

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

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

Miriam Martín Ruiz^a, Enrique Asanza Izquierdo^b

^a Escuela de Ingenieros de Caminos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

^b Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), España.

RESUMEN – Este artículo presenta la validación práctica del método hiperbólico y el de Asaoka para predecir la humedad final a la que llegaría una muestra de suelo tras someterla a una cierta succión matricial; basta con disponer de varias determinaciones de humedad durante el ensayo. Se logra así acortar muy notablemente los tiempos de los ensayos de succión sin apenas pérdida de precisión en su determinación. Para ello, se han analizado 3 referencias bibliográficas de ensayos de succión matricial en suelos y una serie de ensayos propios, específica para los propósitos del presente artículo. El artículo describe los 4 suelos y las técnicas de succión empleadas y presenta, para las diferentes succiones, los registros de la evolución de la humedad empleados. El análisis de éstos evidencia que ambos métodos, y en mayor medida el hiperbólico, permiten predecir la humedad final de las muestras a partir de registros tempranos. Adicionalmente, el buen ajuste con el método de Asaoka sugiere que la difusividad hidráulica, $D(\theta)$, parámetro que rige la velocidad de este proceso de difusión de humedad, es poco variable durante el ensayo. Por ello, se propone este método para estimar D , difícil de determinar experimentalmente. El desarrollo teórico de los dos métodos se recoge en un artículo previo.

SYNOPSIS – This paper shows the practical prove that the hyperbolic and Asaoka's methods can predict the final water content that a soil sample would reach when it is subjected to constant matric suction; only several determinations over the tests are needed. Therefore, the testing periods can be significantly reduced with hardly any loss of accuracy for such determination. Thus, 3 published references containing suction tests and a series of specific tests for the purpose of the present article have been analyzed. The article describes the 4 soils and the techniques of suction used, and includes, for each suction, the data of evolution of water content. The analysis of these data has shown that both methods, and to a larger extent the hyperbolic one, can successfully predict the final water content of a sample, as long as a number of determinations are known. In addition, the fairly good fitting using the Asaoka's method suggests that the hydraulic diffusivity, $D(\theta)$, this being the parameter that governs the diffusive rate of the water content, exhibits hardly any change throughout the test. Therefore, this method is proposed as a mean of assessing D , as its direct determination in the laboratory is difficult. The theoretical background of both methods can be found in the preceding paper.

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

En la primera parte de este artículo se describieron, por una parte, los métodos de predicción hiperbólico y de Asaoka (1978), con diversas aplicaciones en geotecnia, sobre todo para consolidación; y por otra, los conceptos de suelos no saturados, especialmente los relativos a flujo, poniéndose de relieve que la ecuación que gobierna el proceso de equilibrado de la humedad al imponer una succión a una muestra de suelo es, al igual que la consolidación, un fenómeno de difusión. Tan sólo difiere en que el parámetro de difusividad, $D(\theta)$, no es constante en el equilibrado de un suelo no saturado; aun así, en esta segunda parte del artículo se demostrará que los métodos de predicción pueden emplearse satisfactoriamente para hacer prognosis de la humedad de equilibrio (final) en ensayos de succión. Para ello, se han tomado los siguientes ensayos de succión:

- los de Jucá (1990) y los de Asanza (2009), ambos con suelos de Madrid;
- los realizados por Priol et al. (2005) con una roca tipo "creta" muy porosa ligados al estudio de un yacimiento petrolífero;
- y por último, una serie de ensayos con el suelo resultante de la reducción a polvo de lutitas de la formación Marcellus (cuenca de los Apalaches, EE.UU.). Estos últimos ensayos, recientemente realizados en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX por los autores, forman parte de una línea de colaboración entre el Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno de la ETS de Caminos de la UPM y el CEDEX para caracterizar lutitas generadoras de gas (shale gas).

2 – TRASLACIÓN DE EJES. CÉLULA DE PRESIÓN Y TÉCNICA OSMÓTICA

Para determinar la curva característica de un suelo se suelen tomar muestras en iguales condiciones (generalmente al menos 8 para definir suficientemente la curva), sometiendo cada una a una succión diferente, en un rango amplio. En algunos casos se desmonta periódicamente el ensayo para comprobar si se ha llegado a pesada constante, pero lo habitual es adoptar tiempos de equilibrio basados en la experiencia del especialista, según sea la naturaleza de la muestra.

Aunque existen diversas técnicas para imponer succión (Tarantino et al., 2008), sólo se expondrán sucintamente dos técnicas, englobadas en el método conocido como de "traslación de ejes". Se trata de la técnica con célula de presión y de la técnica osmótica, que son las empleadas en los ensayos que se someterán a los métodos hiperbólico y de Asaoka.

2.1 – La célula de presión

La experimentación con suelos no saturados se vale de la denominada técnica de traslación de ejes, concebida para solventar los problemas de cavitación en los circuitos de los equipos cuando se pretende imponer al suelo succiones (tracciones) próximas a 10 m.c.a. Quizá el procedimiento más extendido se realiza con la denominada célula de presión, originalmente desarrollada en el ámbito de la agronomía (Woodruff, 1940; Richards, 1941; Gardner, 1956), que permite establecer succiones que abarcan casi todo el rango de interés en física de suelos.

Como la succión matricial se define como la diferencia entre la presión del aire y la del agua, $(u_a - u_w)$, se recurre al artificio de aumentar la presión del aire en el laboratorio, conservando la presión del agua en valores positivos, generalmente a presión atmosférica, solventando el problema de la cavitación. A pesar de no reproducir las verdaderas presiones del agua y del aire del suelo "in situ", su validez se ha sancionado experimentalmente (Hilf, 1956; Fredlund y Morgenstern, 1977; Tarantino et al., 2000) para suelos con grado de saturación de moderados a altos (>60 %).

La coexistencia de ambas fases a diferente presión se logra de dos posibles modos en el laboratorio. Uno consiste en interponer un disco cerámico poroso de alta entrada de aire (1,5 MPa) previamente saturado de agua, de manera que éste conserva sus poros saturados en tanto que la presión del aire no supere el valor de entrada de aire; y el otro, en interponer una membrana de celulosa regenerada, formada por una estructura porosa tan sumamente fina (de unos 2,5 nm) que

sólo permite el paso de las moléculas de agua y sus iones más habituales, pero no de las moléculas de aire (en realidad en laboratorio se emplea nitrógeno seco, N_2 , que es inerte).

Básicamente, la célula de presión consiste en un cilindro de acero de paredes gruesas, con base y tapa. En la base se sitúa el disco o la membrana y en la tapa un manómetro y una válvula de entrada de aire. Dentro de la base hay un pequeño depósito conectado a un circuito de agua, que asegura la saturación del disco (o de la membrana), estando la fuente de agua a una presión conocida (generalmente la atmosférica). La membrana de celulosa permite aplicar succiones (presiones de N_2) muy superiores a los discos cerámico, si bien suele limitarse porque cuanto mayor es la presión de N_2 , mayor es la presión parcial de vapor de agua, cobrando importancia la evaporación de agua hacia el aire de la célula (Wilson et al., 1994, 1997; Romero, 1999). Estos equipos han de situarse en salas con poca oscilación de la temperatura, pues repercute en la presión. Richards (1965), Suraj de Silva (1987) y Delage et al. (1987) obtuvieron valores de permeabilidad al agua de la membrana entre 10^{-11} y 10^{-12} m/s. Asimismo, Jucá (1990) en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX midió valores entre 6×10^{-12} y 7×10^{-12} m/s. Comparando la impedancia (espesor del elemento/permeabilidad) de la membrana y de los discos de alto valor de entrada de aire, en principio, el periodo de equilibrio es menor con membranas.

2.2 – La técnica osmótica

No ha de inducir a confusión la denominación de esta técnica, ya que únicamente controla la succión matricial del suelo. Se recurre al fenómeno de la ósmosis sólo como modo de imponer una succión matricial al agua sin necesidad de traccionarla. Esta técnica emplea las mismas membranas de celulosa citadas, pero en este caso, reteniendo soluciones de polietilen-glicol (PEG), que es una sal soluble en agua cuyas moléculas son muy superiores a la porosidad de la membrana. Las primeras referencias de su empleo provienen del área de la física de suelos (Zur, 1966), si bien Kassif y Ben Shalom (1971) fueron pioneros en incorporarla a equipos geotécnicos. En concreto, adaptaron la técnica osmótica a un edómetro para el estudio de la expansividad de arcillas con control de la succión. Posteriormente, Delage et al. (1987) la incorporaron a equipos triaxiales.

La relación entre la succión y la concentración de la disolución no es lineal, a menos que ésta sea extraordinariamente diluida. Dicha relación está suficientemente documentada en la literatura técnica (Delage et al., 1992; Cui y Delage, 1996; Dineen, 1997; Tarantino y Mongioli, 2000), por lo que esta técnica permite imponer succiones en prácticamente todo el rango de interés en geomecánica, esto es, varios MPa (Delage et al., 1998; Cuisinier y Masrouri, 2005).

La Figura 1 muestra un esquema de la célula de presión y otro de la técnica osmótica.

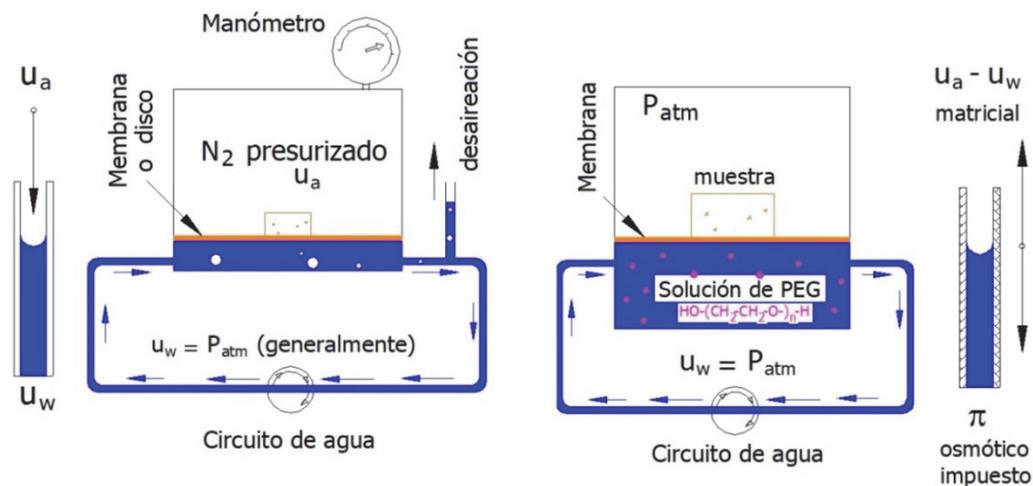


Fig. 1 – Esquemas explicativos: célula de presión, con N_2 presurizado (izq); técnica osmótica, con aire a presión atmosférica (der).

3 – SUELOS EMPLEADOS Y REGISTROS DISPONIBLES

3.1 – Caracterización de los suelos

Se aplicarán los métodos hiperbólico y de Asaoka a los siguientes ensayos de succión con registros de la evolución de la humedad: los de Jucá (1990) y Asanza (2009), dos tesis doctorales realizadas en el CEDEX, que emplearon la célula de presión con membrana de celulosa; los de Priol et al. (2005), que emplearon la técnica osmótica; y una serie de ensayos específicos con polvo de roca de la formación Marcellus, cuya caracterización es el objeto la investigación citada en la introducción. En este caso, los autores del presente artículo han empleado las células de presión con membrana del CEDEX.

Jucá (1990) llevó a cabo ensayos no saturados, tanto de deformabilidad como de resistencia, de suelos reconstituidos, continuando los ensayos pioneros del CEDEX (Escario y Sáez, 1989). En concreto, registró la evolución de la humedad con el tiempo tras imponer succión a tres suelos: a una arcilla gris de alta plasticidad típica de Madrid (“peñuela”) con un límite líquido (LL) del 71% y un límite plástico (LP) del 36%, con mica como mineral preponderante, en menor medida caolinita y algo de esmectita y palygorskita; a una arcilla roja de baja plasticidad, con LL=33% y LP=19%, empleada para la presa de Miraflores de la Sierra (Madrid), formada fundamentalmente por palygorskita; y a una arena “de miga”, con un contenido en finos del 17%, un D_{50} de 0,40 mm y LL=28%. Las succiones iniciales de estos tres suelos, compactados en condiciones Proctor Normal, fueron de 800, 280 y 70 kPa. Dicho autor proporcionó numerosos ensayos de evolución con el tiempo para valorar el efecto de impedancia de la membrana en la transferencia de humedad, así como la aceleración del proceso por aplicación de una moderada presión (mediante un muelle), que mejora el contacto membrana-muestra.

Asanza (2009) empleó una “peñuela”, reconstituida con la adición de un 7% de montmorillonita sódica, resultando una mezcla con LL=74% y LP=37%. La succión inicial de la muestra en condiciones Proctor Normal fue de 1,9 MPa. En este caso se dispone de 4 registros de evolución de la humedad con el tiempo (hasta 40 días).

Priol et al. (2005) ensayaron una “creta” muy porosa ($n=0,4$ a $0,5$) para caracterizar la formación geológica de la roca que alberga el petróleo del campo petrolífero de Ekofisk, en el mar del Norte. Por las dificultades de extracción de muestras de pozo, éstas se tomaron de una cantera de Bélgica, muy similar a la del yacimiento. Se trata de una roca calcárea (con menos de un 1 % de sílice) biomicrítica, friable y constituida mayoritariamente por restos de plancton y algas, con un tamaño de grano de 0,5 a 10 micras. Su origen se atribuye a depósitos pelágicos de aguas tranquilas someras (normalmente en el rango entre 100 a 600 m; 300 m en el caso del yacimiento de Ekofisk).

En el campo de Ekofisk se opera con recuperación mejorada (“enhanced oil recovery”, en la nomenclatura anglosajona), inyectando agua desde pozos adyacentes al de extracción, a fin de desplazar el crudo hacia éste. Las desproporcionadas subsidencias experimentadas (de más de 10 m a lo largo de 40 años), que han comprometido las propias plataformas marinas, se han atribuido a posibles colapsos bajo presión por humectación del agua de inyección.

Por último, se aplicarán estos métodos a los ensayos con suelo procedente de la reducción a polvo (50 micras) de varios testigos de roca de la formación Marcellus (cuena de los Apalaches), situada en el oeste de los estados de Virginia y Pensilvania (EE.UU.). Se trata de una formación de lutitas (shale) generadoras de gas de muy baja porosidad ($n=0,05-0,12$), de las que se extrae la pequeña fracción del gas remanente no migrado, en gran medida adsorbido en nano o microporos de la materia orgánica primigenia. Hoy en día esta formación es la de mayor producción de gas natural en Estados Unidos mediante fracturación hidráulica (“fracking”). Los testigos se tomaron a unos 100 m de profundidad de un pozo somero en Allenwood (Pensilvania, EE.UU.). Se trata de una roca muy resistente ($RCS=100$ MPa), aun cuando sus minerales predominantes son filosilicatos ($\cong 60$ %). En menor medida contiene cuarzo ($\cong 30$ %), acompañados de feldespatos, pirita y dolomita. Su contenido total de materia orgánica (TOC, Total Organic Carbon) está cifrado en 2,7 %. Villamor-Lora et al. (2016) recogen la caracterización detallada de esta roca en laboratorio, con especial énfasis en su deformabilidad, incorporando su anisotropía y el efecto de la temperatura.

El Laboratorio de Geotecnia del CEDEX determinó en balanza hidrostática el peso específico relativo aparente de diversos fragmentos de roca, resultando $G_{ap} \cong 2,58$. Por otro lado, se midió el peso específico relativo de las partículas mediante el picnómetro de helio, dando como resultado $G_s \cong 2,72$. Ha de hacerse notar que durante el proceso de fragmentación y molienda el material desprendía un cierto olor a gas. Con los valores anteriores resulta una porosidad en el entorno del 5 %, que está en consonancia con la literatura técnica (Villamor-Lora, 2016; Rezaee, 2015). Aparte de una serie de ensayos de succión, se han determinado los límites de Atterberg (LL=25) y el contenido de materia orgánica del polvo de la roca, muy similar al indicado anteriormente.

3.2 – Registros de evolución de humedad disponibles

La Figura 2 muestra 4 registros de variación de la humedad de Jucá (1990). Se trata de dos determinaciones con arcilla gris (sometida a 2 MPa de succión, muy similares, pues sólo se varía el tipo de membrana de celulosa) y otras dos con arcilla roja (una sometida a 30 kPa de succión y otra a 1 MPa). Teniendo en cuenta el valor de las succiones iniciales, la de 30 kPa es un proceso de humectación y las otras tres, de desecación.

La Figura 3 muestra los 4 ensayos de humectación con la arcilla de Asanza (2009), sometidas a succiones de 25, 100, 500 kPa y 1 MPa. Todos ellos son procesos de humectación.

La Figura 4 muestra los ensayos realizados por Priol et al. (2005) con la técnica osmótica a tres muestras, con succiones matriciales de 0, 250 kPa y 1 MPa. En este caso todas las muestras parten de un contenido de agua nulo.

Finalmente, la Figura 5 presenta los recientes ensayos realizados en el CEDEX con el polvo de roca de la formación Marcellus. Se trata de cuatro muestras compactadas en seco a una densidad seca de 17 kN/m^3 (con humedad higroscópica inferior al 1 %). Se aplicaron succiones de 20 kPa, 100 kPa, 600 kPa y 1,25 MPa, por lo que son procesos de humectación.

En términos relativos, los ensayos de Asanza (2009) y los recientemente realizados con polvo de roca Marcellus son los que alcanzaron una mayor estabilización: los primeros, debido a que se prolongaron 40 días y los segundos, porque el espesor de las muestras fue un tercio (7 mm) del habitual en estos ensayos, lo cual acelera el equilibrado. Los de Jucá (1990), aunque disponen de un buen número de registros, que definen bastante bien las curvas de evolución, no parecen haberse aproximado suficientemente a su asintota, especialmente los de desecación. Quizá esto se deba a que los procesos en desecación evolucionan de un modo algo más ralentizado (Jucá, 1990; Asanza, 2009). Por otra parte, hay dos registros de Priol et al. (2005) que sugieren leves errores experimentales.

Ha de advertirse que aunque todos estos registros están en función de la humedad gravimétrica clásica (w), para probar la bondad de los métodos de predicción no se requiere una conversión a humedad volumétrica. En caso de que se quisieran contrastar las funciones de conductividad hidráulica, sería necesario la conversión a humedad volumétrica (θ), lo que exigiría hacer un seguimiento de la eventual variación de la porosidad (n) con la humedad (w) y aplicar la siguiente relación:

$$\theta = w \cdot (1 - n) \cdot G_s \quad (1)$$

3.3 – Aplicación de los criterios

En lo que sigue se muestran los resultados de aplicación de los métodos expuestos en la primera parte de este artículo. Las Figuras 6 a 9 muestran las construcciones gráficas del método hiperbólico. Las humedades se refieren a los incrementos (o decrementos) respecto a las condiciones iniciales, omitiéndose el signo de la variación. Como se ve, como promedio, el acomodo a una única recta es notablemente bueno una vez transcurrido aproximadamente el 50 % del tiempo de ensayo, lo cual ya indica la posibilidad de pronóstico tempranas. Al igual que el modelo teórico (Fig. 2c de la primera parte), los tramos iniciales muestran pendientes mayores a la que van adoptando en registros sucesivos.

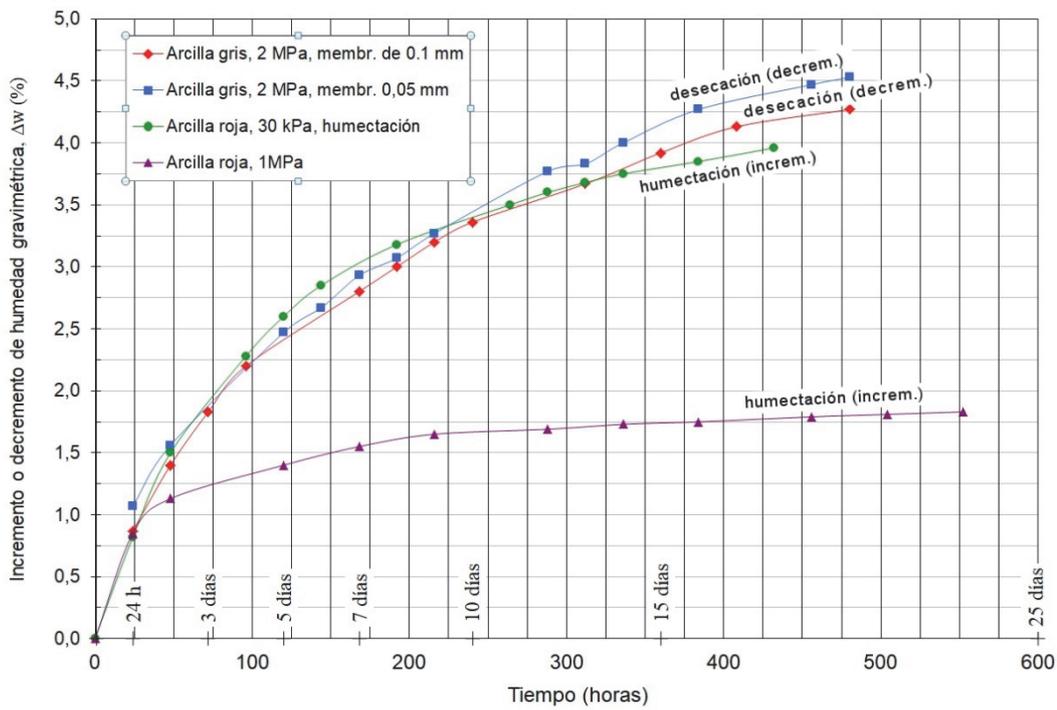


Fig. 2 – Evolución de la humedad (incremento o decremento) en los ensayos de Jucá (1990)

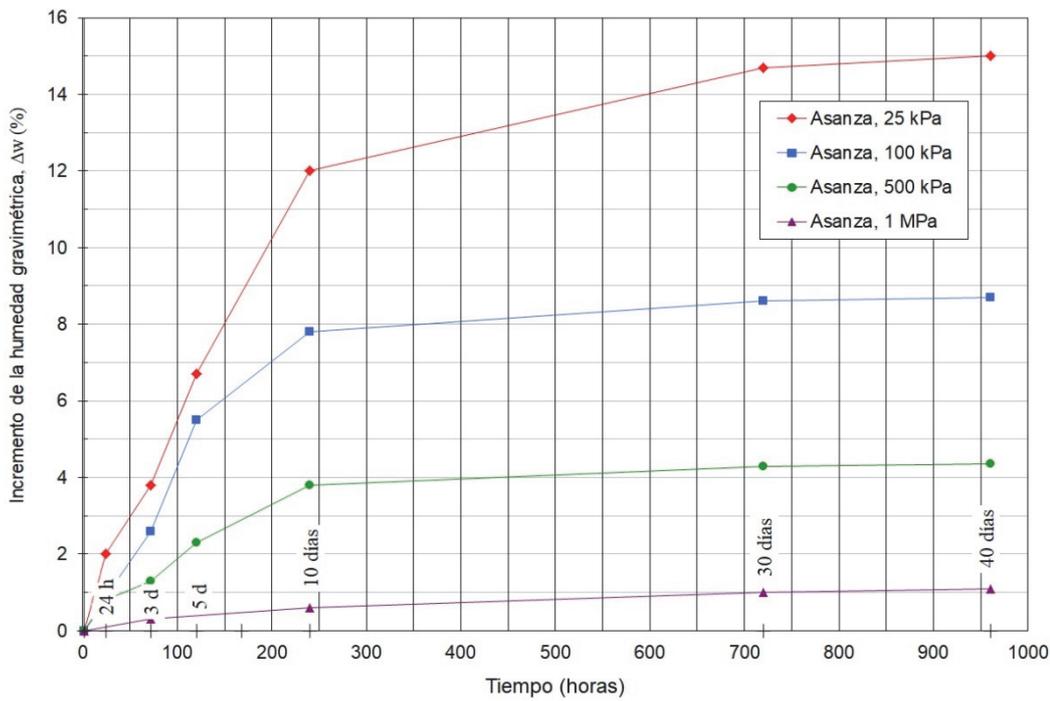


Fig. 3 – Evolución de la humedad (incremento) en los ensayos de Asanza (2009)

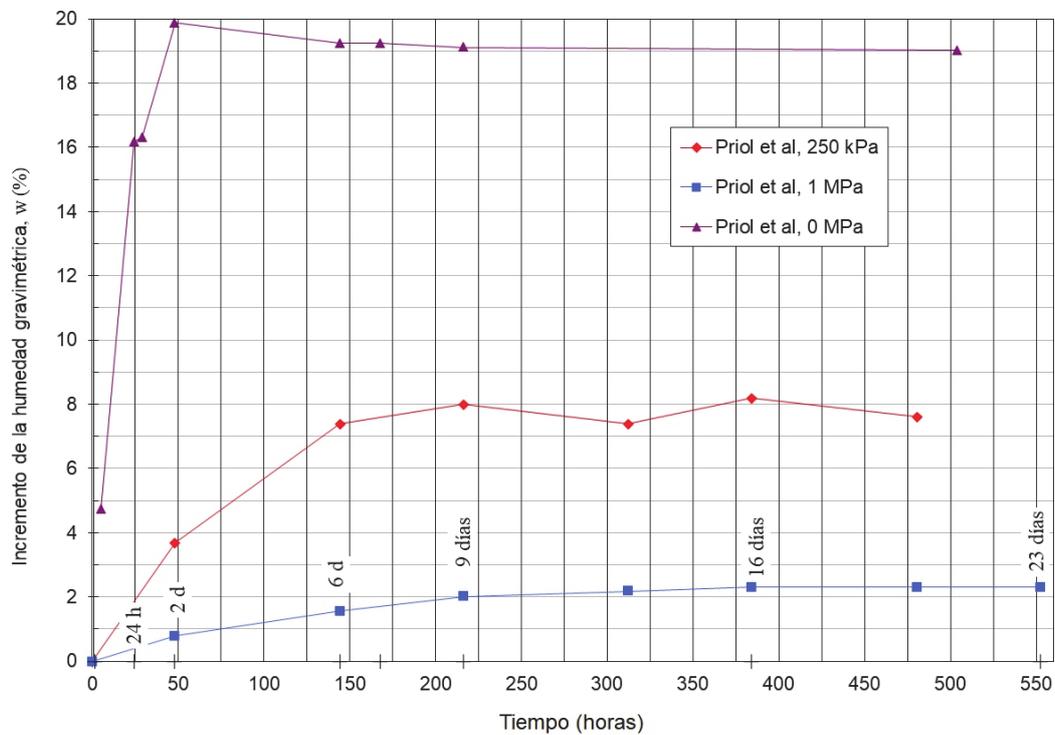


Fig. 4 – Evolución de la humedad (incremento) en los ensayos de Priol et al. (2005)

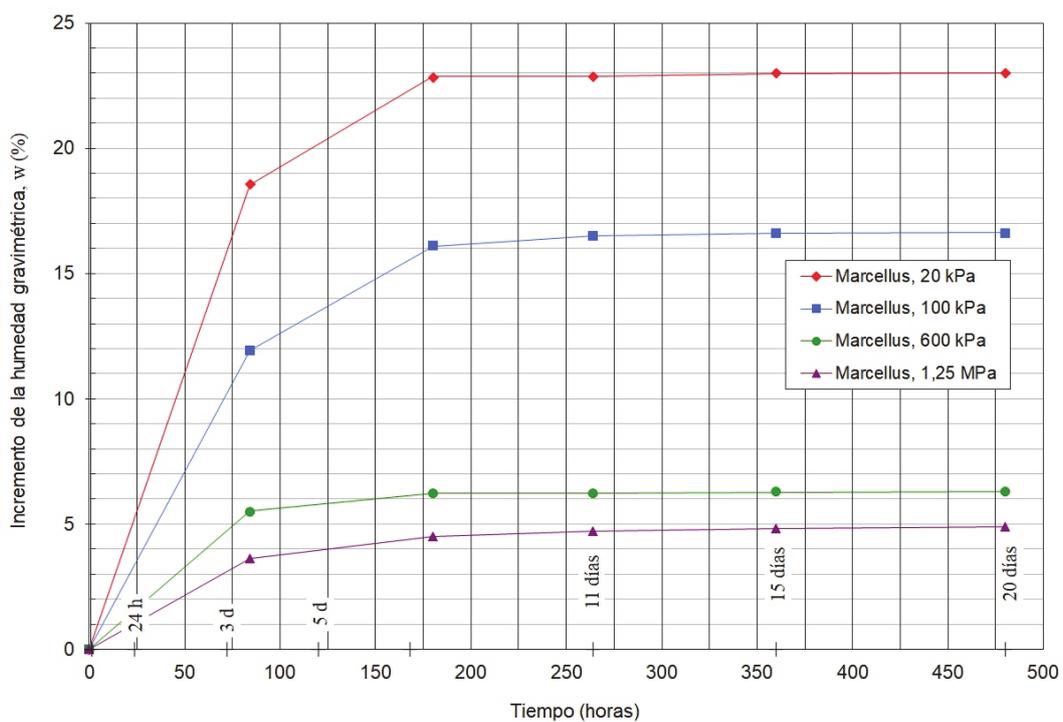


Fig. 5 – Evolución de la humedad (incremento) en los ensayos con suelo “Marcellus”

Las Figuras 10 a 13 muestran las construcciones gráficas con el método de Asaoka (1978). Las humedades, igualmente, se refieren a variaciones (sin signo) respecto a las condiciones iniciales. Por otra parte, en este caso podría soslayarse la exigencia teórica de que para poder aplicar el criterio de Asaoka las determinaciones de humedad han de hacerse a intervalos iguales, pues basta con interpolar los registros próximos. El error en que se incurre, en principio, es poco relevante para los propósitos del presente artículo. Así, para esta interpolación se adoptó un espaciamiento temporal para la interpolación de 100 horas, salvo en los registros de Priol et al. (2005), que se tomaron 120 horas (5 días).

En el caso de los ensayos de Jucá (1990), se ajustan, en general, razonablemente bien a la recta propugnada por Asaoka, aunque es posible que los registros más tempranos, al igual que en consolidación, no se rijan por la ecuación en la que se sustenta el método. El sub-gráfico de la Figura 11 (registros de Asanza, 2009) muestra esto de modo muy evidente: los 2 ó 3 primeros datos (tiempos muy tempranos) han de descartarse para trazar la recta de predicción. En cuanto a los registros de Priol et al. (2005), como quiera que están fuertemente estabilizados, pero con oscilaciones de medida (Fig. 4), tales anomalías también quedan reflejadas en esta construcción, con resultados apenas concluyentes (no así con el método hiperbólico).

La construcción del método de Asaoka con los registros recientemente realizados con polvo de roca Marcellus es menos provechosa de lo esperado, porque apenas se distinguen los puntos, que quedan muy solapados, puesto que los registros están rápidamente estabilizados (se emplearon muestras de muy poco espesor). Si se hubiera determinado la humedad a intervalos menores, se dispondría de puntos de la recta suficientemente alejados del valor asintótico, con el consiguiente provecho para una prognosis.

4 – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En la Tabla 1 se han resumido los valores de variación final de humedad que resultan de la prognosis de ambos métodos. Para valorar con qué precisión y con cuanta antelación puede predecirse ésta, se han de consultar tanto las Figuras 6 a 9 (hiperbólico) como las Figuras 10 a 13 (Asaoka).

Con las del hiperbólico, basta con estimar el tiempo que ha de transcurrir para que los valores experimentales se alineen suficientemente bien en la recta. Como se ve, salvo uno de los registros de Priol et al. (2005), que son de calidad moderada, puede aceptarse que la humedad final puede predecirse una vez transcurrido el 50 % del tiempo del ensayo sin merma de precisión. Con las gráficas de Asaoka, consiste en valorar cuántas de las últimas lecturas son prescindibles o redundantes para estimar el punto de intersección con la línea a 45°. En los trabajos de Jucá (1990) y de Asanza (2009), aunque los registros intermedios definen moderadamente bien la recta de Asaoka, sí parece que se hace más precisa la interpolación de la recta si se agregan registros posteriores aún algo alejados del equilibrio.

Tabla 1 – Estimación de humedades finales empleando los métodos hiperbólico y de Asaoka.

Jucá (1990)		Asanza (2005)		Priol et al. (2005)		Marcellus	
Hiperb.	Asaoka	Hiperb.	Asaoka	Hiperb.	Asaoka	Hiperb.	Asaoka
Los valores son predicciones incrementos finales de humedades (%) respecto de la inicial							
2.1	1.8	1.5	1.45	2.3	2.3	5.2	¿4.9?
4.8	4.2	4.5	4.5	7.3	¿?	6.3	6.3
5.8	5.0	8.9	8.8	19.0	¿?	16.7	16.6
6.1	5.5	16.4	15.4			22.9	23.0

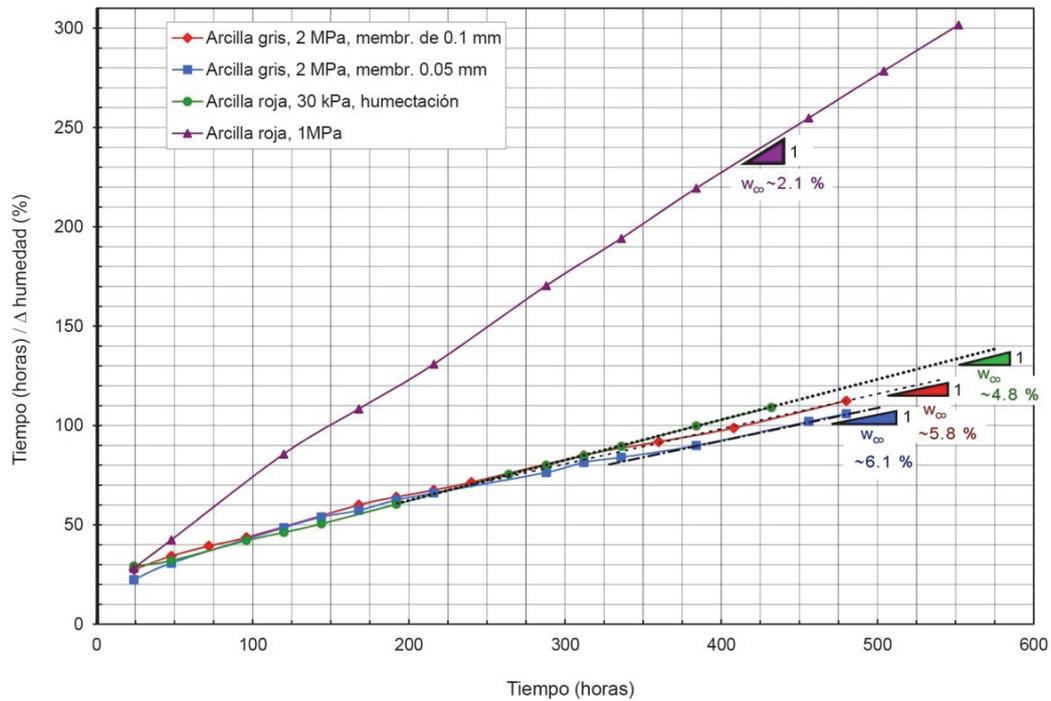


Fig. 6 – Aplicación del método hiperbólico con los ensayos de Jucá (1990)

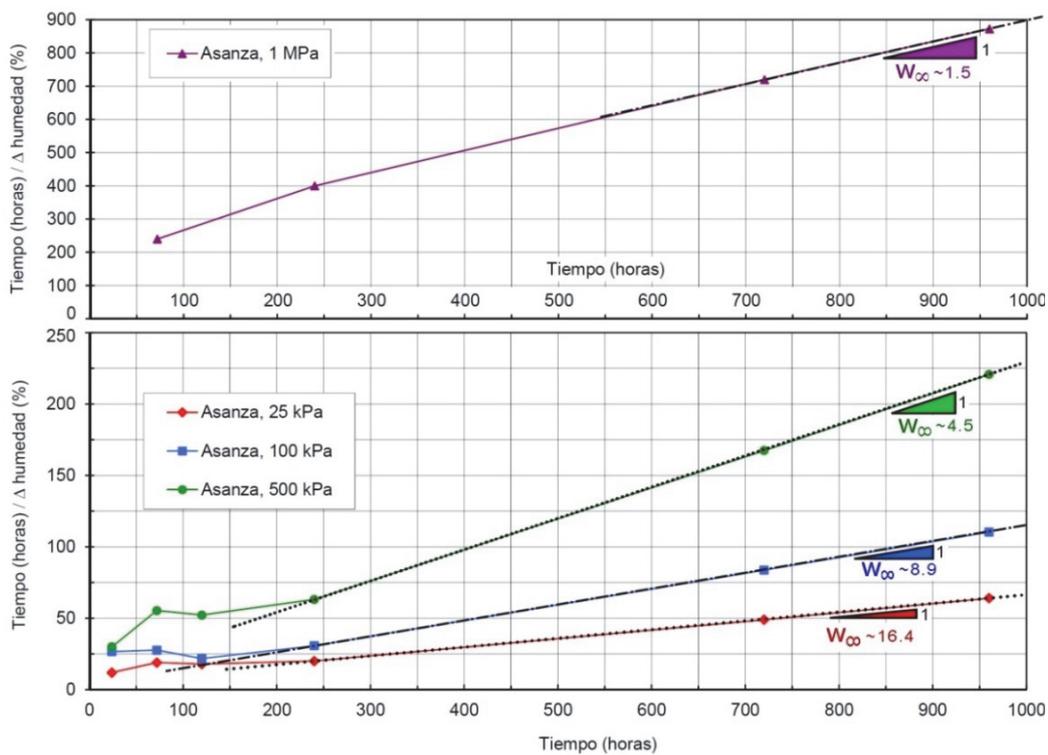


Fig. 7 – Aplicación del método hiperbólico con los ensayos de Asanza (2009)

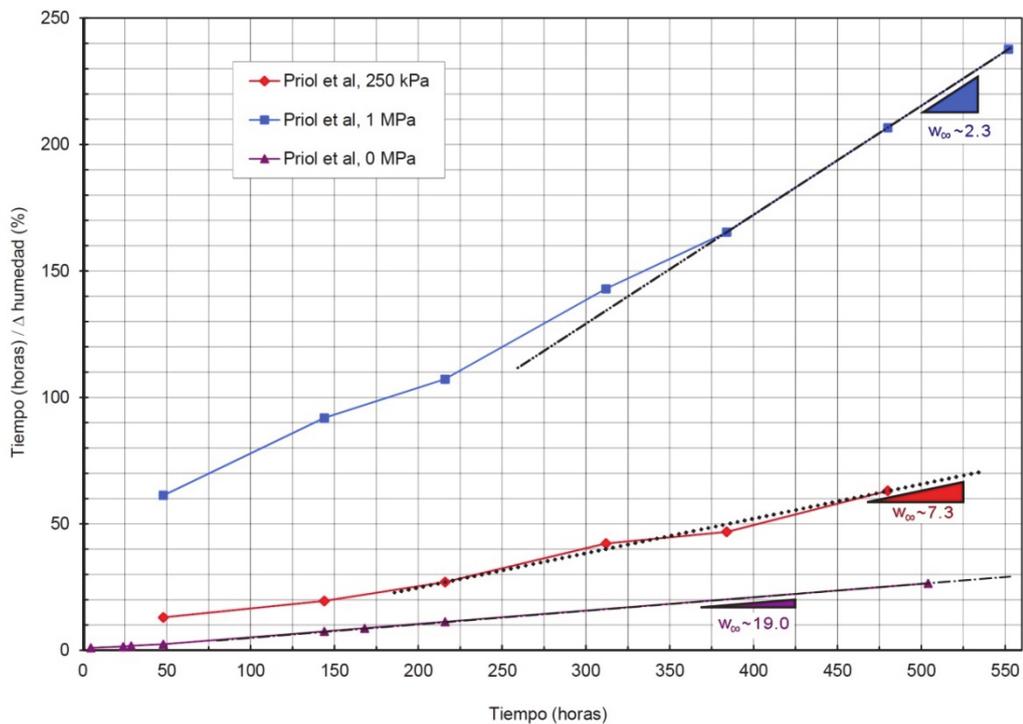


Fig. 8 – Aplicación del método hiperbólico con los ensayos de Priol et al. (2005)

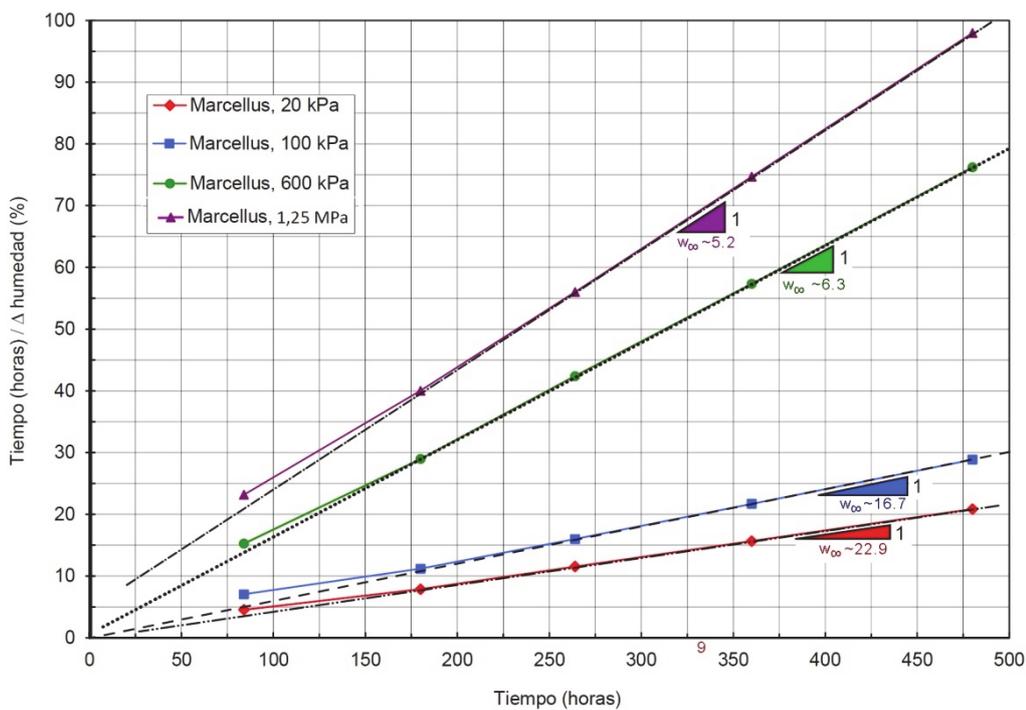


Fig. 9 – Aplicación del método hiperbólico con los ensayos con suelo “Marcellus”

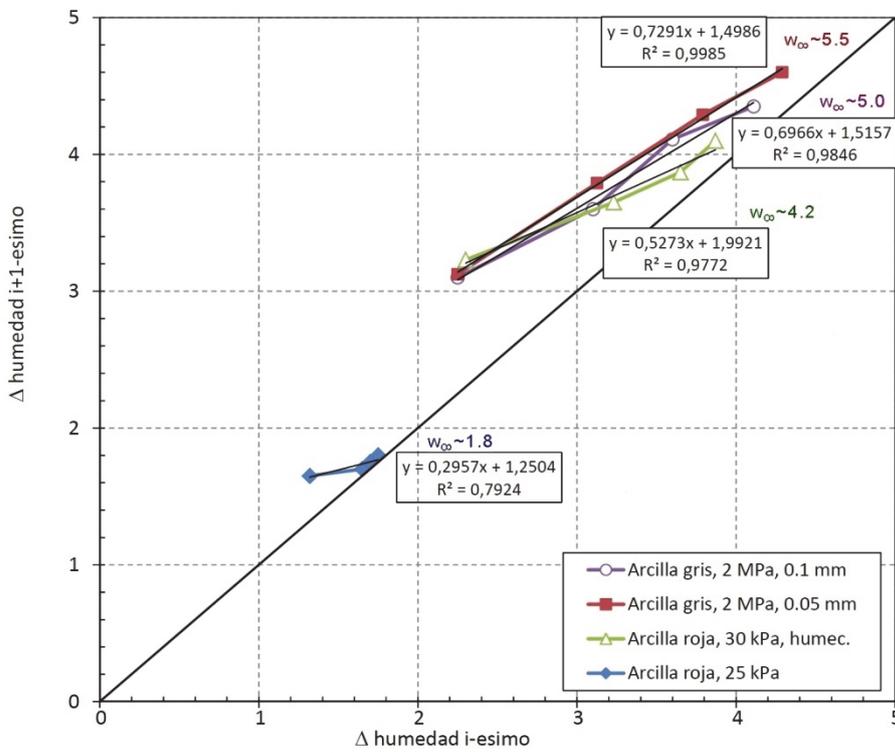


Fig. 10 – Aplicación del método de Asaoka con los ensayos de Jucá (1990)

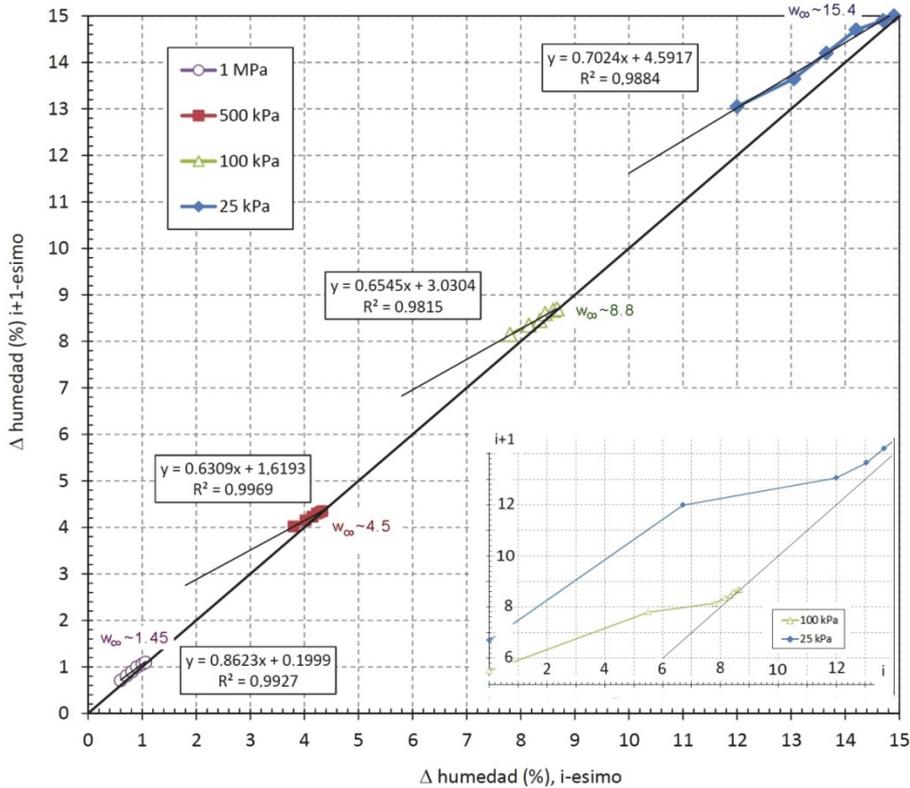


Fig. 11 – Aplicación del método de Asaoka con los ensayos de Asanza (2009)

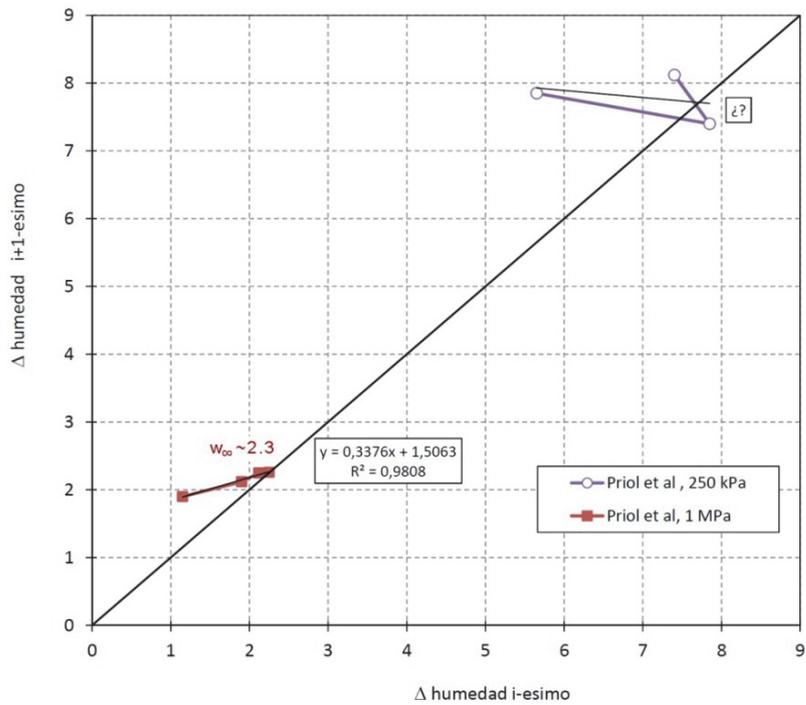


Fig. 12 – Aplicación del método de Asaoka con los ensayos de Priol et al. (2005)

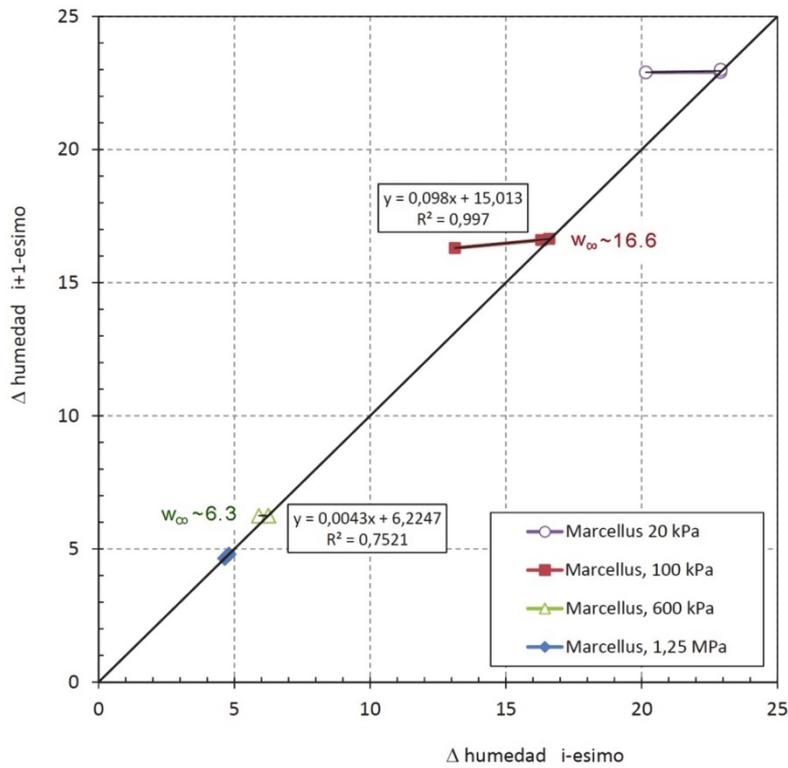


Fig. 13 – Aplicación del método Asaoka con los ensayos con suelo “Marcellus”

Otra cuestión relevante es la posibilidad de estimar la difusividad hidráulica, $D(\theta)$, a partir de los registros de evolución de la humedad. Como quiera que los ajustes con ambos métodos son razonablemente buenos, puede entenderse que la difusividad hidráulica es poco variable con la humedad. Tanto más cierto será esto cuanto más moderados sean los cambios de humedad experimentados por el suelo, esto es, que la succión impuesta no sea muy diferente a la que tiene inicialmente el suelo.

Por mera analogía con el procedimiento clásico para hallar el coeficiente de consolidación mediante el método de Asaoka (Fig. 3 de la primera parte), la difusividad hidráulica, $D(\theta)$ viene dada por:

$$D(\theta) = D = \frac{4 \cdot H^2 \operatorname{Ln}(M)}{\pi^2 \Delta t} \quad (2)$$

donde H es el espesor de la muestra, M la pendiente de la recta de Asaoka y Δt el intervalo de tiempo entre dos registros.

Resulta mucho más difícil estimar la difusividad hidráulica mediante el método hiperbólico, por cuanto se requiere identificar el entorno de la hipérbola donde la curva se torna una recta (véase la Fig. 2b de la primera parte).

Haciendo uso de los registros que mejor se ajustan a una recta de Asaoka, se obtiene una difusividad hidráulica, D , entre 7×10^{-7} y 2×10^{-6} cm^2/s en los ensayos de Asanza (2009); y entre 1,4 y $1,6 \times 10^{-6}$ cm^2/s en los de Jucá (1990) en procesos de desecación y de $2,9 \times 10^{-6}$ cm^2/s en el de humectación. En consecuencia, parece que se obtienen valores de difusividad hidráulica poco variables con la humedad. En ese sentido, en los ensayos de imposición de succión matricial parece validarse el método de Asaoka para dos propósitos: la predicción de la humedad final y la determinación de la difusividad hidráulica. No obstante, dado que el método de Asaoka rige sólo para un grado de equilibrado superior al 60 %, habría que puntualizarse que la difusividad hidráulica obtenida se corresponde a un valor ponderado de los estados avanzados en la difusión de la humedad.

5 – CONCLUSIONES

El presente artículo ha validado experimentalmente que los métodos predictivos de Asaoka e hiperbólico logran estimar con suficiente precisión la humedad final a la que llegaría un suelo al imponerle una succión matricial, confirmándose su utilidad para reducir notablemente los tiempos de ensayo. Los fundamentos teóricos de estos métodos, así como otros usos en geotecnia, potenciales o contrastados, se recogen en un artículo previo. La validación experimental de los métodos se ha basado en el análisis de 3 referencias bibliográficas de ensayos de succión matricial en suelos y en una serie de ensayos realizados por los autores para los propósitos del presente artículo. Se ha abarcado un rango de succiones matriciales suficientemente amplio. El análisis de éstos evidencia que ambos métodos, y en mayor medida el hiperbólico, permiten predecir la humedad final de las muestras a partir de registros tempranos. Así, se ha concluido que, haciendo uso de estos métodos con los registros de humedades disponibles, podría predecirse la humedad final con suficiente precisión si se redujera el tiempo de ensayo hasta en un 50 %. Nótese que de ordinario estos ensayos suelen prolongarse al menos 3 semanas. Así, en este tipo de ensayos bastaría, tras imponer la succión, hacer determinaciones tempranas de la humedad. Para no perder precisión con el método de Asaoka, convendría fijar intervalos de tiempo iguales.

Partiendo de los fundamentos del método de Asaoka, el buen ajuste sugiere que la difusividad hidráulica, $D(\theta)$, parámetro que rige la velocidad de este proceso de difusión de humedad, es poco variable durante el ensayo. Así, si se miden humedades tempranas a intervalos iguales, se logra estimar indirectamente la difusividad hidráulica, D , de un suelo, cuya determinación directa en laboratorio es compleja. Dado que puede construirse la recta de Asaoka, de ella se obtiene tanto la humedad final como la difusividad hidráulica, la cual es proporcional al logaritmo neperiano de la pendiente M de la recta, de acuerdo con la ecuación (2).

Ha de puntualizarse que, como el método de Asaoka es aplicable sólo con determinaciones de humedad cuando se encuentra en un grado de equilibrado superior al 60 %, la difusividad hidráulica obtenida es un valor representativo de las fases avanzadas del reequilibrado de la humedad. Para favorecer la representatividad, parece conveniente imponer al ensayo succiones no muy alejadas de las que tienen el suelo en las condiciones iniciales.

6 – AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a Rafael Villamor Lora, doctorando del Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental del Massachusetts Institute of Technology (EE.UU.) por facilitar las muestras de roca Marcellus; a Claudio Olalla Marañón, Catedrático de Ingeniería del Terreno de la ETS de Ingenieros de Caminos de Madrid (U.P.M.) por financiar esta línea de investigación; y a D. Fernando Pardo de Santayana, Director del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, por poner a disposición de la primera autora las instalaciones y los equipos de suelos no saturados.

7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Cui, Y.-J. & Delage, P. (1996). *Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt*. Géotechnique, 46, pp. 291-311.
- Cuisinier, O. & Masrouri, F. (2005). *Influence of complex hydromechanical loadings on the behaviour of a compacted expansive soil*. Canadian Geotechnical Journal, 42, pp. 731-741.
- Delage, P., Suraj De Silva, G.P.R. & De Laure, E. (1987). *Un nouvel appareil triaxial pour les sols non saturés*. 9th Eur. Conf. of Soil Mechanics, Dublin: 26–28.
- Delage, P., Howat, M. & Cui, Y.-J. (1998). *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*. Engineering Geology, 50, pp. 31-48.
- Delage, P., Suraj de Silva, G.P.R. & Vicol, T. (1992). *Suction controlled testing of nonsaturated soils with an osmotic consolidometer*. Proc. 7th Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, Texas, pp. 206–211.
- Dineen, K. (1997). *The influence of soil suction on compressibility and swelling*. Ph.D. Thesis, Imperial College, Univ. of London.
- Escario, V. y Sáez, J. (1989). *Determinación de las características de los suelos parcialmente saturados (I+D)*. CEDEX, Clave 82-340-0-001.
- Fredlund, D.G. & Morgenstern, N.R. (1977). *Stress state variables for unsaturated soils*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 103, pp. 447-461.
- Gardner, W.R. (1956). *Calculation of capillary conductivity from pressure plate outflow data*. Proc. Soil Science Society of America, 20, pp. 317-320.
- Hilf, J.W. (1956). *An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils*. U.S. Bureau of Reclamation, Design and Const. Div. Tech. Memo. 654.
- Jucá, F.T. (1990). *Comportamiento de los suelos parcialmente saturados bajo succión controlada*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ing. Caminos, Univ. Polit. de Madrid.

- Kassif, G. & Ben Shalom, A. (1971). *Experimental relationship between swell pressure and suction*. Géotechnique, 20, n° 3, pp. 245–255.
- 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.
- Rezaee, R. (2015). *Fundamentals of gas shale reservoirs*, Wiley.
- Richards, L.A. (1941). *A pressure membrane extraction apparatus for soil solution*. Soil Science, 51, pp. 377-386.
- Richards, B.G. (1965). *Measurement of the free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistor*. Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, Butterworth, Australia, pp. 39-46.
- 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.
- Suraj de Silva, G.P.R. (1987). *Etude expérimentale du comportement d'un limon non saturé sous succion contrôlée*. Doctoral Thesis, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Tarantino, A. & Mongioli, L. (2000). *A study of the efficiency of semi-permeable membranes in controlling soil matrix suction using the osmotic technique*. Proc. Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, pp. 303-308.
- Tarantino, A., Mongioli, L. & Bosco, G. (2000). *An experimental investigation on the independent isotropic stress variables for unsaturated soils*. Géotechnique, n° 50, pp. 275-282.
- Tarantino, A., Romero, E. & Cui, Y.-J. (2008). *Laboratory and field testing of unsaturated soils*, Springer.
- Villamor-Lora, R., Ghazanfari, E. & Asanza-Izquierdo, E. (2016). *Geomechanical Characterization of Marcellus Shale*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 49, n° 9, pp. 3403–3424.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G. & Barbour, S.L. (1994). *Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation*. Canadian Geotechnical Journal, 31, pp. 151-161.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G. & Barbour, S.L. (1997). *The effect of soil suction on evaporative fluxes from soil surfaces*. Canadian Geotechnical Journal, 34, pp.145-155.
- Woodruff, C.M. (1940). *Soil moisture and plant growth in relation to pF*. Proc. Soil Science Society of America, 5, pp. 36-41.
- Zur, B. (1966). *Osmotic control of the matrix soil water potential*. Soil Science, 102, pp. 394–398.