

MODELADO NUMÉRICO AVANZADO DE ARCILLAS BLANDAS ESTRUCTURADAS

MIGUEL MÁNICA, ANTONIO GENS, EFRAÍN OVANDO, EDUARDO BOTERO Y JEAN VAUNAT

El comportamiento de las arcillas blandas depende, en buena medida, del tiempo donde los factores que lo determinan son la velocidad de carga, la relajación de esfuerzos, el envejecimiento y las deformaciones diferidas bajo carga constante (creep). Además, algunos materiales, como la arcilla de la Ciudad de México, exhiben una considerable estructuración permitiendo relaciones de vacíos mucho mayores a las del material reconstituido para un mismo nivel de esfuerzos. Sin embargo, bajo carga mecánica, dicha estructura se degrada progresivamente, así, la curva de compresibilidad del material tiende a converger a la curva de un suelo reconstituido (Figura 1). En este trabajo, se propone un marco de referencia para la modelación de arcillas blandas que, de forma natural, reproduce las características de estos materiales que ya se mencionaron.

Se parte de la teoría de la elastoplasticidad clásica, que es independiente del tiempo. El modelo base se define a través de sus componentes principales, i.e. la ley elástica, las funciones de fluencia y potencial plástico, así como la ley de endurecimiento. A manera de ejemplo, se parte aquí de un modelo Cam Clay Modificado (MCC), aunque pueden utilizarse otras componentes. En el caso del MCC, la superficie de fluencia toma la siguiente forma:

$$f = \left(\frac{J}{p f_d(\theta)} \right)^2 - \left(\frac{p_c}{p} - 1 \right) = 0 \quad (1)$$

donde J es la raíz cuadrada del segundo invariante del tensor de esfuerzos (componente desviador), p es el esfuerzo medio, $f_d(\theta)$ es una función que define la forma de la función en el plano desviador, y p_c es una variable de estado que controla el tamaño de la elipse, por tanto, actúa como un esfuerzo de preconsolidación isotrópico. Siguiendo a Gens y Nova (1993), el efecto de la estructuración puede incluirse en la Ecuación 1 reemplazando a p_c por p_{co} , definido como:

$$p_{co} = p_c(1 + b) \quad (2)$$

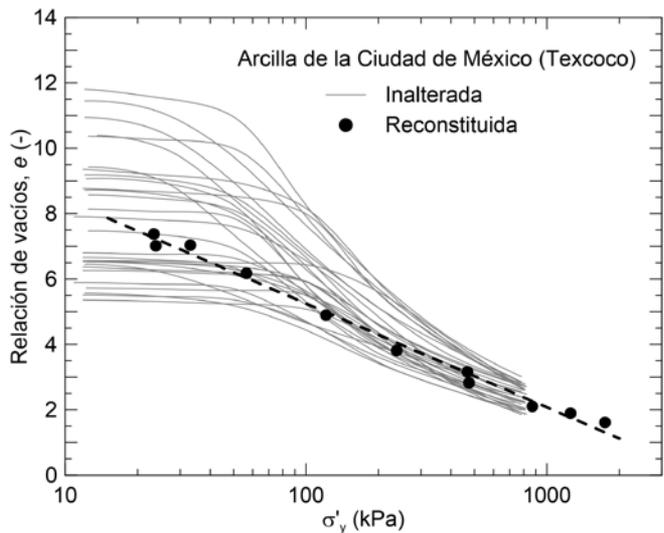


Figura 1. Pruebas de consolidación en arcilla de la Ciudad de México inalterada y reconstituida

donde b es una variable que determina el grado de estructuración. Esto resulta en la expansión de la superficie de fluencia, donde nuevos estados de esfuerzos son permitidos debido a la estructura del suelo. La nueva variable de historia p_{co} dependerá de dos efectos que compiten entre sí: uno relacionado al estado de la superficie de fluencia de un suelo desestructurado, y el otro relacionado con el grado de estructuración. La estructura se degrada ante carga mecánica, por tanto, la evolución de b dependerá de la acumulación de deformaciones plásticas.

El comportamiento en el tiempo se basa en la descomposición aditiva de la deformación de la Ecuación 3, conocida como *partición plasticidad-creep*, donde se consideran dos componentes inelásticas de deformación.

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^{vp} + d\epsilon^c \quad (3)$$

donde ϵ , ϵ^e , ϵ^{vp} y ϵ^c son los tensores de deformaciones totales, elásticas, viscoplásticas y de creep respectivamente. La primera componente inelástica se caracteriza con la teoría del sobre esfuerzo de Perzyna (1966), resultando en:

$$d\epsilon^{vp} = \frac{\langle \Phi(f) \rangle}{\eta} \frac{\partial g}{\partial \sigma} dt \quad (4)$$

donde η es un parámetro de viscosidad, Φ es la función de sobre esfuerzo, g es la función de potencial plástico, σ es el

tensor de esfuerzos, y t es el tiempo. La Ecuación 4 resulta en una dependencia con la velocidad de carga, obteniendo el incremento de resistencia aparente que se observa en laboratorio al aumentar la velocidad de deformación. La segunda componente representa un mecanismo de creep, que considera la ocurrencia de deformaciones plásticas bajo carga constante. Éste se define como:

$$d\epsilon^c = \dot{\epsilon}^c dt \quad (5)$$

donde $\dot{\epsilon}^c$ es el tensor de velocidad de deformación de creep, cuya definición específica se determina en función de observaciones experimentales del material considerado. Aunque la Ecuación 3 define a las deformaciones por creep como una componente adicional, éstas no son independientes ya que se consideran efectos de endurecimiento acoplado. Lo anterior se incorpora definiendo la evolución de p_c como la suma de las deformaciones viscoplásticas y de creep:

$$dp_c = \frac{\partial p_c}{\partial \epsilon^{vp}} d\epsilon^{vp} + \frac{\partial p_c}{\partial \epsilon^c} d\epsilon^c \quad (6)$$

La Ecuación 6 permite incluir el efecto del envejecimiento de la arcilla, es decir, el incremento del esfuerzo de preconsolidación después de periodos prolongados bajo carga constante.

En las Figuras 2 y 3 se muestran algunos resultados seleccionados, de la simulación de pruebas oedométricas, usando un modelo constitutivo basado en las ideas presentadas aquí. En la Figura 2a se observa cómo todas las pruebas, sin importar su estado inicial, convergen a una única curva a grandes esfuerzos que corresponde con el comportamiento del suelo reconstituido (o intrínseco). En la Figura 2b se observa cómo se obtienen curvas de compresibilidad únicas dependiendo de la velocidad de deformación, comportamiento que se ajusta al concepto de las isotacas de Šuklje (1957). Finalmente, en la Figura 3 se observa el efecto de envejecimiento, donde se genera preconsolidación durante el incremento de carga de larga duración.

Independientemente de los componentes específicos empleados (i.e. el modelo elastoplástico base, la función de evolución de b , la función de sobreesfuerzo, o la ley de creep), la formulación resulta naturalmente en los comportamientos dependientes del tiempo mencionados. Además, toma en cuenta el efecto de la estructura inicial del suelo y su desestructuración debido a carga mecánica. Por tanto, este planteamiento innovador representa una potente herramienta para el desarrollo de modelos avanzados de comportamiento de arcillas blandas, como la arcilla de la Ciudad de México. |

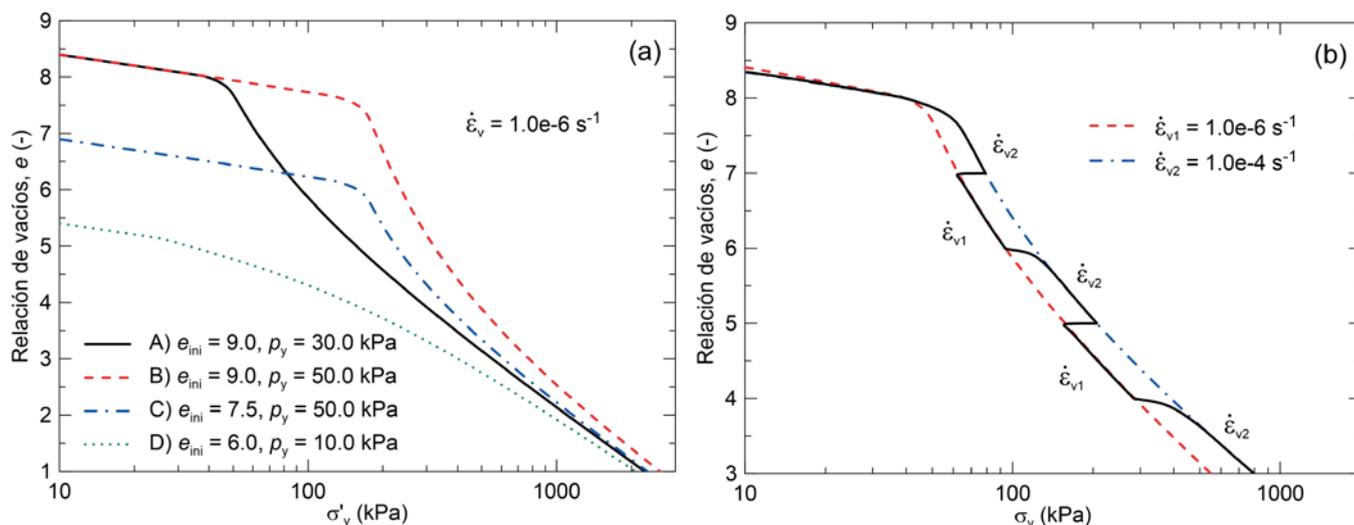
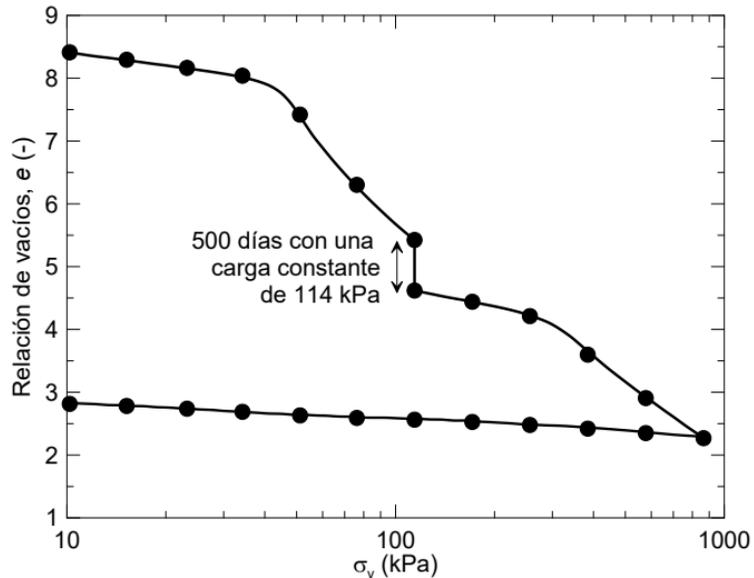


Figura 2. Resultados de la simulación de pruebas oedométricas con control de deformación (a) con diferentes esfuerzos de preconsolidación y relaciones de vacíos iniciales, y (b) a diferentes velocidades de deformación

COORDINACIÓN DE GEOTECNIA



Referencias

- Gens, A. y Nova, R. (1993). "Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks". Proceedings of the international conference on hard soils-soft rocks, A. G. Anagnostopoulos, ed., Rotterdam: Balkema, Athens, 485-494.
- Perzyna, P. (1966). "Fundamental Problems in Viscoplasticity". Advances in Applied Mechanics, 9, 243-377.
- Šuklje, L. (1957). "The analysis of the consolidation process by the isotache method". 4th International conference on soil mechanics and foundation engineering; London, 200-206.

Figura 3. Resultados de la simulación de una prueba de consolidación con un incremento de carga de larga duración