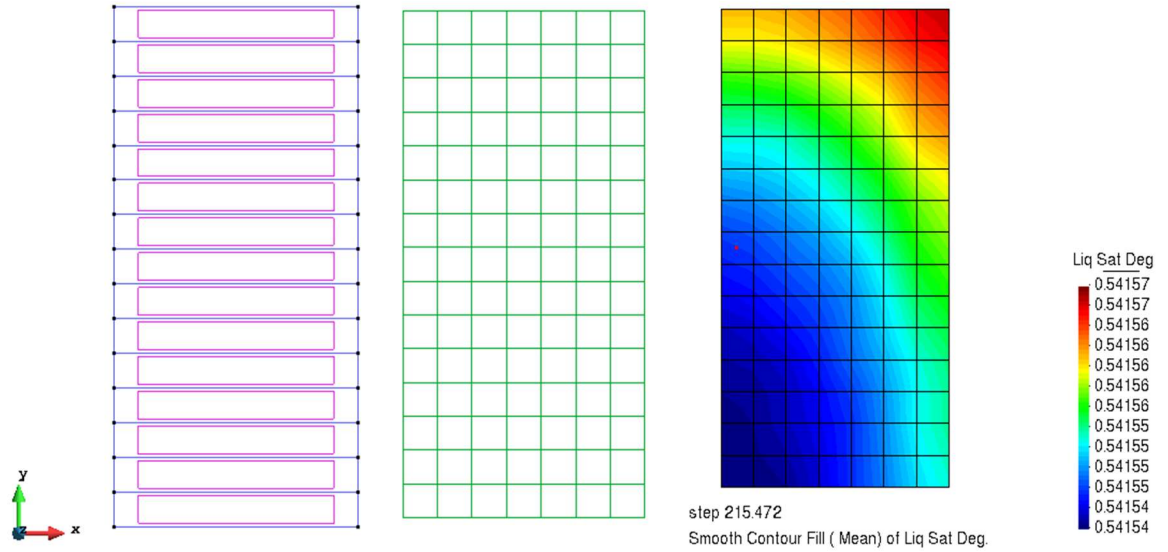
$$\rho_g = \theta_g^w + \theta_g^a = 1.1618935 \quad \text{kg/m}^3 = 1.1618935$$

$$\omega_g^w \text{ (kg/kg)} = 0.018021981 \quad \omega_g^w = \theta_g^w / \rho_g$$

0.018021981 Ingresar en CB

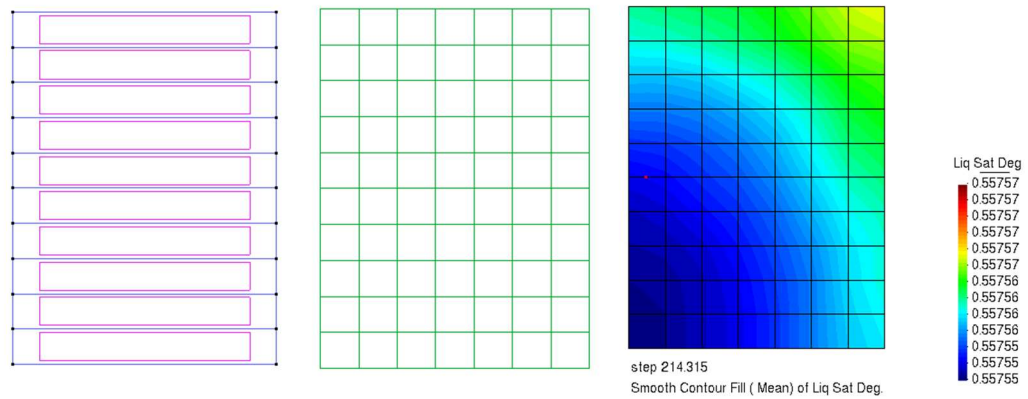
ANEXO B: Resultados obtenidos de modelos de simulación para muestras con alturas de 10 cm y 15 cm

Figura 23. Geometría, mallado y post proceso para una muestra de 15 cm de altura



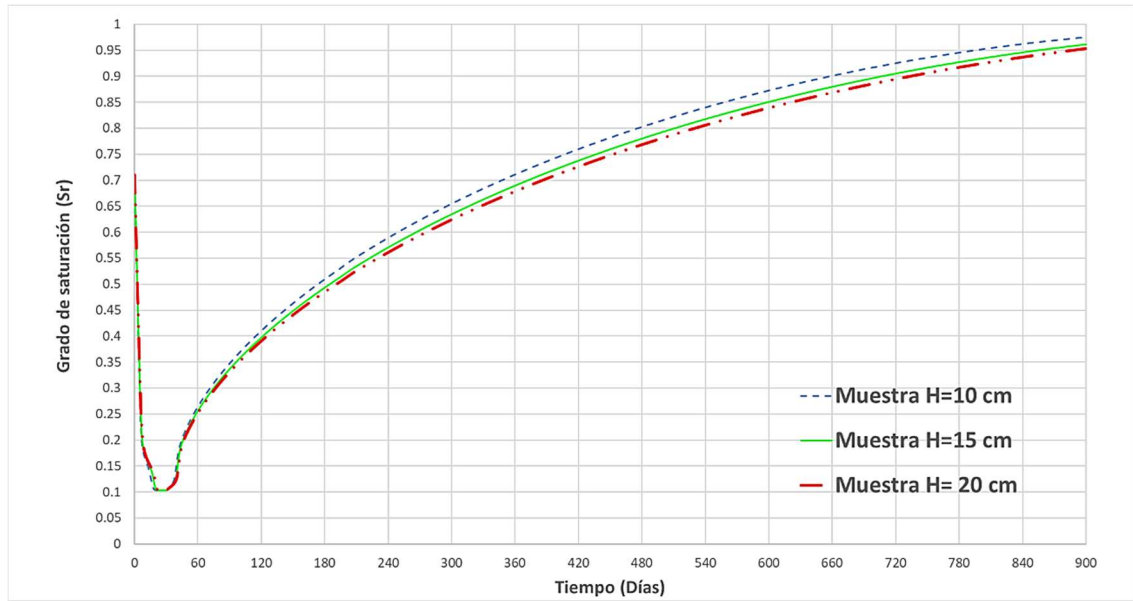
Fuente: Registro propio

Figura 24. Geometría, mallado y post proceso para una muestra de 10 cm de altura



Fuente: Registro propio

Figura 25. Gráfico comparativo de trayectoria de secado y humedecimiento para muestras con alturas de 10, 15 y 20 cm de altura



Fuente: registro propio.