

INFLUENCIA DE LA CARGA Y EL POTENCIAL HIDRICO DURANTE LA COMPACTACION SOBRE LA RESISTENCIA A LA TRACCION DE UNIDADES ESTRUCTURALES DE SUELO EN ESTADO SECO

A. Paz* y J. Guérif**

* *Dpto. de Edafología y Q. Agrícola. Universidad de Santiago de Compostela. E. T. S. I. A. de Lugo. 27002 LUGO. España.*

** *Station de Science du Sol. INRA. Centre de Recherches d'Avignon. B. P. 91. 84143. MONTFAVET. Francia.*

RESUMEN

Con el fin de estudiar la influencia del potencial hídrico del suelo y la carga aplicada durante la compactación sobre el valor de la resistencia mecánica se aplicaron cinco intensidades de carga comprendidas entre 50 y 400 kPa para compactar agregados contenidos en series de muestras cilíndricas con siete contenidos hídricos diferentes.

Se evaluó la variabilidad del procedimiento empleado, que resulta muy preciso, siendo la desviación standard del índice de poros $< 3\%$ y la de la resistencia a la tracción < 25 kPa.

En el intervalo de contenido hídrico considerado se encuentra una relación lineal entre la deformación y el logaritmo de la carga aplicada. Por otra parte, el índice de poros calculado en húmedo y seco pone de manifiesto que, si la compactación es intensa, la contracción durante el secado de la muestra compactada determina un aumento del espacio poroso interagregados, debido bien a la reducción del espacio poroso textural bien a la fisuración.

La resistencia a la tracción global y el índice de poros estructural presentan una dependencia de tipo exponencial. Además, para un mismo índice de poros estructural, cuanto más elevado es el contenido hídrico durante la compactación tanto mayor resulta la resistencia a la tracción global.

Entre la resistencia a la tracción global y la carga aplicada se aprecia una relación lineal en las diferentes series estudiadas.

Palabras clave: Resistencia mecánica del suelo. Compactación. Ensayo brasileño. Potencial hídrico. Contenido hídrico. Contracción. Intensidad de carga.

SUMMARY

INFLUENCE OF LOAD AND SOIL WATER POTENTIAL DURING COMPACTION ON THE TENSILE STRENGTH OF DRY SOIL STRUCTURAL UNITS

In order to investigate the influence of soil water potential and applied load during compaction on subsequent soil strength, five loads from 50 to 400 kPa were chosen to compact aggregates having seven different water contents into cylindrical cores.

In several treatments, the variability of the procedure was evaluated. The method is found to be very reliable, with standard deviations less than 3 % for the void ratio, and less than 25 kPa for the tensile strength.

Within the range of imposed water contents a linear relationship between deformation and logarithm of the applied load was found. Furthermore, wet and dry void ratio calculations showed that when severe compaction occurred, shrinking during drying after compaction determined an increase of interaggregate pore space due either to the reduction of textural pore space or cracking.

An exponential relationship between overall tensile strength and structural void ratio was found. Moreover, the higher the water content during compaction, the higher was the overall tensile strength at a given structural void ratio.

A linear relationship between dry overall tensile strength and applied load was found in the series considered.

Key words: Soil strength. Compaction. Brazilian test. Water potential. Water content. Shrinkage. Load intensity.

INTRODUCCION

Los esfuerzos mecánicos ejercidos sobre el suelo durante las operaciones agrícolas pueden dar lugar a zonas excesivamente compactadas, con una estructura masiva que, a veces, persiste durante varios años (Voorhees, 1983; Manichon, 1987); la formación de una suela de labor es otro ejemplo de compactación excesiva. La susceptibilidad a la compactación del suelo, en todo caso, aumenta con el contenido hídrico.

En una revisión bibliográfica (Guérif, 1992) se señala que la resistencia mecánica global de unidades con escasa o nula porosidad estructural puede ser muy elevada, si ocurre una compactación intensa asociada a períodos posteriores de desecación.

Diversos autores (Rogowski y Kirkham, 1976; Braunack *et al.*, 1979; Hadas y Wolf, 1984; Willat, 1987 etc.), han puesto de manifiesto que la resistencia mecánica de agregados individuales depende del volumen o del tamaño de éstos. Por ello, se admite que la cohesión es una conse-

cuencia del tamaño de las unidades estructurales.

Por su parte, la escuela francesa de Física del Suelo (Monnier *et al.*, 1973; Fiés y Stengel, 1981; Stengel, 1990), atendiendo a la distinción entre macro y microestructura definen una porosidad textural, ligada a la organización y arquitectura de las partículas elementales y una porosidad estructural, complementaria de la anterior, debida a la disposición espacial de los agregados. En vez de referir el espacio poroso al volumen total de la muestra, al estudiar la compactación, conviene utilizar el índice de poros o índice de huecos; con ello la porosidad se expresa en relación al volumen de la fase sólida, constante durante la deformación (Guérif, 1982); la ventaja estriba en que los índices de poros estructural (e_s) y textural (e_t) son aditivos, de modo que si e_T es el índice de poros total se obtiene:

$$e_s + e_t = e_T \quad (1)$$

Si el volumen y la porosidad no son independientes, todo aumento de tamaño de la muestra significa mayor número de fisuras y disminución de la resistencia (Braunack *et al.*, 1979). Por ello, para tener en cuenta el efecto de escala en la cohesión, se ha distinguido una resistencia textural (Guerif, 1988b), medida en agregados de 2 a 3 mm de diámetro (tamaño representativo de este nivel de organización) y una resistencia global (Guérif, 1990) definida en relación con el volumen total sobre el que se efectúa la determinación.

En el incremento de la resistencia inducido por la compactación intervienen la carga mecánica aplicada, la compacidad resultante, así como el contenido hídrico y potencial durante la compactación y, posteriormente, durante la rotura. (Guérif, 1992). Son escasas las experiencias sobre la interacción entre compactación y re-

sistencia. Koolen (1976) analiza la influencia de la humedad sobre la resistencia a escala decimétrica y Liepic *et al.* (1986) la estudian a escala centimétrica. Guérif (1990), encontró una variación exponencial de la resistencia global, en estado seco, en función de e_s ; así mismo estudia la resistencia de muestras húmedas y secas con el mismo índice de poros. Finalmente, la resistencia global de terrones de diferente compacidad y la de macizos cilíndricos formados por agregados con distinto diámetro y la compacidad ha sido medida por De León (1991).

En este trabajo se estudia experimentalmente la influencia simultánea del potencial y la carga durante la compactación sobre la resistencia global del suelo seco y se compara con la resistencia textural del mismo; además, se evalúa la precisión del método empleado.

MATERIAL Y METODOS

Suelo

El suelo estudiado se clasifica como Fluvisol calcárico, de acuerdo con la F.A.O. y procede de la localidad de Montfavet (Dpto. de Vaucluse) en Francia.

La muestra se tomó de 0 a 20 cm. Una vez seca al aire, se tamizó para obtener agregados de 2-3 y 3-5 mm. En las determinaciones se utilizaron agregados naturales de 2-3 mm, excepto para la resistencia textural medida en agregados redondeados a partir de la fracción 2-5 mm.

Las determinaciones químicas y los análisis granulométricos se efectuaron en el laboratorio del INRA,

en Arras (Francia), de acuerdo con los métodos habituales, discutidos por Baize (1988); Los cationes de cambio se determinaron en solución 1N de acetato de amonio a pH = 7. En la Tabla 1 se presentan las propiedades generales de este suelo.

Propiedades físicas generales

Para la media de la relación entre contenido hídrico (w) y potencial (Ψ), los agregados se saturaron previamente a vacío, como describe De León (1991), utilizando un aparato de Richard; en el mismo se determinó el contenido hídrico retenido a 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000

TABLA 1

Propiedades generales del horizonte Ap estudiado.

<i>Análisis mecánico (%)</i>					
Arena gruesa	Arena fina	Limo grueso	Limo fino	Arcilla	
6.0	13.3	11.1	38.1	31.5	

<i>Propiedades químicas</i>					
pH H ₂ O	pH KCl	Caliza (%)	C (%)	Mat. org. (%)	C de cambio a pH = 7 (cmol _c kg ⁻¹)
8.4	7.5	33.9	0.85	1.46	10.1

y 1500 kPa, equilibrando la muestra durante 48 horas.

En la figura 1 se presenta la curva de retención hídrica ajustada a la ecuación propuesta por Van Genuchten (1980). La curva de contracción de los agregados de 2-3 mm (Fig. 2), necesaria para analizar el sistema poroso, se determinó de acuerdo con el método descrito por Monnier *et al.* (1973).

La densidad real se midió por picnometría.

Resistencia a la tracción textural

Se determinó en un lote de 100 agregados de 2-3 mm, redondeados por abrasión y secados con gel de sílice hasta peso constante.

Cada agregado se sometió a un ensayo de rotura por aplastamiento, en la prensa descrita por Guérif (1988a, 1990). La resistencia se calcula de acuerdo con Dexter (1975).

Resistencia a la tracción total

La muestra se preparó en un molde cilíndrico de 7 cm de diámetro y 2.4 cm de alto; con el que se obtuvieron macizos de agregados precompactados.

Conocido el volumen del molde, se puede calcular la masa de agregados necesaria para lograr una porosidad estructural determinada, mediante la expresión:

$$m = \rho_d V_t (1 + e_s + e_t) \quad (2)$$

en donde m es la masa seca, ρ_d es la densidad aparente, V_t es el volumen del molde, e_s y e_t son el espacio poroso estructural y textural, respectivamente.

Se prepararon muestras con un índice de porosidad estructural inicial ($e_s = 1$) y diferente contenido hídrico. Estas unidades estructurales, a su vez, se compactaron en el apar-

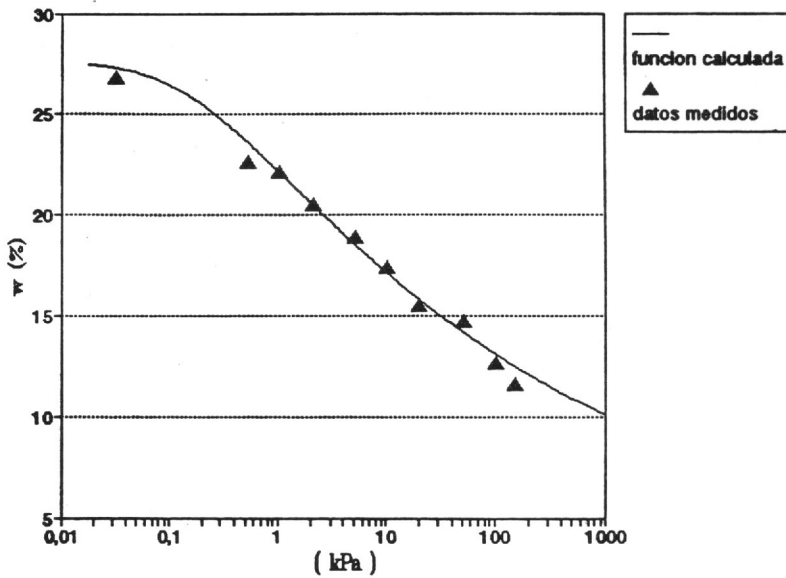


FIG. 1.—Curva de retención hídrica. Datos medidos y ajuste con el modelo de Van Genuchten (1980).

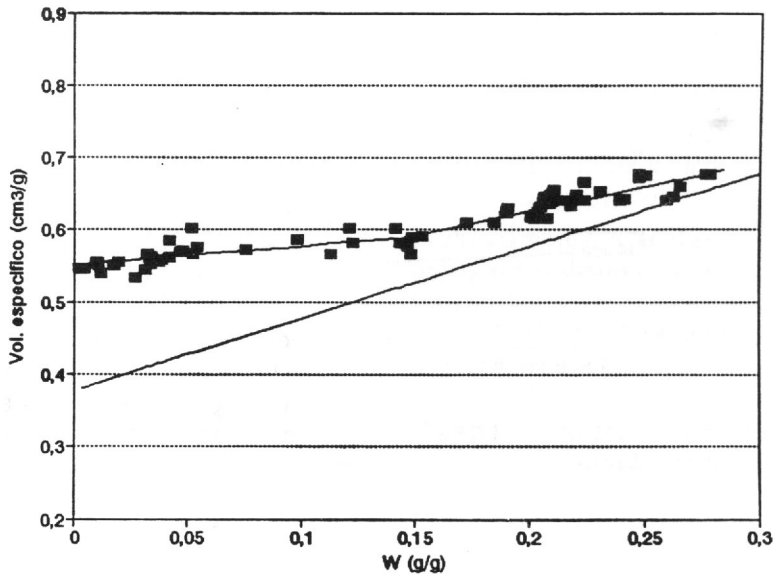


FIG. 2.—Relación entre volumen específico y contenido hídrico.

to de compresión uniaxial con drenaje libre descrito por Guérif (1982) y De León (1991) y presentado en la figura 3a. Se aplicaron presiones de 50, 100, 200, 300 y 400 kPa a muestras duplicadas; en seis ocasiones se efectuaron diez repeticiones, para estudiar la variabilidad.

Los cilindros se secaron con gel de sílice, hasta peso constante, siendo similar el tiempo entre la preparación de la muestra y la realización del ensayo para eliminar la interferencia de procesos de "curado" diferencial (age hardening).

La medida se efectuó mediante el "ensayo brasileño" (Kirkham *et al.*, 1959), con el dispositivo experimental cuyo esquema (Guérif,

1982) se presenta en la figura 3b. La resistencia a la tracción global se calcula con la expresión propuesta por Hiramatsu y Oka (1966), a partir de la fuerza de rotura (F), el diámetro (d) y la altura (h) del cilindro:

$$T = 2F / 4 d h \quad (3)$$

La altura y el diámetro de los cilindros secos se midieron con un pié de rey. Dado que también se conoce el volumen de la muestra húmeda, ya que se mide su altura durante y al final de la compactación con un sensor de desplazamiento, se puede calcular el índice de poros estructural en húmedo y en seco.

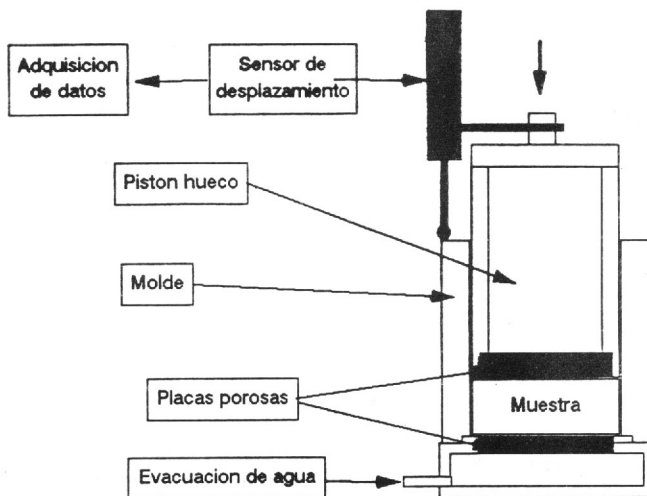


FIG. 3a.—Dispositivo experimental para la preparación de unidades estructurales compactadas.

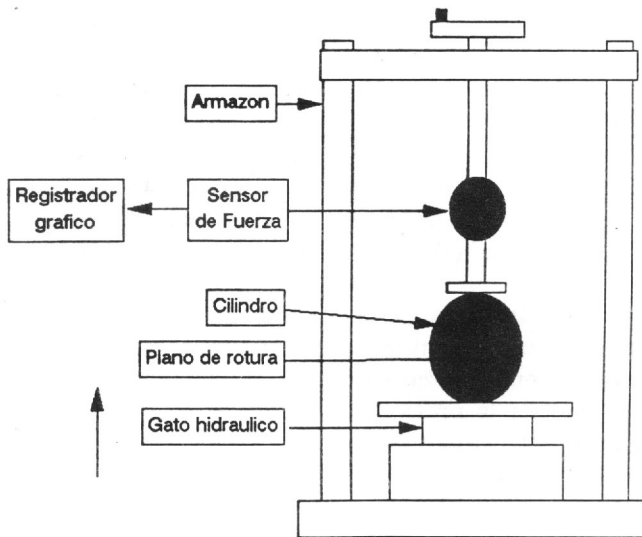


FIG. 3b.—Dispositivo experimental para efectuar medidas de resistencia a la tracción global.

RESULTADOS Y DISCUSION

Resistencia a la tracción textural

El valor medio de resistencia a la tracción textural es de 15.4×10^2 kPa y los valores extremos oscilan entre 4.15 y 29.3×10^2 kPa; el coeficiente de variación es de 35.7%, similar al de otras determinaciones en este suelo (Guérif, 1988b).

Como hipótesis de trabajo se considera que el valor de resistencia textural correspondería al máximo potencial que puede alcanzar la resistencia a la tracción global en las condiciones de compactación más intensas.

Características mecánicas de los cilindros compactados

Previamente a la discusión de los datos de resistencia global, se caracterizan las muestras estudiadas desde el punto de vista mecánico, como se describe a continuación.

Resultados del proceso de compactación

El proceso de compactación por compresión uniaxial de cilindros para el estudio de la resistencia global permite conocer la relación deforma-

ción-carga, para un tiempo de aplicación constante.

Ejemplos de curvas de compresión se muestran en la figura 4, en la que se representan en coordenadas semilogarítmicas el índice de poros estructural (y la densidad aparente) frente a la carga aplicada durante períodos de 30 s.

En el intervalo estudiado la deformación aumenta con el contenido hídrico. La relación entre la compacidad y el logaritmo de la presión es lineal y existe un paralelismo notable entre los datos para sucesivos contenidos hídricos.

También puede observarse como para contenidos hídricos superiores a 0.18 g g^{-1} durante la compacta-

ción, existe una presión a partir de la cual el índice de poros tiende a cero, lo que supone que se alcanza un estado de compacidad muy intenso. Los valores nulos de porosidad estructural en las muestras más húmedas, cuando se someten a cargas de 300 o 400 kPa, significarían que en estos tratamientos ocurrió un proceso de consolidación, es decir que durante la compactación drenaría parte del agua que contiene la muestra.

Porosidad estructural en húmedo y seco

La comparación de los datos de porosidad de las muestras cilíndricas en húmedo y seco (Fig. 5) permite

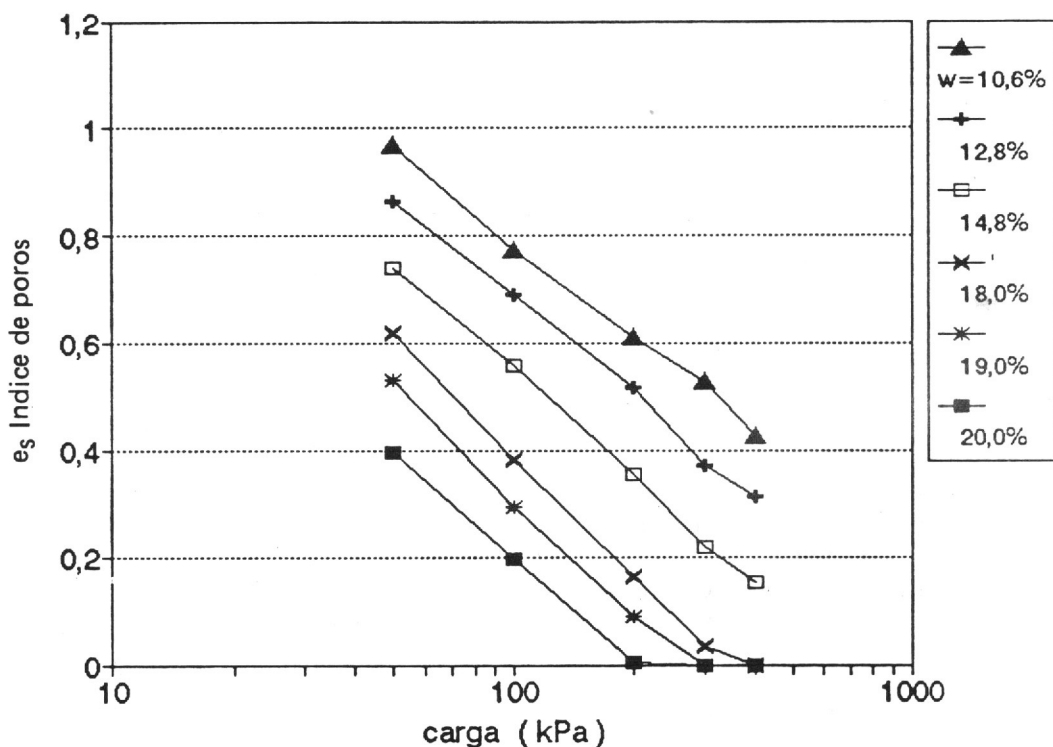


FIG. 4.—*Distribución de frecuencias de la resistencia a la tracción textural.*

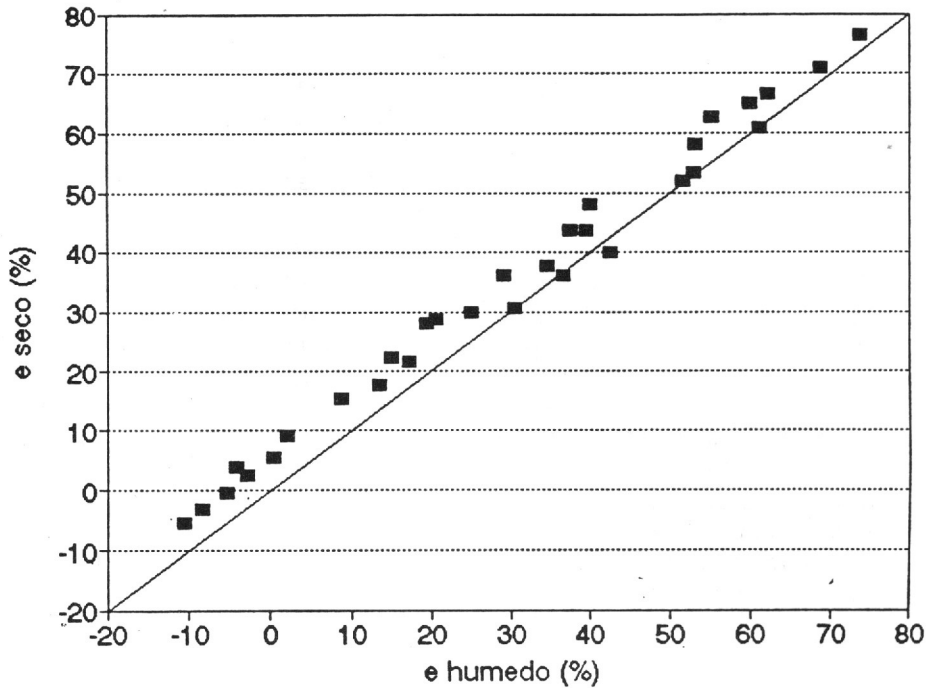


FIG. 5.—Curvas de compresión durante la compactación de la muestra para la medida de la resistencia mecánica global.

analizar el proceso de contracción en el nivel de organización estructural.

Se observa un aumento del volumen ocupado por los espacios interagregados de las muestras secas. El valor máximo de este incremento es de un 7% sobre el índice de poros inicial. Las diferencias entre el valor de e_s en seco y húmedo son más importantes conforme aumenta el contenido hídrico a que se efectúa la compactación, como se deduce de la recta de regresión entre las dos series de datos:

$$e_s (\text{seco}) = 0.97 \cdot e_s (\text{húmedo}) + 5.3$$

Estos resultados se explican, en parte, admitiendo que durante el

proceso de desecación se produce una contracción a escala textural, como consecuencia de la cual disminuye el volumen ocupado por los poros intraagregados, pero aumenta relativamente el espacio poroso interagregados. En parte, sin embargo, este incremento de la porosidad estructural puede también ser una consecuencia de un proceso de fisuración de los agregados durante la contracción; no es posible analizar separadamente la importancia relativa de estos dos factores.

Variabilidad del índice de poros y la resistencia

En la Tabla 2 se consignan los datos medios del índice de poros en húmedo y seco, así como de la resis-

TABLA 2

Variabilidad, del índice de poros estructural en húmedo y en seco, así como de la resistencia a la tracción global en medidas con diez repeticiones.

POROSIDAD ESTRUCTURAL EN HUMEDO					
Ψ (kPa)	w (%)	x (%)	std (%)	cv (%)	
100	12.8	67.6	1.47	2.2	
"	15.8	56.5	1.82	5.1	
"	19.0	29.2	1.10	3.8	
400	12.8	31.8	2.99	9.4	
"	15.8	12.7	0.65	5.1	
"	19.0	-8.1	2.19	-27.1	
POROSIDAD ESTRUCTURAL EN SECO					
Ψ (kPa)	w (%)	x (%)	std (%)	cv (%)	
100	12.8	69.6	0.93	1.3	
"	15.8	60.6	1.50	2.5	
"	19.0	36.4	1.01	2.8	
400	12.8	29.5	1.03	3.5	
"	15.8	19.1	1.32	6.9	
"	19.0	-2.5	0.75	29.6	
RESISTENCIA A LA TRACCION					
Ψ (kPa)	w (%)	T (10 ² kPa)	std (10 ² kPa)	cv (%)	
100	12.8	0.06	0.012	20.3	
"	15.8	0.35	0.041	11.6	
"	19.0	1.59	0.126	7.9	
400	12.8	0.80	0.064	8.0	
"	15.8	1.95	0.120	6.2	
"	19.0	5.88	0.245	4.2	

tencia a la tracción global de los cilindros, junto a las desviaciones típicas y coeficientes de variación respectivas.

Destaca el grado de precisión de la estimación del índice de poros

estructural y de la medida de resistencia.

La desviación típica del índice de poros tiende a ser más elevada en las muestras húmedas que en las secas y nunca supera el 3% de la

porosidad estructural inicial ($e_s = 1$). Las muestras compactadas más intensamente presentan valores de e_s próximos a cero, por lo que sus coeficientes de variación son más altos, sin que ello suponga menor fiabilidad de la medida.

Los valores negativos de porosidad estructural corresponderían a muestras consolidadas, que drenaron agua, por lo que su índice de poros textural resultaría sobreestimado.

En cuanto a la resistencia a la tracción se aprecia como tanto los valores medios como la desviación típica aumentan regularmente con el contenido hídrico y la carga. El coeficiente de variación, sin embargo, es mayor en las muestras más secas y sometidas a cargas menos intensas.

Resistencia a la tracción global en estado seco

Se analizan finalmente la resistencia mecánica para distintos potenciales e intensidades de carga durante la compactación.

Resistencia global y porosidad

Los datos de resistencia a la tracción global y el índice de poros en muestras duplicadas se presentan en la Tabla 3. Algunas de las series estudiadas se pueden observar en la figura 6.

Se comprueba que la dependencia entre resistencia global a la tracción y porosidad estructural es exponencial. Un efecto similar se ha puesto de manifiesto en trabajos que rela-

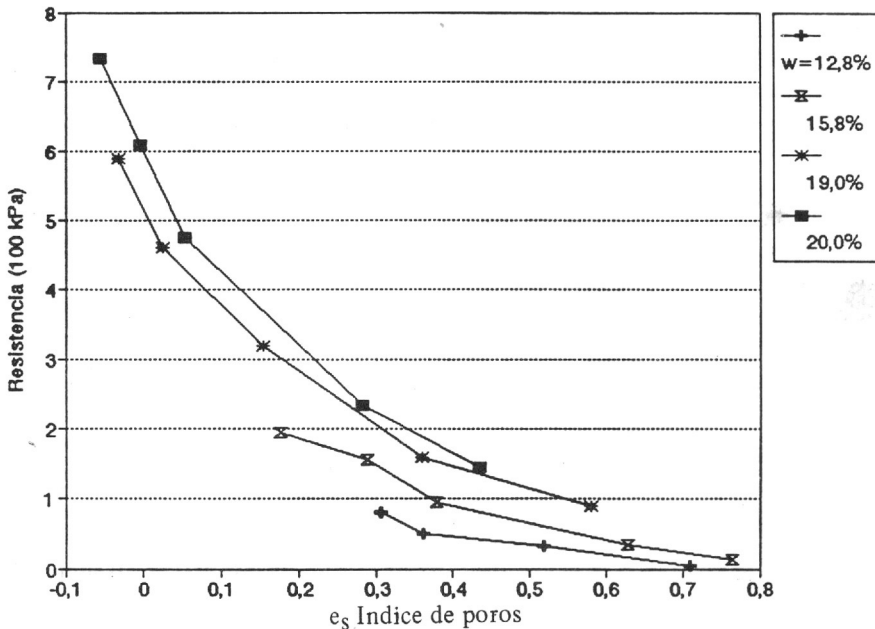


FIG. 6.—Resistencia a la tracción global en función del índice de poros.

TABLA 3

Resistencia a la tracción de las muestras estudiadas (× 100 kPa).

Carga (kPa) w (%)	50	100	200	300	400
20	1.45	2.35	4.75	6.09	7.33
19	0.89	1.59	3.19	3.52	5.89
18	0.48	1.07	2.36	3.52	4.63
15.8	0.13	0.35	0.95	1.55	1.95
14.8	0.06	0.25	0.64	1.19	1.65
12.8	—	0.05	0.32	0.51	0.80
10.6	—	—	0.11	0.31	0.42

cionan resistencia y volumen o porosidad, independientemente del método de medida, o de la escala (Braunack *et al.*, 1979; Hadas y Wolf, 1984; Angers *et al.*, 1987; Willat, 1987; Guérif, 1988b, 1990). Estos resultados se explican teniendo en cuenta que con la porosidad aumentan las zonas de debilidad mecánica a favor de las cuales ocurre la fractura.

Para un mismo índice de poros la resistencia aumenta con el contenido hídrico; esta dependencia es más importante en la gama de humedades elevadas, en donde una oscilación de 0.01 g g^{-1} determina ya diferencias significativas de resistencia. El contenido hídrico elevado en la compactación favorecería el aumento de las zonas de contacto entre partículas, lo que originaría, con el secado posterior una mayor cohesión.

En las condiciones de potencial hídrico y carga ensayadas el valor máximo de la resistencia es de $7.7 \cdot 10^2 \text{ kPa}$, cifra importante, que sin embargo todavía no se aproxima a

los $15.4 \cdot 10^2 \text{ kPa}$ medidos para la resistencia textural.

Resistencia global, potencial hídrico y carga

En la figura 7 se presenta la dependencia simultánea de la resistencia global en seco del contenido hídrico y la carga aplicada.

Conviene destacar que la resistencia es directamente proporcional a la carga, para cada potencial. En la serie más húmeda ($w = 20\%$) a 300 y 400 kPa la resistencia es relativamente baja, lo que reflejaría el aumento del espacio poroso estructural de estas muestras durante la desecación.

Asumiendo una dependencia lineal entre carga y resistencia global, en la serie más húmeda el coeficiente de correlación es de 0.98 y en las series restantes superior a 0.99.

La ordenada en el origen de las dos series de datos con un contenido hídrico más elevado ($w = 20\%$ y 19%) es positiva, lo que supone que durante el proceso de preparación del cilindro, previo a la compacta-

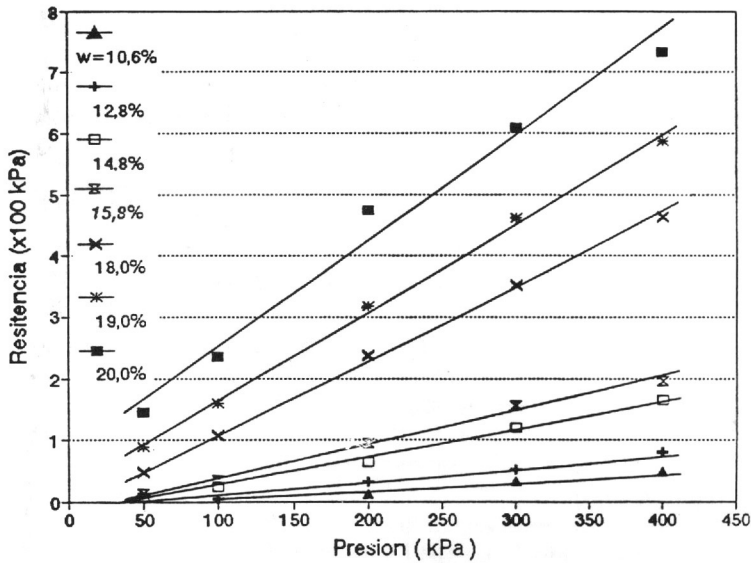


FIG. 7.—Resistencia a la tracción global en función de la carga aplicada.

ción, las fuerzas aplicadas determinan una cohesión interagregados significativamente distinta de cero. Para $w = 18\%$ la ordenada en el origen no difiere de cero y con contenidos hídricos inferiores se obtiene:

w (%)	b (kPa)
15.8	— 26.9
14.8	— 44.2
12.8	— 80.2
10.6	—123.5

En estas series, durante el proceso de precompactación no se originan fuerzas cohesivas importantes. El

valor absoluto de la ordenada en el origen, b, para cada potencial, se interpreta como la carga mínima necesaria para que se formen uniones interagregados responsables de la resistencia global.

Por otro lado al disminuir el contenido hídrico, la pendiente de la recta de regresión entre resistencia global y carga aplicada es cada vez menor. Así, se pasa de 1.71 para $w = 20\%$ a 0.157 para $w = 10.6\%$; este resultado sugiere que las fuerzas responsables de las uniones interagregados dependen del potencial hídrico durante la compactación.

CONCLUSIONES

El procedimiento experimental empleado para estudiar la acción de

la carga aplicada y el contenido hídrico durante la compactación sobre

la resistencia mecánica permite obtener resultados precisos y reproducibles, siendo poco importante tanto la variabilidad del espacio poroso de las muestras cilíndricas empleadas como de la resistencia a la tracción.

La resistencia a la tracción global tiende a disminuir exponencialmente conforme aumenta el índice de poros; este tipo de relación entre resistencia mecánica y espacio poroso es similar a otras reseñadas en la bibliografía y determinadas con diversos métodos.

La resistencia a la tracción global de muestras con un espacio poroso inicial constante, posteriormente compactadas y sometidas a desecación, presenta una dependencia simultánea del potencial hídrico y la carga aplicada.

El efecto de la carga aplicada sobre el valor de la resistencia global medida en seco es tanto más importante cuanto mayor es el contenido hídrico durante la compactación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a J. Royère del INRA por su asistencia técnica. Este trabajo, en

parte, se llevó a cabo con una beca "Xunta de Galicia".

BIBLIOGRAFIA

- ANGERS, D. A., KAY, B. D. and GROENEVELT, P. H., 1987. Compaction characteristics of a soil cropped to corn and bromegrass. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 779-783.
- BAIZE, D., 1988. *Guide des analyses courantes en Pédologie*. INRA. París.
- BRAUNACK, M. W., HEWITT, J. S. and DEXTER, A. R., 1979. Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds. *J. Soil Sci.*, 30: 653-667.
- CARTER, M. R., 1990. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in uncultivated loamy sand to loam soils. *Soil. Till. Res.*, 15: 257-268.
- DEXTER, A. R., 1975. Uniaxial compression of ideal brittle tilths. *J. terramech.*, 12: 3-14.
- F.A.O. 1974. *Key of soil units for the soil Map of the World*. Roma.
- FIES, J. C. et STENGEL, P., 1981. Densité texturale des sols naturels. I. Méthode de mesure. *Agronomie*, 1: 651-658.
- GUERIF, J., 1982. Compactage d'un massif d'agrégats: effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 8: 287-294.
- GUERIF, J., 1988a. Détermination de la résistance en traction des agrégats terreux; revue bibliographique, mise au point technique. *Agronomie*, 8: 281-288.
- GUERIF, J., 1988b. Résistance en traction des agrégats terreux: Influence de la texture, de la matière organique et de la teneur en eau. *Agronomie*, 8: 379-386.
- GUERIF, J., 1990. Factors influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil. Till. Res.*, 16: 167-178.
- GUERIF, J., 1992. Changes in strength properties. In: Soane, B. D., van Ouwerkerk, C., (Ed.). *Soil compaction in crop production*. Elsevier. Amsterdam. (In press).

- HADAS, A. and Wolf, D., 1984. Soil aggregates and clod strength dependence on clod size, cultivation and stress load rates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 1157-1165.
- HIRAMATSU, Y. and OKA, Y., 1966. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 3: 89-99.
- KIRKHAM, D., DE LEENHEER, L. and DE BOODT, M., 1959. Modulus of rupture determination on cylindrical core samples. *Meded. Landbouwhogeschool, Opzoekingsinst. Staat. Gent.*, 24: 369-376.
- KOOLEN, A. J., 1976. Mechanical properties of precompacted soil as affected by the moisture content at precompaction. *Proc. 7th Conf. Int. Soil Tillage Res. Org. (ISTRO), Uppsala, Sweden*: 1-6.
- LEON DE, GONZALEZ, F., 1991. Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée. Tesis. INA Paris-Grignon.
- LIPIEC, J. and TARKIEWICZ, S., 1986. The effect of moisture on the crushing strength of aggregates of loamy soil of various density levels. *Polish J. Soil Sci.*, 19: 27-31.
- MANICHON, H., 1988. Compactage, décompactage du sol et système de culture. *C. R. Acad. Agric. France.*, 74: 43-54.
- MONNIER, G., STENGEL, P. et FIES, J. C., 1973. Une méthode de mesure de la densité de petits agglomérats terreux: application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24: 533-545.
- ROGOWSKI, A. S. and KIRKHAM, D., 1976. Strength of soil aggregates: influence of size, density and clay and organic matter content. *Med. Fac. Landbouww. Rijksunivers. Gent.*, 41: 85-100.
- STENGEL, P., 1990. Caractérisation de l'état structural, objectifs et méthodes. In: Boiffin, J. et Marin la Flèche, A. (Ed.). *La structure du sol et son évolution: conséquences agronomiques et maîtrise par l'agriculteur. Colloques de l'INRA.* 15-36.
- UTOMO, W. and DEXTER, A., 1981. Age hardening of agricultural top soils. *J. Soil Sci.*, 32: 335-350.
- VAN GENUCHTEN, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.
- VOORHEES, W. B., 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 129-133.
- WILLAT, S. T., 1987. Influence of aggregate size and water content on compactability of soil using short time static loads. *J. Agric. Eng. Res.*, 37: 107-115.

Recibido: 21-2-92.

Aceptado: 18-6-92.