

Influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo

Influence of soil bulk density on elastoplastic parameters soil used to modelling soil compaction

Omar González Cueto¹, Ciro Iglesias Coronel², Miguel Herrera Suárez³, Elvis López Bravo⁴
y Ángel Sánchez Iznaga⁵

RESUMEN. Los modelos constitutivos de estado crítico están entre los más empleados para la simulación de la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos. Estos modelos incluyen parámetros elásticos y plásticos. Este trabajo tiene el objetivo de determinar la influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos de un suelo Rhodic Ferralsol. Se realizaron ensayos triaxiales y de compresión uniaxial a muestras remoldeadas a las densidades de volumen de 1.1; 1.175 y 1.25 Mg m⁻³; en un contenido de humedad gravimétrica de 25 kg g⁻¹. Los valores obtenidos de las variables analizadas pueden ser utilizados como datos de entrada para la modelación de la compactación del suelo por medio del método de elementos finitos y permiten conocer el comportamiento de variables de estado crítico de uno de los suelos cubanos de más importancia económica.

Palabras clave: compactación del suelo, propiedades mecánicas, método de elementos finitos, estado crítico.

ABSTRACT. The constitutive models of critical state are among the most employed for soil compaction simulation by means of finite element method. This paper has the objective to determine the influence of soil bulk density on elastoplastic parameters of Rhodic Ferralsol soil. Triaxial and compression uniaxial tests were carried out to remoulded samples, with a bulk density of 1.1; 1.175; 1.25 Mg m⁻³, and gravimetric moisture content of 25 kg g⁻¹. The obtained values of variables analyzed can be used as input data to modelling soil compaction by finite element method and allow to know critical state variables behaviour of one of the Cuban soils with major economic importance.

Keywords: soil compaction, mechanical properties, finite element method, critical state.

INTRODUCCIÓN

En el suelo, es común encontrar mayores densidades de volumen (ρ_v) a medida que sus capas están más alejadas de la superficie, debido al efecto de compresión originado por el peso de las capas superiores; además, el tránsito de máquinas agrícolas provoca el incremento de la densificación: variando su comportamiento mecánico, resistencia a la deformación, propiedades elásticas y de resistencia al corte.

Para el estudio de la respuesta mecánica del suelo al tránsito de las máquinas agrícolas es necesario conocer su estado tenso-deformacional, el cual viene expresado por la relación entre los esfuerzos que inciden sobre el suelo y las deformaciones que en éste provocan (Medina, y. Maynar, 2004). Esta relación se conoce como ley constitutiva, la cual define la respuesta del material frente a un conjunto de acciones, formada por fuerzas externas u otro agente: debiendo tener valor universal, es decir seguir siendo válidas en cualquier

Recibido 10/11/07, aprobado 18/12/08, trabajo 15/09, investigación

¹ MSc. Profesor Auxiliar, Dpto. de Mecanización Agropecuaria, Universidad Central de las Villas (UCLV), E-✉: omar@uclv.edu.cu

² Dr. C. Profesor e Investigador Titular, Universidad Agraria de la Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria.

³ Dr. C. Profesor Titular, Dpto. de Mecanización Agropecuaria, UCLV.

⁴ MSc. Profesor Titular, Dpto. de Mecanización Agropecuaria, UCLV.

⁵ Ing. Profesor Asistente, Dpto. de Mecanización Agropecuaria, UCLV.

circunstancia interna o externa al material. Siempre se refieren a un modelo matemático con carácter ideal, sin embargo, no es posible describir completamente todos los aspectos del comportamiento de un material tan complejo como el suelo, siendo necesario incluir en el modelo solo sus características principales, mientras los aspectos considerados de menor importancia son excluidos (Wulfsohn, and Adams, 2002). Los mismos son el resultado de idealizaciones del estudio de los materiales, cuya composición es homogénea y reproducible a tal grado que sus propiedades mecánicas son virtualmente las mismas que las obtenidas en laboratorio. Los parámetros que caracterizan estas ecuaciones se obtienen por ajustes de los datos experimentales a los modelos matemáticos, los cuales son seleccionados con alguna justificación teórica o empírica (Recarey, 2000).

Entre las ecuaciones constitutivas las más usadas son:

- Elásticas (lineal y no lineal)
- Las que consideran un comportamiento plástico del material
- Las que consideran un comportamiento viscoso del material
- Las que consideran un comportamiento elastoplástico del material
- Viscoelásticas.
- Viscoelastoplásticas.

La ley físico constitutiva elastoplástica es una de las más usadas para describir el comportamiento del suelo agrícola (Fervers, 2004; Herrera, 2006; Shoop, 2001). La cual explica la respuesta del suelo durante la compresión isotrópica o la compresión triaxial, en dos fases. Durante el inicio de la carga exhibe comportamiento elástico lineal (Figura 1), hasta el punto A, de forma tal que si la carga es retirada el suelo regresa completamente a su estado inicial. Si la carga se incrementa, a partir del punto A y hasta el B, al disminuir ésta la deformación aun es reversible aunque ya de forma no lineal. A partir del punto B, el incremento de tensiones provocará que durante la descarga las deformaciones no sean completamente reversibles. Este punto es conocido como punto de fluencia. Si se aumenta entonces la carga, el suelo se deforma hasta el punto C. Desde la trayectoria en su estado inicial hasta C, se producirá deformación elástica en primer lugar y posteriormente, a partir del punto de fluencia del suelo, deformación plástica o irreversible. Si la carga es retirada en algún punto en esta trayectoria, la muestra seguirá un camino de descarga como CDE, quedando con una deformación permanente OE. Si el suelo soportara una nueva carga (como ocurriría si se realizara un nuevo pase de una máquina agrícola) este es recargado a partir del punto E y pudiera seguir una trayectoria tal como EFC, comportándose el material elásticamente hasta que alcanza el punto C. En esta trayectoria el suelo se ha endurecido (trabajo de endurecimiento), dado que el punto de fluencia del suelo se ha elevado a una tensión mayor que la del punto B, representando un nuevo punto de fluencia. A partir del punto C el suelo se comporta de forma elastoplástica otra vez. El área sombreada de la curva representa la histéresis elástica o energía perdida.

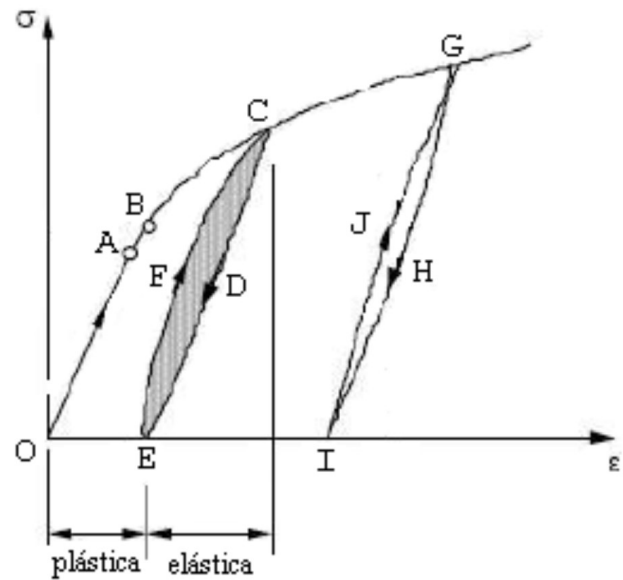


FIGURA 1. Comportamiento del suelo agrícola bajo una ley constitutiva elastoplástica (adaptado de Wulfsohn, and Adams (2002).

Los parámetros más utilizados para expresar el comportamiento elástico lineal de un suelo isotrópico son el módulo de Young o módulo de elasticidad (E) (Raper, and Erbach, 1990a), en el cual cada incremento de tensión aplicada (σ) causa una deformación proporcional (ξ), $E = \sigma / \xi$ y el coeficiente de Poisson (ν). Este último se asume con un valor entre 0.3 y 0.45, basado en el contenido de arcilla del suelo (Raper, and Erbach, 1990b). Este parámetro puede alcanzar un valor de hasta 0.49 en suelos saturados. Otros parámetros utilizados para expresar el comportamiento elástico del suelo son el módulo de corte (G), el cual guarda la siguiente relación con el módulo de Young y el coeficiente de Poisson $G = E / 2(1 + \nu)$; y el módulo de volumen K que se expresa como $K = E / 3(1 - 2\nu)$ (ISA, 2008; Recarey, 2000).

Mientras el comportamiento del suelo a compresión y a cortante ha sido estudiado separadamente en la mecánica del suelo clásica, la teoría de estado crítico permite el estudio de ambos bajo un marco unificado. Esta ha sido aplicada en varias áreas de la investigación del suelo [2, 3, 9], tanto para suelos saturados como para no saturados (Wheeler, and Sivakumar, 1993).

Aunque el comportamiento de los parámetros elastoplásticos del suelo se han analizado con anterioridad en múltiples trabajos, estos han sido, en su mayoría, desarrollados para suelos de zonas templadas, sin embargo hay poco conocimiento de éstos en las condiciones del trópico y muy pocos trabajos se han realizado que describan el comportamiento para las condiciones de los suelos agrícolas cubanos, en específico los ferralsoles (González, *et al.*, 2008). Esta agrupación de suelos es una de las más importantes teniendo en cuenta su fertilidad, excelentes condiciones para la producción agrícola y su amplia extensión en el territorio nacional, representando el 17% del área agrícola total del país (MINAZ, 2004; Oficina Nacional de estadísticas, 2006).

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia de la densidad de volumen en parámetros elastoplásticos, los cuales son utilizados como datos de entrada para la modelación de la compactación del suelo mediante el método de elementos finitos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo utilizado es un Rhodic Ferralsol, proveniente de la zona agrícola del municipio San José de las Lajas, en la Provincia La Habana, Cuba. Para este tipo de suelo se determinaron las propiedades físicas, la granulometría y los límites de Atterberg. La conformación de las probetas de suelo se realizó mediante el método de remoldeo. Al suelo se le adicionó la cantidad de agua necesaria para obtener la densidad y humedad requerida, luego se densificó en un molde abierto, con la ayuda de una prensa axial. Posteriormente permaneció en reposo durante una semana para alcanzar el equilibrio interno del suelo. Las humedades y densidades se establecieron teniendo en cuenta los valores medios en condiciones de producción y los que originan mayor compactación (Tabla 1).

Se realizaron ensayos de compresión triaxial, rápidos, no drenados, sin consolidar y ensayos de compresión uniaxial. Los ensayos triaxiales se desarrollaron con cuatro muestras, con presiones de cámara (σ) de 100; 200; 300 y 400 kPa, con tres réplicas. La velocidad de rotura fue de 1,27 mm min⁻¹. Los ensayos de compresión uniaxial se realizaron en un edómetro. La secuencia de presiones a las que se sometieron las muestras fue de: 25; 50; 100; 200; 400 y 800 kPa, aplicándose durante 0,5 h cada una, registrándose la deformación final de cada carga. Después de colocar la última se procedió al proceso de

descarga en solo dos pasos. Se realizaron tres repeticiones para cada muestra. Las dimensiones de las probetas para el ensayo de compresión triaxial fueron de 100 mm de altura por 50 mm de diámetro y en el ensayo de compresión uniaxial de 19 mm de altura por 70 mm de diámetro.

TABLA 1. Condiciones de los suelos estudiadas

Humedad (θ), kg g ⁻¹	Densidad de Volumen (ρ_v), Mg m ⁻³
25	1,1
25	1,175
25	1,25

Módulo de elasticidad (E_{50}). Se determinó como la media del módulo secante al 50% de la resistencia a compresión (PLAXIS, 2004)], para las cuatro presiones de confinamiento.

Pendiente de la línea de estado crítico (M). Se obtuvo a partir de los resultados de compresión triaxial. Determinándose el esfuerzo desviador máximo (q) y la presión normal media (P) a la que se produce la falla del suelo, $M = \frac{q}{P}$. Se obtuvo el resultado de cada prueba como la media de las presiones de confinamiento y el valor final de M como la media de las tres réplicas realizadas.

Pendiente de la línea de compresión normal (λ). Se determinó el índice de compresión (I_c), a partir de los ensayos de compresión uniaxial, como la pendiente del tramo recto de la curva de compresión (Figura 2), en el plano índice de poros contra el logaritmo de la presión vertical aplicada. Después se obtuvo la pendiente de la línea de compresión normal como $\lambda = I_c / 2.3$.

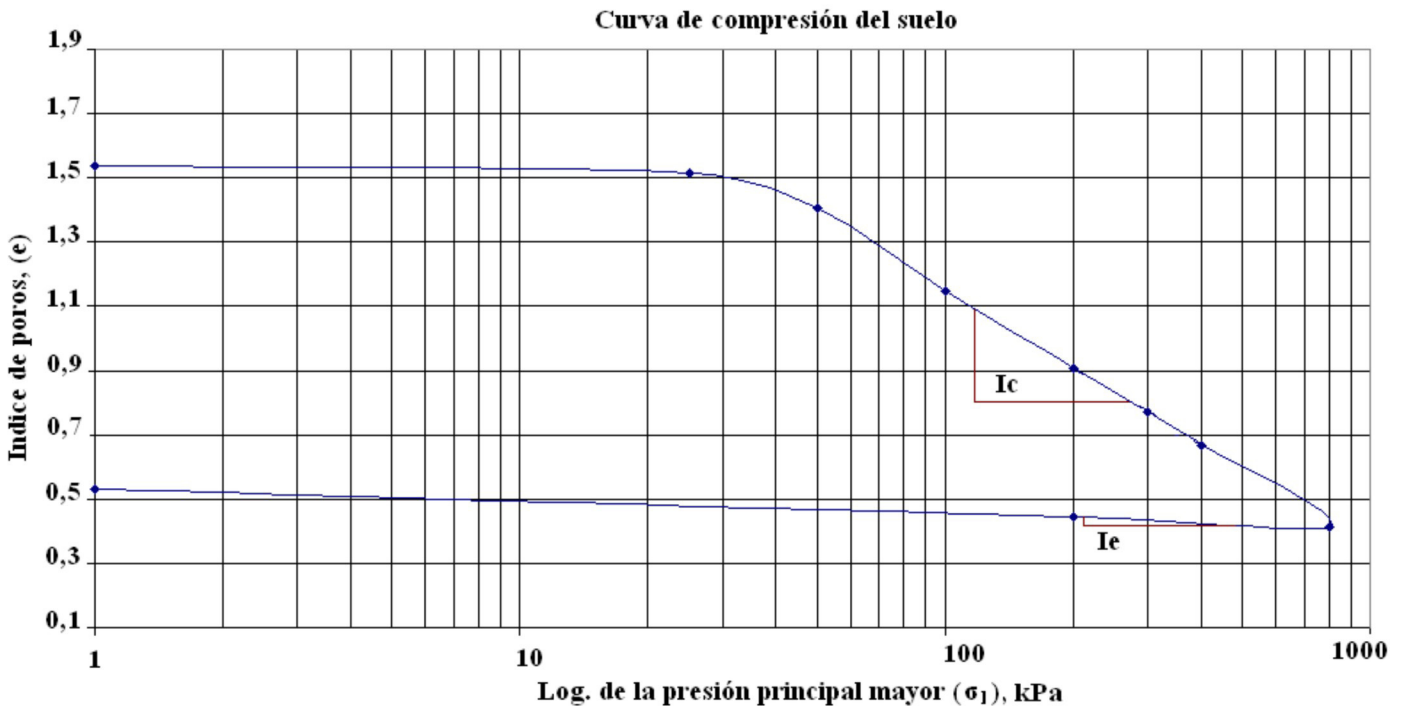


FIGURA 2. Curva de compresión de un suelo Rhodic Ferralsol; determinación del I_c y I_e .

Pendiente de la línea de expansión (k). Se determinó el índice de expansión (I_e), a partir de los ensayos de compresión uniaxial, como la pendiente de la rama de descarga de la curva de compresión del suelo (Figura 2), en el plano índice de poros contra el logaritmo de la presión vertical aplicada. Después se obtuvo la pendiente de la línea expansión como $k \approx I_e / 2.3$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades físicas del suelo (Tabla 2) muestran que es franco arcilloso limoso, con un índice de plasticidad de 30,4, comportándose como un suelo plástico.

TABLA 2. Propiedades físicas del suelo

Gs, Mg m ⁻³	Límites de consistencia, kg g ⁻¹			Granulometría, kg g ⁻¹			MO, kg g ⁻¹
	LL	LP	IP	Arena	Limo	Arcilla	
2,69	61,1	30,7	30,4	19	43	38	3,01

Donde: Gs-Densidad real del suelo; LL-límite líquido; LP-límite plástico; IP-índice de plasticidad; MO - cantidad de materia orgánica en el suelo.

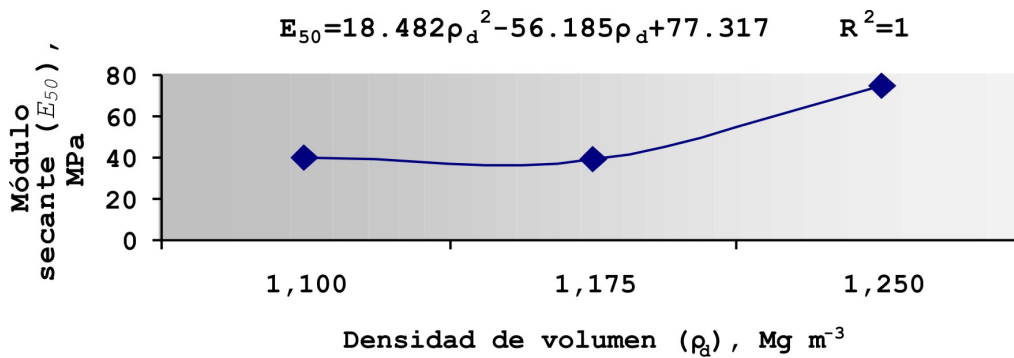


FIGURA 3. Módulo de elasticidad secante, E_{50} en función de la densidad de volumen.

El módulo de elasticidad se calculó como el módulo secante al 50%, debido a que las densidades de volumen utilizadas no alcanzaron el nivel de sobreconsolidación que justificaría el empleo del módulo inicial (E_0), (PLAXIS, 2004). El módulo de elasticidad aumentó no linealmente en función de la densidad de volumen (Figura 3). El análisis de varianza (para un intervalo de confianza del 95%, LSD) mostró que no hay diferencias significativas entre las medias de E_{50} para las ρ_d 1.1 y 1.175 Mg m⁻³, no siendo así cuando se comparan con 1.25 Mg m⁻³. Herrera (2006) y Herrera, *et al.*, (2008), obtuvieron un incremento no lineal del módulo inicial de elasticidad (E_0) con el incremento de la densidad de volumen, para este mismo tipo de suelo, pero a densidades de volumen y humedades diferentes. Mouazem, *et al.*, (2002) reportaron un comportamiento similar para un Arenic Cambisol y para un suelo franco arenoso. Este comportamiento es el esperado debido a que en el estado más compactado hay un contacto más cercano entre las partículas de suelo, lo cual aumenta su resistencia mecánica y rigidez; el suelo se comporta más elásticamente elevando su punto de fluencia. Mientras mayor sea el módulo de elasticidad mayor la resistencia del suelo a la deformación, resultado que coincide con lo expresado por Raper y Erbach (1990) y que se aprecia en la figura 4, donde se relacionan curvas tensión-deformación, para contenido de agua constante (25%), la cual muestra que aumenta el esfuerzo desviador máximo que soporta el suelo a medida que incrementa la densidad de volumen.

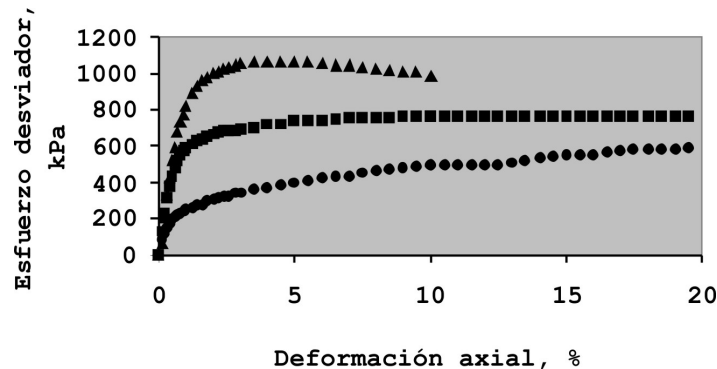


FIGURA 4. Relación tensión cortante-deformación axial, para una muestra de suelo con 25% de humedad y densidades de volumen de ρ_d 1,1 Mg m⁻³, ρ_d 1,175 Mg m⁻³, ρ_d 1,25 Mg m⁻³.

Este resultado se debe a la menor cantidad de aire y agua presente en la muestra de suelo, debido a que éstos han sido ocupados por partículas sólidas las cuales se reorganizan e introducen en los poros durante el proceso de compactación, disminuyendo la porosidad y aumentando su resistencia a las fuerzas externas. La figura muestra además cómo a medida que aumenta la compactación del suelo se favorece su falla frágil, y en el suelo suelto se origina una falla plástica o flujo plástico.

La pendiente de la línea de estado crítico (Figura 5) aumenta con el incremento de la densidad de volumen del suelo

debido a la mayor rigidez del suelo mas compacto. Valores similares a los obtenidos en estos ensayos fueron alcanzados por Medina y Maynar (2004), para suelos saturados y cercanos al máximo valor obtenido por Kirby (1991), para vertisoles, y por Adams (1996), para suelos franco y arcilloso arenoso. Las tres muestras ensayadas alcanzaron el estado crítico con pendiente M (Figura 6). Grandes deformaciones cortantes pueden ocurrir indefinidamente sin que ocurran cambios en las tensiones o deformación volumétrica.

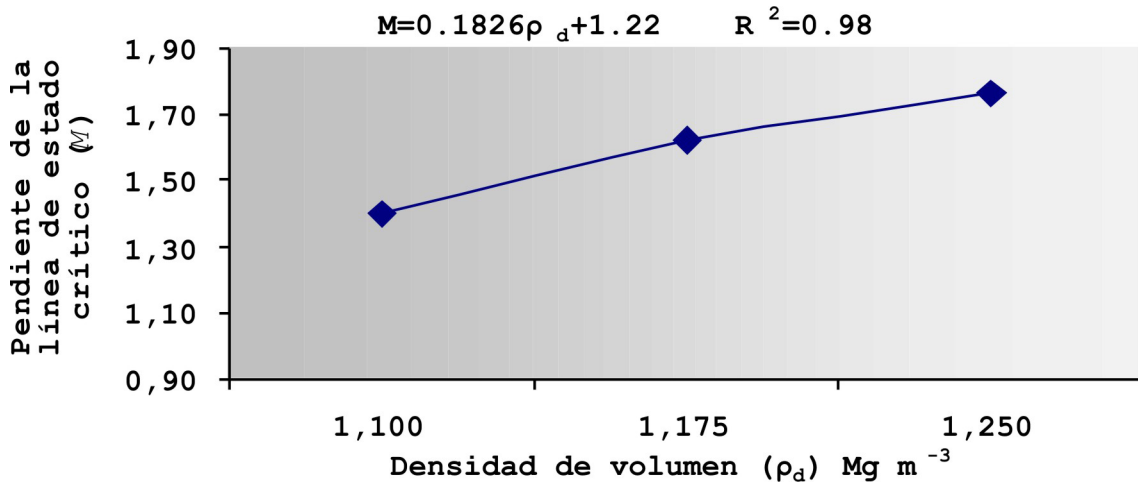


FIGURA 5. Pendiente de la línea de estado crítico (M) en función de la densidad de volumen del suelo.

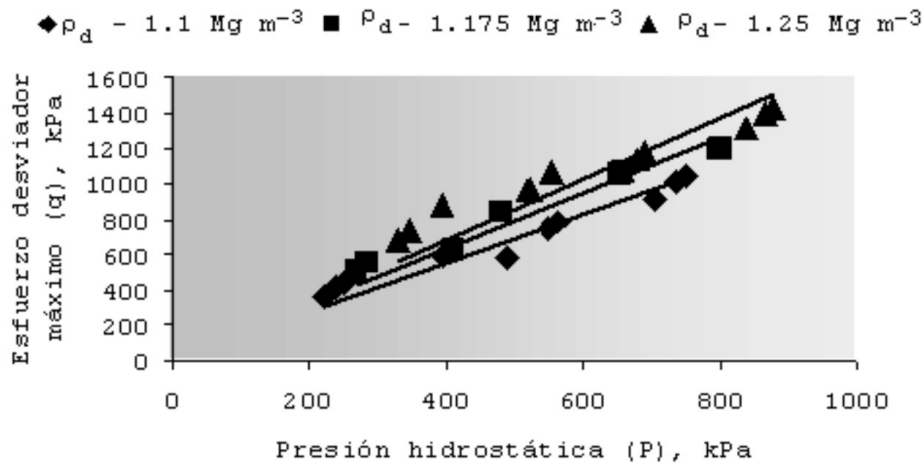


FIGURA 6. Línea de estado crítico, muestras de suelo sometidas a compresión triaxial con presiones de confinamiento σ_3 de 100, 200, 300 y 400 kPa.

El comportamiento de la pendiente de la línea de compresión normal (Figura 7), presenta una dependencia casi lineal de la densidad de volumen del suelo. Los mayores valores de λ se lograron para los suelos mas sueltos debido a que éstos tienen un mayor espacio poroso lo cual los hace más compactables que los suelos densos, coincidiendo con lo reportado por Kirby (1991). Valores similares a los obtenidos para los suelos mas densos, analizados aquí, los alcanzó Adams (1996), para un suelo arcilloso arenoso. Medina y Maynar (2004) obtuvieron

valores de tres veces menores, debido a que los suelos saturados son más rígidos, y la presencia de agua en sus poros, hacen que sean menos susceptibles a la compactación.

Los valores obtenidos para la pendiente de la línea de expansión o de descarga (Figura 8) son menores en el suelo suelto, lo que manifiesta poca capacidad de recuperación, sin embargo aumenta para el suelo más compacto debido a que éstos presentan mayor módulo de elasticidad.

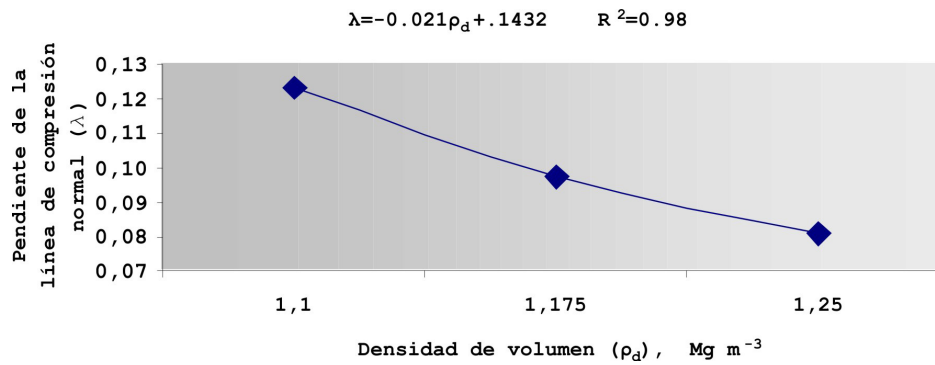


FIGURA 7. Pendiente de la línea de compresión normal en función de la densidad de volumen.

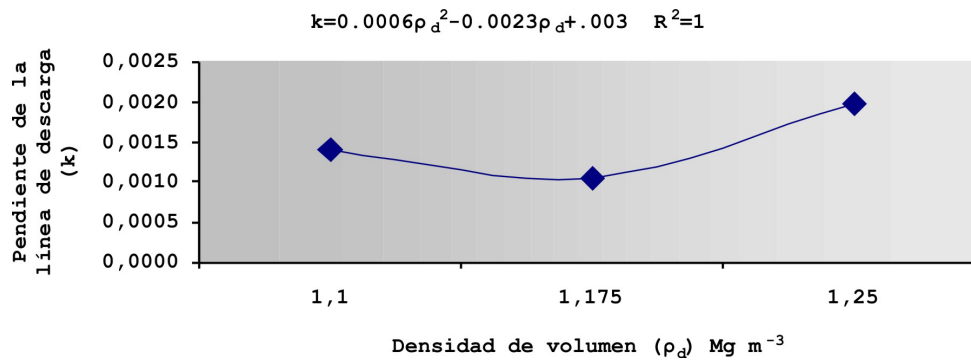


FIGURA 8. Pendiente de la línea de descarga en función de la densidad de volumen.

CONCLUSIONES

- La densidad de volumen tiene influencia directa en todos los parámetros elastoplásticos estudiados, destacándose su efecto sobre el módulo de elasticidad, la pendiente de la línea de estado crítico y la pendiente de la línea de compresión normal.
- Los valores obtenidos de las variables analizadas pueden ser utilizados como datos de entrada para la modelación de la compactación del suelo por medio del método de elementos finitos y permiten conocer el comportamiento de variables de estado crítico de uno de los suelos cubanos de más importancia económica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, B. A.: *Critical state behavior of an agricultural soil*. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad de Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 1996.

ADAMS, B.A. and D. WULFSOHN: "Critical-state behavior of an agricultural soil". *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70: 341-354, 1998.

BERLI, M., B. KULLI, W. ATTINGER, M. KELLER, J. LEUENBERGER, H. FLÜHLER, S.M. SPRINGMAN and R. SCHULIN: "Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery", *Soil & Tillage Research*, 75:37-52, 2004.

FERVERS, CW.: "Improved FEM simulation model for tire-soil interaction", *Journal of Terramechanics*, 41: 87-100, 2004.

GONZÁLEZ, O., C. IGLESIAS, M. HERRERA, E. LÓPEZ y A. SÁNCHEZ: "Influencia de la humedad en parámetros elastoplásticos empleados para la modelación de la compactación del suelo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3):26-30, 2008.

HERRERA, M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*. 173pp, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, La Habana, Cuba, 2006.

HERRERA, M., C. IGLESIAS, O. GONZÁLEZ, E. LÓPEZ y A. SÁNCHEZ: "Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de Elementos Finitos. Parte I", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3), 31-38, 2008.

KIRBY, J. M.: "Critical state soil mechanics parameters and their variation for vertisols in eastern Australia", *Journal of Soil Science*, 42: 487-499, 1991.

KIRBY, J.M. and F. ZOZ: Stress under belt and radial tyres with various wt distributions. ASAE Paper 972733, 1997.

MEDINA, L. y M.M. MAYNAR: "Determinación de los parámetros del modelo de estado crítico Cam Clay para los suelos de Madrid", *Revista de Obras Públicas*: 3.432: 29-45, 2003.

- MINAZ, *Proyecto de producción de caña 2005-2007-2010*, La Habana, Cuba, 2004.
- MOUAZEM, M. A., J.R. HERMAN and J. DE BAERDEMAEKER: "Effects of bulk density and moisture content on selected mechanical properties of sandy loam soil", *Biosystems Eng.*, 83(2): 217-224, 2002.
- Oficina Nacional de estadísticas. *Anuario estadístico de Cuba: [en línea] 2006*. Disponible en: http://www.one.cu/aec_web/aec2006_gif1.htm. [Consulta: noviembre 18 2008].
- ISA: *Elastic models. [en línea] 2008* Disponible en: <http://www.pisa.ab.ca/program/model/elastic/elastic.htm> [Consulta: noviembre 18 2008].
- PLAXIS: *Manual de referencias Plaxis*, 206 pp., V-8. Editor R. B. J. Brinkgreve, Delft University of Technology & PLAXIS b.v., Low Countries, 2004.
- RAPER, R.L. and D.C. ERBACH: "Prediction of soil stress using the finite element method", *Transaction of ASAE*, 33(3): 725-730, 1990a.
- RAPER, RL and D.C ERBACH: "Effects of variable linear elastic parameters on finite element predictions of soil compaction", *Transaction of ASAE*, 33(3): 731-736, 1990b.
- RECAREY, C.: *Modelación del terreno y las estructuras en el dominio del tiempo. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2000.
- SHOOP, A.S.: *Finite element modeling of tire terrain interaction. Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)*, Universidad del Estado de Michigan, Michigan, EEUU, 2001.
- WHEELER, S.J. and V. SIVAKUMAR: *Development and application of critical state model for unsaturated model.*, En Predictive soil mechanics, Ed GT.Houlsby y AN Schofield, 709-728, London, 1993.
- WULFSOHN, D. and B.A. ADAMS: *Elastoplastic soil mechanics, In: Advances in Soil Dynamics*, Volumen 2, 1-116, St Joseph, Michigan, ASABE, 2002.

Programa de Investigación en Ingeniería Agrícola

Se realizan investigaciones en áreas de la Ingeniería Agrícola y Agroindustrial que plantean soluciones a problemas sectoriales o regionales de impacto nacional.

Líneas de investigación:

- Geohidrología
- Mantenimiento y reparación de la maquinaria agrícola
- Sistemas y tecnologías para la mecanización
- Ingeniería y tecnología de alimentos

Se cuenta actualmente con máquinas para la cosecha del maíz, frijol, transplantadoras de piña, reventadora de amaranto, cosechadora de jamaica, cosechadora de cacahuate, sembradoras de precisión de diferentes tipos y capacidades.

Coordinar con:

Dr. Carlos Alberto Villaseñor Perea

Director del

**Dpto. de Ing. Mecánica Agrícola
Tel.: (595) 2 1500 ext. 5719**

**Dpto. de Irrigación
Tel.: (595) 2 1500 ext. 5690**

**"Marcando el rumbo
de la Ingeniería
Agrícola en México,
en el Tercer Milenio"**

**Universidad
Autónoma
Chapingo**

