

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PROCESOS DE SECADO DE SUELOS
ARCILLOSOS MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS**

**JOHANA MILENA BARON CONSUEGRA
LIZETH YADIRA SANTOS MENDEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PROCESOS DE SECADO DE SUELOS
ARCILLOSOS MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS**

**JOHANA MILENA BARON CONSUEGRA
LIZETH YADIRA SANTOS MENDEZ**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Director:
VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES
I.C., M.I.-G, D.I.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

*Dedicado a Mis Padres Lucas y María Belén
A mis hermanos y Andrés Moreno por brindarme todo el amor y el apoyo para
alcanzar este gran logro en mi vida.*

*Y especialmente, dedico este trabajo a Lizeth Santos,
Colega y amiga.*

Johana Milena Barón Consuegra.

*Dedicado a Dios que me ha acompañado, inspirado y ayudado en este camino.
A mi mami y a Rodri que con su constante dedicación y apoyo ha hecho este
sueño realidad
A mi angelito del cielo que siempre me cuida y protege
A mis hermanos Flaco, Nata y Juandi por el apoyo y cada momento de felicidad
y a Migue por brindarme todo el amor, compañía y ayuda constante*

*Y especialmente, dedico este trabajo a Johana Barón,
Colega y amiga.*

Lizeth Yadira Santos Méndez

AGRADECIMIENTOS.

Los autores expresan su agradecimiento a:

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirnos crecer académica y personalmente.

A la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y su personal docente, por contribuir exitosamente con nuestra formación profesional.

Al Ing, M. Sc Vladimir Merchán Jaimes, director de este proyecto, quien gracias a su tiempo, disposición y asesoría, fue el guía necesario para el feliz término de la tesis.

A nuestros familiares y amigos muchas gracias por el apoyo, las risas y el tiempo compartido.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA MECANICA DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS	20
1.1 MATERIAL	24
1.2 EQUIPO	24
1.3 RESULTADOS experimentales e interpretación numérica	27
1.3.1 Resultados experimentales	27
1.3.2 Interpretación numérica de la etapa de eculización	29
2. MANEJO DE LOS PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS CODE_BRIGHT Y GiD	36
3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA SIMULACION NUMERICA	45
3.1 INTERPRETACION DE RESULTADOS	45
3.1.1 Influencia de La Malla	45
3.1.2. Influencia de parámetro β	47
3.2.3. Influencia de la permeabilidad intrínseca	48
3.1.3. Influencia de la porosidad	50
3.1.4. Influencia del módulo de deformación a_2	51
3.1.5. Ejercicios	52
4. CONCLUSIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elementos de la curva de retención según Fredlund et al. (1994)	22
Figura 2. Curva de retención del suelo para “Boom Clay”	25
Figura 3. Esquema de la técnica de transferencia de vapor utilizado para secar la muestra.	26
Figura 4. Evolución de la deformación axial en las aplicaciones de estrés y de succión.	28
Figura 4 con mediante el programa de elementos finitos CODE_BRIGTH.	29
Figura 5 Las condiciones de contorno y parámetros iniciales utilizadas en la simulación numérica.	34
Figura 6. Comparación entre la evolución experimental y calculado de la deformación axial durante el secado.	34
Figura 7. Evolución de la succión en un punto central de la muestra.	35
Figura 8. Geometría del código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE_BRIGTH	36
Figura 9. Superficie formada por medio de nodos	37
Figura 10. Datos del problema (Datos Generales)	37
Figura 11. Datos del problema (Ecuaciones a resolver)	38
Figura 12. Propiedades del material (Modelo Mecánico)	38
Figura 13. Propiedades del material (Modelo hidráulico)	39
Figura 14. Intervalo de tiempo	40
Figura 15. Condiciones de contorno	41
Figura 16. Malla generada	42
Figura 17. Equilibrio de la muestra	43

Figura 18. Desplazamiento vertical en la sección transversal de la muestra para un tiempo	43
Figura 19. Gráfica de resultados	44
Figura 20. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para diferentes mallas	46
Figura 21. Influencia de la malla en el grado de saturación	46
Figura 22. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia del parámetro β	47
Figura 23. Influencia del parámetro β en el grado de saturación	48
Figura 24. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia de la permeabilidad intrínseca	49
Figura 25. Influencia de la permeabilidad intrínseca en el grado de saturación	49
Figura 26. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia de la porosidad	50
Figura 27. Influencia de la porosidad en el grado de saturación	50
Figura 28. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia del módulo de deformación a_2	51
Figura 29. Influencia del módulo de deformación a_2 en el grado de saturación	52
Figura 30. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo	53
Figura 31. Grado de saturación	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Humedad relativa	41

RESUMEN

Título:

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PROCESOS DE SECADO DE SUELOS ARCILLOSOS MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS*

Autores:

JOHANA MILENA BARON CONSUEGRA
LIZETH YADIRA SANTOS MENDEZ**

PALABRAS CLAVES:

SUCCIÓN, HUMEDAD RELATIVA, SECADO, ARCILLAS.

CONTENIDO:

El presente trabajo analiza mediante simulaciones numéricas el comportamiento de succión de una muestra de arcilla parcialmente saturada, previamente estudiada por Merchán (2011) cuando es sometida a variaciones de los parámetros principales como el parámetro β (eficiencia de transferencia de vapor), la permeabilidad intrínseca del material, el módulo de deformación en función de la succión a_2 y la porosidad.

Las características físicas de la muestra citada la definen como una arcilla tipo Boom, de edad terciaria, obtenida en Bélgica, que fue recolectada a orillas del Mar del Norte en el noroeste del continente europeo, y que presenta baja conductividad hidráulica, baja porosidad y propiedades mecánicas aceptables también los resultados experimentales se trabajaron en el equipo de corte anular modificado elaborado por Merchán (2011).

Para dicho análisis fue utilizado el código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE_BRIGHT, el cual permitió obtener resultados que indican que el parámetro β y la permeabilidad intrínseca; son los parámetros que presentan mayor influencia en los resultados. A pesar de que en los desarrollos experimentales se controlan las variables principales, es muy difícil hasta el momento comprobar o seguir la evolución de las mismas dentro de la muestra. Por ésta razón finalmente, se verifica la validez de las simulaciones numéricas como fuente adicional de información en la evaluación de las distintas variables en un ensayo, lo que favorece la puesta en marcha de una técnica experimental.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

SUMMARY

Title:

SENSITIVITY ANALYSIS PROCESS OF DRYING CLAY SOILS BY NUMERICAL SIMULATIONS*

Authors:

JOHANA MILENA BARON CONSUEGRA
LIZETH YADIRA SANTOS MENDEZ**

KEYWORDS:

SUCTION RELATIVE HUMIDITY, DRYING, CLAY

CONTENTS:

This document analyzes by numerical simulation the suction behavior of a sample of partially saturated clay, previously studied by Merchán (2011) when subjected to variations of the main parameters; for example the parameter β (vapor transfer efficiency), the intrinsic permeability of the material, the modulus of deformation as a function of suction and the porosity.

The physical characteristics of the sample above is defined as a type Boom clay of Tertiary age, obtained in Belgium, which was collected along the North Sea in northwestern Europe, and has low hydraulic conductivity, low porosity and acceptable mechanical properties. Experimental results also worked on the modified annular cutting equipment developed by Merchán (2011).

For this analysis was used CODE_BRIGHT finite element code, which yielded results that indicate that the parameter β and the intrinsic permeability, are the parameters that have a greater influence on the results. Although experimental developments in the main variables are controlled, it is difficult to check or follow the time evolution of the same in the sample. For this reason finally verifies the validity of the numerical simulations as an additional source of information in the evaluation of different variables in a trial, which favors the establishment of an experimental technique.

* Degree Work

** Physical-Faculty of Engineering, School of Civil Engineering, Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

INTRODUCCIÓN

Una de las ramas de la ingeniería civil es la mecánica de los suelos, la cual en teoría y práctica ha sido desarrollada principalmente para suelos saturados, debido a que normalmente representa la condición más crítica en términos de estabilidad.

Por otra parte los países tropicales y semiáridos, están sujetos a condiciones climáticas muy variables (ciclos de humedecimiento y secado) y por lo tanto pueden presentar de manera frecuente una condición de saturación parcial. El estudio de la mecánica de los suelos en esta condición ha tenido un gran desarrollo desde 1990 con la aparición del método básico de Barcelona (BBM), desarrollado por (Alonso *et al.*, 1990). A partir de este punto se han desarrollado nuevos equipos experimentales y de igual forma nuevos desarrollos numéricos.

En la actualidad existe poca información referente a los suelos no saturados. Sin embargo, aunque los suelos sedimentarios saturados son los más comunes en los climas templados, los suelos parcialmente saturados, son los más frecuentes en las regiones áridas y semiáridas. A diferencia de los suelos saturados, los cuales tienen dos fases (agua y sólidos), los suelos parcialmente saturados presentan tres: partículas de sólidos, agua y aire.

Hay que anotar que los factores que gobiernan el estado de saturación parcial en campo son el tamaño de las partículas, el clima, la profundidad del nivel freático y la topografía.

Para estudiar el comportamiento mecánico de los suelos no saturados, es necesario examinar su respuesta cuando se producen cambios en la succión

(diferencia entre presiones del aire (P_a) y del agua (P_w)) y su relación con el grado de saturación y los refuerzos efectivos o como es común en términos del esfuerzo neto definido como la diferencia entre el esfuerzo total y la presión de aire. Los estudios experimentales buscan establecer la influencia de estas variables en el comportamiento hidro-mecánico. Uno de estos ensayos es el estudio experimental en el laboratorio de los procesos de secado realizado con condiciones controladas en el equipo del corte anular modificado Merchán (2011). En este caso particular, se aplica la técnica de transferencia de vapor para controlar la humedad relativa o succión total en el ambiente que circunda a la muestra del suelo.

Varios métodos han sido desarrollados para controlar la Succión del material aplicada a una muestra: La técnica osmótica, y el control de humedad relativa.

A pesar de que en los desarrollos experimentales se controlan las variables principales, es muy difícil hasta el momento comprobar o seguir la evolución de las mismas dentro de la muestra. Por ésta razón surge la necesidad de realizar simulaciones numéricas para comprobar la evolución de las diferentes variables en un experimento.

En este documento, basados en la simulación numérica del código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE_BRIGTH, se analizan los principales factores como son el análisis del parámetro β que es la eficiencia de transferencia de vapor, análisis de la permeabilidad intrínseca del material, el módulo de deformación en función de la succión a_2 , la influencia de la permeabilidad intrínseca y la porosidad. Para realizar estos análisis se tomó como base los resultados experimentales y numéricos obtenidos por Merchán (2011) en un proceso de secado. Por tanto, en este proyecto se realiza un análisis de sensibilidad para dichos parámetros nombrados anteriormente con el fin de verificar condiciones de equilibrio en la muestra del suelo.

En el primer capítulo se describe el material utilizado en la prueba refiriéndonos exclusivamente a la arcilla con la cual se hizo el ensayo experimental, es decir, Boom Clay y el equipo en el cual se trabajó que es el corte anular modificado.

En el segundo capítulo se presenta una breve descripción de todo el proceso que se llevó a cabo para realizar las simulaciones numéricas con el programa del código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE_BRIGTH, desde el preproceso hasta el postproceso.

En el tercer capítulo se presenta la simulación básica del experimento BP_4, seguidamente se realiza el análisis de sensibilidad de los parámetros y su respectiva interpretación.

En el capítulo cuatro se encuentran las conclusiones de este estudio y algunas recomendaciones que pueden mejorar la calidad del trabajo en futuras investigaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estudiar procesos de equilibrado de la succión durante secado de muestras inicialmente saturadas mediante técnicas numéricas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el marco de la mecánica de los suelos en condiciones parcialmente saturadas.
- Estudiar la influencia de diferentes variables en el tiempo de equilibrio de la succión. Variables como altura de la muestra, permeabilidad, curva de retención, porosidad. Mediante un análisis paramétrico de estas mismas variables.

1. ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA MECANICA DE SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS

La succión en suelos no saturados está compuesta por la succión capilar que matemáticamente se define como $(u_a - u_w)$ y la succión osmótica (π) por lo tanto la suma de ambos componentes se denomina succión total (ψ). En ese contexto, la magnitud de la succión total corresponde al trabajo total de las fuerzas de capilaridad, absorción y osmosis. La succión total, se representa en unidades de presión y puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi$$

Donde: $\psi = \text{Succión Total}$
 $(u_a - u_w) = \text{Succión Capilar}$
 $\pi = \text{Succión Osmótica}$

La succión capilar se define como la presión negativa que debe aplicarse al agua que tiene una composición idéntica a la del suelo, para que alcance el equilibrio con ésta a través de una membrana semipermeable. Esta succión depende de las fuerzas de atracción entre el agua y los cationes del suelo, de las fuerzas de tensión superficial y de las cargas externas. En general, al disminuir el grado de saturación (S_r) los radios de los meniscos son menores y por tanto la succión aumenta.

Se define como la presión negativa a la cual debe someterse el agua químicamente pura, para que esté en equilibrio, a través de una membrana semipermeable, con el agua del suelo. Esta componente depende de la presencia de sales disueltas en el agua del suelo y no depende de la sobrecarga; para la mayoría de los efectos prácticos, esta componente se puede despreciar.

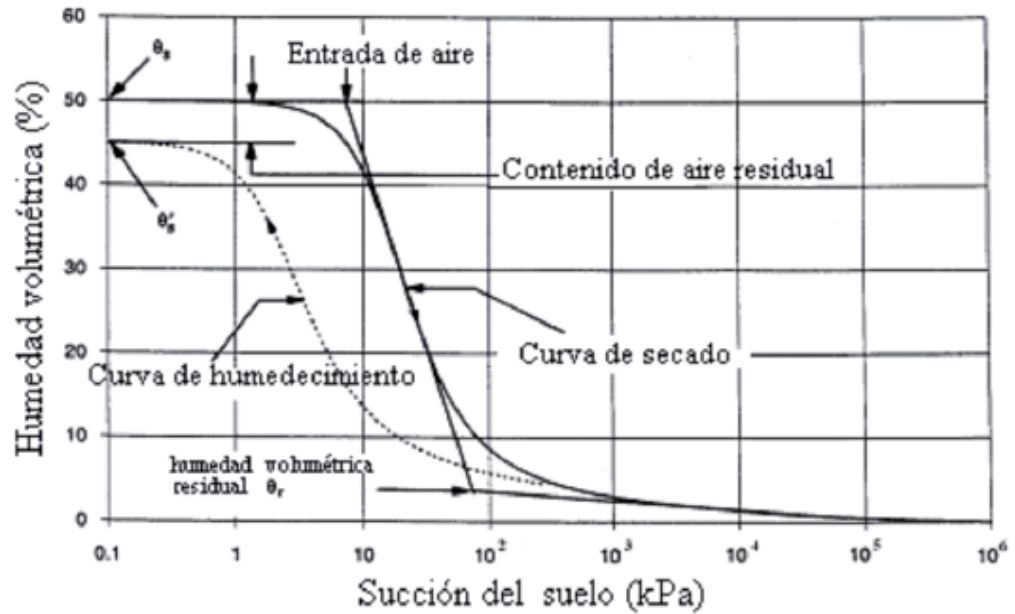
Y el término succión total del suelo se define como la presión negativa, con respecto a la presión externa (atmosférica), que debe aplicarse al agua químicamente pura que se encuentra en un depósito, para que alcance el equilibrio con el agua del suelo a través de una membrana semipermeable (permite únicamente el paso a moléculas de agua).

Según Fredlund *et al.* (1994), la curva de retención del agua en el suelo puede ser definida como la variación de la succión con la capacidad de retención del agua en los macro y micro poros del suelo. Los valores corresponden al tipo de suelo, con una determinada densidad, y la naturaleza de esa relación está directamente asociada a la granulometría y mineralogía del suelo. De una forma general, la geometría de los poros, la magnitud y composición mineralógica de la fracción fina son determinantes en la posición relativa, forma e inclinación de la curva.

La Figura 1 hace referencia a la curva de retención la cual representa la relación entre la succión y el contenido de humedad del suelo, presenta comportamiento histérico (curvas no coincidentes por los procesos de humedecimiento y secado) y se utiliza para estimar diversos parámetros relacionados con el comportamiento de los suelos parcialmente saturados.

En ella se encuentra que en la curva de secado del suelo, si este inicialmente está saturado el nivel freático va bajando y en la curva de humedecimiento del suelo, si el suelo está en estado seco se va humedeciendo.

Figura 1. Elementos de la curva de retención según Fredlund et al. (1994).



Fuente:(ALFARO, 2008)

LEY DE PSICROMETRIA

En general, la **psicrometría** estudia las propiedades termodinámicas de mezclas de gas con vapor. En particular, la mayoría de las aplicaciones se refieren al aire 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 (8.314472J/mol*K), T la temperatura en grados Kelvin, M_w la masa molecular del agua (18015g/mol), V_w es el inverso de la densidad del agua (0.998Mg/m³ a 20°C), u_v 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 u_v y u_{vo} corresponde al valor de la humedad relativa.

ESFUERZO NETO Y ESFUERZO EFECTIVO

El esfuerzo neto (q neto) es el esfuerzo útil que queda para la estructura, después de quitarle el esfuerzo que va a utilizar el peso del relleno del suelo y la sobrecarga del piso.

$$q \text{ neto} = q \text{ adm} - \gamma \cdot D_t - \text{sobrecarga de piso},$$

Donde:

γ = Peso específico del relleno

D_t = Profundidad de cimentación

Por otra parte el esfuerzo efectivo en cualquier dirección está definido como la diferencia entre el esfuerzo total en dicha dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo. El esfuerzo efectivo es por lo tanto una diferencia de esfuerzos. Un suelo parcialmente saturado es un material compuesto de tres fases: partículas de sólidos, agua y aire.

Para los casos en donde el aire en un suelo parcialmente saturado existe dentro de burbujas, puede decirse que por lo menos para el caso de cambios de resistencia cortante esta ecuación se mantiene:

$$\bar{\sigma} = (\sigma - \mu)$$

1.1 MATERIAL

Las pruebas de laboratorio se realizaron en arcilla de Boom que es una arcilla sedimentaria Terciaria de Bélgica que se encuentra ubicada a orillas del Mar del Norte en el noroeste del continente europeo, es una arcilla marina que presenta baja conductividad hidráulica, baja porosidad y propiedades mecánicas aceptables. Por lo tanto, se trata de una roca huésped potencialmente interesante para limitar y retrasar la migración de los contaminantes de los residuos radiactivos. Por este motivo ha sido objeto de numerosas investigaciones en Europa.

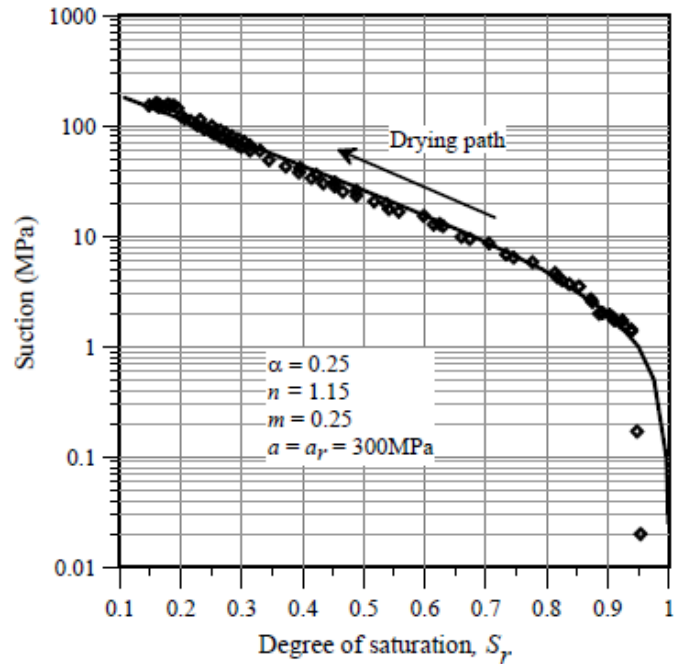
1.2 EQUIPO

La relación entre el grado de saturación del material y la succión o la humedad relativa es descrita a través de la curva de retención de agua del suelo.

La Figura 2 presenta la curva de retención de agua del suelo en términos del grado de saturación (S_r) a partir de un estado remoldeados. Los datos experimentales son instalados por una forma modificada de expresión propuesta por van Genuchten. En esta expresión de conjunto por la Ecuación 1, un total máximo de aspiración se considera en un $a_r = 300\text{MPa}$ para el $S_r = 0$. Parámetro $1 / \alpha$ en la ecuación 1 se relaciona con el valor de la entrada de aire, n para la pendiente de la curva de m y el parámetro con el grado de saturación residual. El parámetro $C(s)$ se utiliza para corregir la curva en el rango de succión superior. Los valores de parámetros de ajuste se muestran en la Figura 1.

$$S_r = C(s) \left[\frac{1}{1 + (\alpha s)^n} \right]^m ; C(s) = 1 - \frac{\ln \left[1 + \frac{s}{a_r} \right]}{\ln \left[1 + \frac{\alpha}{a_r} \right]} \quad (1)$$

Figura 2. Curva de retención del suelo para “Boom Clay”



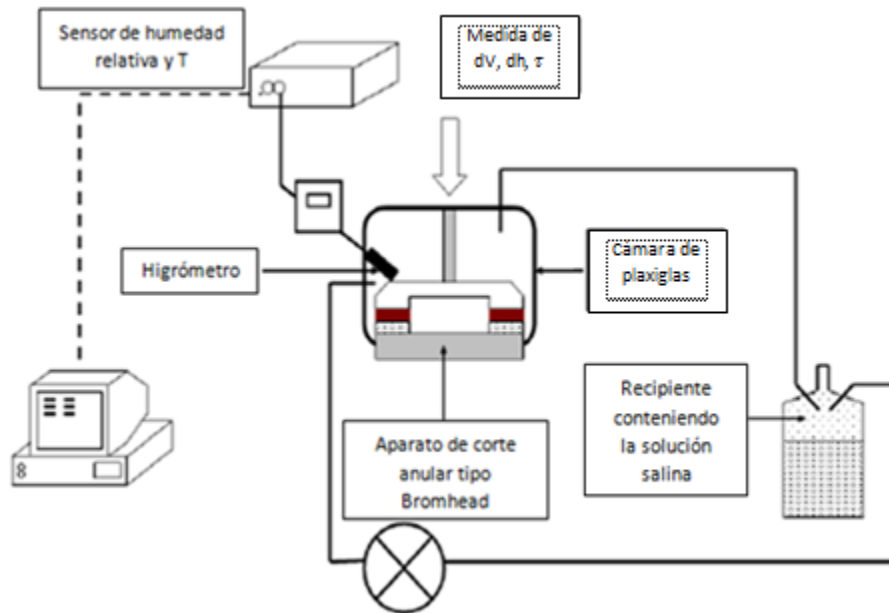
Fuente: (MERCHAN, 2011)

La Figura 3 muestra un esquema del aparato de corte anular (Bromhead, 1972) adaptado a un anillo con una cámara de vidrio para permitir el control de humedad relativa alrededor de la muestra. Un sistema de convección forzada impulsada por una bomba de aire se utiliza para la transferencia de vapor, generado en un recipiente que contiene una solución salina.

La solución salina impone la humedad relativa o succión, la bomba de aire permite la circulación de este potencial dentro del circuito cerrado y adaptado de manera que el secado se obtiene por la salida de moléculas de agua en forma de vapor, hasta que la succión de la muestra es igual a la succión impuesta por la solución salina.

Los desplazamientos verticales de la muestra con una altura inicial de 5mm, así como la humedad relativa y la evolución de temperatura en el secado se registran automáticamente.

Figura 3. Esquema de la técnica de transferencia de vapor utilizado para secar la muestra.



Fuente: (MERCHAN, 2011)

Una primera etapa de la prueba se realiza mediante la aplicación de un esfuerzo vertical de 100 kPa a la muestra cuasi-saturada. Esta primera etapa toma 24 horas para consolidar la muestra.

Posteriormente, la humedad relativa determinada por la solución salina se aplica a través de la técnica de transferencia de vapor y utilizando el circuito de convección forzada. A partir de este momento, comienza el proceso de secado que conduce a una reducción en la altura de la muestra inducida por la pérdida de agua. La muestra se considera generalmente equilibrada con base en la tasa de cambio en altura cuando ésta sea menor al 0,2% por día.

1.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES E INTERPRETACIÓN NUMÉRICA

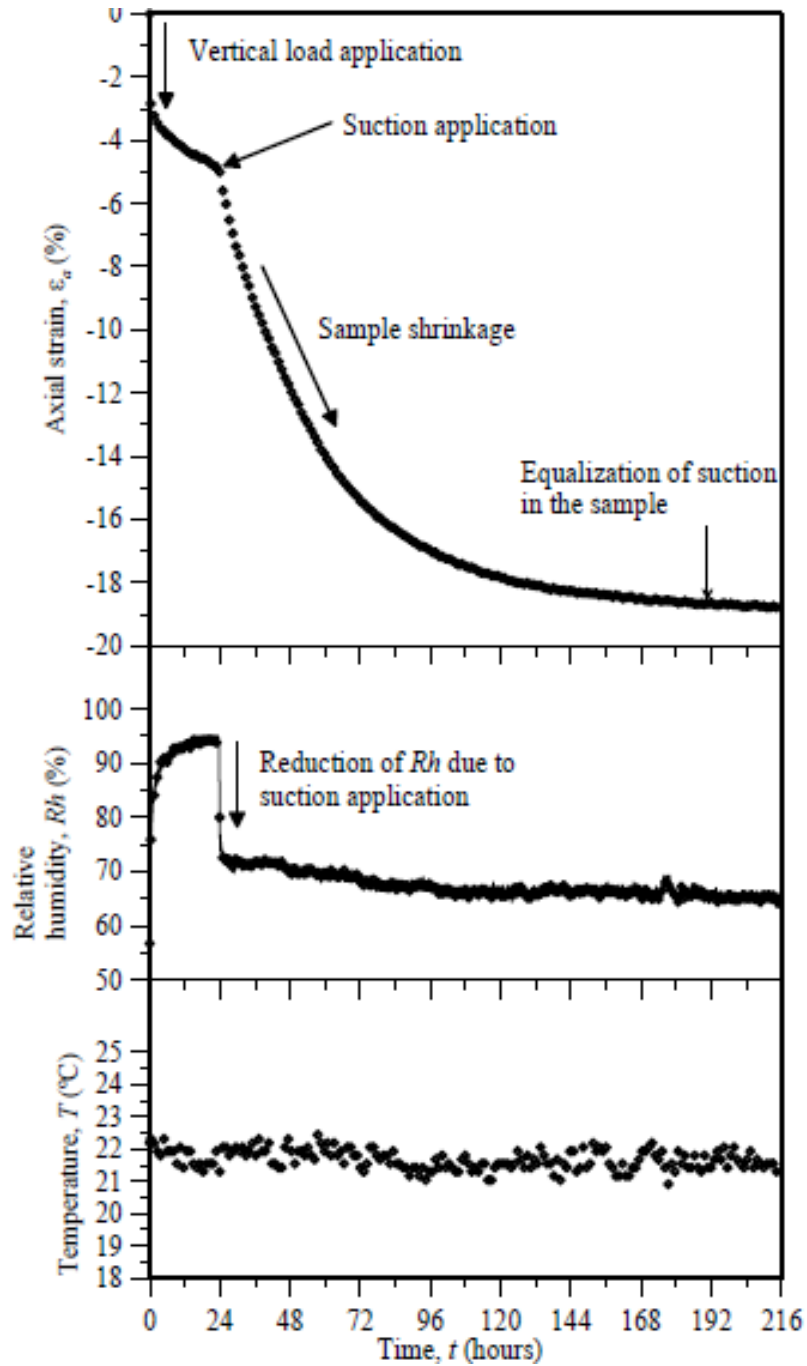
1.3.1 Resultados experimentales. La Figura 3 muestra las dos primeras etapas del protocolo de ensayo a saber, la aplicación de esfuerzo vertical seguida de la aplicación de succión. La deformación axial, así como la humedad relativa y la temperatura en los alrededores de la muestras se miden en el tiempo. Después de la aplicación de esfuerzo vertical inicial, la muestra fue sometida a una deformación axial de un $\varepsilon=4,92\%$ que corresponde a un desplazamiento vertical de $u_{yy}=0,244\text{mm}$. Como se muestra en la Figura 4 durante este tiempo la humedad relativa aumentó de $HR=57\%$ (condiciones de laboratorio) hasta $HR=95\%$ (correspondiente a las condiciones de la muestra casi saturada). Después de la aplicación de la carga, la solución salina y la bomba de aire se conectan al circuito. Una vez que se aplica la succión por transferencia de vapor hacia la muestra, ésta comienza a contraerse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a través que pasa el tiempo (Ver Figura 4).

Como se observa en la Figura 4, la humedad relativa disminuyó bruscamente a $HR = 73\%$ tras una hora de la transferencia de vapor con el circuito de convección forzada. Las pequeñas variaciones de las mediciones de humedad relativa son una consecuencia de las fluctuaciones de temperatura (Merchán, 2011). El equilibrio de la succión se asumió en el instante $t = 192$ horas después de la aplicación de succión, cuando la tasa de desplazamiento vertical debido a la contracción fue menor que $0,2\% / \text{día}$. Como se muestra en la Figura 4, la deformación axial máxima en este momento es un $\varepsilon = 18,8\%$ para un total de succión $s=58\text{MPa}$ estimado a partir de la ley psicométrica.

Sin embargo, como se anotó anteriormente es muy difícil contar con una medición de la succión dentro de la muestra para saber si está equilibrada o no y sólo se puede establecer el equilibrio en términos de la tasa de deformación vertical desde el punto de vista experimental. Para superar este problema, (Merchán, 2011)

realizó una simulación numérica, para poder analizar el proceso de secado, que se discute en la siguiente sección.

Figura 4. Evolución de la deformación axial en las aplicaciones de estrés y de succión.



Fuente: (MERCHAN, 2011)

1.3.2 Interpretación numérica de la etapa de ecualización. Una serie de cálculos numéricos se han realizado para simular la curva de ecualización presenta en la Figura 4 con mediante el programa de elementos finitos CODE_BRIGHT.

El principal reto de la simulación es calcular numéricamente los cambios importantes en la deformación axial y su evolución con el tiempo y comprobar si se estabiliza la succión en el tiempo transcurrido, utilizando el procedimiento experimental.

El modelo constitutivo seleccionado para el secado fue el modelo de superficie del estado no lineal para los suelos parcialmente saturados (Lloret & Alonso, 1985). Este modelo se ha seleccionado por su sencillez para obtener importantes cambios volumétricos con un número reducido de parámetros.

El modelo requiere tres parámetros (a_1 , a_2 , a_3) para definir el cambio de volumen por efectos de cambio de carga y succión. El modelo también requiere que el valor del módulo de corte G_0 o ν la relación de Poisson para definir los incrementos de las deformaciones de corte. El coeficiente a_1 se define por la ecuación 2 en términos de κ que es "la pendiente de la descarga/recarga de la curva en el e - \ln " (p') plano (e : índice de poros, p' : esfuerzo neto). El parámetro a_2 se define por la ecuación 3 en función de κ_s que es "la pendiente de la descarga/carga en la curva $\ln e$ " [$(s + P_{atm}) / P_{atm}$] plano (s : aspiración; P_{atm} : la presión atmosférica). La deformación volumétrica se calcula por la Ecuación 4. El parámetro a_3 no se incluyó en la simulación de la simplicidad. Los valores de estos coeficientes se obtuvieron mediante el análisis posterior que conduce a los siguientes valores: $a_1 = -0.036$, $a_2 = 0,0335$ y una constante relación de Poisson de $\nu = 0.35$.

$$\mathbf{a}_1 = -\frac{k}{(1+e)} \quad (2)$$

$$\mathbf{a}_2 = -\frac{k_g}{(1+e)} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta e}{1+e} = \varepsilon_v = a_1 \Delta \ln(-p') + a_2 \Delta \ln\left(\frac{s+0.1}{0.1}\right) + a_3 \Delta \left[\ln(p') \ln\left(\frac{s+P_{atm}}{P_{atm}}\right) \right] \quad (4)$$

Para el análisis hidráulico, el código numérico toma en cuenta los cambios de permeabilidad, por efecto de variaciones de la porosidad y el grado de saturación. Siguiendo esta idea, la conductividad hidráulica se define en el código por la Ecuación 5, donde, k_w es el tensor de la permeabilidad intrínseca (afectados por los cambios de la porosidad), K_{RL} es la permeabilidad relativa en fase líquida (que tenga en cuenta grado de saturación) y μ_l es la viscosidad dinámica del líquido. En este caso particular, un modelo Koseny dado por la Ecuación 6 se utiliza para definir la variación del tensor de la permeabilidad intrínseca en función de la porosidad ϕ . En esta ecuación, k_{wo} es la permeabilidad intrínseca de líquido en una porosidad de referencia determinada.

La determinación de la conductividad hidráulica se obtuvo en el laboratorio y a partir de allí se determinó este valor. El valor del tensor de la permeabilidad intrínseca $k_{wo}=2,0 \text{ E-18m}^2$ en una porosidad de referencia de $\phi=0,492$. El efecto del grado de saturación se calcula por una ley de potencia del grado de saturación efectivo, dado por la Ecuación 7 con valores de $n=3$, con un máximo de saturación $S_{ls}=1.0$, y la saturación mínima de $S_{rl}=1.0$. Por otra parte, permeabilidad al gas se define en forma análoga a la conductividad hidráulica por la ecuación 8, donde k_g es el tensor de la permeabilidad intrínseca de gas, que se relaciona con el tensor de la permeabilidad al líquido a través de la Ecuación 9. En este caso, un valor de $A=4.0\text{E}5$ se aplicó de acuerdo.

El parámetro de la permeabilidad relativa al gas, que se define por la Ecuación 10 se obtuvo en función del grado de saturación para el agua. Un valor de $n=2$ fue adoptado a partir de datos reportados por [3].

$$K_w = \frac{K_w K_{rl}}{\mu_l} \quad (5)$$

$$K_w = K_{wo} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{(1-\phi)^2}{\phi_0^3} \quad (6)$$

$$K_{rl} = S_e^n \quad ; \quad S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} \quad (7)$$

$$K_g = \frac{K_g K_{rg}}{\mu_g} \quad (8)$$

$$K_g = AK_w \quad (9)$$

$$K_{rg} = (S_g)^n \quad ; \quad S_g = 1 - S_l \quad (10)$$

La aplicación de la humedad relativa es controlada por la transferencia de masa de agua indicada por la Ecuación 11. En esta ecuación, f_g^w es la masa del flujo de vapor en la fase gaseosa, ω_g^w (donde w es agua y g es gas) es la masa de vapor de agua en la fase gaseosa, P_g es la densidad del gas y el producto de estas dos cantidades se define como la densidad de vapor θ_g^w quiere decir agua en fase de gas dada por la Ecuación 12.

La evaporación proviene de la diferencia entre la densidad de vapor de la superficie del suelo ($\omega_g^w \rho_g$) y la densidad del vapor en el medio ambiente $(\omega_g^w \rho_g)^0$. El parámetro β_g se asocia con la función de intercambio turbulento [8] y depende del movimiento del aire sobre la superficie del suelo. Los valores de este parámetro se obtuvieron por [2] para diferentes condiciones de laboratorio. Este parámetro es muy sensible al tipo de sistema de circulación utilizada.

Si el vapor es forzado a través de la muestra con una bomba de aire que causa un gradiente de presión de gas entre la entrada y salida de las caras de la muestra, el flujo advectivo predominará. Esto significa que la evaporación se produce rápidamente. Por otro lado, cuando la circulación del vapor se aplica a lo largo de los límites de drenaje, sin gradiente de presión, la evaporación se produce por difusión por valores de β_g bajos. En este caso, la humedad relativa es aplicada a lo largo de los límites de la muestra con un mecanismo de difusión predominantemente. β_g se obtiene por prueba y error, dando un valor de $\beta_g=7.0E-4$ m/s, que es en el mismo orden de magnitud a lo reportado por[2].

$$j_g^w = \beta_g \left[\omega_g^w \rho_g - (\omega_g^w \rho_g)^0 \right] \quad (11)$$

$$\theta_g^w = \omega_g^w \rho_g \quad (12)$$

El problema original 3D se puede simplificar por una simulación axi-simétrica debido a la simetría de la muestra anular alrededor del eje vertical. Para las simulaciones, las condiciones iniciales de la muestra corresponden al estado después de la aplicación del esfuerzo vertical en el experimento.

La Figura 5 muestra la geometría con una altura de muestra de 4.756 mm y 7.5 mm de ancho, junto con las condiciones de contorno y los valores del estado inicial de la muestra. En el modelo, los lados verticales de la muestra se consideran impermeables al flujo de agua, $q_w=0$, y no se permiten los desplazamientos horizontales $u_{xx}=0$. En la base del modelo, una restricción de los desplazamientos en la dirección vertical se establece $u_{yy}=0$ y en la parte superior de la muestra del esfuerzo tensión vertical total se aplica $\sigma_v=0.2$ MPa.

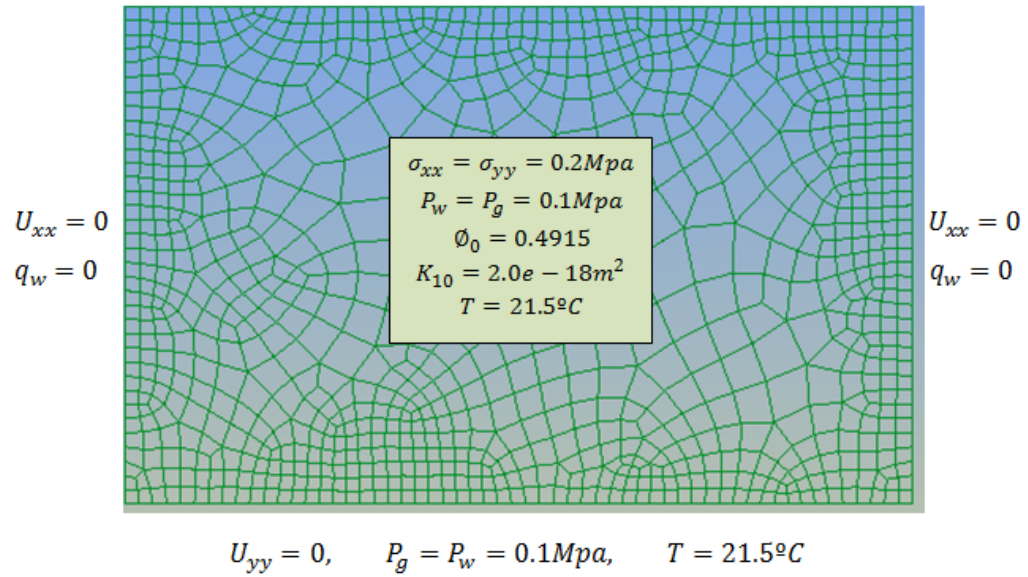
La humedad relativa se aplica en los límites de drenaje de la base y la parte superior tratando de seguir el procedimiento experimental. En busca de la simplicidad un valor de temperatura de $T=21,5$ °C, que corresponde al valor medio de los datos experimentales que se han seleccionado para la simulación.

Una comparación entre las curvas calculadas y la experimental en términos de la evolución del desplazamiento vertical con el tiempo se muestra en la Figura 6.

En la figura 7 la evolución de la succión en el punto medio de la muestra se representa. La curva indica que la succión tenga alrededor de 168 horas para alcanzar un valor estable. El valor dado por la simulación es inferior al determinado experimentalmente, con lo cual el criterio experimental está del lado seguro ($t = 192$ horas).

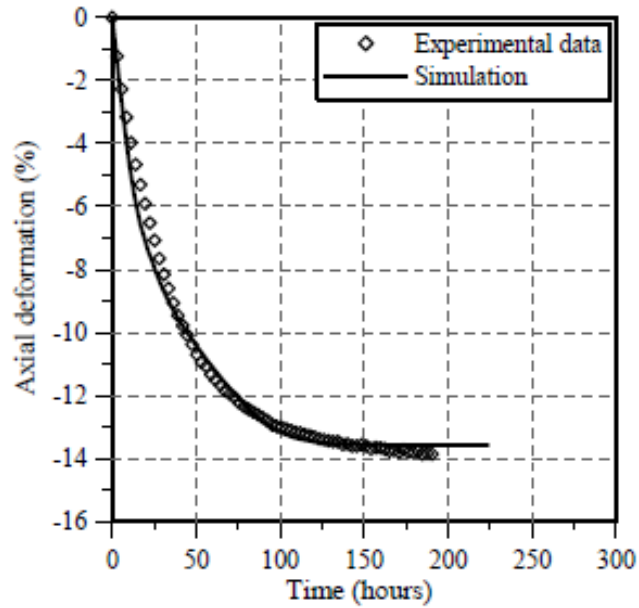
Figura 5 Las condiciones de contorno y parámetros iniciales utilizadas en la simulación numérica.

$$\sigma_{yy} = 0.2\text{Mpa}, \quad P_g = P_w = 0.1\text{Mpa}, \quad T = 21.5^\circ\text{C}$$



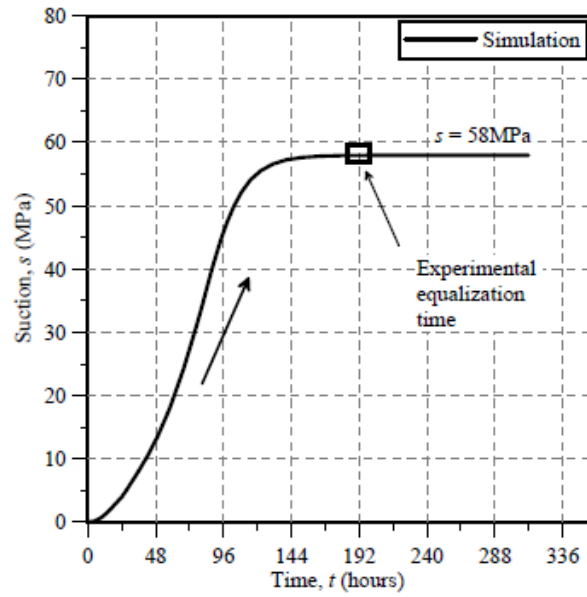
Fuente: *Elaboración Propia*

Figura 6. Comparación entre la evolución experimental y calculado de la deformación axial durante el secado.



Fuente: (MERCHAN, 2011)

Figura 7. Evolución de la succión en un punto central de la muestra.



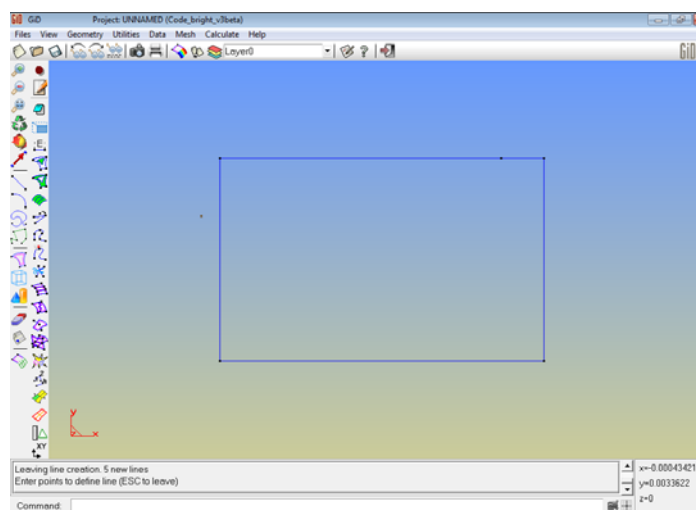
Fuente: (MERCHAN, 2011)

2. MANEJO DE LOS PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS CODE_BRIGHT Y GiD

El código de elementos finitos Code – Bright desarrollado por Olivella *et al.* (1996) requiere de un programa auxiliar para hacer más fácil el pre-proceso y post-proceso. Con el pre-proceso se define la geometría, condiciones de contorno, propiedades de los materiales, etapas de trabajo. GiD traduce estas entradas y las transforma en archivos de texto para el Code-Bright. Seguidamente GiD activa el cálculo y permite ver los resultados en un ambiente gráfico que se denomina el post-proceso.

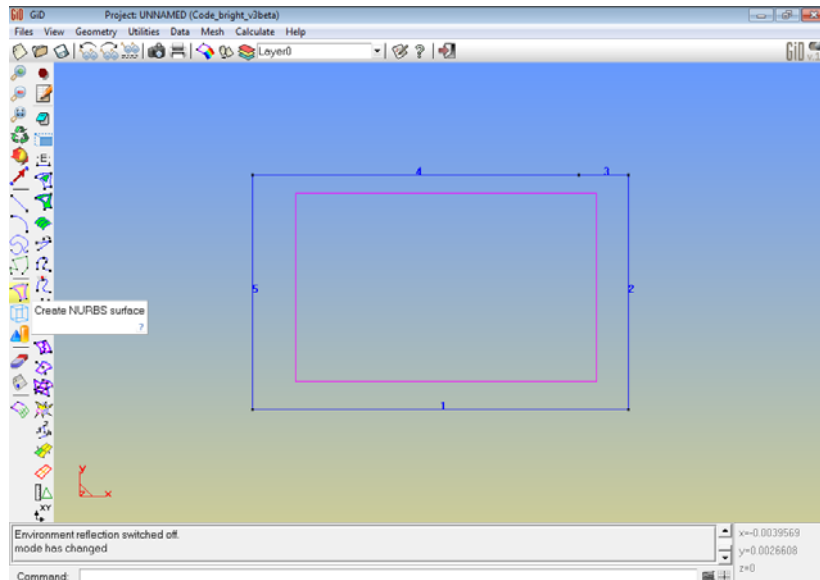
En la fase inicial se define la geometría del problema mediante nodos y sus respectivas coordenadas, luego se procede a unir estos nodos por medio de líneas (Figura 8) y finalmente, a las líneas se le asigna un comando para crear una superficie que corresponde a la sección transversal de la muestra de suelo (ver Figura 9).

Figura 8. Geometría del código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE_BRIGHT



Fuente: Registro Propio

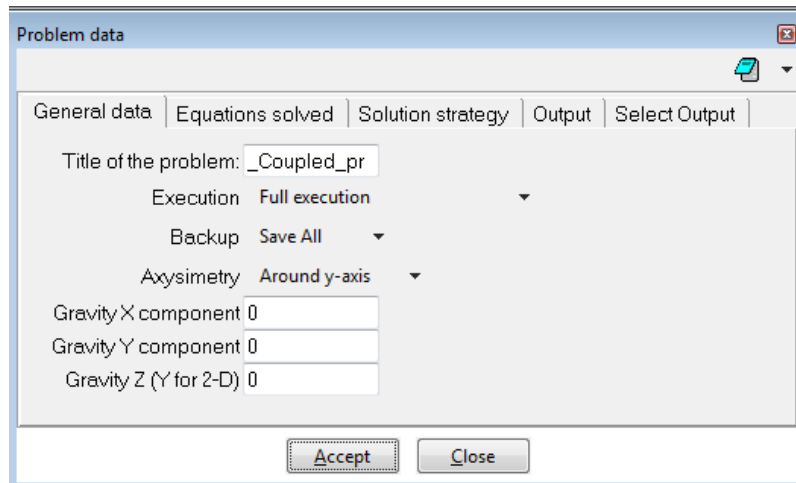
Figura 9. Superficie formada por medio de nodos



Fuente: Registro Propio

En el siguiente paso se define el tipo de problema a resolver. Como se observa en la Figura 10. En la casilla de datos generales se define si hay condición de axisimetría o no, y si tiene en cuenta la gravedad en la asignación de esfuerzos iniciales.

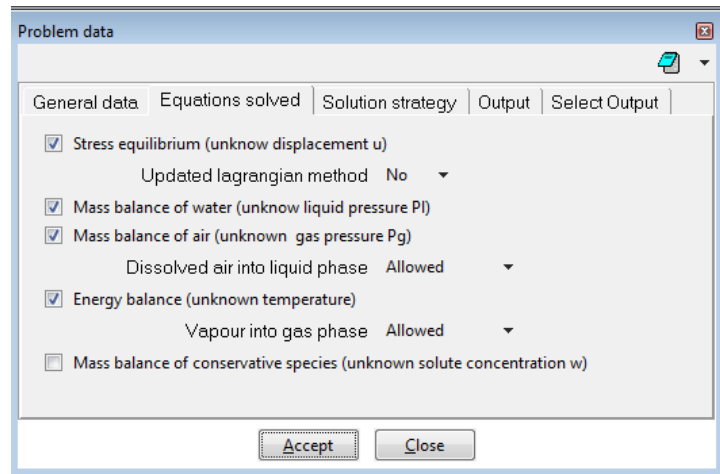
Figura 10. Datos del problema (Datos Generales)



Fuente: Registro Propio

En la Figura 11. Se define el equilibrio, los balances masivos de agua y aire sin tener en cuenta presiones, se disuelve aire en la fase liquida; y en el balance de energía se introduce gas en la fase de vapor.

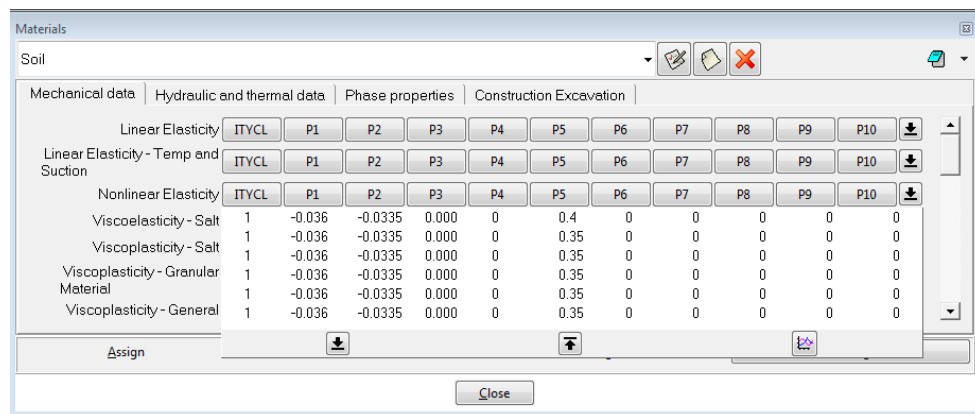
Figura 11. Datos del problema (Ecuaciones a resolver)



Fuente: Registro Propio

Se definen los datos del material, primero para el modelo mecánico se especifica el valor de los módulo de deformación en función de la succión a_1 y a_2 como se observa en la Figura 12.

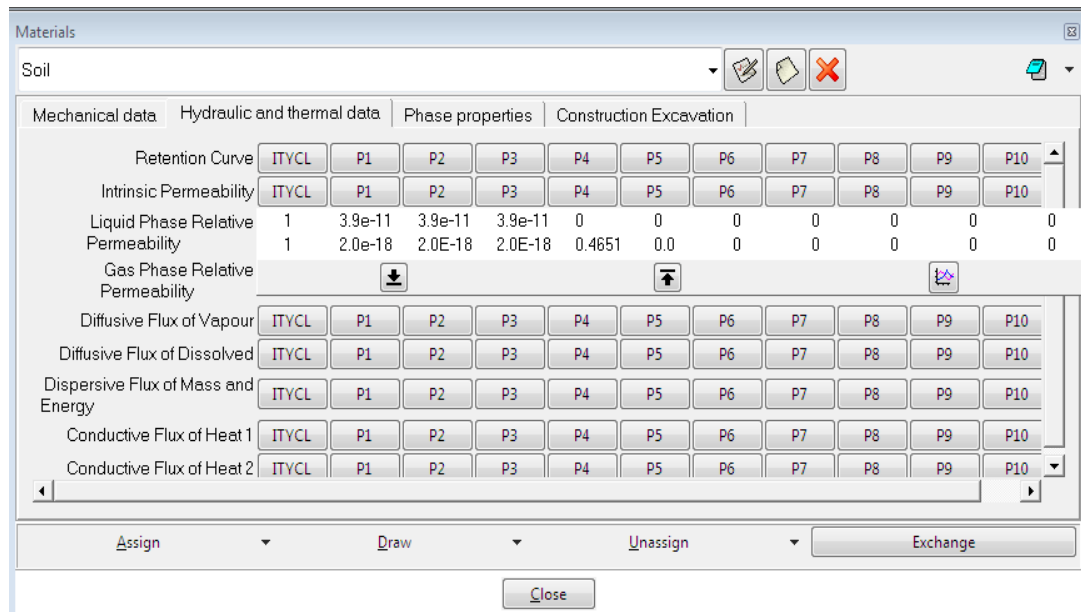
Figura 12. Propiedades del material (Modelo Mecánico)



Fuente: Registro Propio

En la Figura 13. Se definen los datos del modelo hidráulico: permeabilidad intrínseca, permeabilidad relativa de la fase líquida y gaseosa, datos de la curva de retención, y la conductividad por calor.

Figura 13. Propiedades del material (Modelo hidráulico)

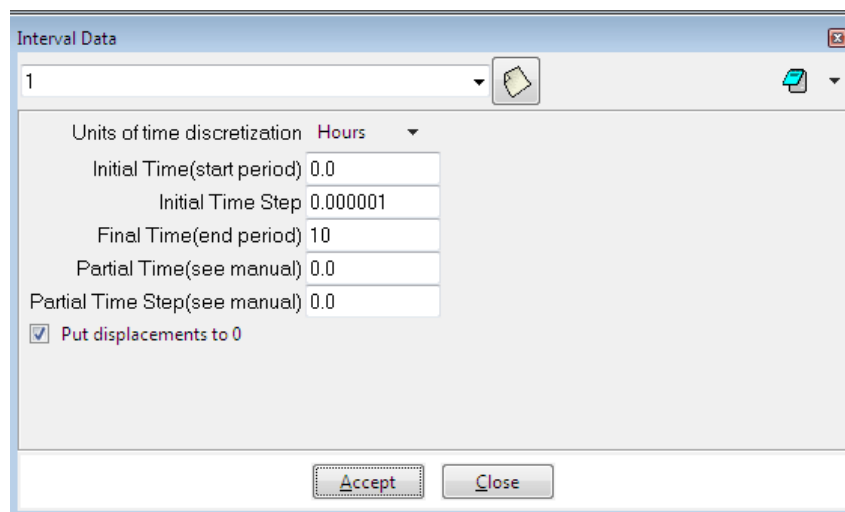


Fuente: Registro Propio

Teniendo en cuenta que el problema a simular es una función del tiempo, se requiere establecer una serie de intervalos de tiempo (ver Figura 14) para los cuales se ajustan las variaciones de las condiciones de frontera. En particular, la variable más importante es la humedad relativa del ensayo medida experimentalmente y que varía durante el proceso de secado. (ver Figura 4).

Asignamos los intervalos de tiempo (Figura 14) donde decimos el tiempo de inicio y de fin para así ir cambiando las condiciones de la geometría de nuestra simulación.

Figura 14. Intervalo de tiempo



Fuente: *Registro Propio*

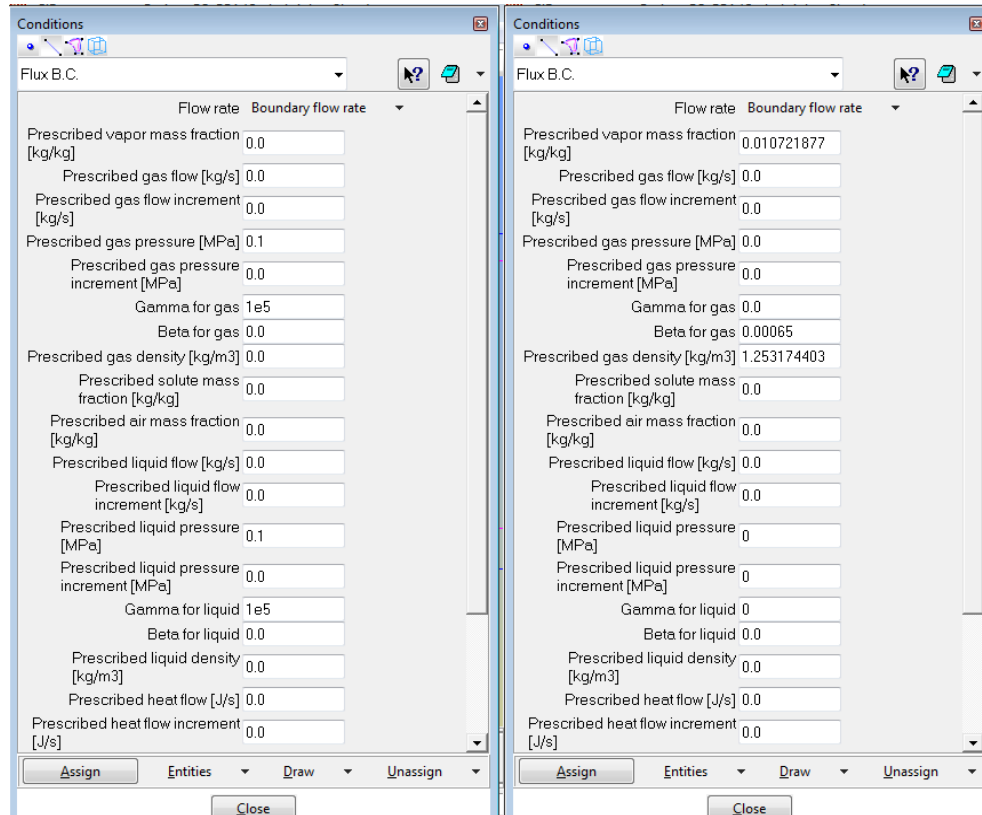
Se asignan condiciones a la geometría para cada intervalo (Figura 15), en las líneas o elementos definimos las restricciones requeridas; en los elementos derecho e izquierdo restringimos desplazamientos en el eje x, en los elementos superior e inferior no se colocan restricciones para poder ver las deformaciones, se le aplica una fuerza de -0.2 MPa al elemento superior. También se le debe asignar la porosidad, la temperatura. En el intervalo 1, inicial se asigna la presión de gas y líquido en este caso 0.1 MPa y el γ de gas. En los intervalos 2, 3 y 4 se asigna la fracción de masa de vapor y la densidad de gas, estos se obtienen con la humedad relativa y un β para el gas ver tabla 1.

Tabla 1. Humedad relativa

INTERVALO DE TIEMPO	HR_{EXP} Humedad Relativa	$W_g^w = \frac{\theta_g^w}{P_g}$ Fracción másica de agua en la fase gaseosa	$P_g = \theta_g^w + \theta_g^a$ Densidad del gas
1	No se tiene en cuenta	0	0
2	71%	0,010721877	1,253174403
3	66,5%	0,010217174	1,253625626
4	65,3%	0,009845281	1,25395832

Fuente: Registro Propio

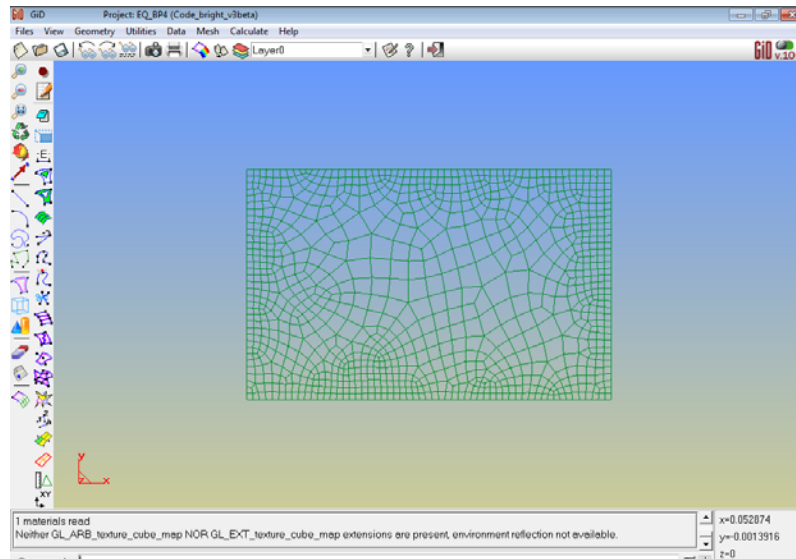
Figura 15. Condiciones de contorno



Fuente: Registro Propio

Una vez realizado todo lo anterior se procede a generar la malla a la cual nosotros decidimos darle el tamaño de los elementos como se observa en la Figura 16.

Figura 16. Malla generada

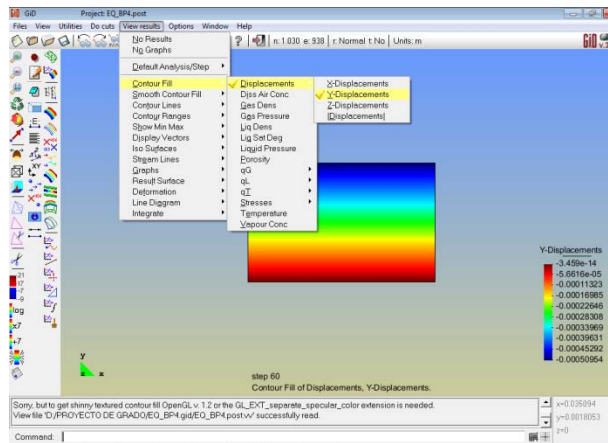


Fuente: Registro Propio

En este punto ya se cuenta con el modelo numérico terminado. El GiD permite calcular desde la plataforma en ambiente Windows y de igual forma permite ver los resultados obtenidos (post-proceso).

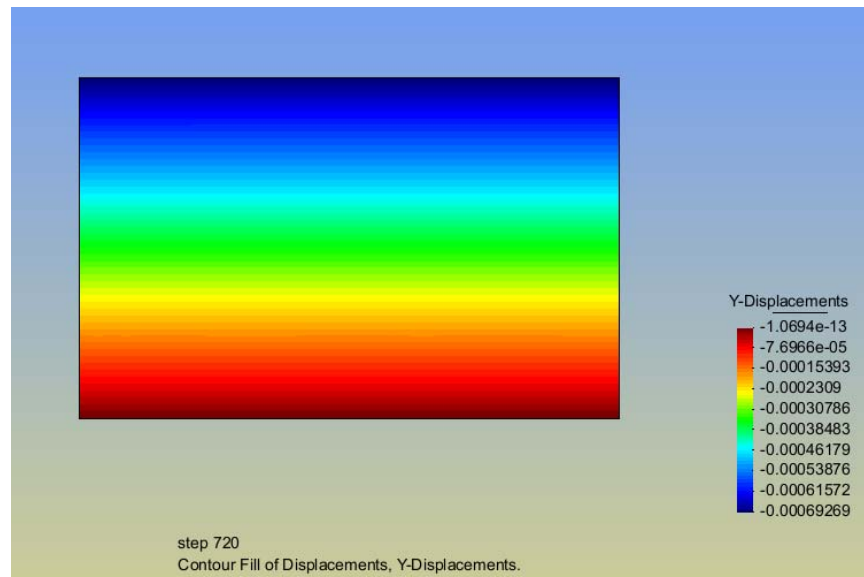
A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos. En la Figura 17 y 18 se permite ver ejemplo de la variación de los desplazamientos verticales en la sección transversal de la muestra.

Figura 17. Equilibrio de la muestra



Fuente: *Registro Propio*

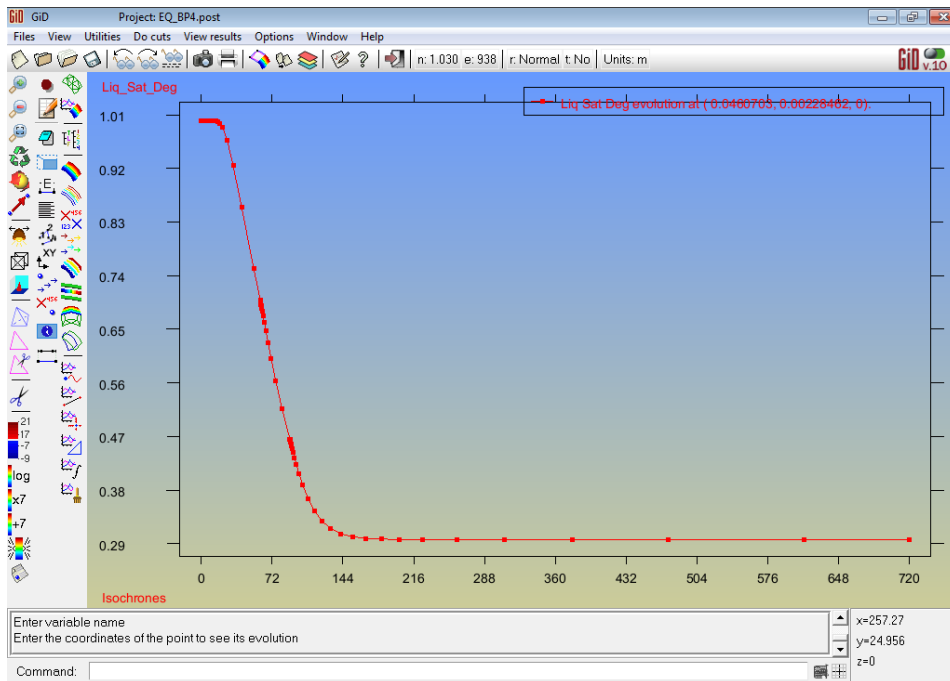
Figura 18. Desplazamiento vertical en la sección transversal de la muestra para un tiempo



Fuente: *Registro Propio*

Otro tipo de resultados se obtiene seleccionando un punto de la superficie analizada y obtener la evolución de alguna de las variables (P_w , P_g , S_r , etc) en función del tiempo. La Figura 19 presenta un ejemplo de grafica de resultados.

Figura 19. Gráfica de resultados



Fuente: Registro Propio

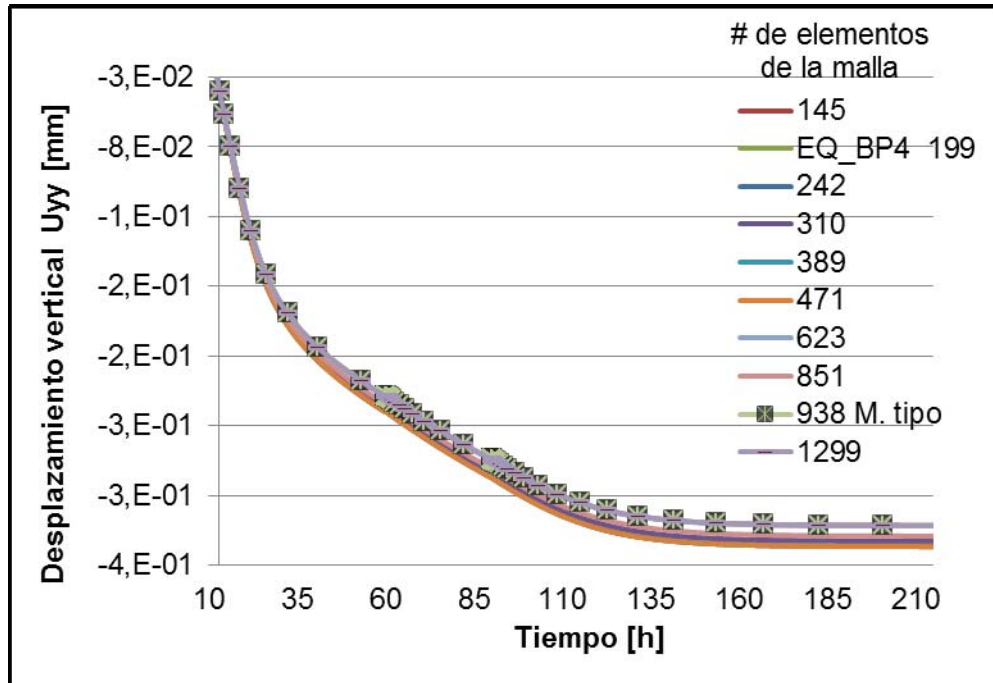
3. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES INVOLUCRADAS EN LA SIMULACION NUMERICA

Una vez obtenidos todos los resultados de las pruebas del software, se procede a realizar un análisis de sensibilidad de las variables. Se analiza la evolución de los desplazamientos verticales en la superficie de la muestra y la evolución del grado de saturación en un punto medio de la muestra.

3.1 INTERPRETACION DE RESULTADOS

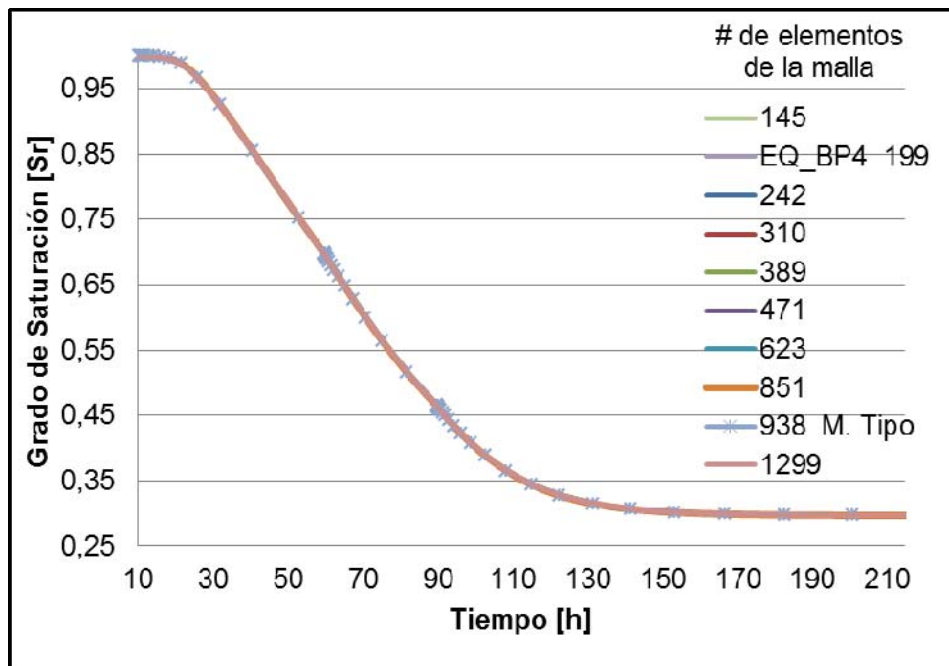
3.1.1 Influencia de La Malla. Como se puede observar en las Figuras 20 y 21, se realizaron diferentes pruebas de números de elementos de mallas. Al realizar pruebas de desplazamiento contra tiempo se producen diferentes deformaciones en el suelo arcilloso; las cuales nos condujeron a buscar una malla ideal en la cual no se produzcan variaciones de desplazamiento. En el grado de saturación del suelo los resultados indican que la malla no afecta. Nuestra malla obtenida es de 938 elementos.

Figura 20. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para diferentes mallas



Fuente: Registro Propio

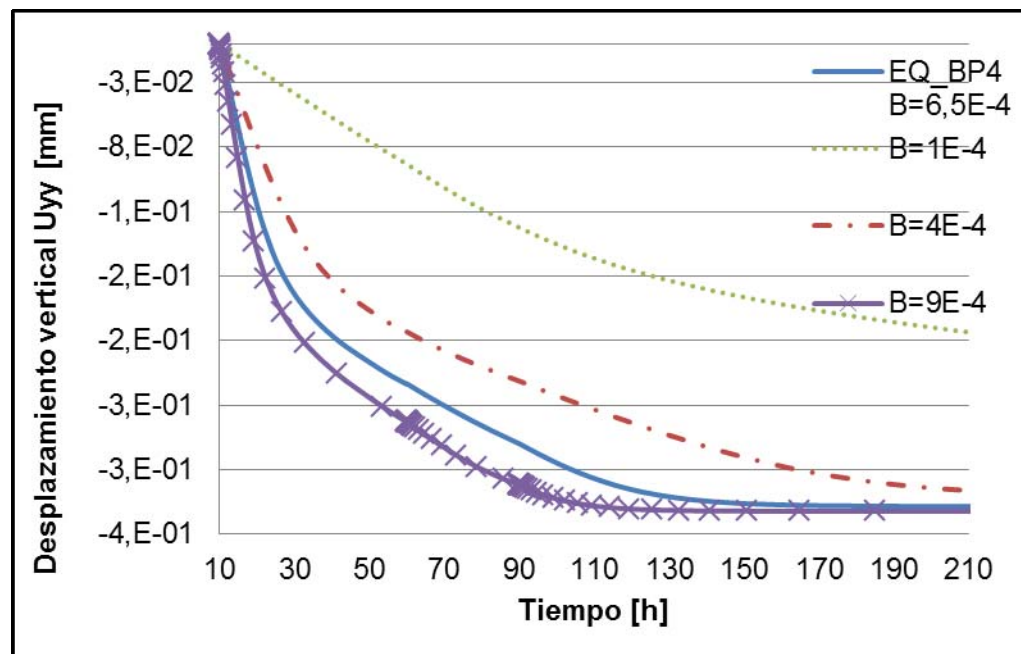
Figura 21. Influencia de la malla en el grado de saturación



Fuente: Registro Propio

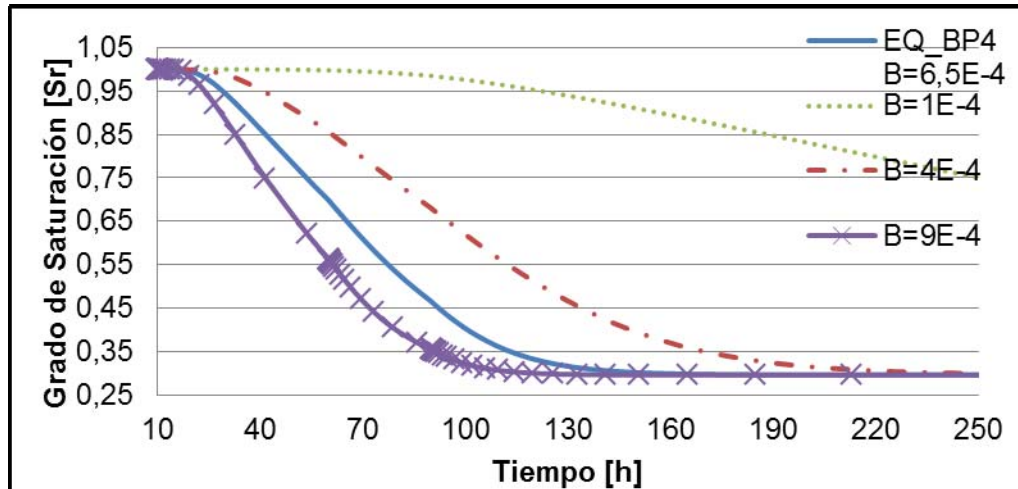
3.1.2. Influencia de parámetro β . En las Figuras 22 y 23 se observa que el parámetro β (beta para el gas o secado de la muestra) tiene una importante influencia en el secado y en la deformación de la altura de la muestra, lo cual nos indica a mayor β la muestra se deformara y se secara en un menor tiempo. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que este parámetro empírico debe calcularse cuidadosamente teniendo en como base pruebas experimentales. De manera que no se puede escoger arbitrariamente.

Figura 22. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia del parámetro β



Fuente: Registro Propio

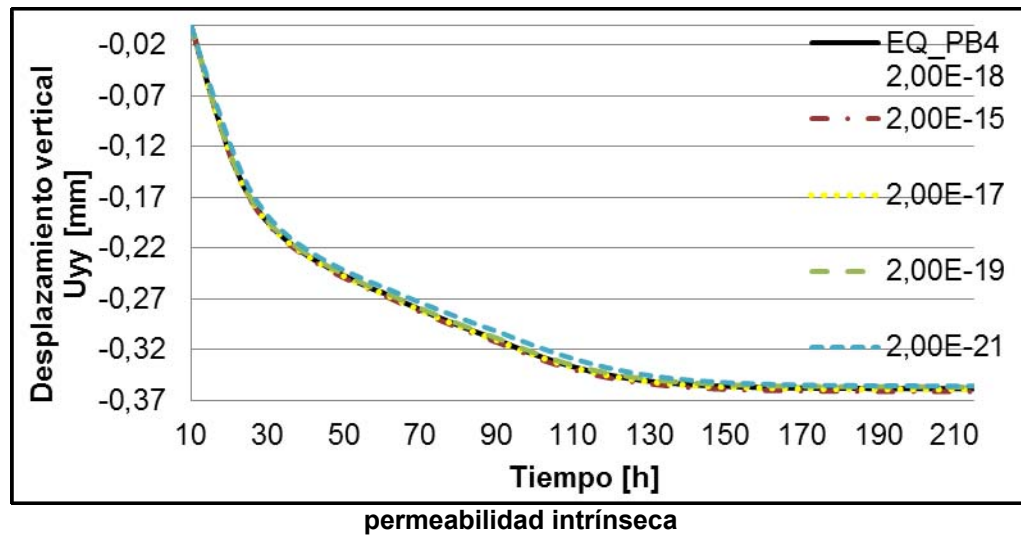
Figura 23. Influencia del parámetro β en el grado de saturación



Fuente: Registro Propio

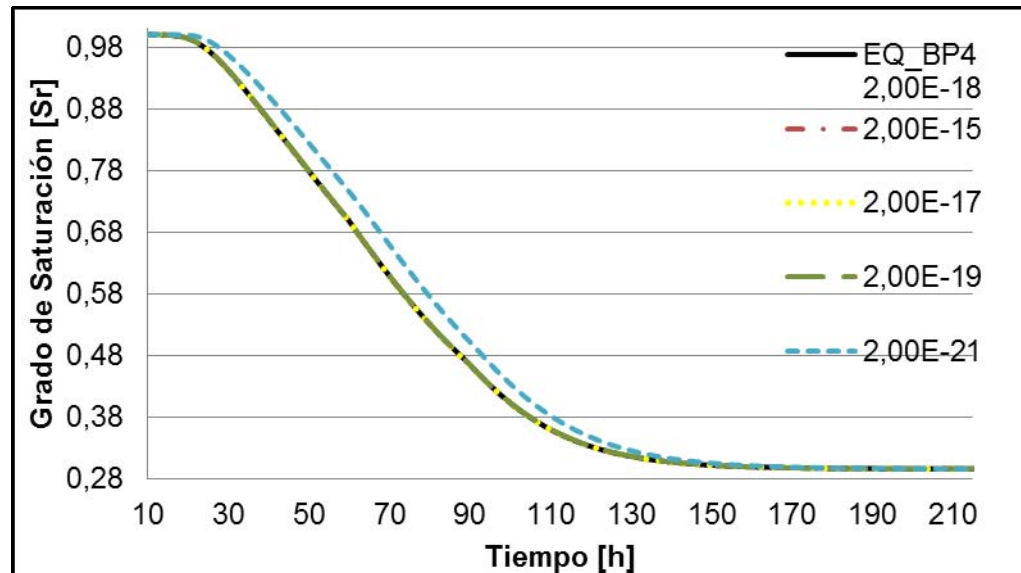
3.2.3. Influencia de la permeabilidad intrínseca. Como se puede ver en la Figura 24, dependiendo de la permeabilidad intrínseca tendremos una deformación en la arcilla a menor permeabilidad habrá menos deformación en el tiempo; y de la Figura 25 obtenemos saturación vs tiempo en donde podemos ver que la muestra se comienza a secar de forma lenta cuando la permeabilidad es demasiado pequeña.

Figura 24. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia de la



Fuente: Registro Propio

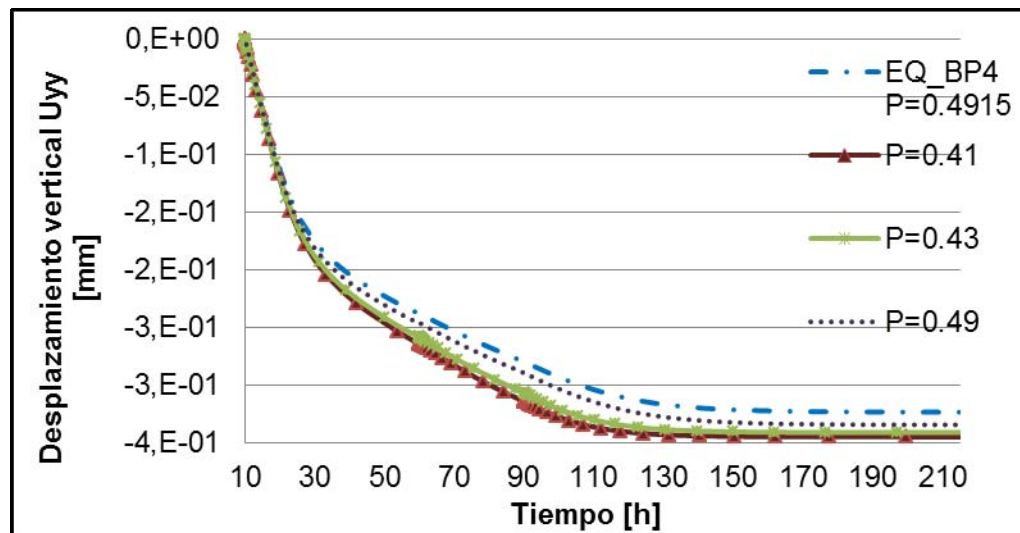
Figura 25. Influencia de la permeabilidad intrínseca en el grado de saturación



Fuente: Registro Propio

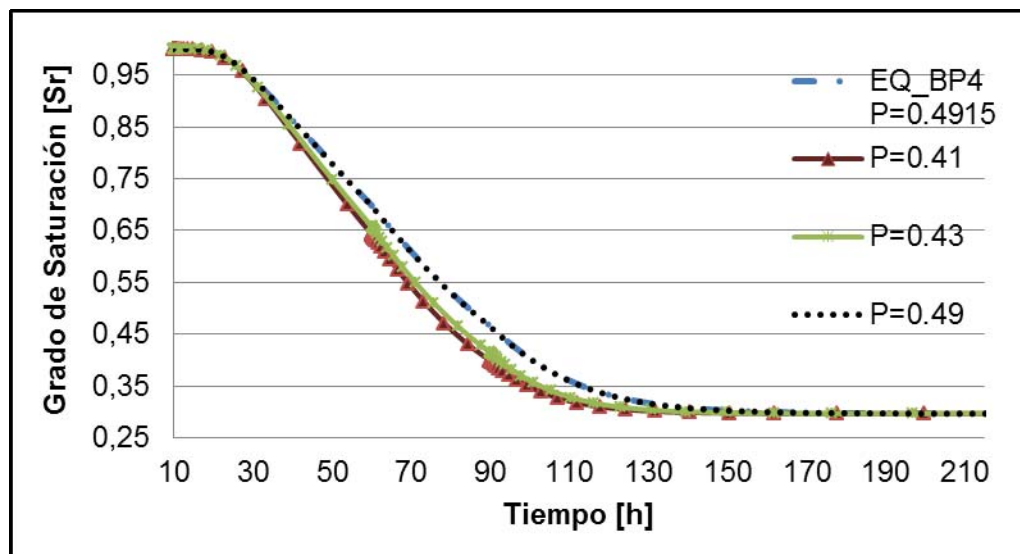
3.1.3. Influencia de la porosidad. En las Figura 26 y 27 se puede ver a simple vista a mayor porosidad se produce menor deformación de altura en el tiempo al igual que el secado de la muestra es más lenta.

Figura 26. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia de la porosidad



Fuente: Registro Propio

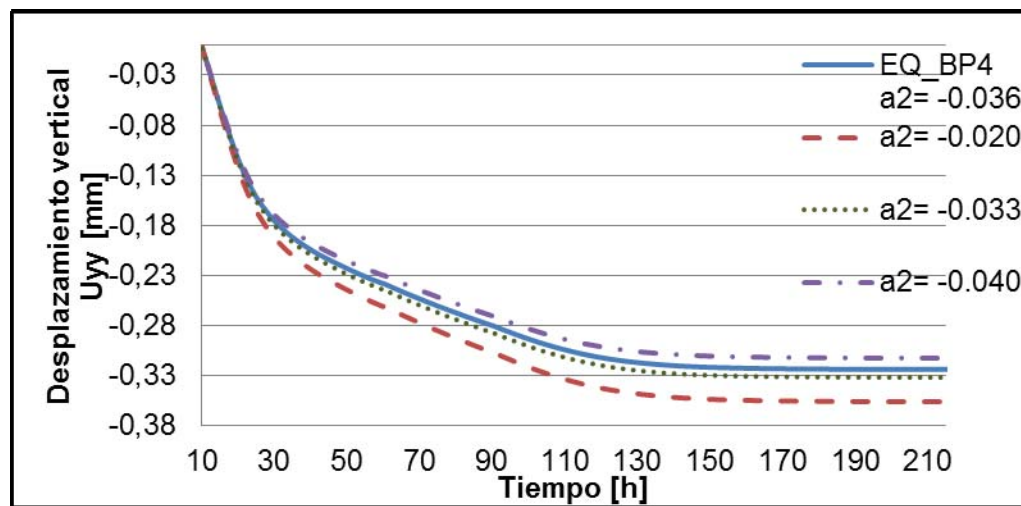
Figura 27. Influencia de la porosidad en el grado de saturación



Fuente: Registro Propio

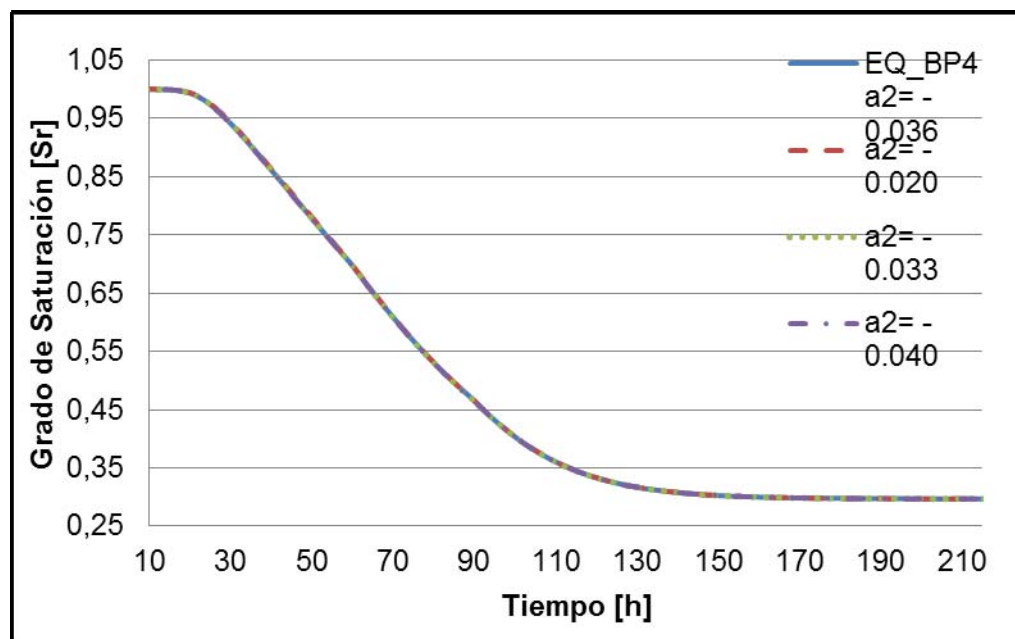
3.1.4. Influencia del módulo de deformación a_2 . La Figura 28 nos hace ver que este módulo tiene influencia en la deformación de la altura de la muestra; a diferencia de la Figura 29 nos demuestra que el módulo de deformación a_2 no tiene influencia en el grado de saturación de la muestra.

Figura 28. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo para la influencia del módulo de deformación a_2



Fuente: Registro Propio

Figura 29. Influencia del módulo de deformación a_2 en el grado de saturación



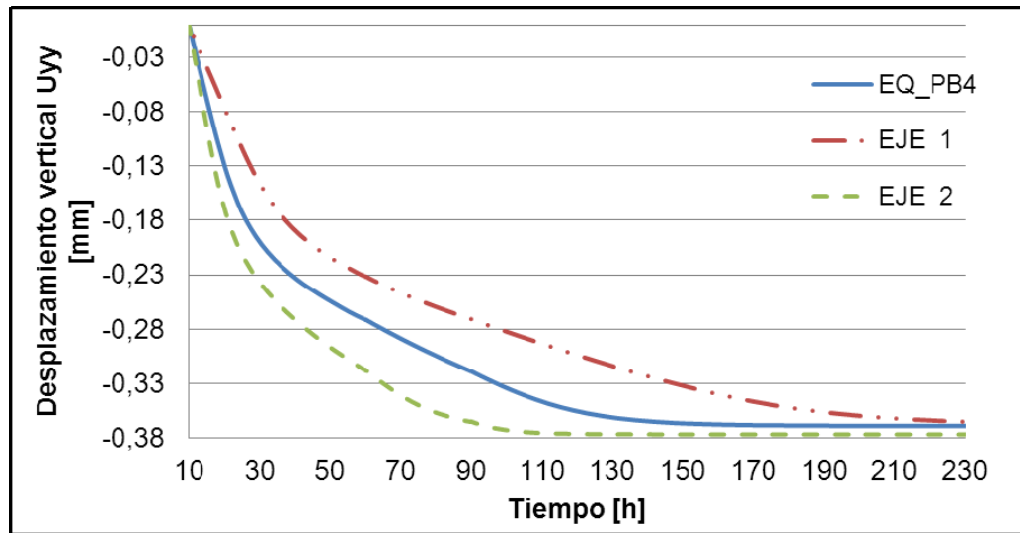
Fuente: Registro Propio

3.1.5. Ejercicios. Realizadas todas las pruebas anteriores se prosigió a realizar dos nuevos ejemplos para observar mejor el comportamiento de la muestra EQ_PB4 [Merchán 2011] que hemos observado desde el inicio ver Figura 30 y 31.

El ejemplo 1: $\beta = 4E-4$; Permeabilidad intrínseca= $2E-21$; Porosidad= 0,49 módulo de deformación $a_2 = -0.04$.

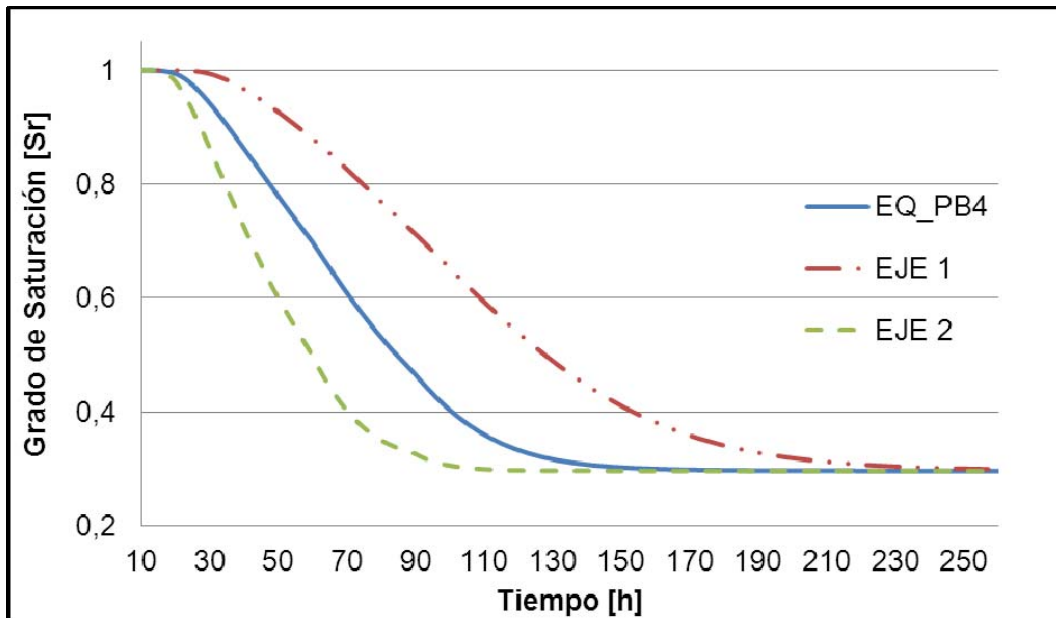
El ejemplo 2: $\beta = 9E-4$; Permeabilidad intrínseca= $2E-15$; Porosidad= 0,41 módulo de deformación $a_2 = -0.02$.

Figura 30. Evolución del desplazamiento vertical en el tiempo



Fuente: Registro Propio

Figura 31. Grado de saturación



Fuente: Registro Propio

En las Figura 30 y 31 se muestran los ejemplos realizados con datos recopilados de las primeras pruebas en las cuales mirábamos los factores por separado, en estos ejemplos miramos los parámetros en conjunto y podemos observar que el

ejemplo 1 la muestra se deforma muy poco pero su secado es muy lento, y el ejemplo 2 la muestra se seca rápidamente pero tiene una deformación en muy poco tiempo, por lo cual podemos decir que el ejemplo EQ_PB4 [Merchán 2011] se encuentra equilibrado.

4. CONCLUSIONES

- Las simulaciones numéricas permiten tener información complementaria de la evolución de distintas variables en un ensayo. De ésta forma se puede seguir de manera más adecuada la puesta en marcha de una técnica experimental.
- Según las pruebas realizadas se puede observar con claridad la influencia de diferentes variables en la muestra. Primero se concluye que existe un número de elementos para la malla de elementos finitos que no afecta los resultados en términos de desplazamientos verticales. En este caso en particular se encontró que la simulación con 938 elementos es la más adecuada para reducir la influencia del mallado en la variable mencionada.
- Del análisis de sensibilidad se concluye que el parámetro β determina la mayor variabilidad en los resultados de evolución de los desplazamientos verticales (Uyy) en el tiempo y del grado de saturación (Sr) en el tiempo. Por otra parte, la determinación de este parámetro en el laboratorio es de difícil obtención, con lo cual se sugiere que este parámetro siempre sea calibrado con ensayos de laboratorio para obtener simulaciones numéricas acordes con la realidad. Es interesante notar que este parámetro que en principio afecta la eficiencia de la transferencia de vapor en la superficie, también influya determinadamente en los desplazamientos verticales.
- Como es de esperar, la permeabilidad intrínseca tiene una influencia principalmente en la evolución del grado de saturación (Sr) en el tiempo. Sin embargo, variaciones importantes de esta variable no representan una variación importante en la respuesta del suelo, lo cual también es un resultado interesante, teniendo en cuenta que tenemos un problema de flujo. Estos

resultados sugieren que se puede trabajar con valores aproximados de permeabilidad intrínseca en este tipo de simulaciones sin incurrir en valores de error despreciables.

- En el caso del modelo de deformación del suelo por cambios de succión, se observó que dicho parámetro no influye considerablemente en la evolución del grado de saturación (S_r) en el tiempo. Por tanto, en principio no se requieren ensayos experimentales adicionales para su determinación. Por otra parte se observó la influencia directa de este parámetro en los desplazamientos verticales.
- Con este trabajo se demuestra que las simulaciones numéricas permitieron establecer la influencia de las variables asociadas al ensayo experimental. Con lo cual se sugiere el uso de este tipo de simulaciones para mejorar el entendimiento de las técnicas experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

- <http://www.gidhome.com/download/official-versions>
- G.W Wilson, D.G Fredlund, and S.L Barbour, Can. Geotech. J., 31(2); 151-161 (1994)
- Lloret, E.E. Alonso, Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering.2, 557 (1985)
- OLIVELLA, S., A. Gens, J. Carrera, E. E. Alonso, (1996), La formulación numérica para un Simulador (CODE_BRIGTH) Para el Análisis Acoplado de Salinos Medios de Comunicación, Diseñando Computaciones, Vol. 13, No 7,, pp: 87-112.
- Romero, E. (1999). PhD thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica MANUAL CODE_BRIGTH. Disponible en internet: http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/v3/Cb_v3manual_v3.zip/view
- VAUNAT, J., MERCHAN, V., ROMERO E. Y PINEDA, J., 2007 “Residual Strength of Clays at High Suctions,” 2nd Int. Conf. on Mechanics of Unsaturated Soils, Weimar, Germany, Vol. 2, pp. 151-162.
- Merchán, V, 2011, “Small Strain stiffness and Residual Strength of Unsaturated Boom Clay” , PhD Thesis, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain