

Nuevas tendencias en la Mecánica de suelos

Tatiana Dranichnikova
Ingeniería Civil
UPS-QUITO



En la Mecánica de Suelos de hoy existen muchas novedades tecnológicas, en lo que se refiere a métodos de cálculo y en los aparatos y equipos para los ensayos. A partir de los años ochenta comienzan a aplicarse técnicas del problema inverso o de la estimación paramétrica en el campo de la geotecnia y la mecánica de rocas. Surgen grupos que se dedican sobre todo al estudio y programación de algoritmos y a su aplicación a casos sintéticos, y grupos que se centran más en resolver problemas y casos prácticos. A partir de los años noventa, la aplicación de las técnicas del problema inverso comienza a extenderse a multitud de campos relacionados con la mecánica de suelos y la mecánica de rocas. Desde una nueva perspectiva, Robles en el año 2001 ha desarrollado un modelo constitutivo de estructura matemática sencilla y consistente, que permite mejorar el conocimiento del comportamiento de los suelos y aplicar técnicas numéricas avanzadas a problemas geotécnicos.

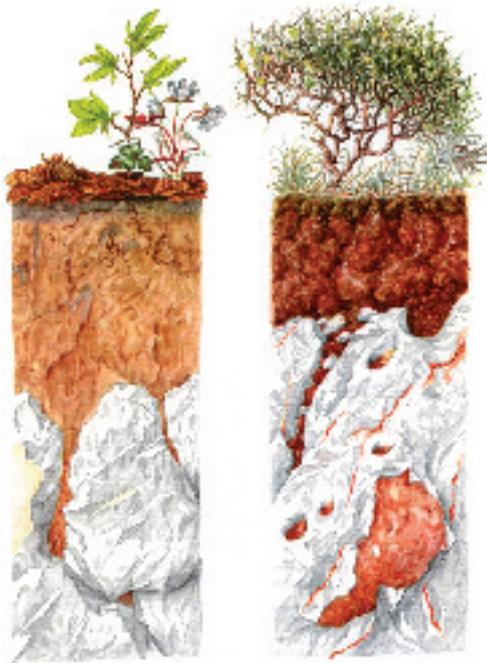
Sobre todo, se desarrollan los parámetros de una nueva ley de comportamiento para suelos no saturados, basada en los modelos constitutivos elastoplásticos, que describen el comportamiento deformacional y el estado de rotura para cualquier trayectoria tensional de los suelos parcialmente saturados, utilizando tales variables como tensión neta, que es la tensión total menos presión de aire de poros: $p = \sigma - u_a$; succión: $s = u_a - u_{wi}$; tensión desviadora ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) y grado de saturación (S_r).

Aunque, desde los años cincuenta, se han dado algunos pasos en el estudio de los suelos no saturados, este todavía está en el proceso de desarrollo.

Cuando el grado de saturación del suelo es muy cercano a 1 (suelo saturado) se puede utilizar el principio clásico de tensiones efectivas de Terzagui. Pero, debido a la complejidad de los fenómenos físico-químicos que tienen lugar en suelos subsaturados, el estudio experi-

mental de estos suelos requiere técnicas más sofisticadas que las utilizadas normalmente en los suelos saturados. En la práctica geotécnica se encuentran numerosos materiales, que presentan más de dos fases en su composición: poros rellenos de agua, poros rellenos de aire y partículas sólidas: son suelos parcialmente saturados, que se encuentran con mucha frecuencia en la naturaleza en regiones áridas y semiáridas y acarrear muchos problemas de diseño. Existe una gran diversidad de este tipo de suelos; muchos de ellos con características y comportamientos particulares, problemáticos, especiales, no convencionales, como son: las arcillas potencialmente expansivas muy plásticas (con expansiones y retracciones en ciclos de mojado y secado), depósitos aluviales, suelos colapsables (loes), suelos residuales, suelos coluviales, eólicos, suelos compactados, rellenos de escombros, etc. Estos suelos están sujetos a cambios de humedad de origen natural (variaciones climáticas) o artificial (actividad humana), que causan importantes modificaciones en su capacidad portante (resistencia y deformabilidad). Por ello, es preciso comprender el comportamiento geotécnico de este tipo de suelos no saturados a fin de poder predecir, prevenir y minimizar accidentes naturales (inestabilidad de taludes, procesos de erosión y asentamientos).

Gran parte de los comportamientos que experimenta un suelo parcialmente saturado están relacionados con la deformación volumétrica al modificar el grado de saturación, debido a la influencia de la succión en su comportamiento. La medida de succión en un perfil del subsuelo es de gran utilidad y ayuda, para poder identificar fenómenos tales como la expansión (hinchamiento) o el colapso (colapso es mayor para el suelo con mayor succión inicial), ya que muestra, en qué dirección el agua del subsuelo está migrando. Y con ello se puede decidir, cómo se debe seguir, para hacer las correcciones respectivas.



Por ello se vio la necesidad de desarrollar un análisis geotécnico, donde el comportamiento mecánico de los suelos no saturados es fundamental en el diseño de obras y actuaciones de ingeniería civil como las cimentaciones, la construcción de terraplenes, presas de tierra y suelos compactados. Es de mucha importancia, en el sentido de contribuir a mejorar la seguridad, calidad, confiabilidad y eficiencia de la infraestructura, de reducir los costos de mantenimiento de las grandes obras ya existentes y de optimizar los

trabajos necesarios para el proyecto y construcción de nuevas obras, tomando en consideración los impactos en la sociedad y en el medio ambiente.

Ante esta situación, en el estudio del suelo parcialmente saturado muchos problemas trae la influencia de nuevas variables de esfuerzos, como la succión, que puede afectar considerablemente al comportamiento de estos suelos; los fenómenos de histéresis, respecto a los cambios de humedad; los fenómenos acoplados hidromecánicos y los flujos no lineales de compleja solución para los suelos con tres fases (sólida, líquida y gaseosa), donde se involucra una variable como es la permeabilidad con un rango grande de valores que dependen del grado de saturación, y otros aspectos del comportamiento de los suelos no saturados. El caso no saturado plantea mayores problemas de tratamiento, donde no ha sido posible la aplicación del principio de los esfuerzos efectivos tal y como se lo realiza para el caso saturado. Por eso, dentro de los estudios y proyectos geotécnicos todavía se mantiene la aplicación de la teoría de los suelos saturados basada en la teoría de estado crítico.

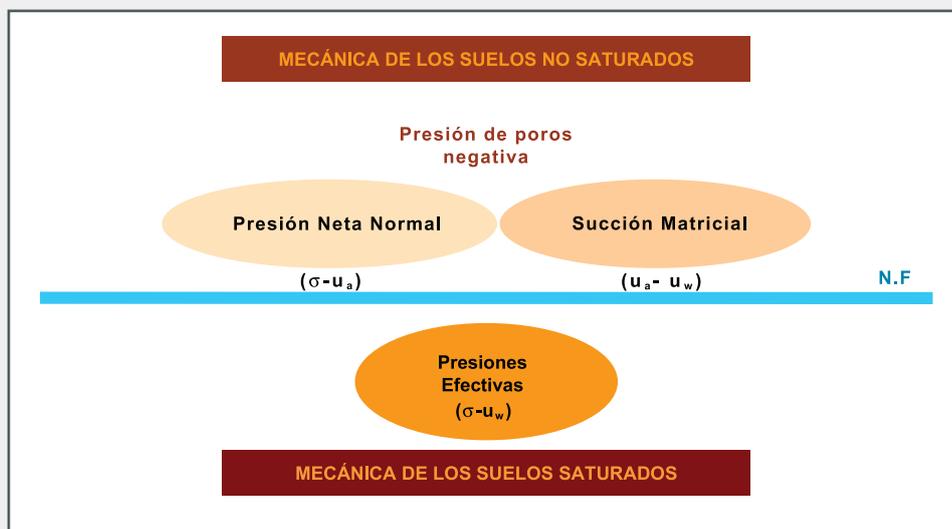
En los suelos húmedos los poros de aire están interconectados y, si el suelo se encuentra en equilibrio y en contacto con la atmósfera, se considera que la presión



del aire será la atmosférica y la presión del agua va a ser negativa.

La succión (s) está compuesta por la succión matricial (s_m) y succión osmótica (s_o) y se refiere a mayor o menor tendencia del suelo a absorber el agua. Algunos investigadores (D.G.Fredlund) consideran, que la succión matricial es suficiente para describir el comportamiento del suelo: $s_m = u_a - u_w$.

Así que, el término succión se aplica para designar la diferencia entre la presión de aire (u_a) y la presión del agua (u_w). La succión ejercida por un suelo se define mediante el llamado índice de succión pF, que es el logaritmo en base 10 de la succión expresada en centímetros de agua. El pF puede variar entre 0 y 7 (7 corresponde a una arcilla desecada a 110 °C), decreciendo para un mismo suelo al aumentar la humedad. La succión viene



definida por la geometría de los poros. En suelos saturados la succión es nula, pero en suelos completamente secos la succión puede tener valores hasta 1'000.000 kPa.

La succión incrementa la resistencia al corte de los suelos (aunque no es indefinido, sino que alcanza un valor límite), estabiliza los suelos, dándoles la resistencia por tensión superficial.

Aunque, también es conocida la influencia de las sales disueltas en el agua que aportan los cationes a la capa doble difusa alrededor de las partículas del suelo, lo que puede provocar las diferentes consecuencias en el comportamiento del suelo, como notables variaciones volumétricas o de resistencia. Como ejemplo, podemos citar, que Skempton y

Northey (1952) indican que la reducción de sales en el agua intersticial puede provocar altas sensibilidades en el suelo, con la consecuencia de la inestabilidad de grandes masas de terreno. Es un fenómeno a tener muy en cuenta, cuando se trata con suelos parcialmente saturados, porque ya hay ejemplos de presas de tierra construidas con un suelo estable con su propia tensión superficial, pero que han fallado cuando se han llenado con agua que tenía iones incompatibles.

A medida que disminuye la succión, la deformabilidad del suelo aumenta. La relación succión – humedad (o succión - grado de saturación) desempeñan un papel importante en la caracterización del suelo parcialmente saturado. A mayor humedad o grado de saturación menor será la succión para un mismo



índice de poros y la curva de esta relación se obtiene mediante ensayo de la succión controlada.

Cuando se presentan pequeños valores de succión, el contenido de agua en el suelo depende prácticamente de la estructura del suelo, del efecto capilar y distribución de los poros dentro del suelo. El suelo retiene el agua con una energía variable; esta fuerza depende de la cantidad de agua retenida y de la superficie de las partículas sólidas. Para una cantidad de agua determinada, la fuerza de succión es tanto mayor, cuanto más fina es la granulometría.

Pero, al presentarse el valor grande de succión, o sea cuando el agua es prácticamente adsorbida a las partículas, la importancia de la textura y de la superficie específica del material es superior a la estructura. Esto puede explicar, que al mismo valor de la succión el contenido de humedad de arcillas es superior a los limos y arenas.

El estudio geotécnico específico de suelos no saturados comenzó en muchos centros de investigación mundiales con la adaptación de las nuevas técnicas de ensayo de suelos en los equipos edométricos. Estos equipos fueron perfeccionando con la modificación de las técnicas

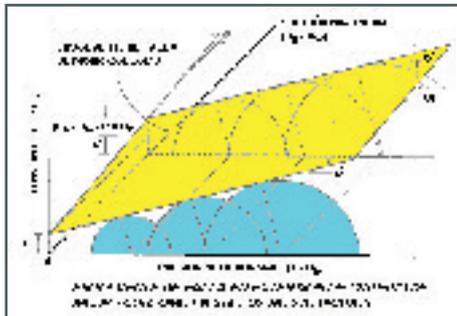
de control de succión (técnica osmótica, control de humedad relativa) y ampliando el número de parámetros a medir (deformación y presión lateral, entrada y salida de agua, temperatura). Siguen desarrollándose también los equipos para la realización de los ensayos de corte y triaxiales con succión controlada, los que permiten la medida y control de la presión de agua y de aire, y medida independiente de los cambios volumétricos de agua y de la probeta. El control de la succión se realiza aplicando el principio de traslación de ejes que se fundamenta en la hipótesis de que cuando se establece una succión dada, incrementar la presión de aire es equivalente a disminuir en la misma proporción la presión de agua. Igualmente, se utiliza la aplicación de la succión mediante la técnica osmótica, técnica de equilibrio de vapor y medida simultánea de la succión mediante psicrómetros.

En 1978, Frenlund D.J. *et.al.* propusieron la ecuación de resistencia al corte de los suelos no saturados:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)tg\phi' + (u_a - u_w)tg\phi^b$$

donde $(\sigma - u_a)$ es la tensión neta, exceso de presión total sobre la presión de poro de aire; $(u_a - u_w)$ es la succión; c' y ϕ' son la

cohesión y el ángulo de fricción (con respecto al esfuerzo efectivo) a una condición saturada y φ^b es el ángulo de fricción interna con respecto a la succión y sus valores no son constantes para un tipo de suelo dado.



Teóricamente, si la succión se incrementa indefinidamente, el suelo debe alcanzar finalmente un estado seco y la ecuación arriba mencionada será reducida a la relación de Mohr–Coulomb para suelos secos. Para satisfacer esta condición φ^b debe aproximarse a cero o sea a valores muy altos de succión.

De los estudios experimentales los investigadores dedujeron: que la resistencia al corte está controlada por la humedad relativa; se presenta mayor resistencia cuanto menor es la humedad relativa. En las deformaciones volumétricas obtenidas se observó que la dilatancia

disminuye apreciablemente cuando el material tiene mayor contenido de humedad. De los resultados también se concluyó que existe una dependencia directa del incremento de rotura de partículas con el aumento del contenido de humedad. Por otro lado, se verificó la posibilidad de que el material alcanzase el estado crítico; se observó que en la mayoría de los ensayos se alcanzó esta condición y en otros existe la tendencia. Se encontró además, que la posición de la línea de estados críticos esta controlada por la succión que posee el material.

BIBLIOGRAFÍA

- Zeballos M. E. Aplicaciones de la mecánica de los suelos no saturados.
- Alonso E. Y Lloret A. Comportamiento de suelos parcialmente saturados.
- Barrera B. M., Garnica A. P., Martínez R. F. Influencia de la succión en los cambios volumétricos de un suelo compactado. Publicación Técnica No. 238 Sanfandila, Qro, 2004.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons, INC., New York. 1993
- Robles S. J. Un modelo de deformabilidad para suelos no saturados. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2001
- Jiménez Salas J.A. Geotecnia y Cimientos I. Editorial Rueda. Madrid.

