

SUPERFICIES DE ESTADO PARA SUELOS NO SATURADOS

A. LLORET
E.E. ALONSO

E.T.S.I. Caminos de Barcelona

RESUMEN

Se proponen, en base al comportamiento cualitativo observado, una serie de modelos analíticos simples para describir las superficies de estado para cambios de volumen y grado de saturación en suelos parcialmente saturados sujetos a compresión isotrópica o confinada. Se utilizan los resultados de ensayos realizados, junto a otros tomados de diversas publicaciones, para encontrar, a través de las técnicas de optimización apropiadas, las expresiones analíticas más adecuadas para esas superficies.

INTRODUCCION

En las últimas décadas el comportamiento constitutivo del suelo parcialmente saturado se ha estudiado principalmente a través de métodos experimentales. Inicialmente, Bishop (1959) y Aitchison y Bishop (1960) sugirieron la existencia de una tensión efectiva, definida como:

$$\sigma' = \sigma - Pa + X(Pa - Pw) \quad (1)$$

donde σ es la tensión total, Pa y Pw las presiones de aire y agua y X un parámetro altamente dependiente del grado de saturación, historia de tensiones y estructura del suelo.

El concepto de tensión efectiva fue cuestionado rápidamente por Jennings y Burland (1962), Bishop y Blight (1963), Aitchison (1965), Blight (1965) y Burland (1965).

De hecho, una reducción de σ' a través de una disminución de succión puede ocasionar el colapso o el hinchamiento del suelo en función de cual sea el valor de σ . Si se reduce σ' como consecuencia de una reducción de σ se produce un hinchamiento mientras que si se reduce debido a una disminución de succión puede pro-

ducirse un colapso. Estos fenómenos no son compatibles con la definición de tensión efectiva establecida en la ecuación (1).

Coleman (1962) sugirió que bajo condiciones de carga isotrópica, los cambios de volumen total (V) y de agua (Vw) en el suelo podían expresarse en términos de cambios de ($\sigma - Pa$) y ($Pa - Pw$) en la forma:

$$-\frac{dV}{V} = C_{11} d(Pa - Pw) + C_{12} d(\sigma - Pa) \quad (2)$$

$$-\frac{dVw}{V} = C_{21} d(Pa - Pw) + C_{22} d(\sigma - Pa) \quad (3)$$

donde los coeficientes C_{ij} varían e incluso pueden cambiar de signo en función del valor e historia de las tensiones (y succiones) aplicadas al suelo. Bishop y Blight (1963), Blight (1965) y Burland (1965) sugieren la conveniencia de formular relaciones funcionales entre el índice de poros y ($\sigma - Pa$) y ($Pa - Pw$) tomadas como variables independientes.

Por medio de ensayos de deformación volumétrica nula Fredlund y Morgenstern (1977) mostraron que la pareja de tensiones mencionada constituyen un sistema de tensiones significativas para suelos parcialmente saturados.

Matyas y Radhakrishna (1968) introducen el concepto de superficie de estado para relacionar el índice de poros (e) y el grado de saturación (S_r) con ($\sigma - Pa$) y ($Pa - Pw$). Estos autores mostraron que estas superficies son únicas para secuencias monótonas de disminución de volumen y aumento de saturación. Esta unicidad se confirma en el trabajo de Barden et al. (1969).

Fredlund y Morgenstern (1976) realizaron una serie de ensayos con diferentes trayectorias de tensión total y succión que pusieron de manifiesto la notoria influencia de los ciclos de carga-descarga o secado-humedecimiento. En el mismo trabajo se proponen relaciones constitutivas análogas a las de Coleman.

(*) Este artículo es traducción del presentado al 11 Congreso Internacional sobre Mecánica del Suelo e Ingeniería de Construcción, San Francisco, 1985.

Para amplias regiones de las superficies de estado Fredlund (1979) propuso las siguientes expresiones:

$$e = e_o - C_t \log \frac{(\sigma - P_a)}{(\sigma - P_a)_o} - C_m \log \frac{(P_a - P_w)}{(P_a - P_w)_o} \quad (4)$$

$$w = w_o - D_t \log \frac{(\sigma - P_a)}{(\sigma - P_a)_o} - D_m \log \frac{(P_a - P_w)}{(P_a - P_w)_o} \quad (5)$$

donde w es la humedad y C_t , C_m , D_t y D_m son constantes.

Por otra parte se han derivado funciones relativamente complejas para relacionar el grado de saturación y la succión del suelo sin tener en cuenta variaciones de la carga exterior. Por ejemplo, Casteleiro (1975) propuso la siguiente expresión para el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ):

$$\theta = \theta_s \exp \left[\frac{-\mu(P_a - P_w)}{(P_a - P_w)_{cr}} \right] + \theta_{cr} \tan h \left[\frac{\theta(P_a - P_w)}{(P_a - P_w)_{cr}} \right] \quad (6)$$

donde θ_s , θ_{cr} , μ , θ y $(P_a - P_w)_{cr}$ son constantes a encontrar en cada suelo en particular.

Las superficies de estado permiten una modelización unificada de los fenómenos de hinchamiento y colapso en suelos parcialmente saturados. Lloret y Alonso (1980) desarrollaron un modelo unidimensional de consolidación que incorpora las superficies de estado para encontrar

los cambios de índice de poros y del grado de saturación del suelo. Estas superficies son descritas analíticamente mediante un sistema de interpolación a través de datos experimentales que utiliza "splines" bidimensionales. Esta descripción tiene dos inconvenientes:

a) El número de ensayos necesario para cubrir un rango de variación moderado de las tensiones significativas es alto. Por otra parte los ensayos necesarios son complejos y de larga duración.

b) Si la superficie interpolada se obliga a pasar por todos los puntos derivados de los ensayos, se pueden introducir grandes errores en las pendientes (módulos) de las superficies. Estos errores obviamente afectan a cualquier modelo de consolidación.

Unas expresiones matemáticas para las superficies de estado relativamente simples y de aplicación general, definidas por medio de un número reducido de puntos fácilmente obtenibles en el laboratorio, reduciría los trabajos experimentales y facilitaría la incorporación en modelos numéricos de estas superficies.

En este trabajo se proponen diferentes tipos de funciones analíticas y sus predicciones se comparan con resultados experimentales en suelos de diferentes tipos. Se realiza asimismo un análisis de la aplicabilidad de las diferentes expresiones y por último se seleccionan entre ellas las consideradas como óptimas desde el punto de vista de un mejor ajuste a los datos experimentales.

TRABAJO EXPERIMENTAL

Se han ensayado dos tipos de suelo. Uno de ellos es un caolín comercial moderadamente plástico (sus propiedades básicas se muestran en la tabla 1) que se ensayó bajo condiciones de confinamiento y de carga isotrópica.

Suelo (Referencia)	WL %	Wp %	LP %	% < 0,002 mm	Clasificación	γ_s (gr/cm ³)	Composición	Preparación de la muestra
1. Arcilla limosa (Jennings y Burland, 1962)	56,4	21,2	35,2	23	CH	2,75	80% turrita 20% bentonita	Fabricada en molde
2. Caolín (Matyas y Radhakrishna, 1968)	29	25	4	8	ML	2,63	80% polvo de turrita 20% caolín	Compactación estática
3. Arcilla West Water (Barden et al. 1969)	20	10	10	10	CL	2,66	lila	Compactación 1/2 Proctor
4. Caolín (Lloret, 1982)	41	29	12	4	ML	2,65	Caolín	Compactación estática
5. Arena arcillosa "Pitolen"	32,2	18,5	13,7	3	SC	2,72	— — —	Compactación Harvard

TABLA 1. Características de los suelos analizados

Serie de ensayos	Tipo de ensayo (+)	Tipo de suelo (Tabla 1)	Índice de poros inicial	Grado de saturación inicial	Rango de succiones (10^3 N/m ²)	Rango de carga aplicada (10^6 N/m ²)	Nº de puntos para definir la superficie e/S_u	Tipo de trayectoria tensional (*)
1	A	4	0.934	0.517	0-1	0.05-8	41/36	C
2	B	4	0.934	0.517	0.2-1	0.1-2	8/8	D
3	A	5	0.474	0.433	0-1	0.05-8	25/25	D
4	B	2	0.825	0.676	0-1.03	0.14-8.27	31/31	C
5	A	2	0.963	0.491	0-0.68	0.14-8.27	29/29	C
6	B	1	0.838	0.504	0-31.02	0.1-30.6	21/12	D
7	A	3	0.475	0.400	0.02-0.82	0.41-4.5	15/-	C

TABLA 2. Características de las series de ensayos analizadas.

(+): A: Deformación unidimensional
B: Compresión isotrópica

(*): C: Carga bajo succión constante alternando con disminución de succión
D: Carga bajo succión constante

Con este primer suelo se realizaron seis ensayos edométricos.

Cinco muestras se sometieron a procesos de carga bajo diferentes succiones. La sexta fue sometida a etapas alternativas de incremento de carga y reducción de succión. Por otra parte, el mismo suelo se ensayó bajo condiciones de carga isotrópica creciente para succiones diferentes. En la tabla 2 se muestran más detalles relativos a estos ensayos (Serie de ensayos número 1 y 2).

El segundo suelo ensayado ha sido el llamado Piñolen (arena arcillosa utilizada para la construcción del núcleo impermeable de la presa de El Limonero (Málaga). Se trata de un suelo de tipo detrítico con cierta cantidad de finos (18%) que le confieren una plasticidad correspondiente a un índice plástico de 13.7. Sobre este suelo se realizaron cinco ensayos edométricos cargando el suelo a diferentes succiones. (Ver tablas 1 y 2).

Para la realización de los ensayos se ha construido una célula edométrica de acuerdo con el esquema mostrado en la fig. 1. Durante la ejecución de los ensayos se controlan las presiones de aire y agua y se miden los cambios de volumen y de agua en el suelo. Otros diseños de células análogas ya han sido descritos en los trabajos de Escario (1967), Barden y otros (1969), Aitchison y Woodburn (1969), Moore y Millar (1971) y Fredlund y Morgenstern (1976). Por otra parte, se ha adaptado una célula triaxial para la realización de ensayos de compresión isotrópica siguiendo las pautas de Bishop y Donald (1961), Matyas y Radhakrishna (1968) y Fredlund y Morgenstern (1976).

TIPOS DE SUPERFICIES DE ESTADO

Ecuaciones como las del tipo 4 de la tabla 3 con los coeficientes C constantes no pueden modelar simultáneamente el comportamiento de colapso inducido al inundar un suelo sometido a una carga relativamente alta y el de hinchamiento que tiene lugar cuando el aumento de saturación se produce con una carga pequeña. Aún cuando este comportamiento mixto no se observe en cualquier tipo de suelo, lo cierto es que la deformabilidad asociada a cambios en la carga total aumenta cuando la succión disminuye.

Estas consideraciones conducen a pensar que los coeficientes C y D en la ecuación 4 no pueden ser constantes.

Una primera aproximación consiste en aceptar una dependencia lineal de estos coeficientes con $(\sigma - P_a)$ y $(P_a - P_w)$. En otras palabras, las pendientes de las superficies $e/d(\sigma - P_a)$ y $e/d(P_a - P_w)$ dependen linealmente de $(P_a - P_w)$ y de $(\sigma - P_a)$ respectivamente. La ecuación más sencilla que admite este tipo de requerimientos es del siguiente tipo:

$$e = a + b(\sigma - P_a) + c(P_a - P_w) + d(\sigma - P_a)(P_a - P_w) \quad (7)$$

donde a, b, c y d son constantes. Siguiendo la nomenclatura de Coleman (ecuación 3) los coeficientes C_{ij} pueden escribirse como:

$$C_{11} = -\frac{1}{1 + e_0}[c + d(\sigma - P_a)] \quad (8)$$

$$C_{22} = -\frac{1}{1 + e_0}[b + d(P_a - P_w)] \quad (9)$$

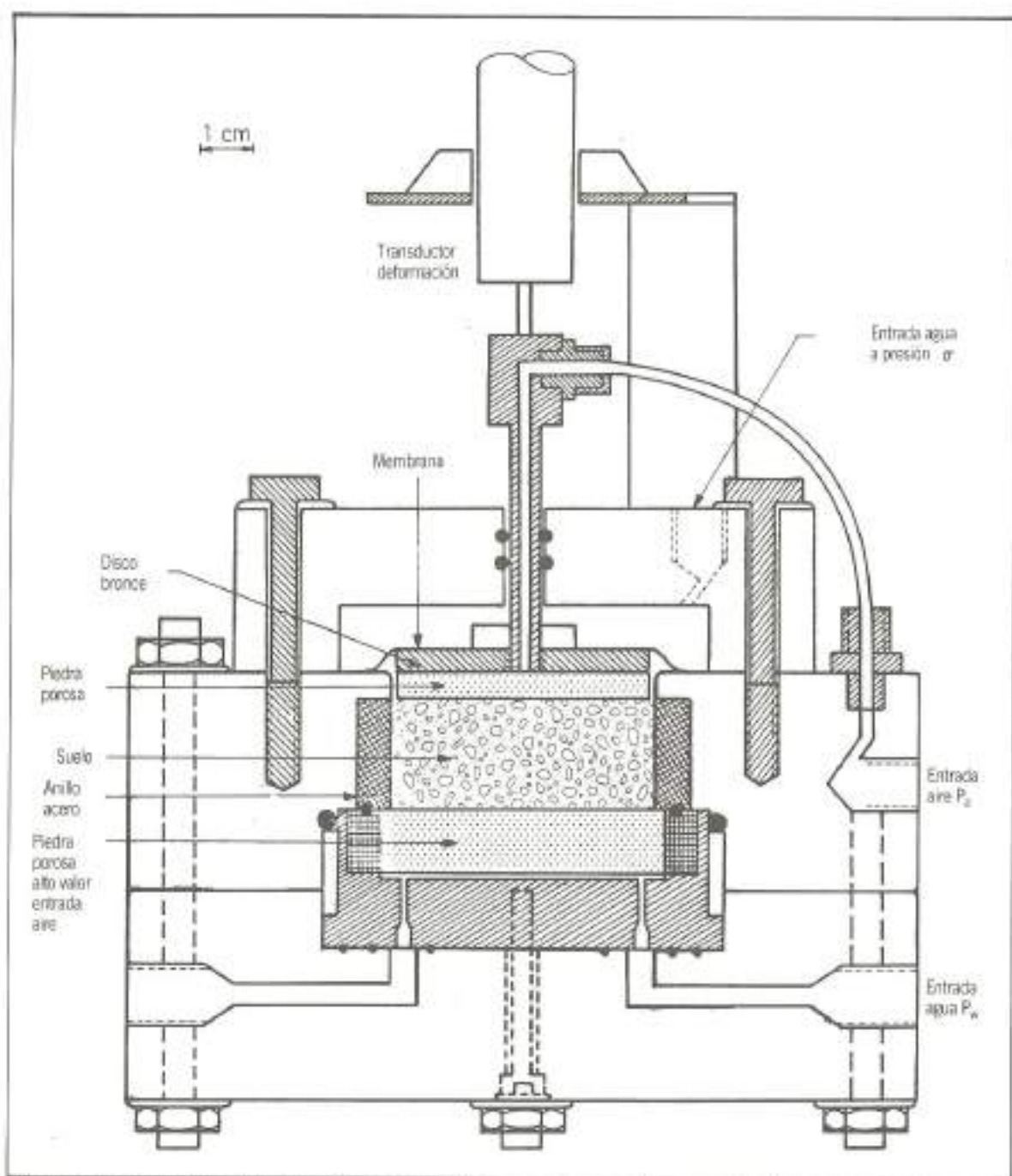


FIGURA 1. Esquema de la célula utilizada en ensayos de compresión confinada con control de las presiones de aire y agua.

Evidentemente, el uso de un mayor número de coeficientes mejoraría la calidad de la aproximación, pero el sentido físico de los parámetros se perdería rápidamente. Si sólo se consideran los términos lineales:

$$e = a + b (\sigma - P_a) + c (P_a - P_w) \quad (10)$$

la formulación resultante es equivalente la propuesta inicial de Bishop (1969) (ecuación 1). De hecho:

$$\frac{e - a}{b} = (\sigma - P_a) + \frac{c}{b} (P_a - P_w) = (\sigma - P_a) + x (P_a - P_w) \quad (11)$$

TIPO	FUNCION	CODIGO
1	$\frac{e}{S_r} = a + b(\sigma - P_a) + c(P_a - P_w)$	L P, S
2	$\frac{e}{S_r} = a + b \log(\sigma - P_a) + c(P_a - P_w)$	L Log P, S
3	$\frac{e}{S_r} = a + b(\sigma - P_a) + c \log(P_a - P_w)$	L P, Log S
4	$\frac{e}{S_r} = a + b \log(\sigma - P_a) + c \log(P_a - P_w)$	L Log P, Log S
5	$\frac{e}{S_r} = a + b(\sigma - P_a) + c(P_a - P_w) + d(\sigma - P_a)(P_a - P_w)$	NL P, S
6	$\frac{e}{S_r} = a + b \log(\sigma - P_a) + c(P_a - P_w) + d \log(\sigma - P_a)(P_a - P_w)$	NL Log P, S
7	$\frac{e}{S_r} = a + b(\sigma - P_a) + c \log(P_a - P_w) + d(\sigma - P_a) \log(P_a - P_w)$	NL P, Log S
8	$\frac{e}{S_r} = a + b \log(\sigma - P_a) + c \log(P_a - P_w) + d \log(\sigma - P_a) \cdot \log(P_a - P_w)$	NL Log P, Log S
9	$S_r = a - Th[b(P_a - P_w)] [c + d(\sigma - P_a)]$	NL P, Th S
10	$S_r = a - \left[1 - e^{-b(P_a - P_w)} \right] [c + d(\sigma - P_a)]$	NL P, Ex S

TABLA 3. Tipo de funciones usadas para aproximar las superficies de estado.

Otra posibilidad de elección es la utilización de variaciones logarítmicas de las tensiones significativas que, en principio, pueden estar mejor justificadas para variaciones grandes de estas tensiones (especialmente con respecto a la succión). Sin embargo, las funciones logarítmicas presentan el inconveniente de que no pueden utilizarse directamente en los casos en que la succión o las cargas sean nulas.

Finalmente se han seleccionado la serie de funciones lineales y no lineales que se recogen en la tabla 3. Estas ecuaciones cubren diferentes posibilidades pero mantienen una simplicidad siempre deseable. Para predecir el grado de saturación se han propuesto estos mismos tipos de funciones. En este caso, ecuaciones como las del tipo (6) sugieren una variación hiperbólica y una disminución exponencial con la succión del grado de saturación. Asimismo, se han propuesto dos tipos de funciones adicionales sólo para el grado de saturación. (Tipos 9 y 10 en la tabla 3).

RESULTADOS.

Se han seguido técnicas de ajuste por mínimos cuadrados para encontrar los coeficientes de las diferentes expresiones mostradas en la tabla 3 que aproximen mejor los resultados experimentales de cada una de las series de ensayos indicados en la tabla 2. Los valores predichos y los medidos se han comparado posteriormente a través de técnicas de regresión convencionales. En las tablas 4 y 5 se muestran los parámetros de regre-

sión de las superficies de estado de cada tipo que mejor se ajustan a los resultados experimentales obtenidos por Lloret (1982) (Series de ensayo 1 y 2 de la tabla 2). Las figuras 2 y 3 muestran la recta de regresión entre los resultados medidos y calculados para dos tipos particulares de modelo para las superficies de estado de la serie de ensayos 1 de la tabla 2. El coeficiente de correlación para el caso mostrado en la figura 2 es de 0,988, la dispersión de los resultados es mínima. El caso mos-

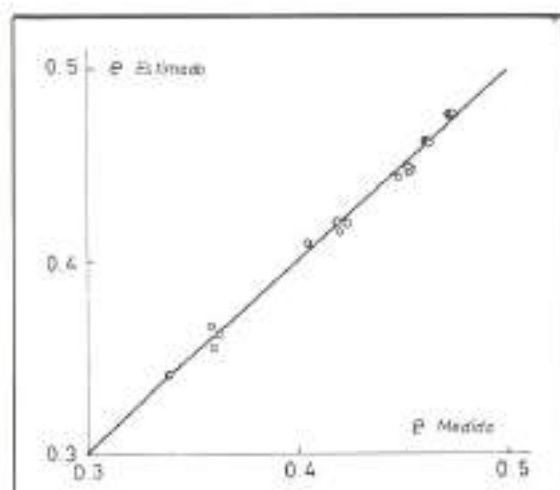


FIGURA 2. Correlación entre los índices de poros medidos y estimados en la serie de ensayos nº 1 (caolín, compresión confinada). Modelo de superficie de estado tipo NL P, LogS. (Ver tabla III).

CODIGO DE LA FUNCIÓN (T. 3)	b	a	Em	Ea	σb	Vx
L.P. S(S=0)	0.860	0.125	8.49	2.316	0.0556	0.0741
L.P. S(S ≠ 0) (*)	0.972	0.025	3.33	0.939	0.0303	0.0379
L.LogP. S(S=0)	0.651	0.312	17.12	4.688	0.0763	0.0859
L.LogP. S(S ≠ 0) (*)	0.654	0.305	11.27	3.646	0.0869	0.0831
L.P. LogS	0.972	0.025	3.32	0.945	0.0301	0.0377
L.LogP. LogS	0.655	0.304	11.00	3.655	0.0868	0.0831
NL.P. S(S=0)	0.905	0.085	7.20	1.988	0.0470	0.0652
NL.P. S(S ≠ 0) (*)	0.986	0.012	3.16	0.564	0.0212	0.0270
NL.LogP. S(S=0)	0.730	0.241	12.87	3.975	0.0711	0.0850
NL.LogP. S(S ≠ 0) (*)	0.694	0.270	9.47	3.399	0.0841	0.0830
NL.P. LogS	0.968	0.011	3.34	0.480	0.0200	0.0255
NL.LogP. LogS	0.697	0.268	8.52	3.401	0.0839	0.0829

TABLA 4. Resultados estadísticos para los diferentes tipos de funciones propuestas para definir el índice de poros. (Serie de ensayos nº 1).

(*) Los puntos del plano Pa — Pw = 0 no se han considerado

LEYENDA

- b = Coeficiente de regresión
- a = Ordenada en el origen
- Em = Error máximo (%)
- Ea = Error medio (%)
- σb = Desviación standard del coeficiente de regresión
- Vx = Coeficiente de variación de una nueva estimación en el punto 1/2 de la media de los valores medidos

CODIGO DE LA FUNCIÓN (T. 3)	b	a	Em	Ea	σb	Vx
L.P. S(S=0)	0.852	0.111	23.33	7.700	0.0609	0.1572
L.P. S(S ≠ 0) (*)	0.897	0.069	13.24	4.720	0.0607	0.1166
L.LogP. S(S=0)	0.854	0.110	22.81	7.671	0.0606	0.1567
L.LogP. S(S ≠ 0) (*)	0.874	0.084	13.12	4.994	0.0664	0.1248
L.P. LogS	0.908	0.062	10.00	4.160	0.0579	0.1122
L.LogP. LogS	0.898	0.069	11.24	4.154	0.0606	0.1164
NL.P. S(S=0)	0.853	0.110	23.42	7.655	0.0607	0.1568
NL.P. S(S ≠ 0) (*)	0.901	0.066	12.81	4.553	0.0598	0.1151
NL.LogP. S(S=0)	0.856	0.108	22.50	7.636	0.0607	0.1560
NL.LogP. S(S ≠ 0) (*)	0.874	0.084	13.11	4.966	0.0663	0.1247
NL.P. LogS	0.909	0.061	10.57	4.154	0.0576	0.1117
NL.LogP. LogS	0.901	0.066	11.24	4.136	0.0597	0.1150
NL.P. ThS(S=0)	0.936	0.048	13.97	4.926	0.0421	0.1174
NL.P. ExS(S=0)	0.952	0.036	12.59	3.962	0.0369	0.1043
NL.P. ThS(S ≠ 0) (*)	0.906	0.063	14.18	4.305	0.0586	0.1134
NL.P. ExS(S ≠ 0) (*)	0.909	0.061	13.62	4.255	0.0578	0.1121

TABLA 5. Resultados estadísticos para los diferentes tipos de funciones propuestas para definir el grado de saturación. (Serie de ensayos nº 1).

(Ver leyenda Tabla IV).

trado en la figura 3 es menos satisfactorio, aquí el coeficiente de correlación es de 0,952 y la dispersión de los resultados refleja probablemente las dificultades experimentales asociadas a la medida del grado de saturación. La dispersión de los valores medidos alrededor de los predichos se ha caracterizado por el coeficiente de variación en un punto localizado a una distancia del origen igual a un medio del valor medido de los valores de las medidas realizadas. (Última columna en tablas 4 y 5). Este coeficiente es de 0.025 en el caso de la fig. 2 y de 0.1 en el de la fig. 3. Un análisis similar se ha efectuado utilizando el "Piñolen". En este caso la dispersión ha sido mejor y casi idéntica para el índice de poros y el grado de saturación.

La mejor aproximación encontrada para el índice de poros del Piñolen (Serie de ensayos nº 3 de la tabla 2) bajo compresión confinada se recoge en el dibujo de la fig. 4. En la figura puede apreciarse la dependencia de la compresibilidad con la succión y la transición del comportamiento de hinchamiento (pequeño) al de colapso.

La figura 5 es una representación de la superficie óptima para el grado de saturación de la serie de ensayos con el Piñolen. La mejor aproximación se ha obtenido con una función exponencialmente decreciente con la succión y linealmente dependiente con la tensión ($\sigma - Pa$).

Se han encontrado los coeficientes de correla-

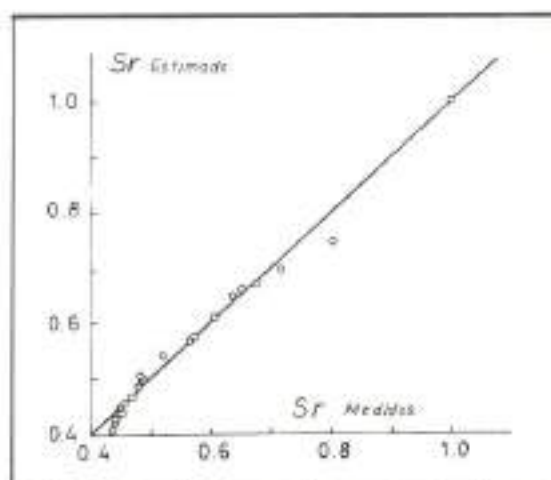


FIGURA 3. Correlación entre los grados de saturación medidos y estimados en la serie de ensayos nº 1 (caolín, compresión confinada). Modelo de superficie de estado tipo NL P, ExS. (Ver tabla III).

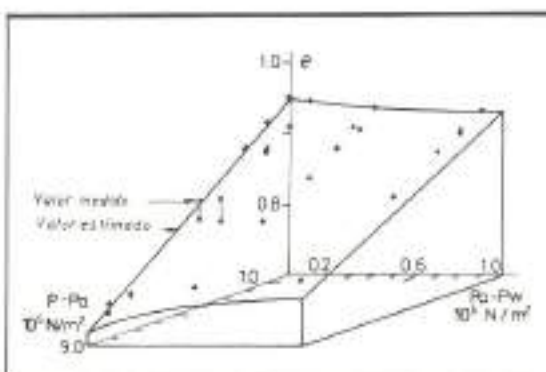


FIGURA 4. Superficie de estado predicha por el modelo NL P, LogS para el índice de poros del "Píñolen" (serie de ensayos nº 3, compresión confinada).

ción entre las medidas y la predicciones óptimas para todas las series de ensayos mencionadas previamente. Los valores de estos coeficientes se muestran en las tablas 6 y 7 respectivamente.

En lo relativo al índice de poros, la mejor aproximación para los ensayos en los que el rango de variación de las tensiones ha sido relativamente pequeño se obtiene con funciones del tipo NL P, Log S (En la tabla 3 se describe la definición de los diferentes códigos). Para rangos de tensión más amplios la mejor aproximación se obtiene con funciones del tipo NL Log P, Log S. Las relaciones no lineales proporcionan lógicamente mejores resultados que las lineales análogas. Sin embargo, las diferencias entre los resultados de las funciones lineales y no lineales son en general pequeñas, quizá como consecuencia del limitado rango de variación de la succión y de la tensión total en la mayor parte de las series de ensayos analizados.

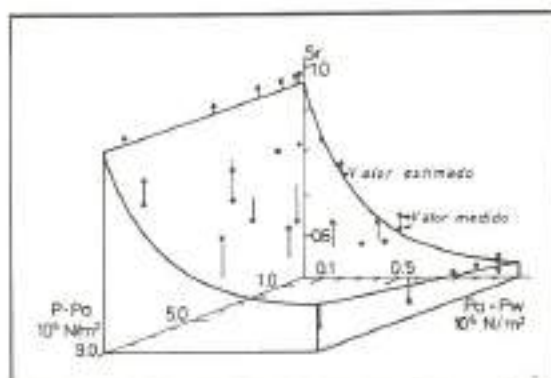


FIGURA 5. Superficie de estado predicha por el modelo NL P, ExS para el grado de saturación del "Píñolen" (Serie de ensayos nº 3, compresión confinada).

FUNCIÓN	SERIE DE ENSAYOS							MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION
	1	2	3	4	5	6	7		
L.P. S(S = 0)	0.8596	0.9783	0.9745	0.8160	0.8904	0.5021	0.8894	0.8443	0.1917
L.P. S(S ≠ 0) (*)	0.9717	0.9783	0.9822	0.8612	0.9312	0.6201	0.8894	0.8906	0.1437
L.LogP. S(S = 0)	0.6508	0.9376	0.5895	0.9370	0.8768	0.7109	0.8450	0.7925	0.1783
L.LogP. S(S ≠ 0) (*)	0.6537	0.9376	0.5833	0.9443	0.9255	0.8345	0.8450	0.8177	0.1764
L.P. LogS	0.9720	0.9738	0.9838	0.8614	0.9344	0.6107	0.8958	0.8908	0.1474
L.LogP. LogS	0.6548	0.9401	0.5849	0.9452	0.9374	0.8295	0.8485	0.8201	0.1777
NL P. S(S = 0)	0.9047	0.9860	0.9877	0.8191	0.9063	0.6190	0.9490	0.8817	0.1469
NL P. S(S ≠ 0) (*)	0.9863	0.9860	0.9875	0.8613	0.9337	0.7333	0.9490	0.9196	0.1018
NL LogP. S(S = 0)	0.7302	0.9377	0.5993	0.9817	0.9649	0.8275	0.9090	0.8500	0.1660
NL LogP. S(S ≠ 0) (*)	0.6939	0.9377	0.5871	0.9732	0.9452	0.9484	0.9090	0.8564	0.1773
NL P. LogS	0.9878	0.9782	0.9905	0.8614	0.9352	0.7404	0.9628	0.9223	0.0997
NL LogP. LogS	0.6966	0.9419	0.5898	0.9753	0.9578	0.9501	0.9191	0.8615	0.1779

TABLA 6. Coeficientes de regresión entre los valores del índice de poros estimados por las distintas funciones propuestas y medidos en las diferentes series de ensayos.

(*) Los puntos del plano $P_a = P_w = 0$ no se han considerado.

FUNCIÓN	SERIE DE ENSAYOS							MEDIA	COEFICIENTE DE VARIACION
	1	2	3	4	5	6	7		
L.P. S(S=0)	0.8520	0.9854	0.7827	0.7426	0.9441	0.9519	0.8698	0.8769	0.1052
L.P. S(S ≠ 0)(*)	0.8972	0.9854	0.8339	0.9514	0.9537	0.9617	0.8698	0.9233	0.0614
L.LogP. S(S=0)	0.8538	0.9811	0.7649	0.7460	0.9450	0.9745	0.8722	0.8768	0.1095
L.LogP. S(S ≠ 0)(*)	0.8740	0.9811	0.7274	0.8955	0.8500	0.9804	0.8722	0.8887	0.0958
L.P. LogS	0.9077	0.9842	0.9418	0.9691	0.9397	0.8897	0.9755	0.9439	0.0375
L.LogP. LogS	0.8977	0.9729	0.8353	0.9174	0.9505	0.9786	0.9753	0.9325	0.0567
NL.P. S(S=0)	0.8533	0.9867	0.7854	0.7434	0.9461	0.9519	0.8742	0.8787	0.1047
NL.P. S(S ≠ 0)(*)	0.9009	0.9867	0.8361	0.9672	0.9645	0.9769	0.8742	0.9281	0.0624
NL.LogP. S(S=0)	0.8560	0.9836	0.7661	0.7461	0.9458	0.9755	0.8752	0.8783	0.1096
NL.LogP. S(S ≠ 0)(*)	0.8741	0.9836	0.7295	0.9230	0.8957	0.8414	0.8752	0.8746	0.0896
NL.P. LogS	0.9087	0.9853	0.9442	0.9737	0.9519	0.7811	0.9777	0.9318	0.0765
NL.LogP. LogS	0.9011	0.9734	0.8378	0.9424	0.9553	0.9793	0.9769	0.9380	0.0554
NL.P. ThS(S=0)	0.9360	0.9904	0.9949	0.9956	0.9600	0.9684	0.9890	0.9763	0.0230
NL.P. ExS(S=0)	0.9516	0.9910	0.9938	0.9962	0.9594	0.9684	0.9893	0.9785	0.0187
NL.P. ThS(S ≠ 0)(*)	0.9057	0.9904	0.9784	0.9554	0.9675	0.9634	0.9890	0.9643	0.0300
NL.P. ExS(S ≠ 0)(*)	0.9090	0.9910	0.9840	0.9611	0.9651	0.9633	0.9893	0.9661	0.0292

TABLA 7. Coeficientes de regresión entre los valores del grado de saturación estimados por las distintas funciones propuestas y las medidas en las diferentes series de ensayos.

(*) Los puntos del plano Pa-Pw=0 no se han considerado.

Para el grado de saturación las diferencias entre las aproximaciones lineales y no lineales son más acusadas. Los mejores resultados se obtienen para modelos NL P, Th S y NL P, Ex S (Ver tabla 3). Se observa por último, que la mejor aproximación (coeficiente de correlación más alto) se obtiene en los ensayos con menores errores de dispersión. Esta tendencia se refleja en las tablas 4 y 5.

CONCLUSIONES.

Del análisis de los resultados de los ensayos de carga isotrópica y con deformación lateral nula realizados sobre dos tipos de suelo y de los resultados de otros ensayos disponibles en la literatura pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. Para variaciones limitadas de la tensión externa para representar la superficie de estado del índice de poros puede utilizarse la expresión analítica siguiente:

$$e = a + b(\sigma - P_a) + c \log(P_a - P_w) + d(\sigma - P_a) \log(P_a - P_w)$$

2. Si el rango de variación de las tensiones significativas es grande se obtiene una mejor aproximación con la función:

$$e = a + b \log(\sigma - P_a) + c \log(P_a - P_w) + d \log(\sigma - P_a) \log(P_a - P_w)$$

3. Respecto a la superficie de estado del grado de saturación, se obtienen excelentes resultados con cualquiera de las dos expresiones siguientes:

$$S_r = a - Th |b(P_a - P_w)| [c + d(\sigma - P_a)]$$

$$S_r = a - \{1 - \exp[-b(P_a - P_w)] [c + d(\sigma - P_a)]\}$$

En este último caso una parte importante de las desviaciones observadas puede explicarse probablemente por la dificultad experimental de medir cambios muy pequeños de volumen de agua.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores agradecen a los alumnos J.A. Clariana, A. Feliz y J.M. Llopis el entusiasmo y dedicación mostrados en la obtención de algunos de los resultados experimentales analizados en esta comunicación.

REFERENCIAS.

- Aitchison, G.D. (1965). Discussion in Proc. 8th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 3, 318-321, Montreal.
- Aitchison, G.D. y Bishop, A.W. (1960). Discussion in "Pore pressure and suction in soils", 150. London: Butterworths.
- Aitchison, G.D. y Woodburn, J.A. (1969). Soil suction foundation design. Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 2, 1-8, Mexico.
- Barden, L., Maderdor, A.O. y Sides, G.R. (1969). Volume change characteristics of unsaturated clays. J. Soil Mech. Frns. Div. ASCE. 95, SM1, 33-51.
- Bishop, A.W. (1959). The principle of effective stress. Teknik Ukeblad. 39, 859-863.
- Bishop, A.W. y Blight, G.E. (1963). Some aspects of

effective stress in saturated and unsaturated soils. *Geotechnique* 13, nº 3, 177-197.

Bishop, A.W. y Donald, I.B. (1961). The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus. *Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng.* Vol. 1, 13-21, Paris.

Blight, G.E. (1965). A study of effective stresses for volume change, in *Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas*, 259-269. Sidney: Butterworths.

Burland, J.B. (1965). Some aspects of mechanical behaviour of partly saturated soils, in *Moisture equilibria and moisture changes in soil beneath covered areas*, 270-278, Sidney: Butterworths.

Casteleiro, M. (1975). Mathematical model of one-dimensional consolidation and desiccation of dredged materials. Ph. D. Thesis, Northwestern University.

Coleman, J.D. (1962). Stress strain relations for partly saturated soils. *Correspondence, Geotechnique* 12, nº 4, 348-350.

Escario, V. (1967). Measurement of the swelling characteristics of a soil fed with water under tension. *International Cooperative Research on the Prediction of Moisture Content under Road Pavements*, Working Group under the auspices of OCDE Madrid Meeting.

Fredlund, D.G. (1979). Second Canadian Geotechnical Colloquium: Appropriate concepts and technology for unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 16, nº 1, 121-139.

Fredlund, D.G. y Morgenstern, N.R. (1976). Constitutive relations for volume change in unsaturated soils. *Can. Geotech. J.* 13, nº 3, 261-276.

Fredlund, D.G. y Morgenstern, N.R. (1977). Stress state variables for unsaturated soils. *J. Geotech. Div. A.S.C.E.* 103, GT5 447-466.

Jennings, J.E.B. y Burland, J.B. (1962). Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. *Geotechnique* 12, nº 2, 125-144.

Lloret, A. (1982). Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas. Tesis D. Universidad Politécnica de Barcelona.

Lloret, A. y E.E. Alonso (1980). Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour. *Geotechnique* 30, nº 4, 449-477.

Matyas, E.L. y Radhakrishna, H.S. (1968). Volume change Characteristics of partially saturated soils. *Geotechnique*, 18, nº 4, 432-448.

Moore, P.J. y Millar, P.V. (1981). The collapse of sands upon saturation. *Proc. 1st Australia-New Zealand Conf. on Geomechanics* 54-60, Melbourne.

VARIANTE DE REINOSA

Hacemos Buenas Obras

Obras de calidad. Como la Variante de Reinosa en Cantabria. Uno de los proyectos del Plan General de Carreteras, para mejorar la red viaria nacional. Un trabajo bien hecho. Al servicio de los ciudadanos. Al servicio de todos. La suma de muchos esfuerzos. Entre ellos, los de AGROMAN. Una empresa que construye, desde el prestigio y la experiencia, muchos de los edificios y de las obras públicas que caracterizan y representan a este país. En AGROMAN, hacemos buenas obras.

Obras promovidas y desarrolladas por el Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU).



AGROMAN
¡AHORA!