

# MÉTODOS HIPERBÓLICO Y ASAOKA, OTROS USOS. CASO DEL EQUILIBRIO DE LA HUMEDAD DE SUELOS NO SATURADOS. TEORÍA

Hyperbolic and Asaoka's methods, other uses. Case of water content equilibrium of unsaturated soils. Theory.

Miriam Martín Ruiz<sup>a</sup>, Enrique Asanza Izquierdo<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Escuela de Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

<sup>b</sup> Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), España.

**RESUMEN** – Este artículo muestra las posibilidades de aplicación del método hiperbólico y el de Asaoka en problemas geotécnicos de predicción. Una de ellas consiste en la predicción del valor final de la humedad si se ha determinado una serie de valores temporales de ésta durante el lento proceso de equilibrado a lo largo de la altura de una muestra de suelo al imponer una succión constante en su base. Se muestra que este proceso se rige por una ecuación análoga a la de consolidación (ámbito tradicional de ambos métodos). En rigor, ambos fenómenos obedecen a la ecuación de la difusión, si bien el parámetro físico clave de un flujo no saturado no es el coeficiente de consolidación, sino la difusividad hidráulica,  $D(\theta)$ , que no tiene por qué ser constante. Partiendo de este ejemplo, con el que la utilidad de los métodos antedichos se muestra en un segundo artículo, también se señala su aplicabilidad tanto en otros fenómenos de difusión, tales como problemas térmicos o transporte de contaminantes, como en ensayos de campo o laboratorio que miden procesos que tienden a una asíntota (carga de pilotes o ensayos presiométricos, por ejemplo). Para ello, este artículo ahonda en los fundamentos de los métodos hiperbólico y de Asaoka e indica los tipos de problemas geotécnicos en los que se ha empleado con éxito. Estos métodos predictivos, en definitiva, permiten reducir extraordinariamente los tiempos del ensayo, y lo que es más importante, reducir los riesgos de que un ensayo prolongado se malogre.

**ABSTRACT** – This paper shows the potential applications of the hyperbolic and Asaoka's method for prediction in geotechnical problems. One application refers to the prediction of the equilibrium water content when a number of this parameter have been previously measured over the slow process of along the height of the soil sample whose base is subjected to a certain suction. It is shown that this phenomenon is governed by an equation just as the consolidation equation (classical scope of both methods). Strictly speaking, both phenomena hold the equation of diffusion and that in the case of an unsaturated flow, the coefficient of consolidation is not the key physical parameter, but the hydraulic diffusivity,  $D(\theta)$ , that need not be constant. The previous example, with which the usefulness of the aforementioned methods are proven in a subsequent paper, helps to highlight their suitability for any other phenomena of diffusion, such as thermal problems and transport of contaminants, as well as for those laboratory or field tests that tend to asymptotic values (pile load or pressimeter tests, for instance). Thus, this paper insightfully addresses the principles of the hyperbolic and Asaoka's method and points out those geotechnical problems in which they have been successfully applied. Both predictive methods are ultimately meant to extraordinarily save time of testing, and most importantly, to reduce the failure likelihood of an extended test.

**Palabras Clave** – Predicción, suelos no saturados, humedad de equilibrio.

**Keywords** – Prediction, unsaturated soils, equilibrium water content.

---

E-mails: miriam.martinr@alumnos.upm.es (M. Martín Ruiz), enrique.asanza@cedex.es (E. Asanza Izquierdo)

## 1 – INTRODUCCIÓN

Algunos ensayos físicos consisten en provocar una perturbación a un sistema en equilibrio que da lugar a un régimen transitorio hacia otro nuevo equilibrio, a fin de cuantificar la relación entre la intensidad de la perturbación y el cambio de algún parámetro entre los dos estados de equilibrio. Suele interesar medir también magnitudes que gobiernan el régimen transitorio. El ensayo de consolidación en edómetro constituye un paradigma de ello en geotecnia. Pese a tener la apariencia de un flujo de agua, en rigor, obedece a la ecuación de la difusión. El presente artículo aborda un ensayo geotécnico más inusual, gobernado básicamente por esa misma ecuación: el equilibrado de la humedad de una muestra al imponer en su base una succión constante. Estos ensayos se emplean para obtener la curva característica de un suelo, indispensable en los estudios de suelos no saturados.

Implementar técnicas de prognosis o predicción del asiento final en un edómetro convencional aporta pocas ventajas, por cuanto cada escalón de carga no suele demorarse mucho más de un día. En cualquier caso, se recurre a ellas para hallar el coeficiente de consolidación como alternativa a los métodos clásicos (Casagrande o Taylor), e incluso para discriminar la consolidación primaria de la secundaria. La prognosis de asientos de consolidación tiene mucha más relevancia en obra, por las incertidumbres ligadas al cambio de escala: los asientos diferidos pueden conducir a incumplimientos de los plazos de la obra o a la aparición de asientos inadmisibles una vez en servicio.

Los métodos de predicción son modelos matemáticos que hacen uso de una serie de registros tempranos del propio proceso para pronosticar su evolución. Se trata, además, de herramientas útiles para el denominado método observacional (Peck, 1969). Ha de hacerse notar que estas técnicas no son exclusivas de fenómenos que se atenúan con el tiempo (consolidación, fluencia clásica o por fracturación de granos en suelos sometidos a presiones muy altas, procesos geoquímicos, agotamiento de las sobrepresiones en los yacimientos o pozos, etc,...) sino que también tienen aplicación en problemas o experimentaciones tenso-deformacionales en medios plastificables como, por ejemplo, los registros de carga de pilotes (tanto axial como lateral), en cuyo entorno coexisten zonas pseudoelásticas y plásticas; así como en configuraciones con deformaciones de segundo orden, tales como compresiones en elementos muy esbeltos (pandeo de bulones o micropilotes) o cimentaciones fuertemente excéntricas en suelos blandos. Se comprende su utilidad especialmente en estos últimos casos, pues interesa pronosticar el valor de la asíntota, sin aproximar el experimento al umbral de fallo. Igualmente, en los procesos que se atenúan extraordinariamente con el tiempo, típico en fenómenos de difusión y térmicos, también son de gran ayuda.

El método hiperbólico, concretamente, se utiliza en geotecnia sobre todo para reproducir la pérdida de rigidez transversal ( $G$ ) de los suelos a medida que aumenta su tensión desviadora, puesto que las curvas tensión-deformación axial de los triaxiales de suelos no preconsolidados parecen aproximarse a dicha forma (Kondner, 1963; Duncan y Chan, 1970). El modelo “hardening-soil” (Schanz, 1998), implementado en diversos códigos numéricos comerciales (PLAXIS y MIDAS GTS), incluye, entre otros elementos, este modelo. Por otra parte, el método hiperbólico también proporciona resultados satisfactorios para predecir el axil último de ensayos en pilotes (método de Chin, 1970, 1972). Fleming (1992) y Borel et al. (2004) depuraron dicho método para los casos en que las dos interacciones tenso-deformaciones (la punta y el fuste), que aisladamente se asemejan a hipérbolas, se solapan.

Aunque el método hiperbólico también se emplea para hacer prognosis de los asientos finales y del coeficiente de consolidación en laboratorio (Sridharan & Rao, 1981; Sridharan et al., 1987) y en obra (Tan et al., 1991; Tan, 1995), el método de Asaoka (1978), al menos en España, ha tenido mucha más difusión.

En el presente trabajo se ha comprobado que estos dos métodos también permiten pronosticar la evolución de la humedad en ensayos de succión. Este primer artículo expone las cuestiones

teóricas, en tanto que en un segundo artículo se mostrará la validación experimental. Para ello, se tomaron ensayos de tres suelos típicos de Madrid (Jucá, 1990; Asanza, 2009); ensayos en una roca tipo "creta" muy porosa, encaminados al estudio de las desproporcionadas subsidencias de los yacimientos petrolíferos de Ekofisk, en el del Mar del Norte (Priol et al., 2005); y por último, una reciente serie de ensayos de succión con el suelo arcillo-limoso resultante de la reducción a polvo de testigos de lutitas de la formación Marcellus, (cuenca de los Apalaches, EE.UU.). Estos últimos ensayos forman parte de una línea de colaboración entre el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la ETS Caminos de la UPM y el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para caracterizar lutitas generadoras de gas (shale gas) de muy baja porosidad ( $n \approx 0,05-0,12$ ).

## 2 – MARCO TEÓRICO

### 2.1 – Succión; curva característica

Una muestra de suelo tendrá tanta más avidez por tomar agua de su entorno cuanto más seca esté. Aceptando la fórmula de la capilaridad (la ascensión del agua por un capilar es inversamente proporcional a su diámetro), serán su poros más finos los que la manifiesten de modo más intenso. Tal avidez por agua puede expresarse formalmente como un potencial, esto es, una energía por unidad de masa de agua, que en términos más prácticos, es convertible en metros (negativos) de columna de agua, y en definitiva, en una succión ( $\psi$ ). Si esos poros más finos logran captar agua del entorno y saturarse, pese a que los inmediatamente menos finos tengan algo menos de avidez, la humedad de la muestra irá aumentando hasta que la succión (avidez) de los poros más pequeños aún no saturados se equilibre con la succión del agua del ambiente exterior. En física de suelos, y por ende, en mecánica de suelos no saturados, es preferible trabajar con la humedad volumétrica ( $\theta$ ), que se define como el volumen de agua por unidad de volumen total de muestra.

Se denomina curva característica, de retención o curva succión-humedad a la relación entre la succión impuesta a una muestra ( $\psi$ ) y la humedad volumétrica ( $\theta$ ) alcanza en el equilibrio. Puede formularse como:

$$\theta = \theta(\psi), \text{ o bien } \psi = \psi(\theta) \quad (1)$$

De momento, se omitirá el hecho de que se trata de una relación histerética, con lo que pierde la biunivocidad si se suceden ciclos de humectación y de desecación.

Teóricamente, la curva característica tendría que ser totalmente equivalente a la curva de distribución de poros obtenida con un porosímetro, máxime si se concibe el suelo como una red sencilla de capilares. Sin embargo, dada la complejidad de la verdadera interacción físico-química entre el suelo y el agua (o algún otro fluido, como los procedentes de hidrocarburos), sólo hay similitud en los rangos más bajos de succión, en los que predominan las fuerzas puramente capilares. Romero y Simms (2008) señalan otros motivos de las divergencias.

Se llama *capacidad de succión* a la pérdida de humedad volumétrica al variar en un orden de magnitud la succión. Se corresponde con la pendiente de la curva característica en un gráfico semilogarítmico. Dicho valor está fuertemente correlacionado con el límite líquido (Burland, 1990; Jucá, 1990; Ho et al., 1992; Marinho, 1994; Jucá y Frydman, 1996). Otra definición muy afin es la *capacidad de humectación específica*, que es la pendiente natural de la curva característica:

$$C(\theta) = \frac{d\theta}{d\psi} \quad (2)$$

La Figura 1 ilustra los conceptos vistos en este apartado.

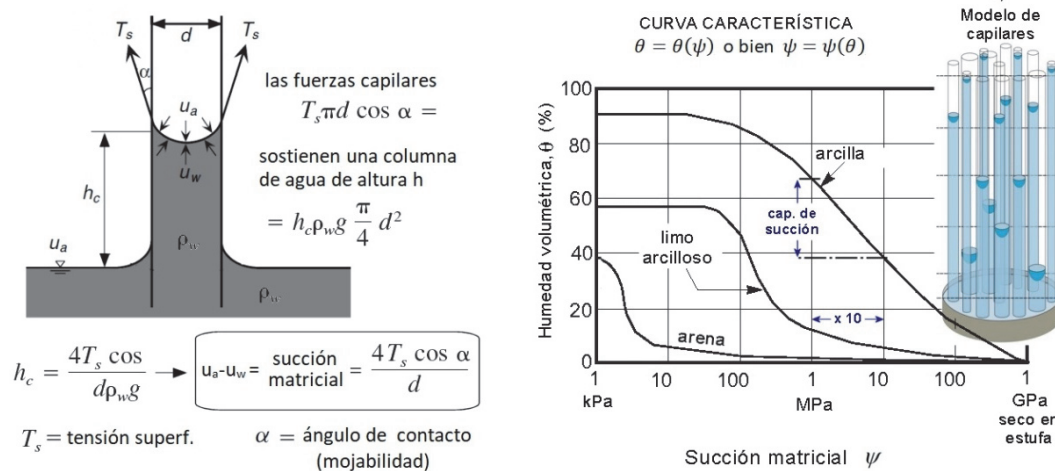


Fig. 1 – Modelo capilar aplicado a suelos (izq) y curva característica (der).

## 2.2 – Conductividad hidráulica

En un suelo no saturado ya no rige la permeabilidad como escalar, sino como una función, denominada *conductividad hidráulica*. Esto se debe a que cuando el suelo deja de estar saturado, su red de poros comienza a perder conectividad hidráulica, esto es, varía con el grado de saturación  $k = k(S_R)$ . Alternativamente, puede expresarse en función de la succión,  $k = k(\psi)$  o de la humedad volumétrica,  $k = k(\theta)$ . Como quiera que  $\theta = n \cdot S_R$ , donde  $n$  es la porosidad, si se conoce el incremento de volumen de la muestra debido a los cambios de humedad, resulta inmediato la conversión entre estas tres modalidades (Asanza, 2009).

Dada la extrema dificultad de realización de ensayos específicos de conductividad hidráulica, los investigadores han propuesto diversas funciones analíticas, todas basadas de algún modo en la integración de la curva característica, entendiendo la red porosa como capilares (modelo algo dudoso en arcillas). Las más difundidas en geomecánica son la de Brooks and Corey (1964), la de van Genuchten (1980) y la de Fredlund y Xing (1994). Puede aceptarse, en primera aproximación, que la conductividad hidráulica depende del cubo del grado de saturación (Brutsaert, 1963; Fredlund & Rahardjo, 1993; Alonso et al., 2008; Lu y Likos, 2004; Tarantino, 2010). Esto es:

$$k_{no\ sat} \approx k_{sat} \cdot (S_R^*)^3 \quad (3)$$

donde  $S_R^*$  es el grado de saturación eficaz, esto es, descontando el agua más intensamente retenida por el suelo, sin conectividad (agua residual o pendular). En ocasiones tal descuento también se aplica a la humedad volumétrica.

## 2.3 – Extensión a flujos no saturados. Información experimental

Para que haya certeza de que una muestra sometida a una cierta succión matricial haya alcanzado prácticamente su humedad de equilibrio, el ensayo suele prolongarse varias semanas. Si se trata de una muestra sometida a una succión total (matricial más osmótica), transferida desde la fuente de succión a través de la humedad del aire, los tiempos de equilibrio pueden aumentar un orden de magnitud.

El presente artículo prueba la utilidad del método hiperbólico y el de Asaoka para estimar la humedad de equilibrio (asintótica) de la muestra si se ha determinado la humedad en diferentes momentos del periodo de equilibrado. Se explicará también cómo estas técnicas contribuyen a verificar la bondad de la función conductividad hidráulica  $k = k(\theta)$ , puesto que como ya se ha explicado, no es experimental, sino teórica, mediante procedimientos de integración de la curva característica,  $\theta = \theta(\psi)$ , que sí es experimental.

Otro uso adicional de los métodos de predicción es la posibilidad de detección y corrección tanto de posibles procesos de desecación por evaporación a altas succiones o condensación (Romero, 1999; Villar, 2000; Vanapalli et al., 2008), como de errores de manipulación de la muestra.

### 3 – PLANTEAMIENTO FORMAL. LA ECUACIÓN DE RICHARDS (1931)

Al imponer en laboratorio una succión ( $\psi$ ) en la base de una muestra homogénea (su espesor es irrelevante a efectos de energía potencial:  $h=z+\psi \cong \psi$ ), se establece un flujo no saturado transitorio cuyo caudal por unidad de superficie (ascendente o descendente, según se imponga una succión menor o mayor a la inicial de la muestra) viene dado por la ecuación de Darcy:

$$q = -k(\psi) \cdot \frac{dh}{dz} \cong -k(\psi) \cdot \frac{d\psi}{dz} \quad (4)$$

Como se ve, ha de generalizarse la ecuación de Darcy con la función de conductividad hidráulica. Por otra parte, el flujo vertical establecido ha de satisfacer la ecuación de continuidad, esto es, que la variación de humedad en un elemento unitario, sea igual al balance de caudal vertical:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (5)$$

Luego, introduciendo la ecuación de Darcy (4) generalizada en la ecuación de la continuidad (5), resulta:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (6a)$$

La expresión (6a) se conoce como la ecuación de Richards (1931). Adviértase que el tiempo ( $t$ ) y la altura ( $z$ ) del punto considerado de la muestra son variables independientes, en tanto que la humedad volumétrica ( $\theta$ ) y la succión ( $\psi$ ) están ligadas a través de la ecuación (1), la curva característica. Así, la conductividad hidráulica puede expresarse en función de la humedad volumétrica,  $k = k(\theta)$ . En virtud de ello, esta expresión puede reescribirse sólo en función de la humedad volumétrica:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(\theta) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (6b)$$

Haciendo uso de la definición de capacidad de humectación específica (2), la ecuación de Richards adopta una estructura que facilita su tratamiento matemático:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k(\theta)}{C(\theta)} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] = \frac{d\theta}{dz} \left[ D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] \quad (7)$$

Si, por sencillez, se tomará  $D(\theta)$  como una constante, la estructura de la ecuación diferencial de Richards (1931) sería igual a la de la consolidación, esto es, la de un proceso de difusión (como la ecuación del calor o la ecuación de Fick), por lo que el cociente de la conductividad hidráulica entre la capacidad de humectación específica:

$$\frac{k(\theta)}{C(\theta)} = D(\theta) \quad (8)$$

sería un parámetro de difusión, que se denomina difusividad hidráulica,  $D(\theta)$ . En este caso, como no tiene por qué ser una constante, sólo se ha encontrado solución analítica con algunas expresiones sencillas de  $D(\theta)$ . El grado de variación de  $D(\theta)$  con la humedad y sus leyes de ajuste, así como algunas soluciones analíticas pueden encontrarse en los tratados de física del suelo (Hillel, 1998; Bear y Chen, 2010). De modo orientativo, en condiciones de cuasi-saturación los investigadores la cifran en  $D \approx 1 \text{ m}^2/\text{día}$ , en tanto que para el punto de marchitez (succión:  $\psi \approx 1,5 \text{ MPa}$ ), en  $D \approx 10^{-3}$  a  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{día}$ .

No obstante, aparte de los códigos comerciales que incorporan módulos transitorios con flujo no saturado (SEEP, PLAXIS, etc.), existen otros códigos numéricos gratuitos para la resolución de este problema, como por ejemplo el Hydrus-1D, desarrollado por Simunek et al. (2005). Este código también resuelve otros problemas de difusión antedichos: el de transporte de calor y de solutos.

## 4 – MÉTODOS DE PREDICCIÓN

### 4.1 – El método hiperbólico

Cuando la curva que relaciona dos variables del proceso físico que se estudia se asemeja a una hipérbola puede aprovecharse una propiedad de las hipérbolas equiláteras. Para demostrarla ha de partirse de una hipérbola cuyos ejes de referencia sean sus asíntotas, que se denominarán  $(x', y')$ . Así, basta con trasladar estos ejes y cambiar el signo a uno de ellos, siendo las nuevas asíntotas los parámetros alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), como muestra la Figura 2a. Como se ve en ella, mediante un sencillo cambio de variable ( $v=x/y$ ), los puntos de la hipérbola se pueden transformar en una recta. Merced a ello, si se tiene una serie de datos tempranos  $(x_i, y_i)$  de un experimento, al graficarse como  $(x_i; v_i=x_i/y_i)$ , la pendiente de la recta es la inversa de la asíntota buscada (Fig. 2b). Según el caso geotécnico que se estudie, dicha asíntota puede ser:

- la carga última de un pilote en función de una serie de asientos registrados (valores  $x_i$ );
- la carga última (fallo) por pandeo de un micropilote u otro elemento esbelto, en función de las deflexiones medidas;
- el asiento final a tiempo infinito de un proceso de consolidación o de fluencia;
- la humedad final de una muestra sometida a una cierta succión, que es el caso que se contrastará.

La ecuación que relaciona los dos parámetros del fenómeno no tienen por qué ajustarse a una hipérbola en todo su dominio. Concretamente, la ecuación teórica que rige la consolidación unidimensional (Terzaghi-Fröhlich) se aproxima realmente bien sólo entre el 60 y el 90 % de la consolidación global. Tales singularidades gráficas se aprovechan para obtener el coeficiente de consolidación. La Figura 2c muestra la transformación de la ecuación adimensional de la consolidación con el procedimiento de la hipérbola; si se dispone de diversos registros de asientos temporales, tras identificar al menos el valor del 60 %, por semejanza y tras el pertinente cambio de escala, puede hallarse el coeficiente de consolidación. Por total analogía, si los registros de humedad de un ensayo de equilibrado de la succión se ajustaran a una hipérbola, podría entenderse

que la difusividad hidráulica,  $D(\theta)$ , apenas variaría con la humedad, de modo que podrían hacerse algunas aproximaciones sobre el cociente entre la conductividad hidráulica y la capacidad de humectación específica.

Expresión canónica de la hipérbola equilátera:  $xy = cte$

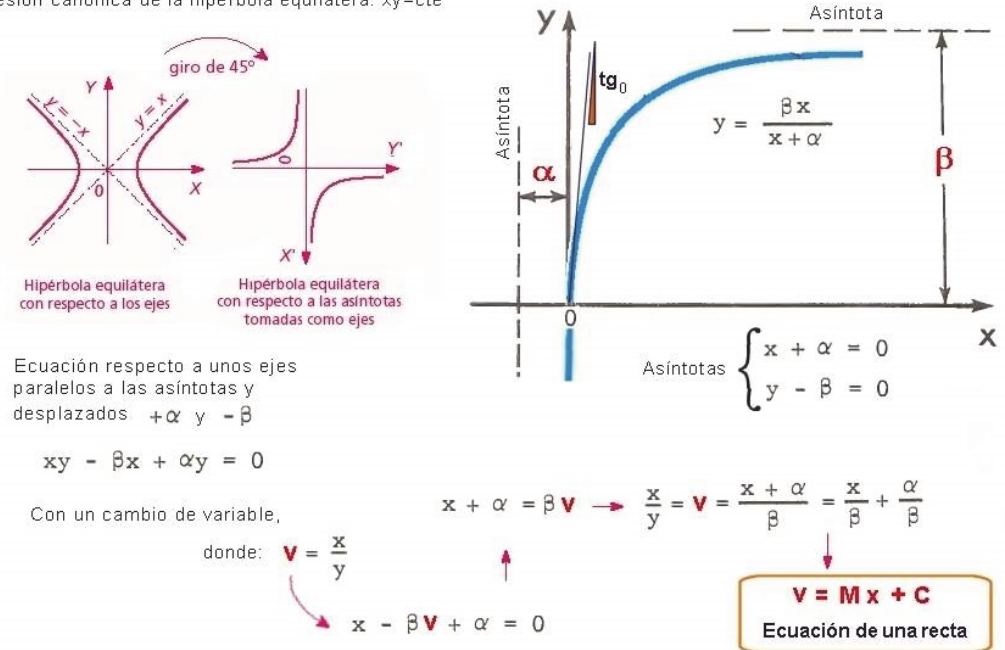


Fig. 2a – Ecuación de la hipérbola y su transformación a una recta

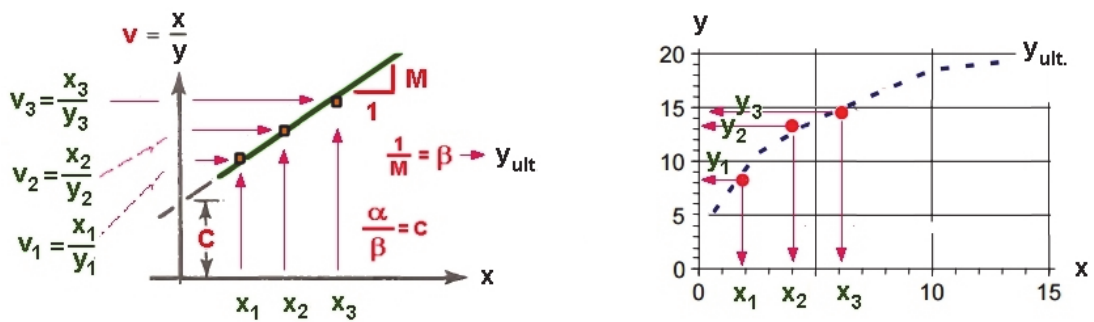


Fig. 2b – Procedimiento gráfico para obtener el valor asintótico (inversa de la pendiente)

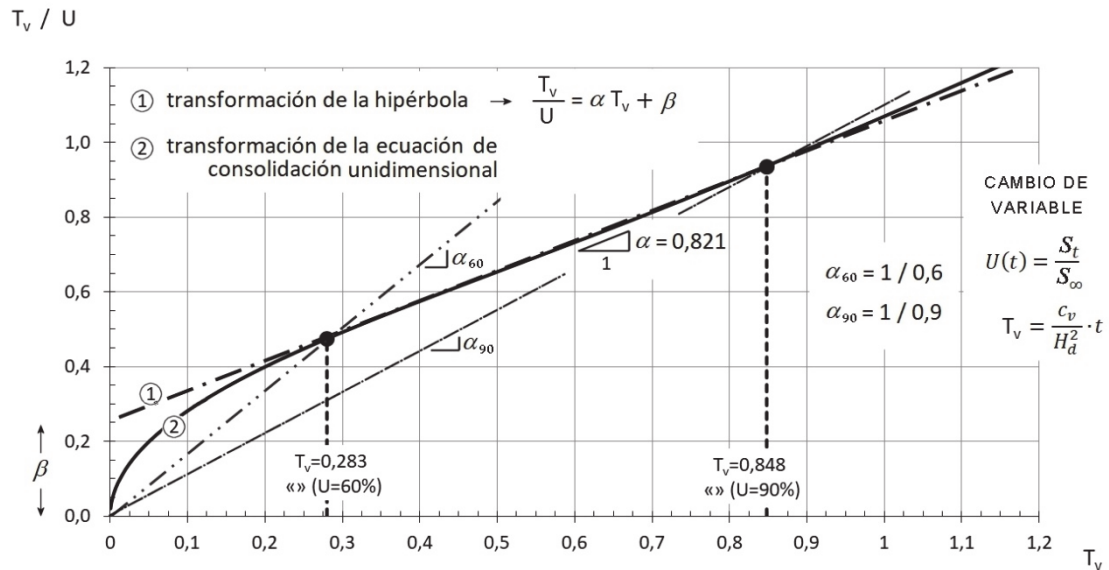


Fig. 2c – Transformación de la hipérbola con la ecuación de la consolidación unidimensional.

#### 4.2 – El método de Asaoka

El método de Asaoka (1978) se concibió para la predicción de asientos y, por añadidura, del coeficiente de consolidación. Aunque, a diferencia del método hiperbólico, no se han encontrado referencias de adaptación de este método a otros casos predictivos en Geotecnia, se cree que hay margen para usarlo también en problemas que obedezcan a leyes de atenuación.

En última instancia, el método se sustenta en una propiedad de funciones del tipo:

$$f(t) = \lambda \cdot (1 - \xi \cdot e^{-\varepsilon t}) \quad (9)$$

donde  $\lambda, \xi, \varepsilon$  son constantes (con  $\varepsilon > 0$ )

Dicha propiedad se enuncia del siguiente modo: la serie discreta de valores  $f(t_i)$ , donde los  $t_i$  están equiespaciados, cumple la siguiente relación de sucesión (por sencillez de notación,  $f(t_i)$  se escribirá  $f_i$ ):

$$f_{i+1} = C + M \cdot f_i \quad (10)$$

siendo  $t_{i+1} = t_i + \Delta t = (i + 1) \cdot \Delta t$

donde:

$$M = e^{-\varepsilon \Delta t} \quad (11)$$

Lo anterior equivale a decir en términos gráficos que la serie de puntos  $(f_0; f_1)$   $(f_1; f_2)$ ,  $(f_2; f_3)$ ,  $(f_3; f_4)$ ...  $(f_i; f_{i+1})$ , pertenece a una línea recta en unos ejes cartesianos, cuya ordenada en el origen y pendiente son C y M. Como la función  $f(t)$  es asintótica, precisamente los valores  $f_i$  y  $f_{i+1}$  tenderán a igualarse a medida que crecen, con lo que el valor final en la construcción gráfica corresponderá a la intersección con la recta a 45°, esto es,  $f_i = f_{i+1}$ . Lógicamente, la variable  $t$  no tiene por qué ser necesariamente el tiempo. La Figura 3 ilustra estas ideas.



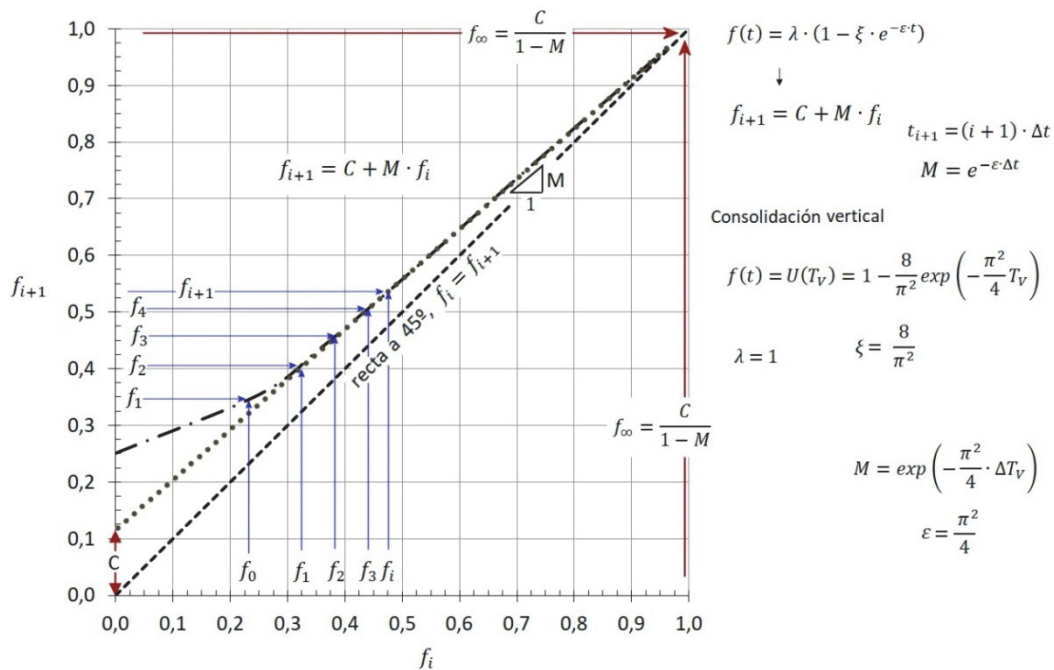


Fig. 3 – Método de Asaoka, generalización para cualquier función del tipo (9).

Se demuestra que el valor asintótico es:

$$f(t_{\infty}) = f_{\infty} = \frac{C}{1 - M} \quad (12)$$

y el valor del al cabo de k intervalos (para  $t_k$ ):

$$f_k = f_{\infty} - (f_{\infty} - f_0) \cdot M^k \quad (13)$$

Con la pendiente M, por analogía al problema de consolidación, podría obtenerse el valor  $D(\theta)$ . En consecuencia, desde un punto de vista experimental, si se toman varios registros de  $f(t)$  a intervalos iguales de  $t$ , puede predecirse el valor asintótico, con el consiguiente ahorro experimental en procesos fuertemente ralentizado o que acaban en rotura.

En el ámbito de la hidrología y edafología, varias expresiones que proporcionan el volumen de agua que fluye, ya por infiltración, ya por rebajamiento súbito del nivel freático a una cierta profundidad (Youngs, 1960; Youngs y Aggelides, 1976; Smith et al., 2002) son del tipo que exige el método de Asaoka (9). Se comprende lo oportuno de emplear este método, pues salvo por la componente gravitacional, hay una clara semejanza entre estos procesos y el de succión en laboratorio.

Así, Youngs y Aggelides (1976) propugnan que el volumen de agua drenado al cabo de un tiempo  $t$ ,  $V(t)$ , tras rebajar súbitamente el nivel freático, viene dado por:

$$V(t) = V_{\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{q_0 \cdot t}{V_{\infty}}\right) \right] \quad (14)$$

donde  $V_{\infty}$  es el volumen perdido a tiempo infinito y  $q_0$  el caudal inicial, cuando la columna se encuentra saturada.

## 5 – CONCLUSIONES

En este artículo se ha ahondado en los fundamentos de los dos métodos de predicción más empleados en los problemas de consolidación. En concreto se ha justificado, desde un punto de vista teórico, su validez también para el caso de la determinación de la humedad de equilibrio en los ensayos de laboratorio para determinar la curva succión-humedad. Su utilidad en este caso radica en que permiten estimar la humedad final reduciendo extraordinariamente el tiempo de ensayo (generalmente, varias semanas), y lo que es más importante, minimizar los riesgos de que éste se malogre, pues estos aumentan mucho en ensayos prolongados.

Asimismo, se ha mostrado que tanto estos procesos de flujos no saturados como los de consolidación obedecen a las leyes de la difusión. Tan sólo difieren en que el parámetro que gobierna el equilibrado de la humedad, en lugar de ser el coeficiente de consolidación, es la difusividad hidráulica,  $D(\theta)$ , que no es necesariamente constante. Así, estos métodos son plenamente válidos para predicciones de ensayos ligados a procesos difusivos o equivalentes, como por ejemplo la dispersión de contaminantes y procesos térmicos.

Teniendo presente los fundamentos de ambos métodos, se vislumbra también su utilidad en otros problemas geotécnicos, tales como para la estimación de la presión límite en ensayos presiométricos, la presión intersticial asintótica en los ensayos de dispersión con CPTu e incluso para la extrapolación de asientos por fluencia. En un segundo artículo se probará la utilidad de los dos métodos mediante su aplicación en los 4 trabajos experimentales referidos en el apartado 1.

## 6 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.; Pinyol, N.; Olivella, S. (2008). *Slope stability under rapid drawdown conditions*. Water Resources Research, 44, nº 5.
- Asanza, E. (2009). *Determinación de las características de fricción en el contacto suelo-geotextil a diferentes succiones, mediante equipos de laboratorio singulares*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Asaoka A. (1978). *Observational procedure of settlement prediction*. Soils and Foundations, 18, nº 4, pp. 87–101.
- Bear, J.; Chen, A.H.-D. (2010). *Modelling ground water flow and contaminant transport*, Springer.
- Borel, S.M.; Bustamante, M.; Gianeselli, L. (2004). *An appraisal of the Chin Method based on 50 instrumented pile tests*. Ground Engineering, January.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Paper nº. 3, Colorado State Univ., Fort Collins.
- Brutsaert, W. (1963). *On pore size distribution and relative permeabilities of porous medium*. J. Geophysical Research, 68, nº 8, pp. 2233–2235.
- Burland, J.B. (1990). 30<sup>th</sup> Rankine lecture: *On the compressibility and shear strength of natural clays*. Geotechnique, Vol. 40, pp.327-378.
- Chin, F. K. (1970). *Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure*. Proc. of South East Asian Conference on Soil Engineering.
- Chin, F.K. (1972). *The inverse slope as a prediction of ultimate bearing capacity of piles*. Proc. 3<sup>rd</sup> Southeast Asian Conference on Soil Engineering, pp. 83–91.
- Duncan, J. M.; Chang, C. Y. (1970). *Nonlinear analysis of stress and strain in soils*. J. of Soil Mechanics & Foundations Division, 96, nº 5, pp. 1629–1653.

- Fleming, W.G.K. (1992). *A new method for single pile settlement prediction and analysis*. Geotechnique, 42, n° 3, pp. 411–425.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons.
- Fredlund, D.G.; Xing, A. (1994). *Equations for the soil-water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal, 31, n° 3, pp. 521–532.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*, Academic Press.
- Ho, D.Y.F.; Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. (1992). *Volume change indices during loading and unloading of an unsaturated soil*. Canadian Geotechnical Journal, 29, n° 2, pp. 195–207.
- Jucá, F.T. (1990). *Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Jucá, J.F.T.; Frydman, S. (1996). *Experimental techniques*, Proc. 1<sup>st</sup> International Conference on Unsaturated Soils, Paris, pp. 1257–1292.
- Kondner, R.L. (1963). *Hyperbolic stress–strain response: cohesive soils*. J. of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, 89, n° 1, pp. 115–143.
- Lu, N.; Likos, W.J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons.
- Marinho, F.A.M. (1994). *Shrinkage behavior of some plastic clays*. Ph.D. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
- Peck, R.B. (1969). *Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics*. Géotechnique, 19, n° 2, pp. 171–187.
- Priol, G.; De Gennaro, V.; Delage, P.; Cui, Y.-J. (2005). *On the suction and the time dependent behaviour of reservoir chalks of North Sea oilfields*, Mancuso & Tarantino (eds), Taylor & Francis Group.
- Richards, L.A. (1931). *Capillary conduction of liquids in porous medium*. Physics 1, pp. 318–333
- Romero, E. (1999). *Characterization and thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated boom clay: an experimental study*. Doctoral Thesis, E.T.S. Ing. Caminos, Univ. Polit. Cat.
- Romero, E.; Simms, P.H. (2008). *Microstructure investigation in unsaturated soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy*. J. of Geotechnical & Geological Engineering, 26, n° 6, pp. 705–727.
- Schanz, T. (1998). *Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien*. Habilitation, Stuttgart Universität.
- Simunek, J.; van Genuchten, M.T.; Sejna, M. (2005). *The HYDRUS-1-D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 3.0, HYDRUS Software*, Dep. of Environ. Sci., Univ. of Calif. Riverside.
- Smith, R.E.; Smettem, K.R.J.; Broadbridge, P.; Woolhiser, D.A. (2002). *Infiltration Theory for Hydrologic Applications*. Water Resources Monograph 15, American Geophysical Union.
- Sridharan, A.; Rao, A. (1981). *Rectangular hyperbola fitting method for one-dimensional consolidation*. Geotechnical Testing Journal, 4, n° 4, pp. 161–168.
- Sridharan, A.; Murthy, N.S.; Prakash, K. (1987). *Rectangular hyperbola method of consolidation analysis*. Géotechnique, 37, n° 3, pp. 355–368.

- Tan, S.A. (1995). *Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains*. Soils and Foundations, 35, n° 1, pp. 101–13.
- Tan, T.S.; Inoue, T.; Lee, S.L. (1991). *Hyperbolic method of consolidation analysis*, J. of Geotechnical Engineering, ASCE, 117, n° 11, pp. 1723-1737.
- Tarantino, A. (2010). *Basic concepts in the mechanics and hydraulics of unsaturated geomaterials*. *Mechanics of unsaturated materials*, Wiley (ed. L. Laloui).
- Vanapalli, S.K.; Nicotera, M.V.; Sharma, R.S. (2008). *Axis translation and negative water column techniques for suction control*. Geotechnical & Geological Engineering, pp. 645-660.
- Villar, M.V. (2000). *Caracterización termo-hidro-mecánica de una bentonita de Cabo de Gata*. Tesis Doctoral, Fac. Geológ., Univ. Compl. de Madrid.
- Vanapalli, S.K.; Nicotera, M.V.; R.S. Sharma (2008). *Axis translation and negative water column techniques for suction control*. J. of Geotechnical & Geological Engineering, 26, n° 6.
- Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil*. Soil Science of America Journal, 44, pp. 892-898.
- Youngs, E.G. (1960). *The drainage of liquids from porous materials*. J. of Geophysical Research, 65, pp. 4025-4030.
- Youngs, E.G.; Aggelides, S. (1976). *Drainage to a water table analysed by the Green-Ampt approach*. Journal of Hydrology, 31, pp. 67-79.