



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Modelación Elastoplástica de la Curva de Retención de Agua en Suelos Parcialmente Saturados

Trabajo realizado por:

Javier Eduardo Casanova Muñoz

Dirigit per:

Jean Vaunat

Máster en:

Ingeniería del Terreno

Especialidad en:

Ingeniería Geotécnica

Barcelona, Septiembre 2018

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
de Barcelona. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

TRABAJO FINAL DE MASTER

Dedicatoria

A toda mi familia

En especial a mi hija y mi angelito...

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi familia:

A mi señora María José y mi hija Rafaela, las cuales se han convertido en la motivación y fuerza que me ayudaron a seguir adelante en todo este proceso acá en Barcelona.

A mis papás y hermano, por su apoyo constante y preocupación.

A mis abuelitas, mis suegros, cuñados, tíos y primos por el apoyo, ayuda y cariño que nos brindaron a mí, Jose y Rafa durante todo este período.

A mi tutor Jean Vaunat, por su dedicación y disposición a supervisarme y responderme dudas cuando fue necesario. Por la voluntad que tuvo de ayudarme en momentos complicados.

A mis compañeros de máster, por la amistad y compañerismo que desarrollamos durante este tiempo.

Y en general, para todos los que permitieron que esto pudiese ser posible y fueron parte de esto.

Resumen

En la actualidad es evidente la importancia de entender y predecir el comportamiento de los suelos no saturados en el estudio de las obras importantes de ingeniería civil.

La curva de retención es una de las características y propiedades más importantes de los suelos no saturados y su importancia hace que cada vez sea más notoria la necesidad de conocerla. La curva de retención también afecta a la parte mecánica a través del nivel de succión que el suelo puede sostener para un contenido dado de agua, a la vez que depende de la deformación.

Ante los constantes ciclos de secado y mojado a los que puede verse afecto un suelo, se puede apreciar el fenómeno de histéresis en la curva de retención, esto es que para una misma humedad la succión matricial sea mayor para el secado que para el mojado.

Los modelos elastoplásticos son los más apropiados para reproducir el comportamiento del suelo en procesos independientes del tiempo. En el presente trabajo se utilizó un modelo elastoplástico con endurecimiento aplicada a superficies anidadas (nested surfaces). A través de una PSD (pore size distribution) se discretizó el rango válido de succiones “asociando” cada espacio entre circunferencias a una familia de tamaño de poros.

Para obtener la curva de retención se implementó un algoritmo en el software MATLAB el cual es capaz de seguir diferentes caminos y cambios de succiones a partir de un archivo de material que contiene los diámetros y módulos de plasticidad de cada circunferencia del modelo. El algoritmo puede ser ejecutado para diferentes tipos de suelos, curvas analíticas de retención, etc.

Abstract

At present, is evident the importance of understanding and predicting the behavior of unsaturated soils in the study of civil engineering.

The retention curve is one of the most important characteristics and properties of unsaturated soils and its importance makes need to know and study it. The retention curve also affects the mechanical part through the suction level it can hold for a given water content, while also depending on the deformation.

Given the constant drying and wetting cycles to which a floor can be affected, the hysteresis phenomenon can be seen in the retention curve, that is, for the same moisture the matrix suction is greater for drying than for wetting.

The elastoplastic models are the most appropriate to reproduce the behavior of the soil in processes independent of time. At the present work it was used the nested surfaces model, a hardening elastoplastic model. Through a pore size distribution (PSD) the valid suctions range was discretized by "associating" each space between circumferences to a pore size family.

To obtain the retention curve, an algorithm was implemented in the MATLAB software, which is able to follow different paths and changes of suctions from a material file that contains the diameters (suction) and plasticity modules of each model circumference. The algorithm can be executed for different soil types, analytical retention curves, etc.

Índice General

Agradecimientos.....	v
Resumen.....	vi
Abstract.....	vii
Índice General.....	viii
Índice Tablas.....	xi
Índice de Figuras.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Descripción General	10
1.2 Antecedentes.....	11
1.3 Objetivos.....	12
1.3.1 Objetivo General.....	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.4 Metodología.....	12
1.5 Estructuración del Trabajo.....	13
2. CURVA DE RETENCIÓN	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Curva de Retención Analítica.....	19
2.3 Curva de Retención mediante PSD.....	22
2.3.1 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP).....	24
3. MODELO ELASTOPLÁSTICO.....	25

3.1	Introducción	25
3.2	Nested Surfaces o Superficies Anidadas	28
4.	ALGORITMO DE HISTÉRESIS.....	34
4.1	Introducción	34
4.2	Desarrollo del algoritmo	35
4.3	Parámetros generales adoptados	38
5.	DESEMPEÑO DEL MODELO	38
5.1	Introducción	38
5.2	Verificación del desempeño del algoritmo	39
5.3	Modelo para Arena, Limo y Arcillas	43
6.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	46
7.	BIBLIOGRAFÍA	47
	Anexo 1	48
	Anexo 2	54

Índice de Tablas

Tabla 1: Parámetros adoptados para las curva de secado	38
--	----

Índice de Figuras

Fig. 1: Succión total y los componentes para una arcilla limosa típica (Fredlund et al., 2001).....	16
Fig. 2: Regiones características de la curva de retención (Perez, 2008)	17
Fig. 3: Resultados de un ensayo isotrópico en los planos $p''-e-s-ew$ (Romero, 1999)	19
Fig. 4: Superficies circulares anidadas móviles (Mroz, 1967 y Prevost 1978)	28
Fig. 5: Superficies anidadas (Dafalias, 1980).....	29
Fig. 6: Superficies de fluencia interna y externa para un modelo de dos superficies. (Principles of hyperplasticity, Houlsby & Puzrin)	30
Fig. 7: Curvas de succión versus contenido de agua. (Hillel, 1998).	34
Fig. 8: Comportamiento elastoplástico con ley de endurecimiento.....	36
Fig. 9: Curva de secado, algunas de mojado y envolvente de mojado.	36
Fig. 10: Estado inicial del modelo “nested surfaces” considerada en el algoritmo.....	37
Fig. 11: Curvas de retención típicas para distintos tipos de suelos (Perez, 2006).....	39
Fig. 12: Comparación curva de secado del modelo y de Van Genuchten	40
Fig. 13: Curvas de secado y mojado obtenidas por el modelo.	41
Fig. 14: Secado a $S = 100000$ [kPa] y mojado para diferentes valores de S	42
Fig. 15: Secado a $S = 100000$ [kPa], mojado a $S = 100$ [kPa] y secado a $S = 100000$ [kPa]	42
Fig. 16: Histéresis secando y mojando instantáneamente el material	43

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción General

Cada día se ha hace más evidente la importancia de entender y predecir el comportamiento de los suelos no saturados en el estudio de las obras de ingeniería civil. Algunas características y propiedades importantes de conocer son la permeabilidad, resistencia al corte, la curva característica o de retención del suelo, etc.

Esta última propiedad, la relación entre la succión y el contenido de agua en equilibrio (llamada curva característica o de retención), no ha sido atendida con la importancia requerida en la mecánica del suelos no saturados, tanto en investigaciones experimentales como en modelos constitutivos. Se pensaba que la curva de retención era relevante solo al modelar el flujo y algunos fenómenos de transporte dentro de medios porosos. Esto implicó que se mostrase interés solo en el papel desempeñado por la capilaridad en la filtración, especialmente con referencia a los problemas de las presas de tierra, teniendo en cuenta su influencia en la conductividad hidráulica. Barbour (1998) ha presentado una revisión histórica de estudios sobre el tema. Sin embargo, la curva de retención es muy importante y debe considerarse complementariamente del análisis mecánico, pues aporta valiosa información sobre la distribución del tamaño del vacío de los medios porosos (Vaunat, Romero & Jommi, 2000).

Para distintos tipos de suelos la curva de retención varía notoriamente teniendo, para una humedad fija, un potencial mayor en arcillas, luego en limos y por último en arenas.

Considerando la curva de retención, para un mismo contenido en humedad, el suelo que es sometido a secado presenta un potencial matricial mayor que el que ha sido sometido a mojado, a este fenómeno se le conoce como "histéresis".

La histéresis se debe principalmente a la forma en que se produce el mojado o el secado, ya que siempre se inician en los poros mayores, lo que hace que en el comienzo del proceso se produzca una gran variación del potencial matricial. Cuando el suelo se va secando se produce un rápido ascenso y después un equilibrio correspondiente a la redistribución del agua en los poros; cuando el suelo se humedece ocurre lo contrario,

todo se inicia con una fuerte bajada del potencial matricial, de ahí la diferencia de las curvas que es máxima es su punto central.

1.2 Antecedentes

Los suelos no saturados comenzaron a estudiarse en un primer momento para validar el concepto de tensión efectiva asociada a ellos (Bishop, 1959 y Aitchinson, 1960). Posteriormente el principal foco de estudio fue la utilización de la tensión efectiva (tensión total menos presión de aire de poros) y la succión (presión de aire de poros menos presión de agua de poros) como las dos variables que definen un estado tensional (Fredlund, 1979). Además durante los años 70, comenzaron a presentarse las bases que rigen el comportamiento de los suelos no saturados (ver Wheeler & Karube 1996, para una revisión de modelos constitutivos de suelos no saturados). (Vaunat, Romero & Jommi, 2000).

Finalmente, el comportamiento del suelo no saturado ha sido investigado en términos del concepto del estado crítico, tratando de conocer su límite elástico ante un ciclo de carga y descarga. El primer modelo capaz de considerar los efectos irreversibles (elastoplasticidad) en la respuesta de los suelos no saturados fue formulado por Alonso et al. (1990). A continuación de este trabajo, Wheeler & Sivakumar (1995) y Wheeler (1996) propusieron un modelo elastoplástico mejorado, tomando en consideración las variaciones del contenido de agua. Además, se han propuesto relaciones entre la curva de retención y otras variables del material, como la resistencia al corte, la permeabilidad y la conductividad térmica (Barbour 1998).

Más recientemente, la curva de retención se ha asociado a un aspecto más fundamental de la respuesta mecánica de los suelos parcialmente saturados: la tensión efectiva. Es en efecto cada vez más reconocido que la presión de agua se debe ponderar por un coeficiente controlado por la curva de retención en el concepto de tensión efectiva válido para materiales parcialmente saturados. De esta forma, la curva de retención controla la respuesta mecánica del suelo en su conjunto y es necesario de considerarla al mismo nivel que la ley constitutiva mecánica en los modelos hidro-mecánicos acoplados (Vaunat,

Romero & Jommi, 2000). El problema está en que la inclusión de la histéresis en este marco conlleva dificultades añadidas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo general del presente Trabajo Final de Máster consiste en desarrollar y validar un modelo de curva de retención con histéresis susceptible de ser posteriormente acoplado con la respuesta mecánica del material.

1.3.2 Objetivos específicos

- Formular un modelo elastoplástico que implique histéresis en la curva de retención.
- Evaluar el desempeño del modelo elastoplástico en el software MATLAB.
- Definir una curva retención a través de una Distribución de Tamaño de Poros (PSD).
- Obtener el comportamiento de curvas de retención para una arena, limo y arcilla.

1.4 Metodología

En esta sección se describe los pasos principales que se siguieron para poder cumplir con los objetivos principales y específicos trazados inicialmente. Los procedimientos utilizados son los siguientes:

1. Se determina una curva de retención de referencia del suelo para el secado del suelo. En primer lugar se utilizó una curva de retención analítica, en el presente trabajo la utilizada fue la curva de Van Genuchten. En segundo lugar, se reconoce la relación que existe entre la curva de retención y la Distribución de Tamaño de Poros del material (PSD) como una herramienta de discretización de la RC. Las

curvas de retención se determinarán de manera característica para tres tipos de suelos: Arena, limos y arcillas.

2. Se define el modelo elastoplástico a ser utilizado para representar el comportamiento del suelo. El modelo elegido para el desarrollo de este trabajo es el denominado “Nested Surfaces” o Superficies Anidadas.
3. Se aplican los conceptos anteriores de manera de aplicar histéresis a la curva de retención mediante un algoritmo en el software MATLAB. El algoritmo lee un archivo de entrada del suelo con las características correspondientes y otro archivo que indica el camino a recorrer, mediante los cambios de succión que sufre el suelo a lo largo de su historia.
4. Comprobación del algoritmo mediante pruebas de manera de observar y comprobar que los resultados obtenidos son válidos. Obtención de ciclos de histéresis, envolventes definidas como curvas principales de secado y mojado.

1.5 Estructuración del Trabajo

Esta memoria está estructurada en 5 capítulos, el resumen de cada uno de ellos se presenta a continuación:

Capítulo 1, Introducción al tema en estudio.

Capítulo 2, Curva de Retención: Breve introducción al tema, se mencionan conceptos importantes a tener en cuenta y se desarrolla por qué las variables del plano e_w -s son las más adecuadas para representar la curva de retención. Se presentan algunas curvas analíticas de tensión, siendo la usada en este trabajo la de Van Genuchten (1980). Se hace mención a la PSD como herramienta de discretización de la curva de retención.

Capítulo 3, Modelo Elastoplástico: Breve introducción a los modelos elastoplásticos y el por qué son los más adecuados para este tipo de problemas. Se desarrollan las ecuaciones utilizadas para encontrar los módulos elásticos y que son la base de todos los cálculos implementados más adelante. Se expone el modelo elastoplástico utilizado en el algoritmo, Nested Surfaces o Superficies Anidadas, dando una breve explicación de sus conceptos más importantes.

Capítulo 4, Algoritmo de Histéresis: Breve introducción al concepto de histéresis en la curva de retención. Se explica cómo fue desarrollado el algoritmo, el modelo elastoplástico utilizado y los parámetros generales adoptados para el cálculo.

Capítulo 5, Desempeño del Modelo: Se hace un pequeño análisis de resultados con algunos valores que se obtuvieron para verificar y comparar los resultados obtenidos por el modelo implementado en el algoritmo.

Capítulo 6: Conclusiones finales del trabajo y futuras líneas de investigación.

Referencias y Anexo.

2. CURVA DE RETENCIÓN

2.1 Introducción

Se define como curva de retención de la humedad del suelo (RC: Retention Curve) a la relación entre el contenido de humedad y su potencial matricial, la cual refleja la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión aplicada. En general la curva de retención se expresa a través de la gráfica entre el grado de saturación o contenido de agua y la succión. Esta relación depende principalmente de los factores relacionados con la porosidad del suelo.

Barbour (1998), Romero (1999) y Vanapalli et al. (1999) señalaron que generalmente son dos los mecanismos principales que rigen el almacenamiento de agua dentro de un suelo. El primer mecanismo se relaciona principalmente con el flujo de agua libre dentro de los macroporos y el segundo está relacionado con la adsorción de agua a nivel microporos. El primero se combina con la respuesta mecánica del suelo, mientras que el segundo mecanismo es prácticamente independiente de la estructura macroscópica. Por otra parte, la curva de retención expresa, indirectamente, la distribución de los diámetros de los poros en un suelo, ya que la retención capilar depende del tamaño de éstos.

El agua en el suelo está retenida por distintas fuerzas que determinan su potencial hídrico. Este potencial hídrico, en un suelo no saturado, se compone de:

- **Potencial Matricial:** Retención de agua por capilaridad. Debido a que los poros del suelo retienen el agua impidiendo su drenaje, el potencial matricial es negativo. El rango de potenciales matriciales en el que se determina la curva de retención va desde 1 [kPa] (grado de saturación de 100%) hasta aproximadamente 10^6 [kPa] (suelo seco en horno).
- **Potencial Osmótico:** Retención por los iones en solución.
- **Potencial gravitacional:** Ejercido por la fuerza de la gravedad.

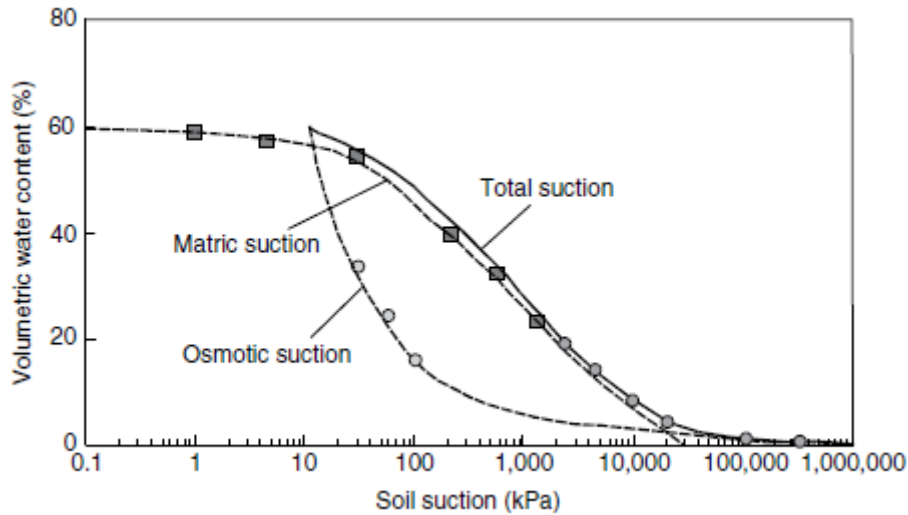


Fig. 1: Succión total y los componentes para una arcilla limosa típica (Fredlund et al., 2001).

La curva se determina equilibrando una muestra de suelo saturado con una serie de potenciales matriciales conocido y midiendo el contenido de agua retenida en cada uno de ellos. Se recomienda verificar que no existan escapes de aire por las tapas o alguna conexión, principalmente, cuando la presión señalada en los manómetros no se mantenga por espacio de 5 o 10 minutos. Es posible obtener la equivalencia entre el potencial matricial y el diámetro equivalente de los poros, lo que convierte a la curva característica de humedad en una estimación de la distribución acumulada del volumen de porosidad en función del tamaño de los poros.

La curva de retención se puede descomponer principalmente en tres distintas zonas: la capilar, la de desaturación y la residual. La zona capilar es aquella en la cual el suelo se mantiene en un estado de saturación, y termina en el valor de entrada de aire (Fredlund, 1999), el cual está definido como el valor que debe de exceder la succión matricial, antes de que el aire empiece a entrar en los macroporos del suelo (Fig. 2). En la zona de desaturación, el agua es desplazada por aire; por tanto, la fuerza con la que el agua se encuentra adherida a las partículas del suelo se incrementa a medida que el suelo pierde más agua. Al finalizar esta zona, el agua se encuentra en un estado discontinuo y el coeficiente de permeabilidad se reduce en forma importante (Fig. 2). Para la zona residual, un incremento de succión no produce un cambio importante en el contenido de agua, la cual es tan escasa que no fluye entre los poros y la remoción puede ser sólo por

evaporación (Hosagasi, 2006). En esta región en donde las succiones son muy altas, el agua está adsorbida a las partículas (Fig. 2).

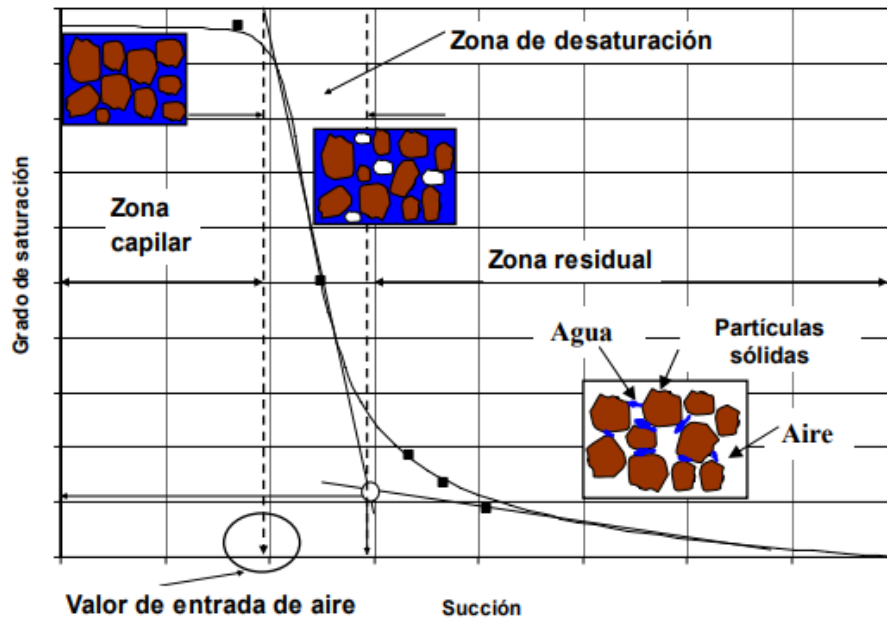


Fig. 2: Regiones características de la curva de retención (Perez, 2008)

Como se dijo en el capítulo introductorio, en un suelo no saturado, las tensiones totales σ_{ij} , la presión de la fase gaseosa p_a y la presión de la fase líquida p_w generalmente definen el estado de tensión, sin embargo, los resultados experimentales de pruebas de tipo nulo (null-type test) han dado evidencia, cada vez mayor, de que cualquier par de combinaciones entre σ_{ij} , p_a y p_w puede ser adoptado para describir el comportamiento del suelo, por conveniencia experimental, la tensión neta $\sigma''_{ij} = \sigma_{ij} - p_a \delta_{ij}$ y la succión $s = p_a - p_w$ son los usualmente adoptados. Edgar (1993), Wheeler & Sivakumar (1996), Houlsby (1997) y Dangla et al. (1997) convergen a la misma afirmación sobre las variables trabajo conjugadas a las tensiones netas y la succión.

Despreciando las contribuciones del flujo de fluidos y la compresibilidad del aire, Houlsby (1997) expresa la tasa de trabajo de entrada por unidad de volumen \dot{W} como:

$$\dot{W} = \sigma''_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} + s \dot{\epsilon}_w$$

Se usa la convención de mecánica de suelos, donde $\dot{\epsilon}_{ij}$ es el tensor de deformación habitual y $\dot{\epsilon}_w$ es un componente de deformación generalizado asociado a la succión,

denominado deformación hidráulica. $\dot{\epsilon}_w$ es igual a $\frac{-\dot{e}_w}{1+e_0}$, donde e_0 es el índice de vacío de la configuración de referencia y e_w es la relación de agua (volumen de agua dividido por volumen sólido). Con esta definición, $\dot{\epsilon}_w$ es igual y opuesto al incremento del contenido volumétrico de agua referido a la configuración de referencia.

En condiciones isotrópicas, la ecuación de la tasa de trabajo de entrada por unidad de volumen se convierte en:

$$\dot{W} = p'' \dot{\epsilon}_v + s \dot{\epsilon}_w$$

Donde p'' es la tensión media neta, $\dot{\epsilon}_v = -\dot{e} / (1 + e_0)$ es la deformación volumétrica y \dot{e} es el incremento de la índice de vacío.

Los cambios acoplados en la tensión media neta, la succión, la deformación volumétrica y el contenido volumétrico de agua están totalmente descritos por una curva en el espacio $p''-e-s-e_w$. La proyección de esta curva en los cuatro planos $p''-e$, $p''-s$, e_w-s y e_w-e da una representación completa de la respuesta hidromecánica del suelo.

Los planos $e-p''$ y $p''-s$ se usan típicamente para describir la respuesta mecánica del suelo no saturado bajo estrés isotrópico y cambios de succión.

El plano e_w-s se adopta para representar la curva de retención, por lo cual se puede denominar “plano hidráulico”. En este plano, la curva de retención termina en el índice de vacío inicial para una succión nula.

Esta representación pone en evidencia el acoplamiento completo que existe entre la curva de retención y el comportamiento mecánico. La curva de retención afecta a la parte mecánica a través del nivel de succión que el suelo puede sostener para un contenido dado de agua a la vez que depende de la deformación.

Por otro lado, la simetría que existe entre el plano de compresión y de retención en agua sugiere que marcos de modelación similares se pueden aplicar a ambas partes, particularmente la elastoplasticidad. Para eso, se requiere definir una ecuación que represente la curva de retención como una línea de estado. Expresiones analíticas disponibles en la literatura se pueden considerar para este propósito.

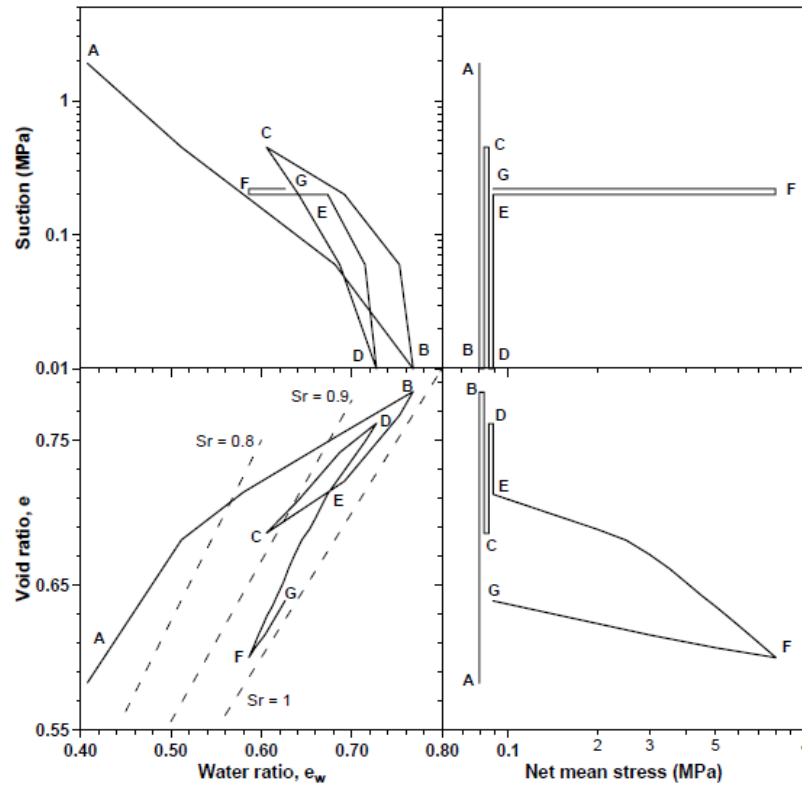


Fig. 3: Resultados de un ensayo isotrópico en los planos $p'' - e - s - e_w$ (Romero, 1999)

2.2 Curva de Retención Analítica

Existen muchas expresiones analíticas para describir la curva de retención. Se nombran algunas de las más relevantes y/o utilizadas en algún momento del desarrollo de este trabajo.

Ecuación de Van Genuchten (1980)

Es una ecuación empírica que define una función continua con dos parámetros de ajuste. La curva de retención de Van Genuchten está definida por la siguiente fórmula:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{1/1-\lambda} \right)^{-\lambda} \quad P = P_0 \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

Donde:

S_e : Grado de saturación efectivo.

S_l : Grado de saturación.

S_{sl} : Grado de saturación máximo.

S_{rl} : Grado de saturación residual.

P_g : Presión de gas.

P_l : Presión de agua.

λ : Factor de forma de la curva de retención.

P_0 : Presión medida a cierta temperatura [MPa].

σ_0 : Tensión de superficie a la temperatura a la cual fue medida P_0 (usualmente $\sigma_0 = 0.072 \left[\frac{N}{m} \right]$ a $20^\circ C$).

Ecuación de Van Genuchten Modificada (FEBEX Model)

Es similar a la primera curva de retención presentada, con la particularidad que se le agrega un factor de modificación el cual se muestra a continuación:

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

Donde los parámetros son similares a los de la curva de Van Genuchten normal y

$$f_d = \left(1 - \frac{P_g - P_l}{P_d} \right)^{\lambda_d}$$

Donde P_d es la presión relacionada con la succión al 0% de grado de saturación y λ_d es un parámetro del modelo.

Brooks & Corey (1966)

Uno de los modelos más antiguos, pero más utilizados. Este modelo es una función potencia que incluye un índice de distribución de tamaño de poros:

$$S_e = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \quad \text{para } \psi \geq \psi_b$$

Donde

S_e : Grado de saturación efectivo.

ψ_b : Intersección de la línea recta en donde $S_e = 0$.

λ : Índice de distribución de tamaño de poros.

Fredlund & Xing (1994)

El modelo fue desarrollado con base en la distribución del tamaño de poro, matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$\theta_w = c(\psi) * \frac{\theta_s}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]^m}$$

Donde

θ_s : Contenido de agua volumétrico, con un suelo saturado.

Ψ : Succión del suelo en [kPa].

a: Parámetro del suelo relacionado con el valor de entrada de aire del suelo en [kPa].

n: Controla la pendiente de la curva de retención.

m: Parámetro que se determina del contenido de agua en condiciones saturadas y del punto de inflexión de la curva.

$c(\psi)$: Factor de corrección donde la succión es igual a 10^6 [kPa] o contenido de agua igual a cero. Se expresa como:

$$c(\psi) = \left[1 - \frac{\ln \left[1 + \left(\frac{\psi}{\psi_r} \right) \right]}{\ln \left[1 + \left(\frac{10^6}{\psi_r} \right) \right]} \right]$$

Donde

ψ_r : Parámetro relacionado con la succión residual.

2.3 Curva de Retención mediante PSD

La distribución del tamaño de poro (PSD) se puede definir como la abundancia relativa de cada tamaño de poro en un volumen representativo de suelo. Ésta se puede representar con una función $f(r)$, que tiene un valor proporcional al volumen combinado de todos los poros cuyo radio efectivo está dentro de un rango infinitesimal centrado en r . Al igual que la porosidad, se puede considerar que $f(r)$ comprende componentes texturales y estructurales.

La PSD se puede usar para obtener la relación entre la succión y el grado de saturación o contenido de agua con una relación de vacío constante. La RC obtenida mediante una PSD es válida en el rango donde la capilaridad es el mecanismo físico predominante (Romero E, Simms PH, 2008).

La relación de agua $e_w = V_w/V_s = S_r * e$ se estima mediante las siguientes ecuaciones:

$$e_{nw} + e_w = e; e_w = e - e_{nw} = (1 - S_{rnw}) * e$$

Donde e_{nw} es la proporción no humectante (mercurio) y S_r y S_{rnw} el grado de saturación de agua y fluido no humectante, respectivamente ($S_r + S_{rnw} = 1$ para una mezcla de dos fluidos).

A medida que la relación de vacíos disminuye, el valor de entrada de aire aumenta, y las curvas son más pronunciadas.

Se debe tener en cuenta la heterogeneidad del sistema de poros inducido por el proceso de compactación utilizando un modelo de retención multimodal, definido por Durner (1994) como una superposición lineal de subclases del tipo van Genuchten con la siguiente ecuación:

$$E_w = \frac{e_w - e_{wres}}{e - e_{wres}} = \sum_{i=1}^k w_i * \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i * s)^{n_i}} \right]^{m_i}$$

Sustituyendo $\alpha_i = m_i^{1-m_i} / s_{pi}$ en la ecuación anterior, el mecanismo de almacenamiento de agua en un medio poroso heterogéneo se convierte en:

$$E_w = \frac{e_w - e_{wres}}{e - e_{wres}} = \sum_{i=1}^k w_i * \left[1 + m_i * \left(\frac{s}{s_{pi}} \right)^{1/1-m_i} \right]^{-m_i}$$

Esta ecuación se utiliza para modelar los datos de la RC. Los datos experimentales se modelan con un modelo de retención de agua bimodal. La función de densidad capilar de poros (PCF) se define como:

$$PCF = \Delta E_w / \Delta \log(s)$$

Donde E_w es el grado efectivo de saturación como se define en la ecuación del mecanismo de almacenamiento de agua en un medio poroso heterogéneo.

La forma del PSD está esencialmente controlada por el contenido de agua de compactación. Con bajos contenidos de agua, la microporosidad disminuye y el PSD tiende a una distribución casi monomodal para la compactación más seca. A mayores contenidos de agua, se crean más y más agregados por el proceso de compactación. Para muestras húmedas, los agregados forman un esqueleto protector alrededor de las partículas de arena / limo (confirmado por micrografías ESEM), y el PSD recupera una distribución monomodal. Cuando se compacta con solución salina, el material presenta

una doble porosidad más pronunciada, como resultado de la contracción del agregado (Casini, Vaunat, Romero & Desideri, 2012).

En el presente trabajo se utilizó la pore size distribution (PSD) como una herramienta de discretización de la curva de retención asumiendo que cada succión representada por una circunferencia (como se explicará más adelante), representa una familia de tamaño de poro.

2.3.1 Mercury Intrusion Porosimetry (MIP)

Una manera de encontrar una distribución del tamaño de poros de una muestra de suelo y por ende la curva de retención, es a través de la técnica denominada Mercury Intrusion Porosimetry (MIP). La porosimetría se usa a menudo para conocer los tamaños de poros, volumen, distribución, densidad y otras características relacionadas con la porosidad de un material. Es importante notar que la porosidad es especialmente importante para conocer la formación, la estructura y el uso potencial de muchos materiales.

En estos casos es el mercurio el material idóneo para realizar la porosimetría, pues no moja la mayoría de las sustancias y tampoco penetra espontáneamente en los poros por acción capilar, por lo que es necesario forzar su entrada hacia los poros mediante la aplicación de presión externa. La presión equilibrada requerida es inversamente proporcional al tamaño de los poros. Solo se requiere una ligera presión para introducir mercurio en macroporos grandes, mientras que se requieren presiones mucho mayores para forzar al mercurio a poros pequeños.

El análisis de porosimetría de mercurio es la intrusión progresiva de mercurio en una estructura porosa bajo presiones estrictamente controladas. Claramente, cuanto más precisas sean las mediciones de presión, más precisos serán los datos de tamaño de poro resultantes.

3. MODELO ELASTOPLÁSTICO

3.1 Introducción

El suelo es un material en el que se observan deformaciones irreversibles, fenómenos de fluencia y dilatación inducida por tensiones de corte, por lo que para describir su comportamiento es necesario aplicar la teoría de la plasticidad. El estudio de la teoría de la plasticidad comenzó en los trabajos de Coulomb (1776) y Rankine (1857) para analizar las presiones de tierra. Una perspectiva general de la evolución de los métodos elastoplásticos puede encontrarse en Gens y Potts (1987) mencionado por Yuk (1994).

Un modelo elástico, la respuesta es reversible y no depende de la trayectoria seguida, por el contrario las deformaciones plásticas son irreversibles y sí dependen de la trayectoria seguida. Es por esto que los modelos elastoplásticos son los más apropiados para reproducir el comportamiento del suelo en procesos independientes del tiempo.

Un modelo elastoplástico queda definido mediante cuatro fórmulas, la primera es un criterio límite de discontinuidad, la segunda la aplicación del principio de actividad de deformaciones elásticas y plásticas, la tercera la definición de una regla de flujo generalizada y finalmente el planteamiento de las reglas de rigidización. Drucker y Prager (1952) y Ducker (1953) presentaron las primeras formulaciones plásticas para representar el comportamiento del suelo. Los primeros modelos de estado crítico fueron desarrollados en la Universidad de Cambridge por Roscoe et al. (1958). Estos modelos permitieron reproducir los rasgos más característicos del comportamiento de los suelos desde el punto de vista cualitativo y también sirvieron de base para la obtención de modelos más completos, capaces de predecir el comportamiento de los suelos.

El modelo desarrollado por Alonso et al (1990) fue el primero en considerar elastoplasticidad en los modelos de suelos no saturados. Este modelo constitutivo describe el comportamiento de tensión y deformación de los suelos parcialmente saturados. El modelo está formulado en el marco de la plasticidad de endurecimiento utilizando dos conjuntos de variables de tensión independientes: el exceso de tensión total sobre la presión del aire (tensión neta) y la succión. Este modelo fue capaz de representar, de manera consistente y unificada, muchas de las características fundamentales del comportamiento de los suelos parcialmente saturados que habían sido tratados por

separado por los modelos propuestos previamente. Al alcanzar la saturación, el modelo se convierte en un modelo de estado crítico convencional.

El modelo elastoplástico se desarrollará en una dimensión y bajo las variables de un problema mecánico, luego se desarrollará haciendo una analogía para las variables hidráulicas. Para el comportamiento mecánico en el tramo elástico se puede definir:

$$d\sigma = E * (d\varepsilon - d\varepsilon^P)$$

Para que se esté en el tramo elástico se debe cumplir con la condición:

$$F = \sigma - \sigma_L \leq 0$$

Siendo la condición límite:

$$\sigma = \sigma_L$$

Donde la tensión plástica se define como:

$$\sigma_L = H * d\varepsilon^P$$

Siendo H el módulo plástico. Por ende reemplazando en la condición límite se tiene:

$$E * (d\varepsilon - d\varepsilon^P) = H * d\varepsilon^P$$

Y por lo tanto:

$$d\varepsilon^P = \frac{E}{E + H} d\varepsilon$$

Finalmente, reemplazando en la ecuación del tramo elástico:

$$d\sigma = \frac{EH}{E + H} d\varepsilon$$

Por lo explicado anteriormente, las mejores variables para desarrollar el modelo elastoplástico son la succión (s) y la deformación volumétrica hidráulica (ε_w). Por tanto para el tramo elástico se tiene:

$$d\sigma = K_w * (d\varepsilon_w - d\varepsilon_w^p) = ds$$

La condición que se debe cumplir es:

$$F_n = (s - s_{on})^2 - r_n^2 \leq 0$$

Donde n es el circunferencia del modelo elastoplástico. El caso límite es:

$$(s - s_{on})^2 = r_n^2$$

Por lo tanto se tiene:

$$\begin{aligned} s - s_{on} &= r_n \\ s - s_{on} &= -r_n \end{aligned}$$

Considerando análogamente al comportamiento mecánico:

$$d\sigma = ds = s - s_{on} = K_w * (d\varepsilon_w - d\varepsilon_w^p)$$

$$r_n = H_n * d\varepsilon_w^p$$

Y por lo tanto:

$$d\varepsilon_{wn} = \frac{K_w + H_n}{K_w * H_n} ds$$

Como se dijo anteriormente se puede definir a la derivada de la deformación hidráulica como:

$$d\varepsilon_w = \frac{-1}{1 + e_0} de_w$$

Donde

e_w : Relación de agua (volumen de agua dividido por volumen sólido).

e_0 : Índice de vacío inicial.

Integrando esta expresión se obtiene:

$$e_w - e_{w_0} = -(1 + e_0) * (\varepsilon_w - \varepsilon_{w_0})$$

Donde las condiciones iniciales son:

$$e_{w_0} = e_0; \quad \varepsilon_{w_0} = 0$$

3.2 Nested Surfaces o Superficies Anidadas

Mroz (1967) y Prevost (1978) propusieron usar superficies anidadas (nested surfaces) móviles las cuales permiten simular leyes complicadas dentro de la elastoplasticidad, pero que como desventaja tenían un límite por la gran demanda de recursos que utilizaban Fig 4.

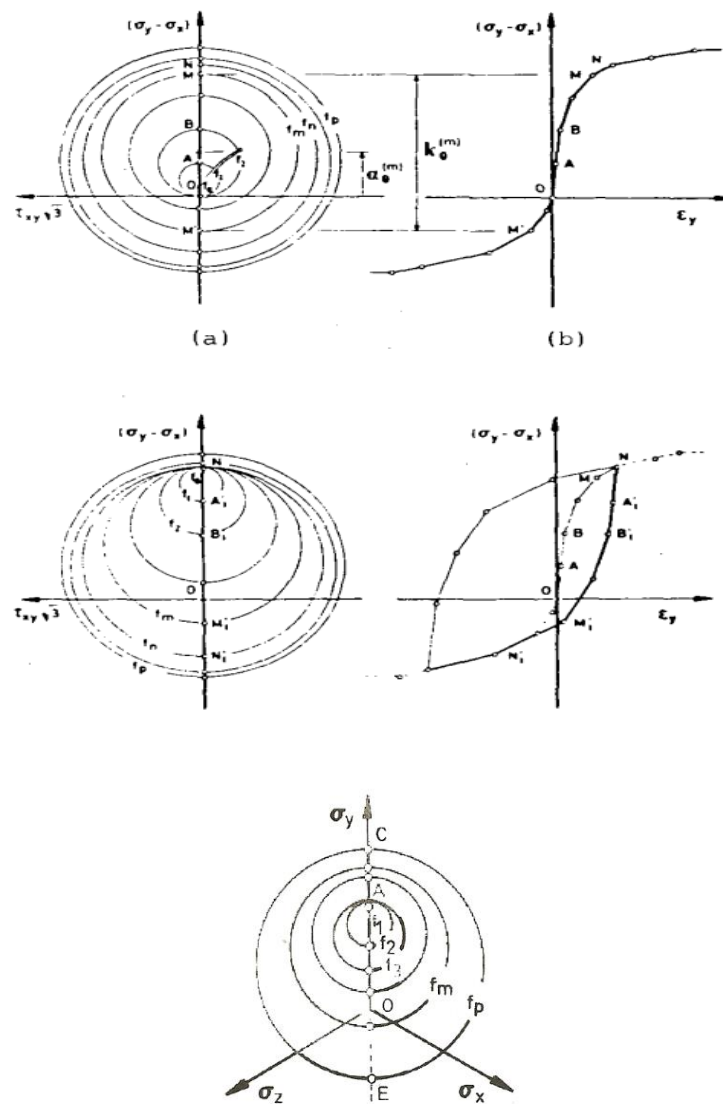


Fig. 4: Superficies circulares anidadas móviles (Mroz, 1967 y Prevost 1978)

Dafalias (1980), igualmente propuso utilizar solo dos superficies, pero entre las cuales se interpola el valor de H.

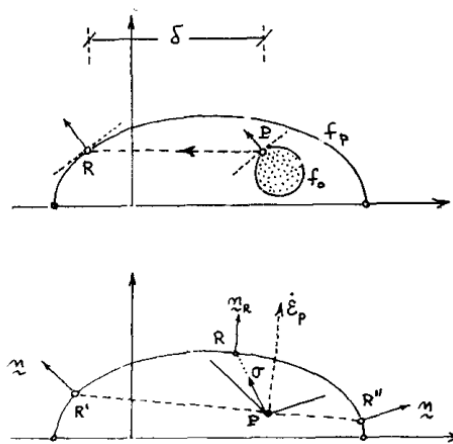


Fig. 5: Superficies anidadas (Dafalias, 1980)

Últimamente los modelos de plasticidad que emplean superficies de fluencia anidadas se han vuelto comunes, particularmente en la modelación del comportamiento de suelos. Aunque algunos modelos emplean muchas superficies de fluencia, para ilustrar los principales principios es suficiente utilizar solo dos superficies. Tal modelo fue descrito, por ejemplo, por Mroz et al. (1979) para los suelos y a continuación se expone brevemente de acuerdo a lo explicado en el capítulo 6.3 del libro “Principles of hyperplasticity”, Houlsby & Puzrin.

En primer lugar se tiene una superficie de fluencia exterior (Fig. 6):

$$F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{(p)}) = 0$$

La cual en su interior contiene una superficie de fluencia interna más pequeña que puede trasladarse, expandirse o contraerse y que está definida por:

$$f(\sigma_{ij} - \rho_{ij}, \varepsilon_{ij}^{(p)}) = 0$$

Donde ρ_{ij} define la posición de la superficie de fluencia interna y puede interpretarse como las coordenadas de tensión de su "centro". Debe especificarse la regla de traslación para la superficie de fluencia interna, así como su dependencia de la deformación plástica. La regla se construye de modo tal que, a medida que la superficie interna se mueve, se ve

obligada a permanecer completamente dentro de la superficie exterior: de ahí el nombre de "superficie anidada". Además, las dos superficies solo pueden tocarse en el punto de tensión actual cuando alcanza la superficie exterior.

Además, se asume que se aplica la regla de flujo asociada y que ambas superficies tienen la misma forma. Estas dos suposiciones no son esenciales, pero simplifican el desarrollo.

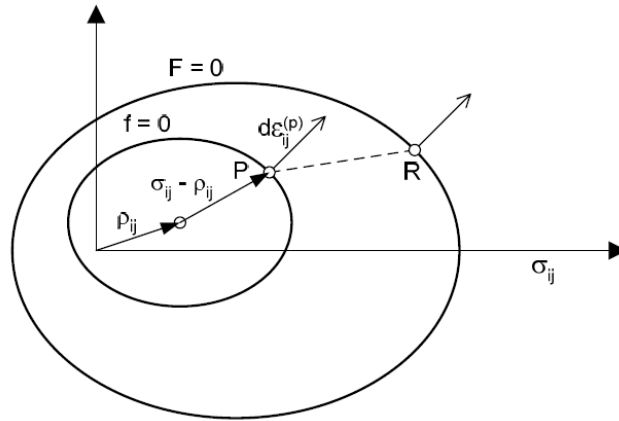


Fig. 6: Superficies de fluencia interna y externa para un modelo de dos superficies.
(Principles of hyperplasticity, Houlsby & Puzrin)

Se supone que si el estado de tensión está dentro de la superficie de fluencia interna, o si está sobre la superficie de fluencia y el multiplicador de plástico λ sería negativo, el comportamiento es elástico y se rige por las ecuaciones elásticas. Si el estado de tensión está sobre la superficie de fluencia interna y el multiplicador de plástico λ es positivo, el comportamiento es elastoplástico, y los componentes plásticos del vector de deformación incremental se definen a partir de las ecuaciones:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(p)} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{1}{h} * \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} * \frac{\partial f}{\partial \sigma_{kl}} * \dot{\sigma}_{kl}$$

Que satisfacen la regla de flujo asociada para la superficie f . h es el módulo de endurecimiento del plástico.

El dominio encerrado por la superficie de fluencia externa $F(\sigma_{ij}, \epsilon_{ij}^{(p)}) = 0$ en esta formulación es, tal como para el modelo de superficie límite, no elástico y para

trayectorias de tensión dentro de esta superficie, el flujo plástico ocurre una vez $f = 0$ y $\lambda > 0$. En el caso del endurecimiento cinemático, la condición de consistencia:

$$\dot{f}(\sigma_{ij} - \rho_{ij}, \varepsilon_{ij}^{(p)}) = 0$$

No es suficiente para definir el módulo de endurecimiento "h" porque contiene las variables adicionales ρ_{ij} desconocidas. Este problema generalmente se trata de la siguiente manera.

Primero, nuevamente es necesario definir un punto de imagen (R) en la superficie externa, correspondiente a cualquier punto de tensión en el interior. El punto de imagen R (Fig. 6) se define simplemente como el punto en la superficie exterior en el cual la dirección de la normal es la misma que la de la superficie normal a la interna, por ejemplo $\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}^R} = \alpha \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$, donde α es un escalar positivo.

A continuación, se asume que la dirección del movimiento del "centro" de la superficie interna se define mediante una regla que garantiza que las superficies permanezcan anidadas correctamente. Se puede demostrar que esto se puede lograr especificando que el movimiento relativo del punto P con respecto a su punto conjugado R tiene que ocurrir en la dirección de PR:

$$\dot{\sigma}_{ij} - \dot{\sigma}_{ij}^R = \mu(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^R)$$

Donde μ es un escalar positivo. El valor de μ está determinado por la forma de la regla de endurecimiento.

Se puede elegir un módulo de endurecimiento fijo para la superficie interna, en cuyo caso hay un cambio repentino de rigidez cuando se alcanza la superficie externa o (como en el modelo de superficie límite) el módulo de endurecimiento para la superficie interna se puede ajustar como una función de la distancia desde la superficie exterior, de modo que se logre una transición suave de la siguiente manera.

Suponiendo que la superficie de gran escala $F(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{(p)}) = 0$ es una clásica superficie de elasticidad de endurecimiento por deformación con la regla de flujo asociada, su módulo

de endurecimiento H se determina a partir de la condición de consistencia $\dot{F}(\beta\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^{(p)}) = 0$ como:

$$H = - \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}^{(p)}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$$

El módulo de endurecimiento h para un punto de tensión en la superficie de producción interna depende de la configuración relativa de estas dos superficies. Se vuelve igual a H cuando estas dos superficies entran en contacto entre sí. El módulo puede, por ejemplo, ser especificado por una expresión de la forma,

$$h(\delta) = H + \left(\frac{\delta}{\delta_0}\right)^\gamma (h_0 - H)$$

Donde como antes $\delta=PR$ es la distancia desde el punto de tensión actual al punto de la imagen. La forma garantiza que $h(0)=H$ y $h(\delta_0) = h_0$. Esta formulación tiene un concepto muy cercano a la plasticidad de superficie límite. Sin embargo, este modelo de plasticidad evita el problema inherente en los modelos de superficie límite de trinquete para pequeños ciclos de descarga y recarga. Las reglas más sofisticadas para definir el punto de imagen y la traslación de la superficie de fluencia interna proporcionan una forma más realista para describir el comportamiento histerético y el efecto del historial de carga anterior.

Este proceso se puede llevar un paso más allá al introducir un conjunto de superficies de anidación dentro del dominio entre $f = 0$ y $F = 0$. Estas superficies pueden trasladarse, expandirse o contraerse debido a esfuerzos plásticos y además son capaces de codificar de una manera más sutil los detalles del historial de estrés pasado. El movimiento relativo entre cada superficie adyacente se define mediante reglas similares a la detallada anteriormente para garantizar que permanezcan anidadas.

La configuración de las superficies anidadas y, por lo tanto, la rigidez posterior para una trayectoria de tensión particular depende del historial de carga anterior. La respuesta del material para cualquier historial de carga puede estudiarse siguiendo la evolución de las configuraciones de las superficies anidadas. Este modelo posee una estructura de memoria de niveles múltiples porque, para tensiones que varían cíclicamente, solo un

cierto número de superficies se someten a la traslación; las otras superficies pueden cambiar solo isotrópicamente. Este enfoque puede extenderse a un número infinito de superficies, aunque para cálculos prácticos, es necesario un número finito.

4. ALGORITMO DE HISTÉRESIS

4.1 Introducción

La relación de la succión y contenido de agua de un suelo no tiene un valor único. Por ejemplo, si se considera un suelo que sufre un proceso de secado, ya sea por evaporación o por drenaje, y otro suelo sufre un proceso de humedecimiento por efecto de la lluvia o por capilaridad. En ambos casos y para el mismo valor de succión, se tiene que el suelo en proceso de secado retiene más agua que el que sufre humedecimiento. Este fenómeno se denomina Histéresis.

El efecto de histéresis puede atribuirse a varias causas (Hillel, 1998). Puede deberse al aire atrapado, la no uniformidad, y a diferentes tamaños de los poros, expansión y contracción del suelo que puede alterar la estructura del suelo, etc. (Tuller y Or, 2005; Likos y Lu, 2004). La histéresis o puede obedecer al proceso de llenado o vaciado de los poros de diferentes tamaño presentes en el suelo (Dullien, 1992).

Se debe considerar, además, que el comportamiento real del suelo es muy complejo y por ende la histéresis asociada con el secado y mojado del suelo ilustra que no hay una única curva de retención de agua (Haines, 1930; Hillel, 1998; Fredlund, 2000, 2002).

La figura 7 muestra una curva de retención típica de mojado e ilustra el efecto de la histéresis en la relación de equilibrio de succión matricial y la humedad del suelo. Los bucles intermedios son curvas de barrido que representan transiciones completas o parciales entre las ramas principales.

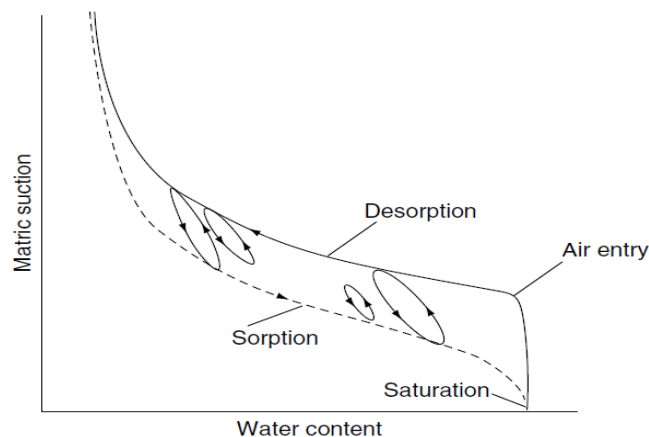


Fig. 7: Curvas de succión versus contenido de agua. (Hillel, 1998).

4.2 Desarrollo del algoritmo

El algoritmo desarrollado en este trabajo final de máster partió con la búsqueda de una curva de referencia de secado, para esto inicialmente se comenzó utilizando la curva de retención analítica de Van Genuchten. El procedimiento fue el siguiente:

En primer lugar se toma el rango válido de succión entre 1[kPa] y 1000 [MPa] y se divide a través de una progresión geométrica, esto es que la razón entre cada tramo será constante (α) y por ende cada tramo será mayor α veces al anterior. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$a_n = a_0 * r^{n-1}$$

Una vez discretizada la succión se aplica la ecuación de Van Genuchten para encontrar el grado de saturación efectivo y luego la relación de agua a través de las siguientes fórmulas:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = \left(1 + \left(\frac{S}{P_0} \right)^{1/1-\lambda} \right)^{-\lambda}$$

$$e_w = S_e * e_0$$

Considerando que en un inicio $e_w = e_0$ se puede encontrar el cambio de relación de agua Δe_w y por ende $\Delta \varepsilon_w$. Utilizando las fórmulas detalladas en el capítulo 3.1 se llega a la expresión:

$$H = \frac{K_w * \lambda_w}{K_w - \lambda_w}$$

Donde $\lambda_w = \Delta S / \Delta \varepsilon_w$ es la pendiente del gráfico típico de comportamiento elastoplástico con endurecimiento.

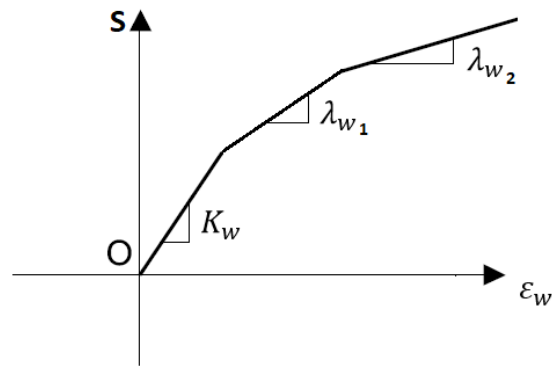


Fig. 8: Comportamiento elastoplástico con ley de endurecimiento.

Una vez obtenidos los módulos plásticos (H) y con la discretización del rango de succión, se tiene definida la curva de referencia de secado. La curva principal de mojado se definirá como una envolvente de varios caminos de mojado.

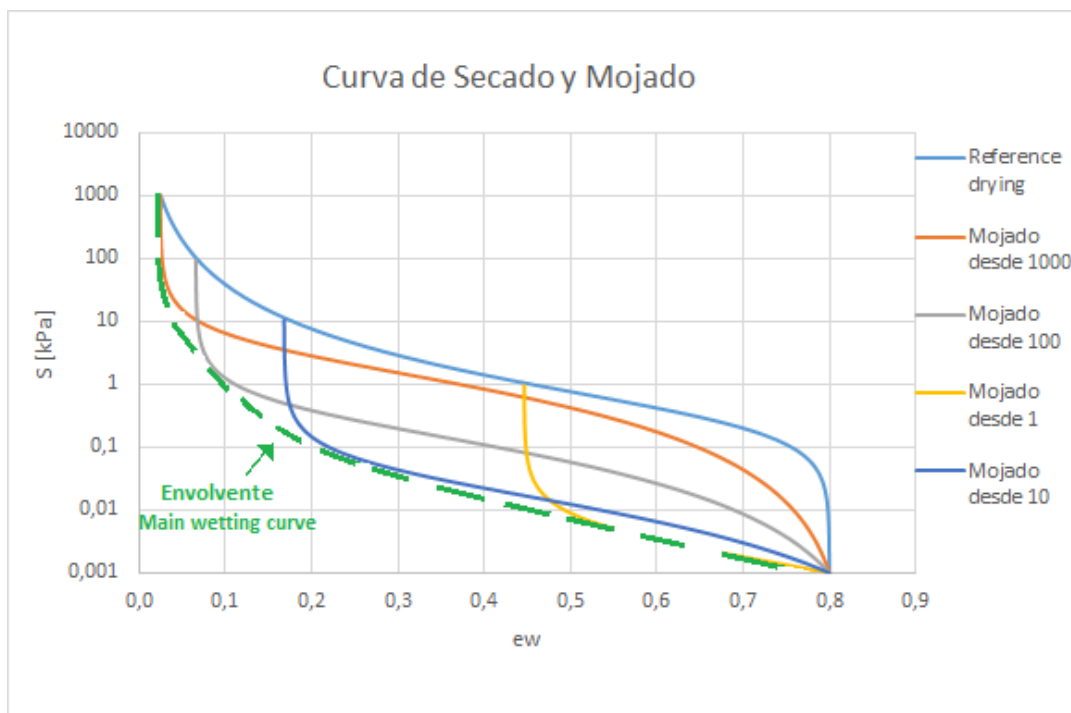


Fig. 9: Curva de secado, algunas de mojado y envolvente de mojado.

Cabe destacar que el algoritmo supone que las superficies anidadas son círculos que inicialmente parten con su base a una succión nula esto se puede apreciar en la siguiente figura:

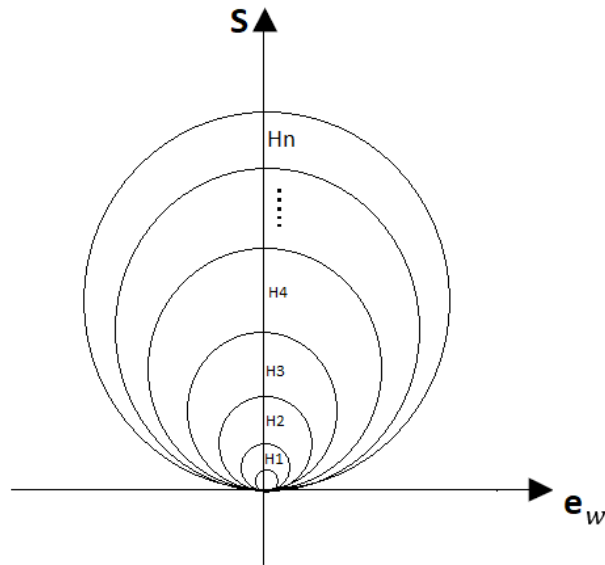


Fig. 10: Estado inicial del modelo “nested surfaces” considerada en el algoritmo.

Entre cada circunferencia, donde cada una representa una superficie de fluencia, se le asocia un módulo plástico constante. El interior de la primera circunferencia es la región elástica del modelo por lo que su módulo asociado es el módulo elástico o módulo de compresibilidad del agua, K_w .

El algoritmo actúa siguiendo un camino de succiones, este viene dado por un archivo de entrada el cual es leído por el algoritmo y aplicado de manera continua hasta completarlo. Los cambios de succión pueden ser positivos, representando el secado del suelo, o negativos, representando un humedecimiento de este mismo.

El cálculo en sí, comienza identificando la succión inicial en la que se encuentra el suelo. Ésta es una variable de historia y debiese ser un dato de entrada, sino el modelo considerará la succión inicial nula. Con este dato se trasladan las superficies de fluencia correspondientes hasta dicho punto siguiendo el comportamiento propuesto por las superficies anidadas. Luego se identifican las superficies activas inicialmente como luego de aplicado el delta de succión calculando para cada paso entre superficie de fluencia el cambio de deformación volumétrica hidráulica y la succión asociada.

Una vez completado el camino de succión establecido se calcula el vector de deformación volumétrica y de relación de agua correspondiente a cada cambio succión graficando

dicho camino y mostrando la curva retención con su respectiva histéresis (según sea el caso).

4.3 Parámetros generales adoptados

Utilizando la curva de retención de Van Genuchten los siguientes parámetros fueron los utilizados para la obtención de la curva de referencia de secado:

Tabla 1: Parámetros adoptados para las curva de secado

Main Drying Curve		
Po	0,3	[Mpa]
σ_0	0,072	[N/m]
λ	0,3	
e0	0,8	

El módulo elástico hidráulico (K_w) utiliza el valor establecido de 2200 [MPa].

La razón geométrica se calculó para dividir el rango de succión en aproximadamente 150 partes por lo que yendo desde 0,001 a 1000 [MPa] la razón da un valor aproximado de 1,1.

5. DESEMPEÑO DEL MODELO

5.1 Introducción

El desempeño del modelo implementado en el algoritmo desarrollado en el presente trabajo será evaluado para diferentes materiales, a través del archivo de entrada “material” el cual es un input que viene con la información de las superficies de fluencia circulares establecidas por el modelo, así como el valor del módulo plástico de secado que permitirá también la creación de las curvas de mojado correspondientes.

Para una misma cantidad de suelo, las arcillas presentan una superficie mucho mayor que los demás tipos de suelo y además presentan cargas negativas que se unen al polo positivo

de las moléculas de agua estableciendo puentes de hidrógeno, por tanto su capacidad de retención de agua es mucho mayor.

En suelo arcilloso la variación del potencial matricial es paulatina, mientras que en el suelo arenoso, cuando la humedad baja de un cierto valor, se produce un cambio brusco que corresponde al paso de macroporos a microporos.

Los suelos con una buena estructura tienen mayor porosidad y por tanto cuando están saturados, contienen más agua. En el suelo saturado la estructura domina por sobre la textura, caso contrario ocurre para valores altos de potencial mátrico.

La naturaleza de la curva característica está directamente asociada a la composición granulométrica y estructura del suelo (T. J., 1993); por tanto, la relación puede variar para diferentes tipos de suelos (Fig. 11). Nótese que para el caso de suelos finos (arcillas), estos pierden saturación en forma gradual; mientras que para suelos granulares, la pérdida de agua ocurre en forma muy rápida.

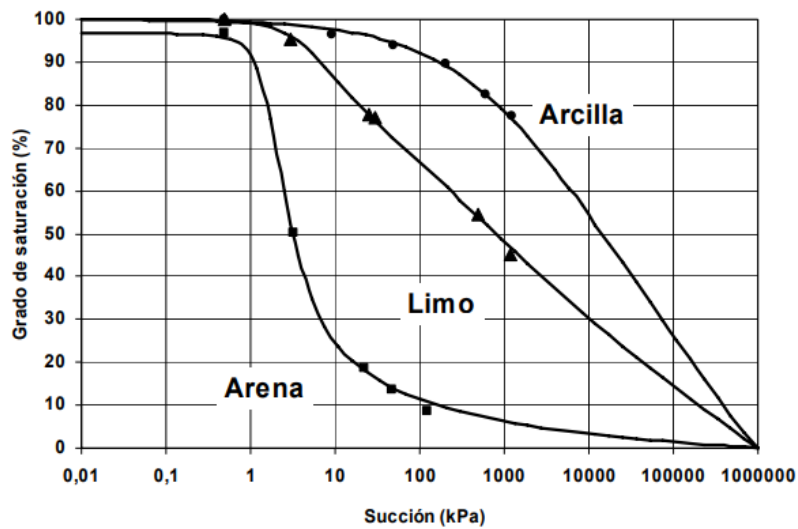


Fig. 11: Curvas de retención típicas para distintos tipos de suelos (Perez, 2006)

5.2 Verificación del desempeño del algoritmo

Para verificar el correcto desempeño del modelo implementado en el algoritmo en primer lugar se comparará la curva de referencia de secado con la gráfica de curva de retención

analítica de Van Genuchten (Fig. 12). Se puede observar que hay bastante similitud entre ambas curvas de referencia.

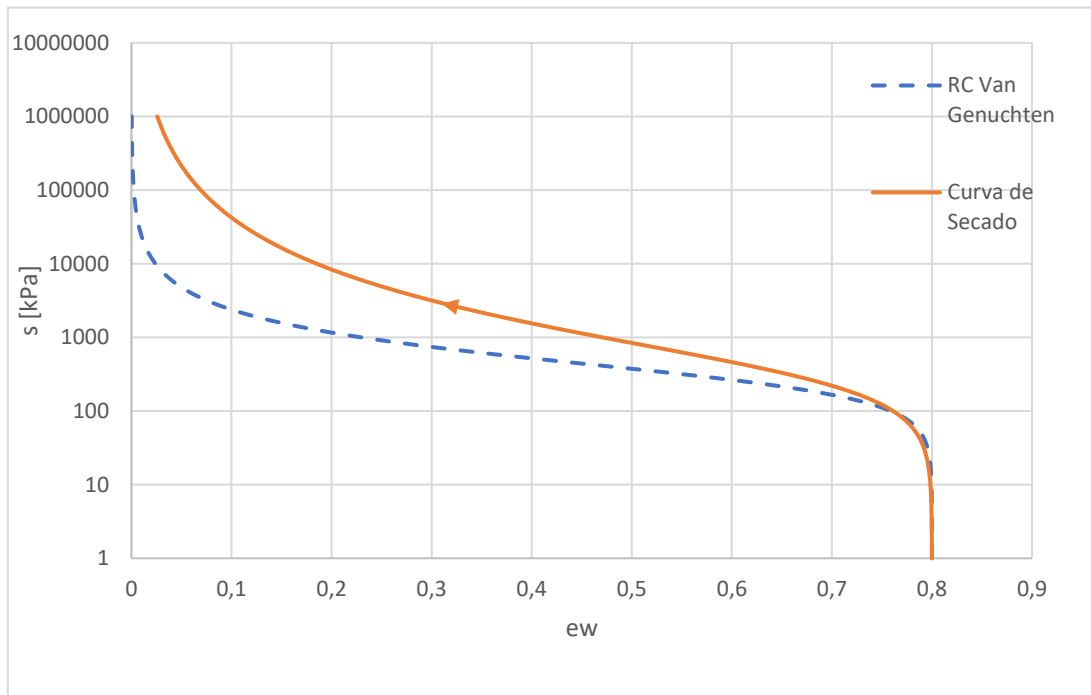


Fig. 12: Comparación curva de secado del modelo y de Van Genuchten

Además se muestra la misma curva analítica con la curva de secado y mojado obtenidas al hacer un cambio de succión positivo y otro similar pero negativo. Estas tres curvas son curvas de referencia que se encuentran entre las curvas principales de secado y mojado (Fig. 13). La diferencia se debe principalmente a la discretización utilizada, entre más pequeña la variación tomada más exacta será la curva entregada por el algoritmo.

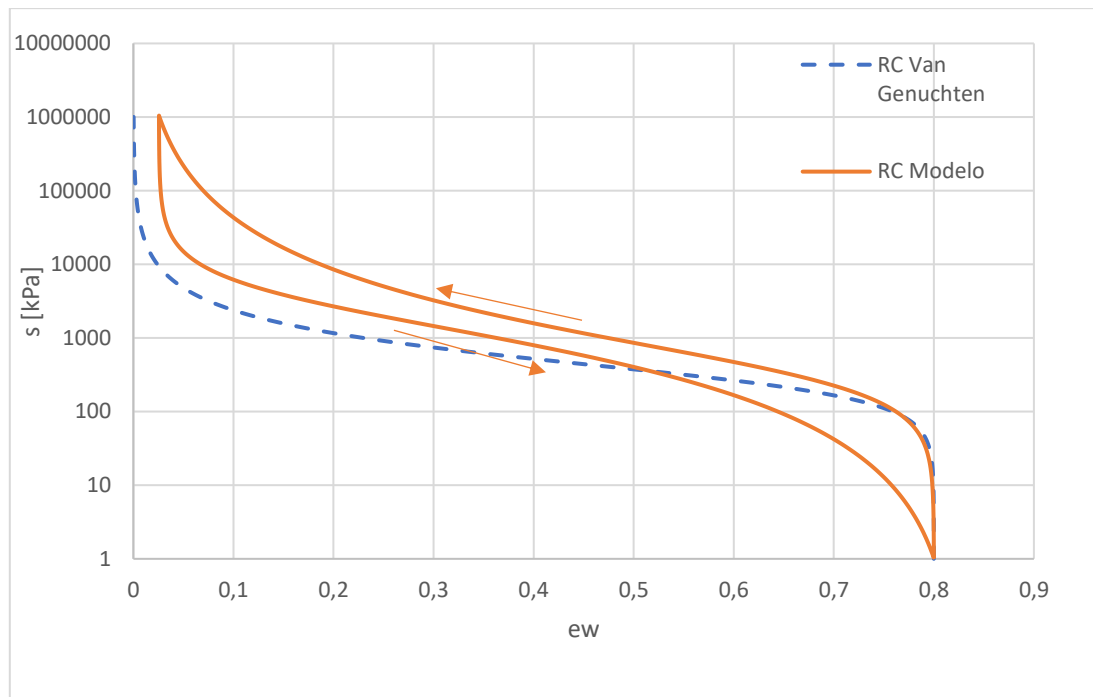


Fig. 13: Curvas de secado y mojado obtenidas por el modelo.

Además se realizaron una serie de verificaciones las cuales pueden apreciarse en las siguientes figuras, obtenidas desde el software Matlab:

1. Curva de secado hasta $S = 100000$ [kPa] y mojado completo del material desde diferentes valores de succión. Este gráfico permite mostrar principalmente la envolvente que dará paso a la curva principal de mojado del modelo. Este gráfico es similar al obtenido previamente (Fig. 14) y que confirma los buenos resultados obtenidos por el modelo desarrollado.
2. Curva de secado hasta $S = 2000$ [kPa], mojado hasta $S = 1800$ [kPa] y secado nuevamente hasta $S = 2000$ [kPa]. En este gráfico (Fig. 15) se muestra un ciclo de histéresis, además se dibuja igualmente la curva de secado de referencia (en rojo).
3. Por último se realizó la construcción esquemática de ambas curvas principales, la de secado y de mojado en base a varios ciclos de histéresis (produce secando y mojando casi instantáneamente al llegar cerca de las curvas principales.) que como se observa se mueven dentro de la región formada por ambas curvas principales (Fig. 16).

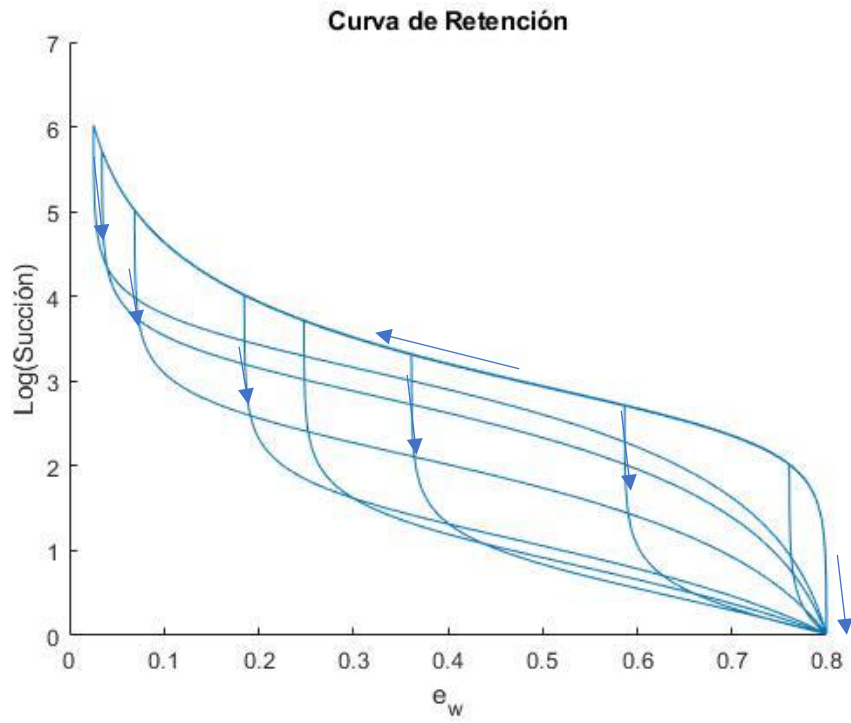


Fig. 14: Secado a $S = 100000[\text{kPa}]$ y mojado para diferentes valores de S .

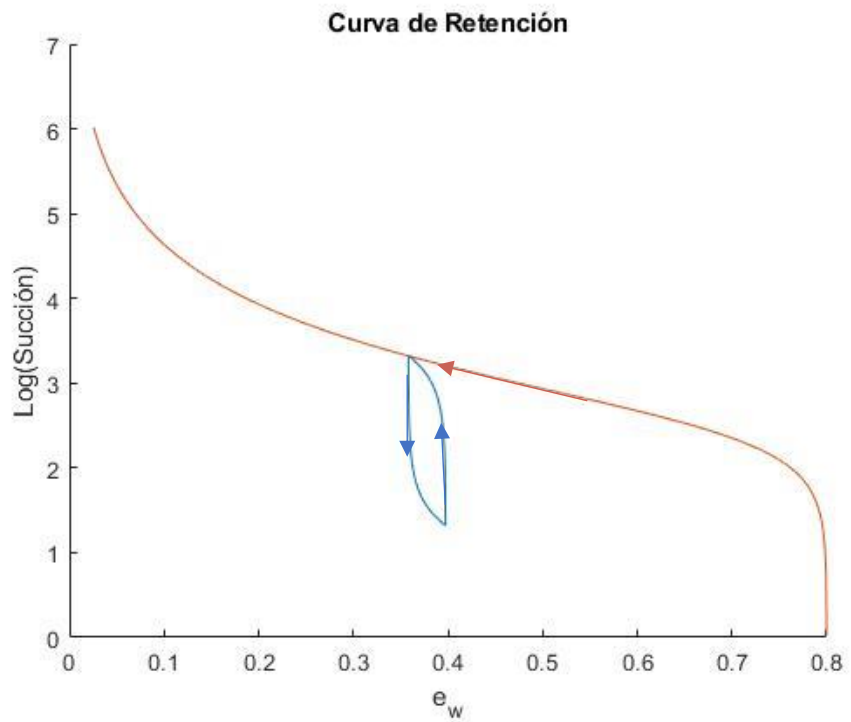


Fig. 15: Secado a $S = 100000[\text{kPa}]$, mojado a $S = 100[\text{kPa}]$ y secado a $S = 100000[\text{kPa}]$

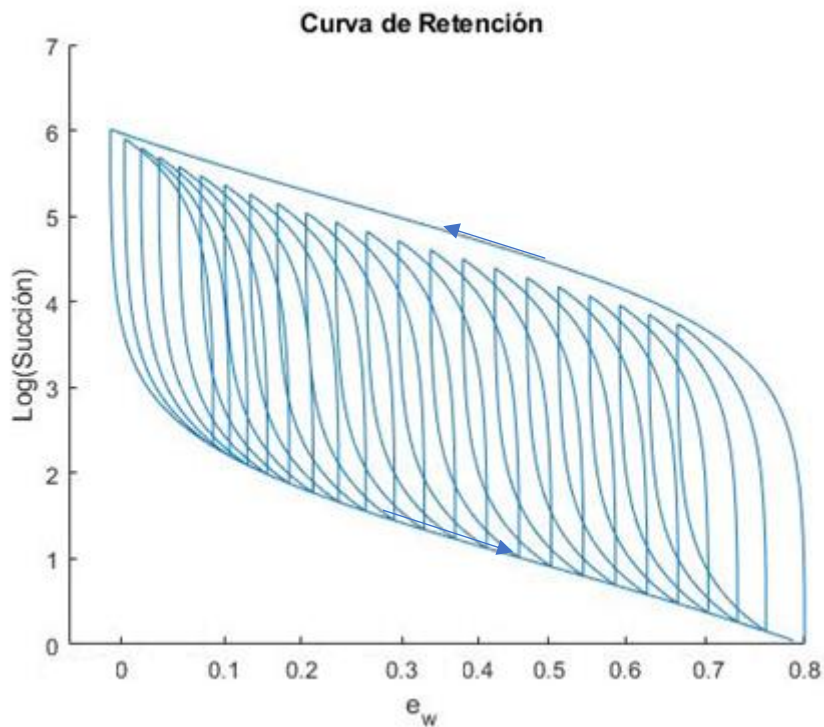


Fig. 16: Histéresis secando y mojando instantáneamente el material

5.3 Modelo para Arena, Limo y Arcillas

Como se observa en la figura 11 la curva de retención no sólo se diferencia en cuanto a valores de succión (para un mismo valor de humedad los tres tipos de suelos muestran un valor distinto de succión) sino también de forma.

Tomando como referencia la curva analítica de Van Genuchten se construyen 3 curvas de retención, una para cada tipo de suelo, las cuales serán comparadas con la obtenida en cada caso por el modelo desarrollado.

A continuación se presentan las tablas con los valores escogidos para la modelación de estas curvas y una figura en que se muestran las tres.

Tabla 2: Parámetros de curva de Van Genuchten adoptados para arena.

ARENA		
P_o	0,08	[Mpa]
σ_o	0,072	[N/m]
λ	0,6	
e_0	0,8	

Tabla 3: Parámetros de curva de Van Genuchten adoptados para limo.

LIMO		
P_o	0,1	[Mpa]
σ_o	0,8	[N/m]
λ	0,3	
e_0	0,8	

Tabla 4: Parámetros de curva de Van Genuchten adoptados para arcilla.

ARCILLA		
P_o	0,1	[Mpa]
σ_o	0	[N/m]
λ	0,2	
e_0	0,8	

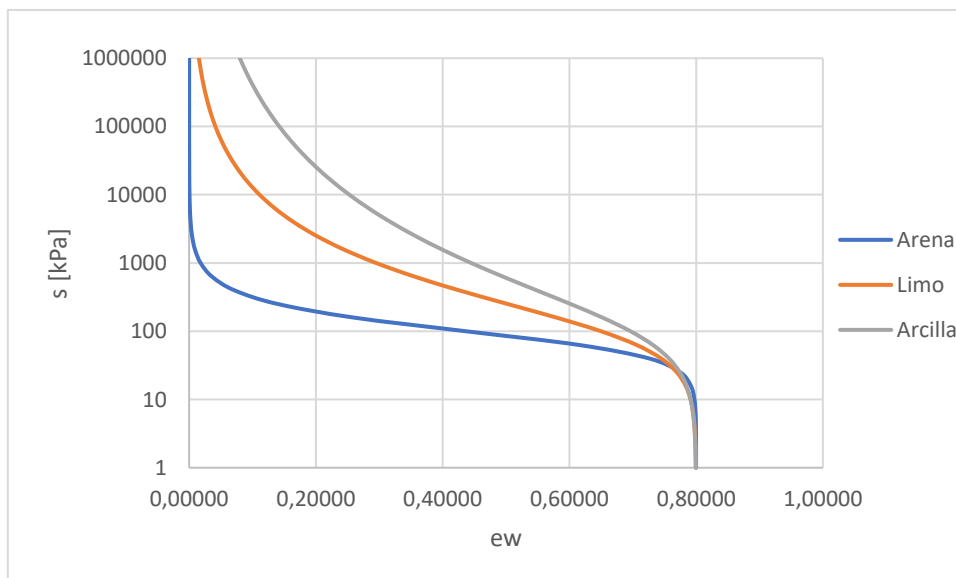


Fig. 17: Curva de retención para arena, limo y arcilla.

Estas curvas serán comparadas con las obtenidas para un secado mediante el algoritmo desarrollado en el presente trabajo.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como conclusión del trabajo, se puede destacar:

- La utilización de un modelo elastoplástico de superficies anidadas para describir la histéresis de la curva de retención. La idea de este modelo proviene de la similitud que existe entre la curva de retención y la PSD. No se excluye que en un futuro, cada superficie anidada se asocie a una familia de poros.
- La introducción natural del bucle principal de histéresis, así como de la histéresis de los bucles interiores mediante este tipo de modelo.
- La definición de los bucles principales como envolvente de todos los bucles interiores posibles. En ese sentido, la curva utilizada para definir los módulos elastoplásticos hidráulicos no corresponde a ninguna rama principal de secado/mojado, pero representa una curva de referencia que define la zona de estados alcanzables mediante cualquier serie de ciclos de succión.
- Importancia de los archivos y datos de entrada. La definición correcta del material, un camino de succión claro y una succión inicial que indica desde donde parte el cálculo y que tiene mucha influencia, pues implicará los módulos de plasticidad considerados para el cálculo de la deformación hidráulica.

Como líneas futuras de investigación, se considera:

- La asociación de cada superficie de fluencia anidada a una familia de tamaño de poros para dar un significado físico.
- La búsqueda de soluciones analíticas capaz de describir las envolventes de histéresis producidas por el modelo.
- La búsqueda de una curva de referencia que proporciona envolventes principales de secado/mojado descritas por una ecuación de van Genuchten.
- La implementación del modelo en el código `code_bright`. Para poder incluir la histéresis de la curva de retención en un caso real.
- La realización de cálculos de interacción suelo-atmósfera que incluyan la histéresis de la curva de retención.

7. BIBLIOGRAFÍA

Alonso E.E., Gens A. & Josa A. (1990). A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*.

Casini F, Vaunat J, Romero E, Desideri A (2012). Consequences on water retention properties of double-porosity features in a compacted silt.

Durner W (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resour Res* 30(2):211-223

Houlsby G.T., Puzrin A.M. (2006), "Principles of hyperplasticity, An Approach to Plasticity Theory Based on Thermodynamic Principles".

Mroz, Z. (1967). "On the description of anisotropic work hardening," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, V 15, pp. 163-175.

Pérez, N. (2006), Development of a Protocol for the Assessment of Unsaturated Soil Properties. PhD thesis. Arizona State University.

Perez N (2008), "Determinación de las curvas características en suelos no saturados con celdas de presión".

Prevost, J. H. (1978). "Plasticity theory for soil stress-strain behavior," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, V 104, pp. 1177-1194

Romero, E. (1999). Characterization and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom clay: an experimental study. Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

Vaunat J, Romero E, Jommi C (2000). An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils.

Anexo 1

El algoritmo utilizado en el presenta trabajo final de master se muestra a continuación:

```
%INPUTS!

Kw=2200000,0;
zero=10^-4;
l=1;
e0=0.8;
cte=0.01;

%ALGORITMO

%carga de radio de succión y módulos plásticos
input1=load('material.prn');
[m n]=size(input1);
H=(1:m-1);
r1=(1:m);
prueba_e=[];
prueba_s=[];
for j=1:1:m
    r1(j)=log10(input1(j)/2);
end
d0=r1(2)-r1(1)
r=(1:m);
s0=(1:m);
for j=1:1:m
    r(j)=j*d0/2;
    s0(j)=j*d0/2+cte;
end

s_ini=s0(1)-r(1,1)+cte;
s_inil=s_ini;
for j=1:1:m-1
    H(1,j)=input1(j+1,2);
end

%Llevar los círculos iniciales hasta s_ini
i=1;
while 2*r(i)<=s_ini
    s0(i)=s_ini-r(i);
    i=i+1;
end

input2=load('camino succion.prn');
delta_S=1:length(input2);
for j=1:1:length(input2)
    delta_S(j)=sign(input2(j))*log10(abs(input2(j)));
end
w=delta_S(1,1);

%INICIO DEL FOR (CÁLCULO DE DEFORMACIONES)
for k=1:1:length(input2)
    i=0;
```



```

%Verificar sentido del cambio de succión
if sign(w)==sign(delta_S(k))
%iniciar el delta s0
delta_s0=(1:m);
for j=1:1:m
    delta_s0(j)=0;
end

%Definicion superficies activas
while abs((s_ini-s0(i+1))^2-r(i+1)^2)<zero
i=i+1;
end
ni=i
i=0;
sf=s_ini+delta_S(k)
while (sf-s0(i+1))^2-r(i+1)^2>=zero
i=i+1;
end
nf=i

%Cálculo deformaciones elásticas y plásticas

if ni==0 && nf==0
prueba_e(1,1)=delta_S(k)/Kw;
prueba_s(1,1)=sf;
l=l+1
end

if ni==0 && nf~=0
prueba_e(1,1)=1/Kw*(sign(delta_S(k))*2*r(1)-s_ini)
prueba_s(1,1)=sign(delta_S(k))*(r(1))+s0(1)
ni=ni+1
l=l+1
end

if ni~=0 && nf~=0
i=ni;
while i<=nf-1
    j=1;

prueba_e(1,1)=(Kw+H(i))/(Kw*H(i))*(s0(i+1)+sign(delta_S(k))*r(i+1)-
(s0(i)+sign(delta_S(k))*r(i)))
    prueba_s(1,1)=sign(delta_S(k))*r(i+1)+s0(i+1)
    while j<=i
        delta_s0(j)=delta_s0(j)+(s0(i+1)+sign(delta_S(k))*r(i+1)-
(s0(i)+sign(delta_S(k))*r(i)));
        j=j+1;
    end
    delta_s0;
    i=i+1;
    l=l+1
end
j=1;
prueba_e(1,1)=(Kw+H(nf))/(Kw*H(nf))*(sf-
(s0(nf)+sign(delta_S(k))*r(nf)))
prueba_s(1,1)=sf
l=l+1
while j<=nf

```

```

        delta_s0(j)=delta_s0(j)+(sf-(s0(nf)+sign(delta_S(k))*r(nf)));
        j=j+1;
    end
    delta_s0;
    end
    j=1;
    n=length(r);
    while j<=n
        s0(j)=s0(j)+delta_s0(j);
        j=j+1;
    end
    s0

%SI HAY UN CAMBIO DE DIRECCIÓN!

else

%inicio vector delta_s0
delta_s0=(1:m);
for j=1:1:m
    delta_s0(j)=0;
end

%Definición superficies activas
while abs((s_ini-s0(i+1))^2-r(i+1)^2)<zero
    i=i+1;
end
ni=i
i=0;
sf=s_ini+delta_S(k)
while (sf-s0(i+1))^2-r(i+1)^2>=zero
    i=i+1;
end
nf=i
dep_w=0;

%Calculo deformaciones elásticas y plásticas

if ni~=0 && nf==0
    dep_w=delta_S(k)/Kw;
    prueba_e(1,1)=delta_S(k)/Kw;
    prueba_s(1,1)=sf;
    l=1+1
end

if ni~=0 && nf~=0
    i=1;
    prueba_e(1,1)=1/Kw*(s0(1)+sign(delta_S(k))*r(1)-s_ini)
    prueba_s(1,1)=s0(1)+sign(delta_S(k))*r(1)
    l=1+1
    while i<=nf-1
        j=1;

prueba_e(1,l)=(Kw+H(i))/(Kw*H(i))*(s0(i+1)+sign(delta_S(k))*r(i+1)-
(s0(i)+sign(delta_S(k))*r(i)))
        prueba_s(1,l)=sign(delta_S(k))*r(i+1)+s0(i+1)
        while j<=i
            delta_s0(j)=delta_s0(j)+(s0(i+1)+sign(delta_S(k))*r(i+1)-
(s0(i)+sign(delta_S(k))*r(i)));

```

```

        j=j+1;
    end
    i=i+1;
    l=l+1
end
j=1;
prueba_e(1,1)=(Kw+H(nf))/(Kw*H(nf))*(sf-
(s0(nf)+sign(delta_S(k))*r(nf)))
prueba_s(1,1)=sf
l=l+1
while j<=nf
    delta_s0(j)=delta_s0(j)+(sf-(s0(nf)+sign(delta_S(k))*r(nf)));
    j=j+1;
end
end
j=1;

%Guardar el cambio de posición de los centros
n=length(r);
while j<=n
    s0(j)=s0(j)+delta_s0(j);
    j=j+1;
end
end
w=delta_S(k);
s_ini=sf;
%TÉRMINO DEL FOR (CÁLCULO DE DEFORMACIONES)
end

%Vector epsilon_w
b=1;
Eps_w=[];
Eps_w(1,1)=0;
for b=1:1:(length(prueba_e))
    Eps_w(1,1+b)=Eps_w(1,b)+prueba_e(1,b);
end

%Vector ew
ew=[];
ew(1,1)=e0; %considerando que s_ini=0
for b=1:1:(length(Eps_w)-1)
    ew(1,1+b)=ew(1,b)-(1+e0)*(Eps_w(1,b+1)-Eps_w(1,b));
end
ls=[];
ls(1,1)=s_inil
for b=1:1:(length(prueba_s))
    ls(1,b+1)=prueba_s(b);
end

%Ploteo 1
prueba_e;
Eps_w
ls;
figure(1)
    hold on
    plot(Eps_w,ls);
    xlabel('Epsilon_w');
    ylabel('Succión');
    title('Modelo Elastoplástico');

```

```
%Ploteo 2
format long
ew
ls
figure(2)
    hold on
    plot(ew, (ls));
    xlabel('e_w');
    ylabel('Log(Succión)');
    title('Curva de Retención');
```


Anexo 2

En este anexo se muestra un ejemplo de archivo de material donde la primera columna representa los valores de los diámetros de cada circunferencia de succión (superficie anidada) y la segunda columna es el módulo plástico correspondiente a cada zona:

s [kPa]	H [kPa]	s [kPa]	H [kPa]	s [kPa]	H [kPa]
1,00000	0,00000	276,80149	6,01896	18341,99502	13,07102
4,59497	957,94068	304,48164	5,70994	20176,19453	13,60924
5,05447	836,33200	334,92980	5,44944	22193,81398	14,17051
5,55992	730,21449	368,42278	5,23214	24413,19538	14,75574
6,11591	637,61359	405,26506	5,05344	26854,51492	15,36588
6,72750	556,80672	445,79157	4,90934	29539,96641	16,00192
7,40025	486,29105	490,37073	4,79641	32493,96305	16,66490
8,14027	424,75542	539,40780	4,71169	35743,35935	17,35591
8,95430	371,05585	593,34858	4,65264	39317,69529	18,07607
9,84973	324,19419	652,68344	4,61705	43249,46482	18,82657
10,83471	283,29951	717,95178	4,60305	47574,41130	19,60865
11,91818	247,61187	789,74696	4,60902	52331,85243	20,42359
13,10999	216,46817	868,72165	4,63360	57565,03767	21,27275
14,42099	189,28978	955,59382	4,67561	63321,54144	22,15754
15,86309	165,57179	1051,15320	4,73406	69653,69558	23,07940
17,44940	144,87361	1156,26852	4,80811	76619,06514	24,03988
19,19434	126,81076	1271,89537	4,89707	84280,97165	25,04057
21,11378	111,04774	1399,08491	5,00037	92709,06882	26,08313
23,22515	97,29177	1538,99340	5,11755	101979,97570	27,16929
25,54767	85,28737	1692,89274	5,24822	112177,97330	28,30086
28,10244	74,81159	1862,18201	5,39211	123395,77060	29,47972
30,91268	65,66987	2048,40022	5,54902	135735,34770	30,70783
34,00395	57,69246	2253,24024	5,71880	149308,88240	31,98723
37,40434	50,73120	2478,56426	5,90138	164239,77070	33,32007
41,14478	44,65681	2726,42069	6,09676	180663,74770	34,70855
45,25926	39,35650	2999,06275	6,30497	198730,12250	36,15499
49,78518	34,73183	3298,96903	6,52611	218603,13480	37,66180
54,76370	30,69692	3628,86593	6,76031	240463,44820	39,23149
60,24007	27,17685	3991,75253	7,00777	264509,79310	40,86668
66,26408	24,10622	4390,92778	7,26870	290960,77240	42,57010
72,89048	21,42803	4830,02056	7,54338	320056,84960	44,34458
80,17953	19,09251	5313,02261	7,83211	352062,53460	46,19309
88,19749	17,05627	5844,32487	8,13523	387268,78800	48,11870
97,01723	15,28149	6428,75736	8,45314	425995,66680	50,12464
106,71896	13,73517	7071,63310	8,78625	468595,23350	52,21424
117,39085	12,38856	7778,79641	9,13501	515454,75680	54,39100

129,12994	11,21658	8556,67605	9,49992	567000,23250	56,65854
142,04293	10,19742	9412,34365	9,88149	623700,25580	59,02064
156,24723	9,31205	10353,57802	10,28030	686070,28140	61,48126
171,87195	8,54393	11388,93582	10,69694	754677,30950	64,04449
189,05914	7,87865	12527,82940	11,13204	830145,04040	66,71461
207,96506	7,30370	13780,61234	11,58627	913159,54450	69,49607
228,76156	6,80819	15158,67357	12,06034	1004475,49900	72,39353
251,63772	6,38268	16674,54093	12,55500		

o