

EL ENDURECIMIENTO ANISOTRÓPICO EN LA SUPERFICIE DE FLUENCIA DE MODELOS CONSTITUTIVOS PARA SUELOS NO SATURADOS

Anisotropic hardening in the yield surface on constitutive
models for unsaturated soils

Eduardo Daniel Pérez García^{1*}, Eduardo Rojas González¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Autor de correspondencia
eduardaniel1492@gmail.com

RESUMEN

La mecánica de suelos saturados evolucionó rápidamente después de que Terzaghi estableció el principio de esfuerzos efectivos, sin embargo, los modelos determinados para estos materiales no aplican para el caso de suelos no saturados. Por esa razón, en años recientes se han venido investigando estos materiales para establecer ecuaciones que ayuden a predecir su comportamiento adecuadamente. Existen diferentes fenómenos en los suelos no saturados tales como el endurecimiento por succión, el acoplamiento hidromecánico y la histéresis de la curva de retención. El propósito de este documento es discutir las ventajas y desventajas de tres modelos distintos incluyendo los parámetros que requieren y sus consideraciones fenomenológicas para determinar las bases de un modelo más sencillo y práctico.

Palabras clave: suelos no saturados, esfuerzos efectivos, acoplamiento hidromecánico, superficie de fluencia, endurecimiento anisotrópico, histéresis

ABSTRACT

The mechanics of saturated soils evolved rapidly after Terzaghi established the principle of effective stress however the model established for these materials could not be applied for unsaturated soils. For that reason, in recent years, these materials have been investigated to establish the required equations to correctly model their behavior. There are different phenomena present on unsaturated soils such as: suction hardening, hydro-mechanical coupling and hysteresis of the retention curve. The purpose of this document is discussing the advantages and disadvantages of three different models including their parameters and their phenomenological considerations to establish the basis for a simpler and more practical model.

Keywords: unsaturated soils, effective stress, hydromechanical coupling, yield surface, anisotropic hardening, hysteresis

INTRODUCCIÓN

Los suelos no saturados son la combinación de tres distintas fases: partículas sólidas, partículas de aire y agua que ocupan el denominado espacio poroso. Su comportamiento de esfuerzo-deformación es complejo y está influenciado por muchos factores como cargas aplicadas externamente, tipos de suelo, estructura, densidad y succión que surgen de la tensión superficial a través de la interfaz aire-agua dentro del suelo. En particular, la succión aumenta la resistencia al corte y endurece la respuesta de la estructura del suelo. Al mojarse, sin embargo, este aumento en la rigidez de la estructura interna del suelo se pierde y puede estar asociado con un colapso volumétrico grande e irreversible. Los suelos no saturados se encuentran prácticamente distribuidos por toda la superficie terrestre y estas características de comportamiento necesitan ser estudiadas para ayudar a mitigar muchos problemas de ingeniería al buscar su aplicación en cimentaciones, pavimentos y taludes por mencionar algunos. Por esto se ha buscado el continuo desarrollo de modelos constitutivos para suelos no saturados, línea de investigación que se ha visto enriquecida en por lo menos los últimos 15 años.

Los primeros modelos constitutivos para suelos no saturados hacían uso de las denominadas variables independientes de esfuerzo, las cuales eran representadas generalmente por el esfuerzo neto ($\sigma_n = \sigma - u_w$) y la succión ($s = u_a - u_w$), donde σ representa el esfuerzo total, y u_a y u_w las presiones de aire y de agua, respectivamente. Esta consideración se tomaba en cuenta porque se demostró experimentalmente que mientras estas dos variables de esfuerzo se mantuvieran constantes, se podían hacer variar los valores de los elementos de esfuerzo, u_a y u_w sin afectar el comportamiento del suelo [1]. Estudios posteriores demostraron que es posible obtener estas variables de forma teórica al aplicar el principio que establece que el equilibrio de un sistema multifase es igual a la suma del equilibrio de cada una de sus fa-



ses. A partir de estos resultados, se han realizado una gran cantidad de ensayos en suelos no saturados para determinar la influencia de cada una de estas variables en el comportamiento volumétrico y de resistencia. Sin embargo, se han encontrado obstáculos para explicar de manera más precisa el comportamiento de estos materiales, uno de esos obstáculos sucede cuando aplicamos esfuerzos al suelo. Éste se deforma, los poros se reducen, y la curva de retención, el esfuerzo por succión y las deformaciones cambian de tal manera que hay que ir actualizando las curvas de retención y los esfuerzos por succión con cada incremento de carga. Esta interacción entre los esfuerzos aplicados al suelos y las propiedades hidráulicas se denomina acoplamiento hidromecánico.

Modelo del Estado Crítico

Uno de los modelos más prácticos para suelos no saturados es el modelo del estado crítico, debido a su sencillez y a que involucra el uso de pocos parámetros. Si un material fino es sometido a un ensayo de compresión isotrópica, su trayectoria de respuesta puede graficarse como una línea recta de pendiente igual a λ en los ejes logaritmo del esfuerzo medio efectivo (p') contra volumen específico ($v = 1 + e$), donde e representa la relación de vacíos del material, tal como se muestra en la Figura 1, donde N representa el volumen específico para un esfuerzo medio efectivo unitario, mientras que su respuesta en descarga-recarga se puede trazar como línea recta de pendiente k .

La Figura 1 muestra que cuando se trazan las trayectorias de respuestas de un suelo fino para ensayos drenados y no drenados realizados en probetas normalmente consolidadas (NC) y preconsolidadas (PC) se obtienen las curvas que se muestran en la figura. Se pudo observar que si se unían los puntos finales de todas las trayectorias de respuesta de estos últimos ensayos, que representan las condiciones de falla del material para

cada caso, se alineaban en una recta paralela a la línea de compresión virgen isotrópica (CVI). A esta línea se le denominó del Estado Crítico (CSL) y representa una condición donde el material alcanza un estado de plasticidad perfecta y la deformación desviadora crece indefinidamente mientras los esfuerzos efectivos y la deformación volumétrica total se mantienen constantes.

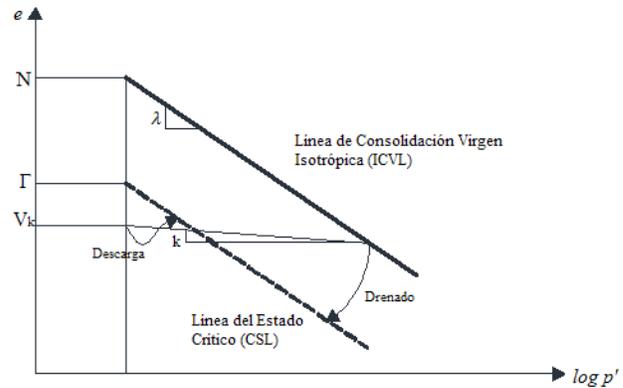


Figura 1. Trayectorias de respuesta para diversos ensayos y línea del estado crítico (CSL).

Modelo Cam-Clay Modificado

Este modelo permite simular el comportamiento de suelos arcillosos y fue desarrollado por Roscoe y Burland [2]. Se denomina modelo modificado Cam-Clay (MCC), que se basa en cuatro principios: propiedades elásticas, superficie de fluencia, potencial plástico y ley de endurecimiento. Esta teoría fue desarrollada para suelos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados. Históricamente, se puede considerar el modelo Cam-Clay como el primer modelo de endurecimiento plástico que fue adoptado de forma general para suelos. Una de las hipótesis básicas en el modelo modificado Cam-Clay es considerar que la superficie de fluencia coincide con el potencial plástico, lo cual implica una regla de flujo asociada y la aceptación del criterio de normalidad (el incremento de deformación plástica es normal, en todo punto, a la curva de fluencia o plastificación). En la Figura 2, se representan

el plano del volumen específico (v) y el logaritmo natural del esfuerzo efectivo ($\ln p'$), la respuesta de un material al ser sometido a consolidación isotrópica. Además, se asume la hipótesis de endurecimiento isotrópico, es decir, que las sucesivas superficies de fluencia, que aparecen al aumentar las cargas sobre la muestra, aumentan de tamaño, pero sin cambiar de forma.

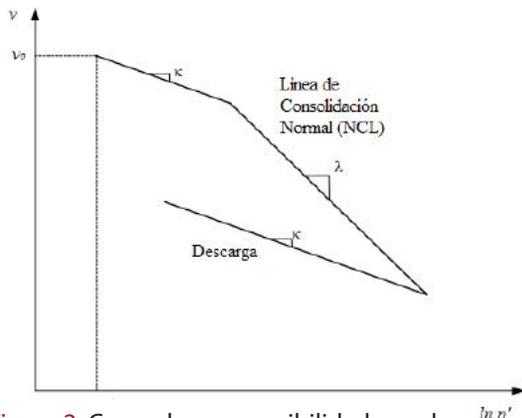


Figura 2. Curva de compresibilidad para la respuesta del material durante la consolidación isotrópica.

El propósito de este artículo es hacer un análisis de tres modelos constitutivos basados en las consideraciones anteriores e investigar los parámetros que involucran, cómo plantean la superficie de fluencia, así como realizar algunos comentarios acerca de la regla de endurecimiento que siguen.

Modelo de Russell y Khalili

El modelo propuesto por Russell y Khalili [3] está basado en la teoría de una superficie de fluencia plástica límite para generar una transición suave entre el comportamiento elástico y el elastoplástico, debido a su gran versatilidad y su precisión al reproducir el comportamiento esfuerzo-deformación para varios tipos, presentado un buen ajuste entre los resultados experimentales y analíticos. El modelo es una extensión de la propuesta realizada previamente por Russell y Khalili [4]. Basado en el marco del estado crítico, el modelo utiliza el concepto de esfuerzos efectivos de Bishop con el parámetro de Bishop que depende únicamente de

la succión. La ventaja de usar la ecuación de esfuerzos efectivos radica en que la deformación elástica y la resistencia al corte limitante del suelo pueden ser expresadas completamente en términos de un único esfuerzo efectivo en lugar de tener dos o tres variables de esfuerzo independientes. La plasticidad previa y posterior al pico es tomada en cuenta. La carga y la superficie de fluencia muestran la misma forma y son representadas por una función logarítmica con endurecimiento isotrópico, la cual a su vez depende de la deformación volumétrica. Una regla de mapeo radial simple centrada en el origen es usada para definir la proyección del estado de esfuerzos en la superficie fluencia.

Además, se adopta una regla de flujo no asociada con un potencial plástico obtenido de la integración de una regla basada en el endurecimiento-ablandamiento isotrópico del suelo, la matriz se relaciona con un cambio en la succión del suelo, así como en la deformación volumétrica. La regla de flujo depende de la posición del estado de esfuerzos con respecto a la línea del estado crítico (CSL), así como de la dirección del vector normal del potencial plástico. Esta característica del modelo asegura que se presentará contracción cuando el estado de esfuerzos esté por debajo de la línea del estado crítico (CSL) y que en el caso de que el estado de esfuerzos esté por encima de esta línea el suelo se mostrará expansión.

Para describir el módulo de endurecimiento, es dividido en dos partes: una para la superficie de fluencia y otra para la distancia entre la superficie de carga y la de fluencia. Este último módulo de endurecimiento puede definirse de forma arbitraria siempre y cuando sea nulo en la superficie de fluencia y utilice un parámetro que dependa de las condiciones iniciales. El modelo toma en cuenta los efectos de un suelo no saturado en la definición del estado crítico y también los efectos de la trituración de partículas con altos esfuerzos en suelos arenosos. También incorpora tanto la variación de la línea del estado crítico (CSL) como la de la de conso-



lidación isotrópica (ICVL), debido al endurecimiento por succión mediante una ecuación analítica escrita en términos de la succión y la deformación volumétrica de la muestra.

Por simplicidad son adoptadas notaciones triaxiales e histéresis hidráulica y son ignorados aquellos fenómenos dependientes del tiempo. Una desventaja de este modelo es que requiere de varios parámetros para su ajuste y funciones tales como: el exponente de la superficie de fluencia ($1/N$), un parámetro de estado inicial k_m , una función k_d para definir la disipación de la energía, una función que define la pendiente de la línea de compresión isotrópica dependiente de la succión ($\lambda(s)$) y una función que define el desplazamiento de la ICVL con la succión. Además, como el potencial plástico no cruza el eje de esfuerzo efectivo medio en ángulo recto, aparecen tensiones desviadoras durante la carga isotrópica.

Superficie de Fluencia

El modelo de plasticidad de la superficie límite presentado por los autores es una extensión de la que aparece en Russell y Khalili [4] que fue desarrollada inicialmente para describir el comportamiento esfuerzo-deformación para una arena de cuarzo saturada a través de un rango de esfuerzos, incluidos aquellos que son suficientes como para causar el aplastamiento de partículas y sometidos a distintas series de cargas. Las características subyacentes del modelo son suficientemente generales como para que éste también sea adecuado para describir el comportamiento de esfuerzo-deformación de un amplio rango de suelos no saturados.

El estado crítico actúa como una condición de referencia hacia la cual todos los estados se acercan con el aumento del esfuerzo cortante. Por lo tanto, el estado crítico tiene un papel importante en el modelo. A menudo se asume que la línea de estado crítico (CSL) es recta en los planos $v - \ln p'$ y $q - p'$ para arenas saturadas y arcillas, sin

embargo, hay evidencia experimental de que la CSL para arenas en el plano $u - \ln p'$ puede no ser recta, ya que se ve afectada por el aplastamiento de partículas cuando se someten a altos esfuerzos. Para este modelo se asume que la CSL para arenas saturadas toma una forma lineal segmentada en tres partes. Para el caso de las arcillas saturadas existe gran evidencia experimental que asegura que la relación entre el esfuerzo desviador y esfuerzo medio efectivo se aproxima a un valor constante a comparación de cuando se aplican esfuerzos superiores a los que ha experimentado el suelo en su historia geológica, por lo tanto la CSL es lineal y pasa por el origen, al adoptar el criterio de falla establecido por Mohr-Coulomb y definido por una pendiente M en función del ángulo de fricción interna del suelo en condiciones del estado crítico ϕ'_{cs} , donde ambas variables son variables materiales.

Es así que se asume una regla de flujo no asociada que garantiza que las deformaciones volumétricas plásticas para arcillas y arenas sean igual a cero en el estado crítico. La existencia de una región puramente elástica se ignora de tal manera que toda deformación es considerada elasto-plástica; el suelo siempre se encuentra fluyendo y el estado de esfuerzos se encuentra en la superficie de carga. También, la histéresis comúnmente observada en los ciclos de descarga-recarga de arcillas sugiere que la deformación no es puramente elástica. La deformación plástica se produce cuando el estado de esfuerzos, indicado mediante σ , recae sobre o dentro de la superficie de fluencia. Por simplicidad se considera que tanto la superficie de fluencia como la de carga son de la misma forma y son homologas en cuanto al origen en el plano $q - p'$. Además, se asume una regla simple de mapeo radial para el crecimiento de la superficie de fluencia, la cual establece que una línea recta que parte del origen y el estado de esfuerzo del suelo (σ) intersecta la superficie de falla en $\bar{\sigma}$ (como se muestra en la Figura 3), es σ ni se observa en ninguna figura. así que se deduce que los vectores normales

unitarios de la superficie de carga y la superficie de fluencia en σ y $\bar{\sigma}$ son lo mismo. En la Figura 3 se muestran de forma gráficas las superficies de fluencia y carga propuestas por [3] así como algunas de las condicionales que determina el modelo que proponen. En la Tabla 1 se enlistan los parámetros, que requiere el modelo, ordenados de acuerdo con su función.

Tabla 1. Lista de Parámetros para el modelo propuesto por [3].

Parámetro	Descripción
λ_0	Valor inicial de la pendiente de la línea de compresión
λ_{cr}	Valor de la pendiente durante el aplastamiento de partículas
λ_f	Valor final de la pendiente en esfuerzos extremadamente altos
M_{cs}	Pendiente de la línea del estado crítico (CSL), en función del ángulo de fricción del suelo en condiciones del estado crítico
K	Módulo de Bulk
G	Módulo de Corte
d	Función de dilatación
p'_c	Parámetro que controla el tamaño de la superficie de carga
\bar{p}'_c	Parámetro que controla el tamaño de la superficie de fluencia
N	Constante de curvatura
R	Constante material que representa la relación entre p' en la intersección de la superficie de carga con la línea $y = \dots$

Hidráulicos	c_m	Factor de compresibilidad de la estructura del suelo respecto a la succión
	$\gamma(s)$	Succión dependiente del valor del cambio en la línea límite de compresión isotrópica (LICL) no saturada a la línea límite de compresión isotrópica (LICL).
Acoplamiento	κ_d	Potencial plástico
	κ_m	Parámetro del módulo de endurecimiento

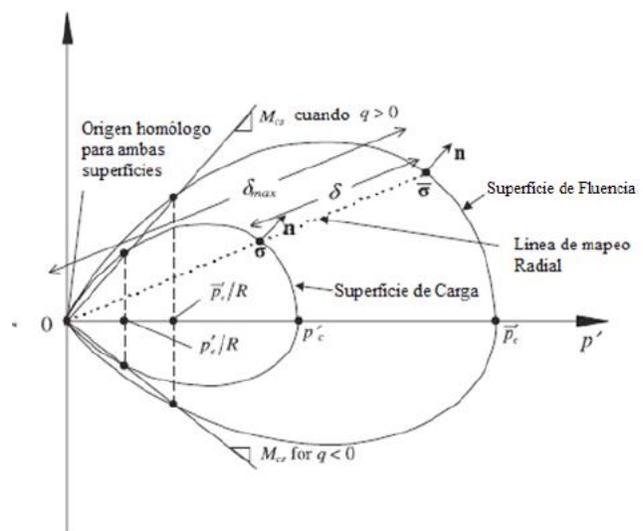


Figura 3. Superficie de carga, superficie de fluencia y línea de mapeo radial en el plano $q - p'$ propuesta por [3].

Las deformaciones plásticas ocurren cuando el estado de esfuerzos actuales del suelo σ se encuentra sobre o dentro de la superficie de fluencia, lo que se logra definiendo el módulo plástico como una función decreciente de la distancia entre σ y un punto en la imagen sobre la superficie de fluencia, denominado $\bar{\sigma}$. En la Figura 1 se puede apreciar la superficie de carga y de fluencia propuestas en el modelo de [4], ambas graficadas en el mismo plano $q - p'$ y con un origen homólogo para ambas superficies. Se asume que \bar{p}'_c experimenta endurecimiento isotrópi-



co con cambios en s como también deformaciones volumétricas plásticas similares a las que mencionan Loret y Khalili [4], [10]. Para suelos colapsables el endurecimiento por succión ocurre como resultado de un incremento en \bar{p}'_c más rápido en comparación con \bar{p}' durante un aumento en la succión del suelo.

Modelo de Zhou y Sheng

Zhou y Sheng [5] proponen un modelo basado en la ecuación de Bishop para suelos no saturados. El modelo es capaz de reproducir el comportamiento mecánico típico de los suelos saturados en lo que se refiere a la variación de densidad inicial (o relación de sobreconsolidación), sin ningún otro tipo de parámetros más allá de los requeridos por el modelo modificado Cam-clay [6]. El modelo se extiende desde las condiciones de suelo saturado a condiciones no saturadas al utilizar el término de esfuerzos por saturación para simular el comportamiento hidromecánico totalmente acoplado de suelos compactados con diferentes densidades iniciales. La superficie de fluencia, superficie de subcarga y las correspondientes reglas o módulos de endurecimiento se generan primero en el espacio del esfuerzo efectivo medio de Bishop, el esfuerzo desviador y el grado efectivo de saturación $p' - q - S_e$. Al contrario que la mayoría de los modelos comunes donde la succión se usa como el tercer eje además del esfuerzo efectivo medio y el esfuerzo desviador, este modelo usa el grado efectivo de saturación como el tercer eje. Incluye una superficie de colapso bajo carga (LCYS) similar en forma a la del Modelo Básico de Barcelona, pero escrita en términos del grado efectivo de saturación. El índice de compresibilidad también depende del grado efectivo de saturación del suelo.

El modelo usa una regla de endurecimiento isotrópico común para la superficie de fluencia. Para el modelo hidráulico se emplea una ecuación de Van Genuchten modificada, que incluye la influencia del cambio de volumen en las curvas de retención de agua

en el suelo (SWRC). Los ciclos de secado y humedecimiento se pueden simular utilizando el modelo hidráulico [7]. La relación de vacíos inicial se considera como una variable clave para el comportamiento del suelo. Se requiere de dos parámetros de ajuste para el acoplamiento hidromecánico, además los fenómenos de endurecimiento por succión y el cambio de la ICVL y CSL con succión no se incluyen directamente en el modelo.

Tabla 2. Lista de Parámetros para el modelo propuesto por [5].

Parámetro		Descripción
Mecánicos	λ_0	Índice de compresibilidad elasto-plástico en suelos saturados
	κ	Índice de compresibilidad elástico en suelos saturados
	λ_d	Índice de compresibilidad elasto-plástico en suelos secos, puede ser tomado como el valor de κ si no se tienen datos disponibles
	M	Relación de esfuerzos en el estado crítico para suelos saturados
	ν	Relación de Poisson
	N en p_r	Punto de inicio de la línea de compresión normal
Hidráulicos	a_d, a_w, m, n	Límites de secado-humedecimiento (ecuación de Van Genuchten)
	b	Parámetro para comportamiento no lineal
Interacción hidromecánica	a_1	Primer parámetro de interacción hidromecánica
	a_2	Segundo parámetro de interacción hidromecánica

Este modelo requiere 13 parámetros, 6 para la respuesta mecánica del suelo, 5 para el comportamiento de la retención de agua del suelo y 2 para la interacción hidromecánica.

Superficie de fluencia

Con respecto a la modelación tanto de suelos saturados como no saturados, en especial a la interacción hidromecánica y a la transición entre el estado saturado al no saturado, se ha demostrado que las relaciones esfuerzo-saturación son más usadas que las relaciones esfuerzo-succión. Las variables constitutivas básicas para el modelo son el grado de saturación efectivo y el esfuerzo efectivo basado en la ecuación de Bishop. Distintos estudios experimentales han demostrado que el comportamiento hidráulico en suelos se rige por la succión, así como por la deformación volumétrica, debido a los esfuerzos netos. El modelo integra este último fenómeno en una función general para expresar el cambio en el grado de saturación efectivo. La deformación volumétrica causada por un cambio en la succión del suelo bajo un esfuerzo neto constante es contenida en esta función. Para calibrar algunos parámetros hidráulicos es necesario conocer la curva de retención de agua del suelo.

El modelo modificado Cam-Clay (MCC) es usado para extender la superficie de fluencia en el estado isotrópico (superficie de carga-colapso) a un estado de esfuerzos en tres direcciones. De forma análoga al modelo modificado Cam-Clay, la deformación plástica volumétrica es usada para controlar el endurecimiento de la superficie de fluencia, la cual en sí toma la forma elíptica de acuerdo con el MCC, la superficie de carga-colapso y una regla de endurecimiento. La superficie de fluencia de carga-colapso (L-C) describe la relación entre el límite elástico equivalente y el esfuerzo de fluencia en estados no saturados, la cual está controlada por el nivel de saturación efectivo (S_e) y el primer parámetro de interacción hidromecánica (α_1). La barra "-" se usa para diferenciar las variables vin-

culadas a la superficie de fluencia con las variables asociadas a la superficie de sub-carga, M es la relación de esfuerzos en el estado crítico, que se toma como una variable independiente de las condiciones de saturación y succión. Ambas superficies tanto de carga como de Fluencia son mostradas en la Figura 4.

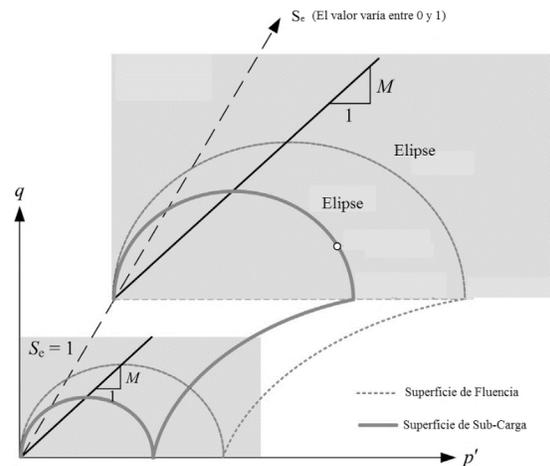


Figura 4. Superficie de fluencia propuesta por [7].

El modelo presenta una superficie de sub-carga en el plano tridimensional $p' - q - S_e$, la cual se asume que es análoga a la superficie de fluencia controlada por una función basada en la intersección entre el grado de saturación específico y el esfuerzo efectivo. La regla de endurecimiento menciona que si el punto del estado actual de esfuerzos se encuentra en la superficie compresión normal, en este caso, ni el pico de fuerza o ablandamiento ocurrirán. Si el suelo es compactado y el punto del estado de esfuerzos se encuentra debajo de la superficie compresión normal se presentará un ablandamiento. La magnitud de la fuerza máxima y el comportamiento de reblandecimiento depende del valor de la pendiente M .

Modelo de Ma y col.

El modelo se basa en una serie de observaciones experimentales para investigar el comportamiento hidráulico y mecánico de un suelo limoso compactado en condiciones no saturadas. Con estas observaciones, se pudo



establecer un modelo constitutivo elastoplástico de suelos dilatantes no saturados que es capaz de describir el efecto del acoplamiento de la histéresis de la curva de retención y la deformación plástica. Se desarrolla en el marco de la mecánica de suelos de estado crítico. Aunque tanto la histéresis mátrica, la deformación plástica de la estructura interna del suelo como su acoplamiento son de las principales preocupaciones, el modelo hace énfasis a la dilatación y ablandamiento del suelo no saturado bajo condiciones de corte.

El modelo presentado por Ma et al. [8] incorpora la ecuación de Bishop y el grado de saturación como parámetro de Bishop para calcular los esfuerzos efectivos. Este modelo está basado en la superficie elíptica del modelo modificado Cam-Clay (MCC). El modelo hidráulico Feng y Fredlund [6] se utiliza para simular los ciclos de secado y humedecimiento e incluye la dependencia de las curvas de retención suelo-agua en las deformaciones volumétricas plásticas. El modelo constitutivo usa una regla de flujo no asociada a través de un término de dilatancia. La regla de endurecimiento considera el efecto de las deformaciones plásticas volumétricas y desviadoras. La influencia de las deformaciones plásticas desviadoras se incluye por medio de un parámetro que depende del grado de saturación y succión. También considera una función de corrección que considera el efecto de endurecimiento de un material no saturado que depende del valor actual de varios parámetros como la succión, el grado de saturación y la deformación volumétrica plástica de la muestra. Este modelo no considera el cambio de la ICVL o CSL debido al endurecimiento por succión.

Superficie de fluencia

La relación esfuerzo-deformación se desarrolla a partir de la generalización del modelo modificado Cam-Clay (MCC), en el que la función de fluencia está dada por los valores de la presión de preconsolidación p_c , la cual en condiciones de total saturación es una

función de deformación volumétrica plástica y deformación desviadora plástica. Para el caso de condiciones parcialmente saturadas p_c depende de la succión matricial y el grado de saturación, así como la deformación volumétrica plástica y la deformación desviadora plástica. Por lo tanto, se sugiere aquí que la línea de estado crítico (CSL) para el caso de condiciones no saturadas es la misma que cuando el suelo se encuentra en condiciones saturadas, y la línea de falla simplemente está dada por el esfuerzo desviador q , en función de la pendiente de la línea del estado crítico M , la cual a su vez es independiente de la succión matricial o el grado de saturación.

Se ha demostrado que el suelo puede endurecerse aún más después de que ocurre la dilatación. Por lo tanto, al desarrollar una regla o módulo de endurecimiento, se debe tomar en cuenta el efecto de las deformaciones plásticas. Con base en los resultados experimentales, se puede mencionar que el suelo se vuelve más rígido cuando la succión matricial es más grande, y, por consiguiente, el efecto de endurecimiento de la deformación desviadora plástica se vuelve más evidente. Por lo tanto, aquí se propone la presión de preconsolidación inicial p_{c0} y un parámetro β definido como el coeficiente de proporcionalidad del efecto de endurecimiento por deformaciones plásticas desviadoras, el cual está en función de la succión y el grado de saturación. A partir de la función de endurecimiento propuesta, la superficie de fluencia aumenta por la disminución en el grado de saturación o por el aumento en la succión. Cuando el suelo está completamente saturado, el efecto de la capilaridad en el endurecimiento desaparece. Claramente, la función propuesta puede pasar del estado saturado al estado no saturado sin problemas, por lo que ambos estados se pueden describir en un solo marco. Además, se puede implementar numéricamente de forma directa.

Los parámetros para el modelo pueden ser divididos en tres grupos: los parámetros constitutivos convencionales, parámetros de

la curva de retención y los de acoplamiento.

Tabla 3. Lista de parámetros para el modelo propuesto por [8].

Parámetro	Descripción		
Relaciones Esfuerzo Deformación	λ	Pendiente de la línea de compresión	
	κ	Pendiente de la línea de recompresión	
	G	Módulo de corte	
	n	Parámetro adimensional que describe la contribución del parámetro de estado en la relación de esfuerzo de dilatación.	
	β_o	Coefficiente de proporcionalidad del efecto de endurecimiento por deformaciones plásticas desviadoras para suelo saturados y no saturados	
Curva de Retención Suelo-Agua	b_{DR}^0 d_{DR}^0 b_{WT}^0 d_{WT}^0	Parámetros del modelo de Feng y Fredlund	
	S_r^{irr}	Grado de saturación residual	
	c	Parámetro utilizado para describir el comportamiento	
	Acoplamiento	r m	Parámetros materiales para el endurecimiento por el efecto de no saturación
		α_{DR} α_{WT}	Parámetros para describir el efecto de la deformación en la Curva de retención Suelo-Agua

Para la calibración del modelo es necesario contar con algunos parámetros experimentales como es el caso de la curva de retención suelo-agua donde los valores de b_{DR}^0 , d_{DR}^0 , b_{WT}^0 , d_{WT}^0 son determinados por medio del proceso de adecuar la curva que más se asemeje a los datos experimentales usando

los límites de la curva de retención suelo-agua. El valor c también es obtenido al adecuar los valores numéricos con los experimentales y escoger el valor que mejor los aproxime.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo desarrollado por [3] presenta una superficie simple de fluencia en un marco del estado crítico que es adecuado para describir el comportamiento esfuerzo-deformación de una amplia gama de suelos no saturados. Esto es posible mediante el uso del concepto de esfuerzo efectivo y, específicamente, al adoptar una simple regla elástica-isotrópica. Se definieron funciones versátiles para la superficie de carga y la superficie de fluencia que pueden describir las diversas direcciones de carga de diferentes suelos. De la misma manera, se adoptó un potencial plástico ya que es adecuado para una amplia variedad de tipos de suelos, incluye un módulo de endurecimiento que toma en cuenta el endurecimiento isotrópico, debido a deformaciones plásticas y la succión. La versatilidad del modelo se destacó por su capacidad para simular con alta precisión el comportamiento esfuerzo-deformación de arcillas caoliníticas no saturadas sometidas a tres trayectorias de carga de prueba triaxial y el comportamiento esfuerzo-deformación de la arena no saturada sometida a dos trayectorias de carga de prueba triaxial y la ruta de carga de compresión oedométrica.

Por otro lado, [5] presenta un modelo constitutivo hidromecánico para suelos no saturados en varias densidades iniciales. El modelo se basa en la plasticidad de subcarga para suelos saturados y el enfoque del esfuerzo por saturación. Este modelo se reduce al modelo modificado Cam-clay si el suelo está normalmente consolidado y completamente saturado. El modelo constitutivo se propone en el espacio del esfuerzo efectivo de Bishop y el grado efectivo de saturación inicial, y la matriz de se deriva en el espacio de esfuerzos netos y saturación contra



la deformación y succión. El modelo propuesto entre las ventajas que ofrece es que es capaz de reproducir el comportamiento hidromecánico acoplado de suelos no saturados. Se introducen dos parámetros de interacción hidromecánica (a_1 y a_2) para cuantificar el efecto de la saturación en la compresibilidad de un suelo en condiciones no saturados y el efecto del cambio de volumen en la variación en la saturación. Además, se introduce una superficie de subcarga y un parámetro de endurecimiento unificado para cuantificar el efecto de densidad inicial en el comportamiento hidromecánico acoplado de suelos no saturados. El modelo requiere 13 parámetros, los cuales pueden ser fácilmente calibrados mediante pruebas de laboratorio. Las comparaciones entre las predicciones del modelo y los resultados de las pruebas para suelos no saturados y compactados a varias densidades iniciales confirman la validez del modelo constitutivo propuesto.

Mientras que para el caso de la propuesta realizada por [8] se demuestra que el factor clave que influye en la capacidad de retención de agua en un suelo es la relación de vacíos, y el estado de esfuerzos puede influir en la curva de retención suelo-agua únicamente cambiando la relación de vacíos, es decir, la deformación. Se realizó una serie de pruebas triaxiales para estudiar la resistencia y flujo de plástico con distintos valores de succión prestando especial atención en los cambios de volumen, encontrando que, durante la aplicación de esfuerzos cortantes, la deformación volumétrica se transforma de positiva (contracción) a negativa (dilatación). Se propone un modelo elastoplástico que acopla el comportamiento hidráulico y mecánico de los suelos no saturados en el marco del estado crítico del suelo. El modelo introduce el parámetro de estado en la relación de dilatación para dar cuenta del efecto de las condiciones iniciales incluida la relación de vacíos, estado de esfuerzos y condiciones de saturación. El comportamiento del mismo suelo con diferentes condiciones iniciales puede ser simulado usando solo un

conjunto de parámetros del material. Se propone una regla de flujo no asociada, similar a la deducida del comportamiento de la arena, y a su vez el predecir la deformación del volumen durante el proceso de corte basado en experimentación en suelos limosos.

El modelo introduce la curva de retención suelo-agua no sólo para describir la histéresis capilar en los suelos no saturados que experimentan arbitrariamente en los ciclos de humedecimiento-secado, sino también para caracterizar el efecto de la historia hidráulica en la deformación de la estructura interna del suelo a través de una función de endurecimiento. La regla de endurecimiento de la presión de preconsolidación considera el efecto de la deformación plástica y el efecto de la succión matricial en la dilatación. También se tiene en cuenta el efecto de la deformación plástica sobre la curva de retención suelo-agua. De acuerdo con la simulación de los resultados de la prueba, el modelo se puede verificar para reflejar las deformaciones características de suelos limosos no saturados con una alta precisión.

La ecuación de Bishop para esfuerzos efectivos ha permitido unificar la condición de falla de los suelos no saturados en una línea para cualquier valor de succión. Con estos valores se puede obtener el parámetro λ de Bishop y de ahí el esfuerzo efectivo del suelo, sin embargo, es necesario proponer una ecuación para la deformación volumétrica que utilice pocos parámetros y sea capaz de reproducir los aspectos principales del comportamiento volumétrico de los suelos no saturados, tales como la denominada rigidez por succión, la cual sucede al aumentar la succión en el suelo cuando se somete a incrementos del esfuerzo medio neto así como su posterior reblandecimiento ante cargas elevadas, su rápida estabilización volumétrica bajo incrementos de succión y su posterior comportamiento elástico a altas succiones. Además, el uso de los esfuerzos efectivos facilita la representación del comportamiento volumétrico de los suelos al igual que el estado crítico de muestras suje-

tas a distintas húmedas, lo que genera diferentes valores de succión como una familia de líneas paralelas que muestran la misma pendiente. La ecuación podría conformar un marco teórico unificado para el comportamiento de los suelos tanto saturados como no saturados. Los modelos elastoplásticos basados en el principio de los esfuerzos efectivos de Bishop buscan integrar el fenómeno del acoplamiento hidromecánico y deben acoplarse con un modelo basado en el estado crítico y así sea posible simular el comportamiento hidráulico del suelo.

Aunque existen varios modelos que buscan reproducir el comportamiento de los suelos no saturados, no todos son capaces de simular ciertas particularidades de estos materiales. En los últimos años se han desarrollado modelos que consideran una superficie de fluencia que crece de forma isotrópica, sin embargo, experimentalmente se ha demostrado que no sucede así.

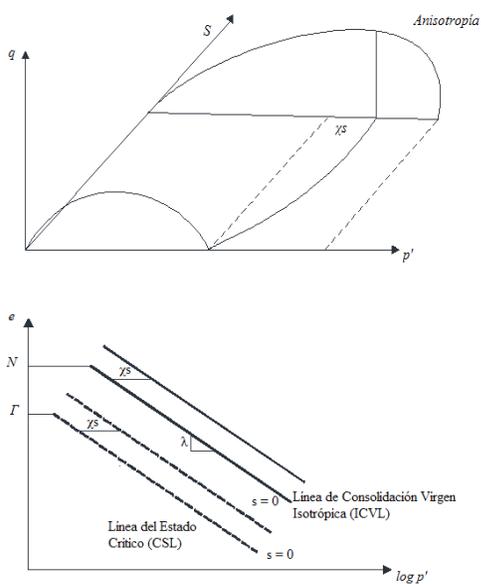


Figura 5. a) Crecimiento isotrópico de la superficie de fluencia. b) Desplazamiento de la línea del estado crítico en función del valor de la succión y el parámetro de bishop.

Existe un potencial de deformaciones plásticas que toma la forma de la superficie de fluencia que se muestra en la Figura 5a, donde se grafica el espacio $q - p' - s$. El tamaño

de la superficie de fluencia depende de la succión y del esfuerzo de preconsolidación. También se ha demostrado que cuando el suelo se encuentra en estado crítico y la succión del suelo aumenta, la línea del estado crítico se desplaza en función del valor de la succión como se muestra en la Figura 5b.

Esto implica que el endurecimiento de la superficie de fluencia en los modelos para suelos no saturados debe ser de tipo anisotrópico para tomar en cuenta el desplazamiento de la línea del estado crítico con la succión, es decir, la superficie de fluencia debe cambiar de forma conforme crece la succión.

CONCLUSIONES

La modelación en suelos no saturados plantea establecer una mecánica de suelos general con la que podamos predecir el comportamiento general de los suelos. Estos modelos deben utilizar pocos parámetros y deben ser aplicables a todo tipo de suelos, sin limitaciones asociadas a sus condiciones de saturación. La modelación ha tenido un importante crecimiento en los últimos años al incluir los fenómenos de endurecimiento por succión, el acoplamiento hidromecánico y la histéresis de las curvas de retención, los cuales nos han ayudado a mejorar notablemente los resultados, sin embargo, algunos modelos involucran muchos parámetros que pueden llegar a ser hasta 40 e incluso algunos de éstos a su vez requieren ser calibrados previamente. Esto último complica su aplicación práctica. Por lo tanto, todavía es una tarea pendiente el establecer modelos sencillos que utilicen pocos parámetros.

Además, se debe asegurar que se mantenga la simetría de la matriz de rigidez en los modelos constitutivos ya que resulta bastante ventajoso para el análisis basado en el método de elementos finitos. En la sección de resultados y discusión son establecidas las bases para un modelo que incluya una superficie de fluencia que adopte diferen-



tes formas (endurecimiento anisotrópico) y la condición del desplazamiento del punto del estado crítico en la superficie de fluencia, debido al fenómeno de endurecimiento por succión, así como una matriz de rigidez simétrica y el uso de pocos parámetros.

REFERENCIAS

[1] Bishop A.W. y Donald I.B. "The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus", *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech.*, Paris I: 13-21. 1961.

[2] Roscoe, K.H. & Burland, John. On the Generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clays. 1968.

[3] Russell A. R., Khalili N. "A unified bounding surface plasticity model for unsaturated soils." *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, pp 181-212, 2006.

[4] Loret B, Khalili N. "An effective stress elastic-plastic model for unsaturated porous media." *Mechanics of Materials*; 34:97-116, 2002.

[5] Zhou A and Sheng D. "An advanced hydro-mechanical constitutive model for unsaturated soils with different initial densities." *Computers Geotech*; 63: 46-66, 2015.

[6] Feng M and Fredlund DG. "Hysteresis influence associated with thermal conductivity sensor measurements". *52nd Canadian Geotechnical Conference and Unsaturated Soil Group, Proceedings from Theory to Practice of Unsaturated Soil Mechanics*, Can Geotech Soc, Richmond BC, Canada; 651-657, 1999.

[7] Sheng D and Zhou A. "Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils." *Can Geotech J*; 48: 826-840, 2011.

[8] Ma T, Wei C, Wei H and Li W. "Hydraulic and mechanical behavior of unsaturated silt: experimental and theoretical characterization." *Int J Geomech*; 16(6): D4015007:1-13, 2015.

[9] Wheeler SJ, Sivakumar V. "An elastoplastic critical state framework for unsaturated soil." *Geotechnique*, pp 35-53, 1995.

[10] Loret B, Khalili N. A three-phase mo-

del for unsaturated soils." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*; 24:893-927, 2000.

[11] Russell AR, Khalili N. "A bounding surface plasticity model for sands exhibiting particle crushing." *Canadian Geotechnical Journal*, pp 1179-1192, 2004.

[12] Roscoe KH, Burland JB. On the generalised stress-strain behavior of 'wet' clay. In: Heyman J, Leckie FA, editors. *Engineering plasticity*. Cambridge, England: Cambridge University Press; p. 535-609, 1968.