

Determinación de los parámetros macroestructurales de un Ultrasol requeridos por el Método de los Elementos Distintos para la simulación del desgaste de los aperos de labranza

Determination of the Ultrasol parameters required for the Distinct Elements Method for the simulation tillage tools wear

Ángel Lázaro Sánchez Iznaga¹, Miguel Herrera Suárez², Ciro Iglesias Coronel³, Carlos Alberto Recarey⁴
y Reinaldo Pérez Armas¹

RESUMEN. En el presente trabajo se investiga la influencia del estado de humedad y densidad en el comportamiento de los parámetros físicos y macroestructurales de un Ultrasol, requeridos por el Método de los Elementos Distintos (MED) para la simulación del desgaste de los aperos de labranza. Para el cumplimiento del objetivo planteado se realizaron ensayos físicos en función de caracterizar estos suelos desde este punto de vista, así como se determinaron los parámetros macroestructurales del suelo y de la interfase suelo-herramienta de labranza mediante ensayos de corte directo y corte directo modificado, determinando el módulo cortante, el ángulo de fricción interna, la cohesión, el ángulo de fricción y la adhesión suelo-herramienta de labranza, estudiándose por vez primera en Cuba estos parámetros en un suelo agrícola de textura arenosa-loamosa. Los resultados permiten establecer las dependencias variacionales de los parámetros macroestructurales investigados con respecto al contenido de humedad y densidad del suelo, poniéndose de manifiesto que las magnitudes y tendencias de dichos parámetros están condicionadas por el contenido de humedad presente en el suelo y su estado de densificación, mostrando valores del módulo cortante que oscilan de 1 820,58 a 2 739,36 kPa; ángulo de fricción interna de 19,78 a 31,44°; cohesión de 8,19 a 18,68 kPa; fricción externa de 12,96 a 26,97°, la adherencia suelo metal de 5,76 a 9,16 kPa y el coeficiente de Poisson 0,36.

Palabras clave: Ensayos físicos, ensayos mecánicos, propiedades físicas, propiedades mecánicas, módulo cortante, fricción interna del suelo, cohesión, fricción suelo-metal, adhesión.

ABSTRACT. Presently work was investigated the influence of the moisture and density in the behavior of the macrostructure and physique parameters of an Ultrasol, it required for the Distinct Element Method (DEM) for simulation tillage tools wear. To full fill the establish objective the physical tests were carried out in function of characterizing soils physically, as well as the tillage tool-soil interface and soil macrostructure parameters were determined by means of direct shear test and modify direct shear test, determining the shear module, soil internal friction angle, soil cohesion, friction angle and tillage tool-soil adhesion. The results allow establishing the variety dependences of the soil macrostructural parameters according to the density and moisture content present in the soil, it manifesting that the magnitude and tendency of these parameters are governed by density and moisture content present in the soil, showing shear modulus values ranging from 1 820,58 to 2 739,36 kPa; soil internal friction angle ranged from 19,78 to 31,44°; soil cohesion reached values from 8,19 to 18,68 kPa; tillage tool-soil friction angle ranging from 12,96 to 26,97°; adhesion reached values from 5,76 to 9,16 kPa and Poisson's ratio 0,36.

Keywords: physical tests, mechanical tests, physical properties, mechanical properties, shape module, soil internal friction angle, soil cohesion, tillage tool-soil friction angle, tillage tool-soil adhesion.

Recibido 20/12/11, aprobado 28/01/13, trabajo 20/13, artículo original.

¹ M.Sc., Prof. Asistente, Universidad de Cienfuegos, Dpto. Tecnología Agropecuaria, Cienfuegos, CP 59430. E-✉: angelsi@uclv.edu.cu

² Dr.C., Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas. Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara, Cuba.

³ Dr.C., Prof. e Inv. Titular, Universidad Agraria de La Habana-CEMA, Mayabeque, Cuba.

⁴ Dr.C., Inv. Titular, Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería, CIMNE. Universidad Central de Las Villas Villa Clara, Cuba.

Colaboradores: Ing. Yoandry Socarrás Armenteros e Ing. Alberto López Méndez, a quienes se le agradece su participación en la investigación.

INTRODUCCIÓN

Los ultrasoles son suelos que están diseminados por toda Cuba, ocupando una extensión territorial total de 611332,75 ha (Nápoles *et al.*, 1992), distribuidos en la mayoría de las provincias del país, a excepción de la provincia de Guantánamo. La importancia económica de estos suelos está dada por su productividad, pues en la mayoría de los casos se destinan a la producción de tabaco, hortalizas, granos, además de raíces y tubérculos, así como al desarrollo de la ganadería.

A pesar de su importancia económica, estos suelos poseen una elevada abrasividad que los clasifica como altamente friccionantes, lo cual está dado por sus constituyentes, donde predomina la arena, el cuarzo y los perdigones de hierro, partículas que al interactuar con la superficie de trabajo de la herramienta de labranza provocan el desgaste de esta.

El desgaste es un fenómeno que trae aparejado la reducción de la vida útil de los órganos de trabajo de los aperos de labranza, provocando el aumento del consumo de energía y el encarecimiento de los costos de las labores de preparación, acondicionamiento y cultivo de suelos.

Esta problemática obliga a la búsqueda o introducción de nuevos materiales para la fabricación de órganos de trabajo resistentes al desgaste, así como al diseño de nuevos órganos de los aperos de labranza en función de minimizar estos efectos.

Para el estudio del desgaste abrasivo, en la actualidad se han desarrollado los métodos numéricos, de los cuales el Método de Elementos Distintos o Discretos (MED) ha tenido mayor aplicación en el estudio del desgaste de las herramientas que se emplean, tanto en el corte de rocas como en suelos no agrícolas (Recarey *et al.*, 2001). Este método toma como datos de entrada los parámetros referidos a la macro (propiedades mecánicas) y microestructura del geomaterial.

Los parámetros macro se pueden determinar mediante los ensayos convencionales que se realizan en los laboratorios de mecánica de suelo (Franco *et al.*, 2005), o a partir de ensayos realizados directamente en el campo (Asaf *et al.*, 2006; Coetzee y Els, 2009), sin embargo, los parámetros microestructurales sólo pueden determinarse mediante la estimación una vez determinadas las primeras.

En el ámbito internacional los parámetros macroestructurales de los suelos agrícolas que se requieren para simular en MED el desgaste de los aperos de labranza han sido ampliamente estudiados (Nicholds, 1930; Baver y Gardner, 1972; Chi y Kushwaha, 1990; Raper y Erbach, 1990; Chi, 1993; Srivastava *et al.*, 1993; Fielke, 1999; Durán, 2002; Mouazem, 2002; Mouazem *et al.*, 2002), sin embargo, en Cuba, a pesar de que se conocen estudios completos de estos parámetros en los vertisoles de la costa norte de Villa Clara (Rodríguez, 1999; Herrera, 2002; De La Rosa *et al.*, 2011); los suelos rojos y negros plásticos, destinados todos al cultivo de la caña de azúcar (García de la Figal, 1978); los ferralíticos rojos compactados de las provincias de Ciego de Ávila y Mayabeque (Pérez de Corcho *et al.*, 2004; González *et al.*, 2008), dedicados al cultivo de la piña, viandas, y hortalizas respectivamente, no se conocen estudios dirigidos a la determinación de los mismos en suelos arenosos o arenosos-limosos como es el caso de los ultrasoles, por consiguiente también se

desconocen los parámetros microestructurales de los mismos.

Tomando en cuenta estos aspectos se decide realizar el presente trabajo que tiene como objetivo: determinar los parámetros macroestructurales de un suelo abrasivo de la región central de Cuba clasificado como Ultrasol, necesarios para la simulación del desgaste de los aperos de labranza mediante el Método de Elementos Distintos.

MÉTODOS

Este trabajo se realizó entre los meses de octubre 2010 a julio del 2011. Inicialmente se tomaron las muestras de suelo en la empresa de Cultivos Varios de Manacas, perteneciente al municipio de Santo Domingo, provincia de Villa Clara. Posteriormente los ensayos de suelo se realizaron en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Empresa de Investigaciones Aplicadas a la construcción (ENIA) de Villa Clara, ubicada en la ciudad de Santa Clara.

Metodología para la recolección de las muestras de suelo. La recolección de las muestras de suelo consistió en la apertura de calicatas de 60 cm de ancho por 60 cm de profundidad, tomándose las muestras de forma individual para tres horizontes de profundidad diferentes, denominados: horizonte A (profundidad 0 a 15 cm), horizonte B (profundidad 15 a 30 cm) y horizonte C (profundidad 30 a 50 cm).

Después de cortado el suelo en bloques, se seccionó en tres capas coincidentes con los horizontes de transición, y se depositaron en sacos de nylon y se trasladaron al laboratorio de mecánica de suelos, ubicada en el municipio de Santa Clara, provincia Villa Clara. El suelo objeto de estudio se clasifica como un Ultrasol, según la USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1992) y como un suelo Ferralítico Cuarcítico Amarillento Rojizo Lixiviado, según la 2da Clasificación Genética de los Suelos en Cuba (Cairo y Quintero, 1980).

Metodología para la conformación de las probetas de suelo. Las probetas se conformaron empleando el método de remoldeo, según las normativas establecidas en las (NC 10:1998).

Las humedades y densidades de remoldeo usadas en este experimento oscilan de 4,4 a 16,8% y de 1,198 a 1,991 g/cm² respectivamente.

Metodología para la caracterización física del suelo. Para la caracterización física del suelo se realizaron los ensayos de granulometría, límites y peso específico, procedimiento tal y como se establecen en las (NC 20:1999; NC 19:1999; NC 58:2000).

Metodología para la determinación de los parámetros macroestructurales del suelo. Los parámetros macroestructurales determinados son: el módulo cortante, la cohesión, el ángulo de fricción interna del suelo, la fricción suelo-metal y la adhesión.

Para la determinación del módulo cortante comúnmente se emplean los ensayos triaxiales, sin embargo, debido a la textura de este suelo resulta prácticamente imposible conformar las probetas con los medios que cuentan los laboratorios de mecánica de suelos convencionales, por lo que la determinación de este parámetro se realizó mediante el empleo de ensayos de cortante directo (Figura 1).

El módulo cortante del suelo se determinó planteando en un sistema de coordenadas (σ ; τ) los valores de esfuerzo contra deformación hasta que la recta tangente a la curva esfuerzo-deformación inicie el estado no lineal. Este parámetro se expresa en kPa y se calculó mediante la fórmula siguiente:

$$G = \frac{\tau}{\frac{h_{\text{anillo}}}{10 \cdot \sigma} \cdot 0,01} \quad (1)$$

donde:

τ - esfuerzo cortante en la dirección tangencial, kPa;

σ - esfuerzo cortante en la dirección normal, kPa;

h_{anillo} - altura del anillo, m.

La cohesión se determinó como el intercepto de la recta y el ángulo de fricción interna del suelo como el ángulo de levantamiento o pendiente de dicha recta, procedimiento que ha sido descrito por (Herrera, 2006).

Las presiones normales (σ) empleadas en este ensayo son: 25, 50, 75, 100 kPa.

El ensayo de corte directo se realizó en una caja corte directo de deformación controlada (Figura 1), donde se colocó la probeta de suelo fue cortada bajo un régimen de velocidad constante (1,2 mm/min).

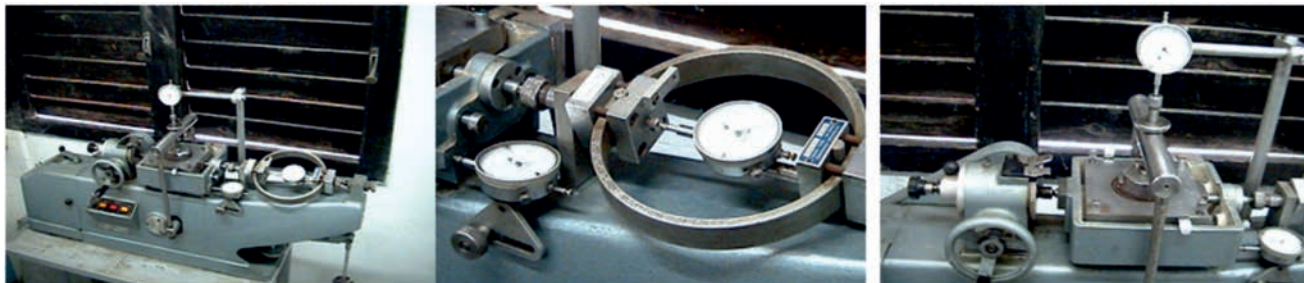


FIGURA 1. Aparato de corte directo.

Metodología para la determinación de los parámetros macroestructurales del suelo relacionados con la interfase suelo-herramienta. Los parámetros a determinar son: la fricción y la adhesión suelo-metal, para lo cual se recurrió al ensayo de corte directo modificado (Figura 2).

El procedimiento metodológico y el equipamiento que se empleó en este caso es similar al del ensayo de corte directo, con la diferencia que en este se coloca un cilindro metálico en la parte inferior de la caja de corte (Figura 2 b), permite que el suelo contenido en la parte superior de dicha caja se deslice sobre el mismo (Figura 2 c). El material que se empleó en la construcción del cilindro metálico fue Acero G-60, es decir del mismo material empleado en la construcción de las partes de los

apros de labranza que interactúan directamente con el suelo.

Tanto la adhesión como la fricción suelo-metal se determinaron graficando los resultados del ensayo de corte directo modificado en un sistema de coordenadas (σ ; τ_a), con la diferencia que la pendiente o ángulo de levantamiento de la recta de mejor ajuste con respecto a la horizontal corresponde al valor del ángulo de fricción suelo-metal, y el intercepto de dicha recta coincide con el valor de la adhesión suelo-metal, como se muestra en la ecuación 2.

$$\tau_a = C_a + \sigma \cdot \tan \delta \quad (2)$$

Las presiones normales (σ) empleadas en este ensayo son: 25, 50, 75, 100 kPa.

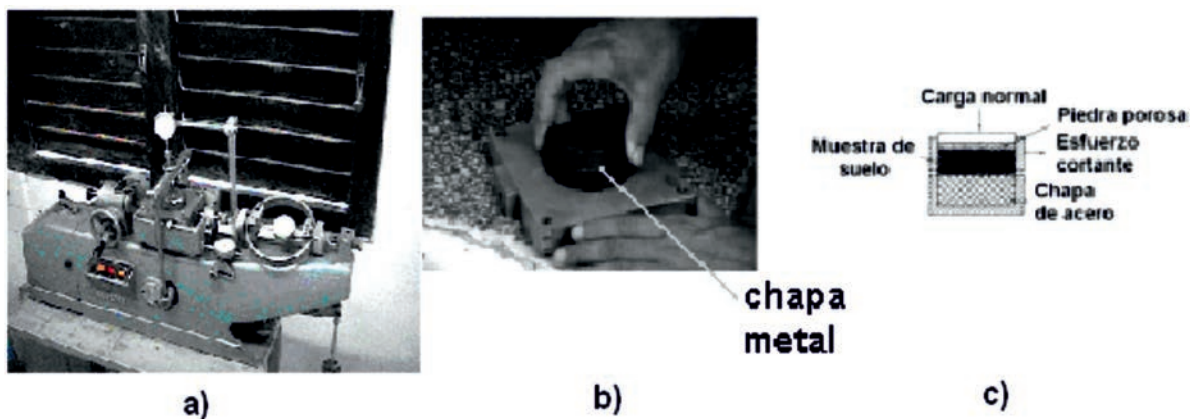


FIGURA 2. Equipamiento para la realización del ensayo de corte directo modificado. a) Aparato de corte directo, b) chapa de metal, c) esquema de la caja de corte modificada.

Metodología para el procesamiento estadístico de los resultados. Los datos obtenidos en los ensayos se analizaron con el procesador estadístico STATGRAPHICS Centurion XV, recurriéndose al análisis de regresión múltiple para la búsqueda de las relaciones existentes entre las variables en estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la caracterización física del suelo. Los resultados muestran (Tabla 1), que el contenido de arena presente en el suelo representa la mayor parte de su composición granulométrica y sus valores oscilan entre 67,2 a 75,8%. En el caso de la fracción limo y arcilla sus valores oscilan entre 14,8 a 12,2% y 2,2 a 3,7%, respectivamente, los mismos alcanzan

su valor máximo 14,8% y 3,7% en el horizonte intermedio. Por tal motivo el suelo se clasifica como un suelo de textura arenosa-loamosa, según el triángulo de clasificación textural (Cairo y Quintero, 1980).

El peso específico (Gs) en este suelo (Tabla 1), muestra la tendencia a incrementarse con el aumento de la profundidad del suelo, alcanzando valores máximos de 2,73 g/cm³, típicos de los suelos con alto contenido de arena.

TABLA 1. Propiedades físicas del suelo en estudio

Profundidad, cm		Gs, g/cm ³	Límite plástico	Relaciones moleculares			Granulometría, %				
desde	hasta			Grava	Arena	limo	Arcilla	Coloide			
0	15	2,69	NP	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$ 1,0 - 2,0	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$ 1,0 - 3,0	$\frac{SiO_2}{F_2O_3}$ 10 - 15	5,8	75,8	14,2	5	2,2
16	30	2,71	NP				13,5	67,2	14,8	3,7	0,8
31	50	2,73	NP				8,5	75,7	12,2	2,3	1,2

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el cual se basa en el empleo de la carta de plasticidad (Figura 3), el suelo en estudio se clasifica como una arena limosa, no plástica del tipo SM.

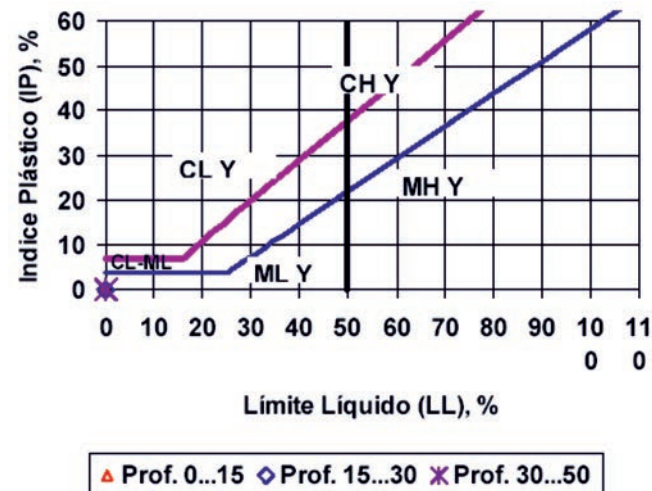


FIGURA 3. Carta de plasticidad del suelo.

Las relaciones moleculares existentes entre el SiO₂ y otros componentes químicos del suelo se muestran en la tabla 1, donde se puede apreciar que la relación SiO₂/F₂O₃ predomina respecto a las relaciones restantes, alcanzando valores que oscilan de 10 a 15%, manifestando el alto contenido de cuarzo y hierro en este suelo, constituyentes que justifican su naturaleza abrasiva.

Resultados de la investigación de los parámetros macroestructurales del suelo

Resultados de la determinación del Módulo cortante (G).

Los resultados obtenidos de la determinación experimental del módulo cortante muestran que existe una estrecha dependencia con respecto al contenido de humedad y densidad presente en el suelo, manifestando una tendencia a disminuir en la medida que aumenta el contenido de humedad y a incrementarse con el aumento de la densidad del suelo (Figura 4), alcanzando valores

que oscilan de (1 792,04-2 774,13) kPa, comportamiento típico de los suelos con alto contenido de arena.

Dichos resultados son indicador de que la rigidez del suelo a nivel de su macroestructura está en función del contenido de humedad presente en el mismo y de su estado de compactación.

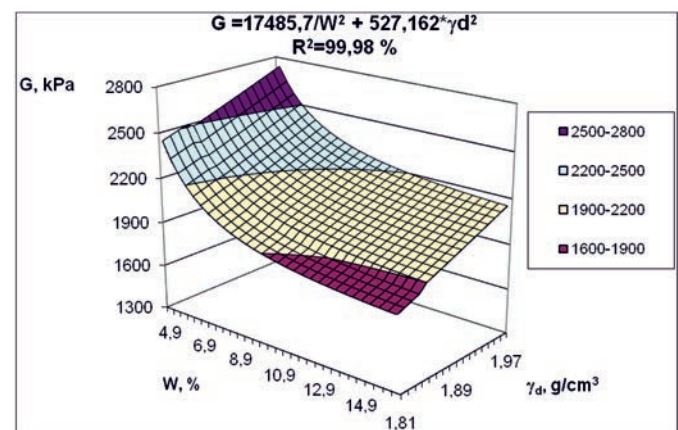


FIGURA 4. Variación del módulo cortante ante los cambios de humedad y densidad.

Resultados de la determinación de la fricción interna del suelo (φ).

Los resultados de la determinación experimental de este parámetro muestran una tendencia a disminuir su magnitud según se incrementa el contenido de humedad (Figura 5), y aumentar cuando el suelo se hace más denso, alcanzando valores que oscilan de 19,78 a 31,44°, valor máximo que es inferior al obtenido por (Herrera, 2006) en suelos de textura arcillosa, y los obtenidos por (Cañavate y Hernández, 1989; Obando, 2008) en suelos de textura arenosa. Tanto la tendencia como las magnitudes han sido reportadas por (Mouazem, 2002; Gallarday, 2005; Davoudi et al., 2008; Gitau et al., 2008; Coetzee y Els, 2009) en suelos de similar textura, y por (Obando, 2008) en suelos de textura diferente al investigado.

El análisis estadístico de los resultados corroboró la existencia de una estrecha dependencia entre los valores de la fricción interna del suelo con respecto a la variación del estado de humedad y densidad (R²=99,3%).

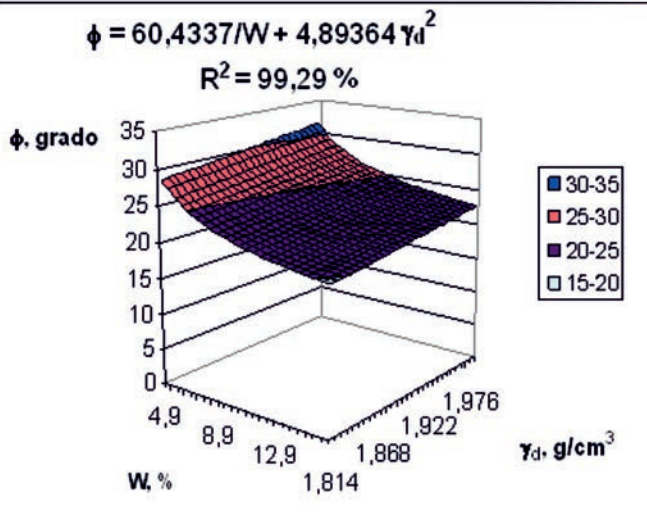


FIGURA 5. Variación del ángulo de fricción interna del suelo ante los cambios de humedad y densidad.

Resultados de la determinación de la cohesión del suelo (c). La determinación experimental de la cohesión del suelo muestra que existe una tendencia a disminuir su magnitud cuando se incrementa la humedad del suelo (Figura 6), y a crecer cuando el suelo se hace más denso, tendencia encontrada por otros investigadores en suelos de textura franco-arenosa y arcillosos (Durán, 2002; Marrón, 2002), alcanzando magnitudes que oscilan de 8,19 a 18,68 kPa, valores superiores a los obtenidos por (Asaf *et al.*, 2007; Shmulevich, 2010) en suelos de textura arenosa, pero inferiores a los obtenidos por (Marrón, 2002; Obando, 2008) en suelos de similar textura, poniéndose de manifiesto que los ultrasoles a pesar de ser suelos friccionantes alcanzan valores de la cohesión semejantes a los de las arcillas ligeras, aspecto que está condicionado por el contenido de limo de dichos suelos. De igual forma que el caso anterior, el análisis estadístico corroboró la estrecha dependencia que muestra la cohesión con respecto al estado de humedad y densidad ($R^2=99,16\%$).

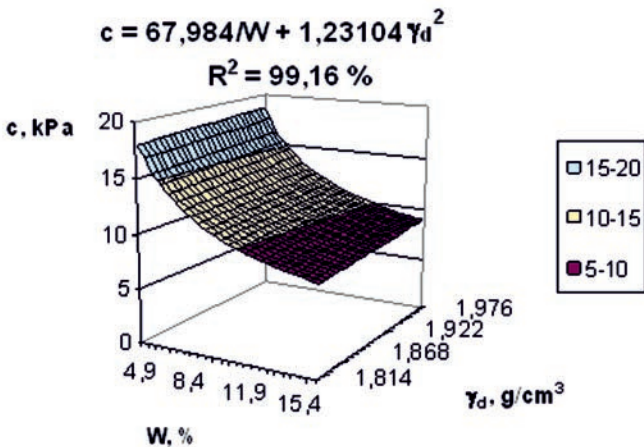


FIGURA 6. Variación de la cohesión del suelo ante los cambios de humedad y densidad.

Resultados experimentales de la determinación de los pa-

rámetros macroestructurales de la interfase suelo-herramienta de labranza.

Resultados de la determinación del ángulo de fricción externa (delta). Los resultados de la determinación experimental del ángulo de fricción de fricción externa (suelo-metal) mostraron una marcada dependencia de esta propiedad respecto al estado de densidad y humedad del suelo ($R^2=90,38\%$), alcanzando valores que oscilan de 12,96 a 26,97°, exhibiendo una tendencia a la disminución de su magnitud con el aumento de la humedad del suelo, y aumentar con el incremento de la densidad (Figura 7). Los valores alcanzados coinciden con los encontrados por otros investigadores en suelos de textura similar (Marrón, 2002; Mouazem, 2002; Davoudi *et al.*, 2008), pero inferiores a los obtenidos por (Herrera, 2006) en suelos de textura arcillosa.

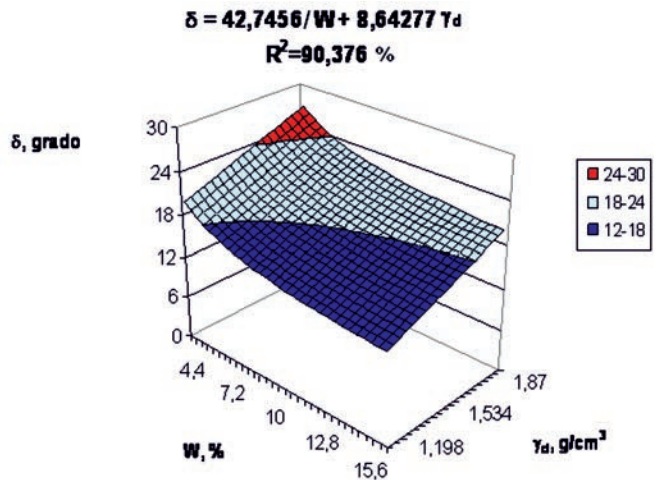


FIGURA 7. Variación del ángulo de fricción externa del suelo ante los cambios de humedad y densidad.

Resultados de la determinación del Adhesión del suelo (C_a). La Figura 8 mostró que la adhesión suelo-metal tiende a aumentar su magnitud en la medida que aumenta el contenido de humedad, hasta alcanzar su valor máximo (9,16 kPa) a humedades cercanas al 10,4%, a partir de lo cual comienza a disminuir su magnitud (5,76 kPa) con el aumento del contenido de humedad. En esta última fase la fricción está dominada por la lubricación entre ambas superficies en contacto. Esta variable aumenta su magnitud de forma directamente proporcional al aumento de la densidad del suelo. La magnitud de la adhesión del suelo objeto de estudio oscila de 5,76 a 9,16 kPa para las condiciones de humedad y densidad empleadas en la experimentación. Los valores alcanzados se encuentran en el rango típico para los suelos de textura arcillosa (NC10:1998; Cañavate y Hernández, 1989; Chi y Kushwaha, 1990; Chi, 1993; Fielke, 1999; Durán, 2002; Mouazem *et al.*, 2002; Herrera, 2006; Soni y Salokhe, 2006; Herrera *et al.*, 2008); y superiores a los suelos de textura Franca (Durán, 2002). A pesar de que los ultrasoles son suelos no plásticos poseen valores de adhesión significativamente superiores a las arenas, comportamiento que está dado por la influencia de contenido de limo que poseen dichos suelos.

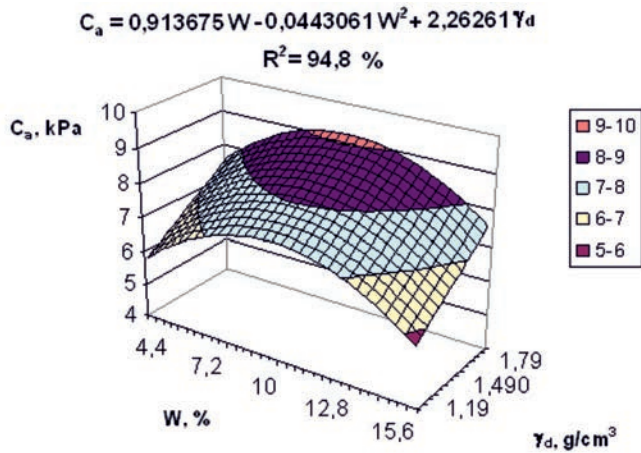


FIGURA 8. Variación de la adhesión suelo-metal ante los cambios de humedad y densidad del suelo.

Estimación del coeficiente de Poisson (ν). Dada la imposibilidad de determinar experimentalmente el coeficiente de Poisson dada las características del suelo objeto de estudio y las particularidades del equipamiento existente, se procedió a su estimación mediante el método de prueba y error, a partir de la relación existente entre los parámetros que definen la rigidez del material tanto a nivel macroestructural como microestructural.

A partir de esta relación se estimó el módulo de Young (E_{est}), el cual fue comparado con el módulo de Young determinado a partir de los ensayos experimentales (E_{exp}). De esta forma el valor de E_{est} más cercano al E_{exp} se corresponde con el coeficiente de Poisson requerido en las simulaciones, pues es el que satisface en mayor grado la relación entre los parámetros que definen la rigidez del suelo (Figura 9).

El valor de E_{exp} se determinó a partir de su relación con el módulo cortante, como:

$$E_{exp} = \frac{8}{3} \cdot G \tag{3}$$

donde:

G- módulo cortante, kPa.

Para la determinación de E_{est} se asignaron valores del coeficiente de Poisson ($\nu=0,36$ a $0,45$). La rigidez normal en el contacto (K_n) se determinó para determinados tamaños de partículas definidos por su radio medio ($R=2,7$ mm), como:

$$E_{est} = \frac{3(1-\nu^2)K_n}{4\sqrt{R}} \tag{4}$$

donde:

ν - coeficiente de Poisson;

K_n - rigidez en el contacto, kPa;

R- radio de la partícula, m.

En la Figura 9, a modo de ejemplo se observa el proceso de estimación del coeficiente de Poisson para el caso de un suelo húmedo y medianamente suelto ($W= 14,5\%$; $\gamma_d= 1,86$ g/cm³). En este caso particular el valor de Poisson que proporcionó las magnitudes más exactas del módulo de Young estimado $E_{est}=5085,20$ kPa con respecto al valor experimental

$E_{exp}=5085,16$ kPa fue $\nu=0,36$, valor cercano al obtenido experimentalmente por (Davoudi *et al.*, 2008) en un suelo de similar textura, condiciones de humedad y densidad semejantes, comportamiento propio de los suelos con estado medianamente suelto.

A partir de este procedimiento se estimó el coeficiente de Poisson para las condiciones de humedad y densidad del suelo comprendidas en la experimentación ($W= 4,9$ a $16,4\%$; $\gamma_d= 1,81$ a $1,97$ g/cm³), se realizó un análisis de regresión multivariado, el cual mostró que la magnitud de este parámetro depende del estado de humedad y densidad del suelo ($R^2=99,47\%$), disminuyendo no linealmente con el aumento de la humedad del suelo. Sin embargo, el cambio de estado de suelto a denso propició el aumento de su magnitud. Los valores para este suelo oscilaron de $0,32$ a $0,48$, (Fig. 10). Las tendencias encontradas concuerdan con los reportados por otros investigadores (Chi, 1993; Mouazem, 2002; Mouazem *et al.*, 2002; Herrera, 2006). Los valores mostrados por este suelo están en el rango típico exhibido por suelos de esta naturaleza.

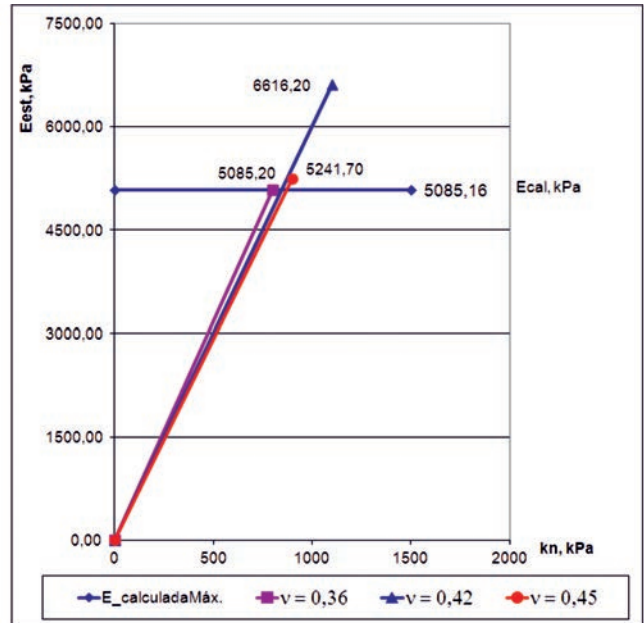


FIGURA 9. Estimación del coeficiente de Poisson.

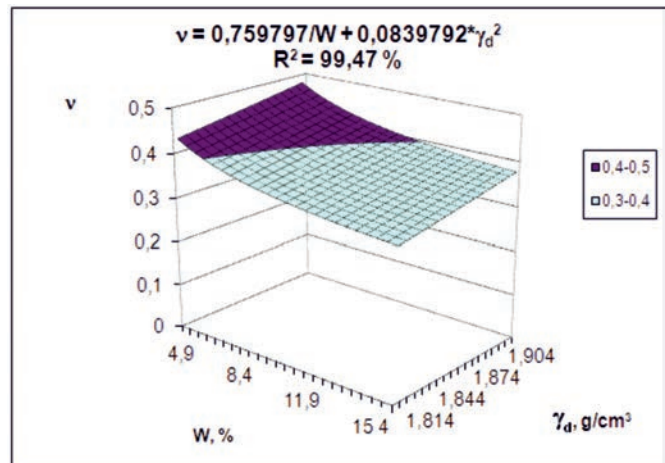


FIGURA 10. Variación del coeficiente de Poisson ante los cambios de humedad y densidad del suelo.

CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación se llegó a las siguientes conclusiones:
- El suelo en estudio se clasifica como arenoso-loamoso, con alto contenido de arena (75,8%) y muy poca presencia de arcilla (5%);
- Tanto el contenido de humedad como la densidad del suelo condicionan las magnitudes y tendencias mostradas por los parámetros macroestructurales del suelo objeto de estudio, evidenciando que en la medida que aumenta el contenido de humedad disminuye su resistencia mecánica, aumentando esta con el incremento de la densidad.
- Las propiedades determinadas experimentalmente muestra-

ron valores típicos para este tipo de suelo, alcanzando valores del módulo cortante que oscilan entre 1 820,58 a 2 739,36 kPa; ángulo de fricción interna del suelo de 19,78 a 31,44°; y la cohesión entre 8,19 a 18,68 kPa;

- Las magnitudes y tendencias mostradas por los parámetros macroestructurales relacionados con la interfase suelo-herramienta de labranza también están estrechamente correlacionadas con el contenido de humedad y densidad del suelo, mostrando valores de la fricción suelo-metal que oscilan entre 12,96 a 26,97°, y de la adhesión entre 5,76 a 9,16 kPa;
- El procedimiento empleado para la estimación del coeficiente de Poisson fue capaz de predecir con exactitud el comportamiento de este parámetro para diferentes condiciones de humedad y densidad del suelo objeto de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASAF, Z.; D. RUBINSTEIN & I. SHMULEVICH: "Evaluation of link-track performances using DEM", *Journal of Terramechanics*, 43: 141-161, 2006.
2. ASAF, Z.; D. RUBINSTEIN y I. SHMULEVICH: "Determination of discrete element model parameters required for soil tillage", *Journal of Soil & Tillage Research*, 92(1): 227-242, 2007.
3. BAVER, L. D. & W. R. GARDNER: *Soil Physics: Soil Dynamics Property*, New York, 1972.
4. CAIRO, C. P. y G. QUINTERO: *Suelos*, Editorial Pueblo y Educación ed, Ciudad Habana, 1980.
5. CAÑAVATE, J. O. y J. L. HERNÁNDEZ: *Técnica de la Mecanización Agraria*, 1-643pp., 3ra edición. Ediciones Mundi-Prensa ed, España, 1989.
6. COETZEE, C. J. & D. N. J. ELS: "Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade-granular material interaction", *Journal Terramechanics*, 30(46): 15-26, 2009.
7. CHI, L.: "An elastoplastic constitutive model for agricultural cohesive soil", *Journal Canadian Agricultural Engineering*, 35(4): 245-251, 1993.
8. CHI, L. & R. L. KUSHWAHA: "A non-linear 3D finite element analysis of soil failure with tillage tools", *Journal of Terramechanics*, 27(4): 343-366, 1990.
9. DAVOUDI, S.; R. ALIMARDANI; A. KEYHANI & R. ATARNEJAD: "A two dimensional Finite Element analysis of a plane tillage tool in soil using a non-linear elasto-plastic model", *American-Eurasian Journal Agricultural & Environment Science*, 3(3): 498-505, 2008.
10. DE LA ROSA, A. A. A.; S. M. HERRERA y C. O. GONZÁLEZ: "Propiedades Macroestructurales de un Vertisuelo requeridas para la simulación computacional de la interacción suelo-apero de labranza mediante el Método de Elementos Finitos (MEF)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(2): 1-15, 2011.
11. DURÁN, G. H. M.: "Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco", *Journal of Terra Latinoamericana*, 20(3): 227-234, 2002.
12. FIELKE, M. J.: "Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements wet soil", *Journal Agriculture Engineering Research*, 74: 91-101, 1999.
13. FRANCO, Y.; D. RUBINSTEIN & I. SHMULEVICH: Determination of discrete element model parameters for soil-bulldozer blade interaction. En: 15th international conference of the ISTVS, September, pp. 25-29, Hayama, Japan. 2005.
14. GALLARDAY, B. T. E.: "Estudio de mecánica y resistencia de suelos: caso Lima", *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 8(15): 78-87, 2005.
15. GARCÍA DE LA FIGAL, C. A.: "Estudio de la fricción suelo-metal y suelo-plástico para dos suelos cañeros cubanos", ISPJAE, *Revista Ciencias Técnicas, Serie 8, Ingeniería en Construcción de Maquinaria*, 3: 107-122, abril de 1978.
16. GITAU, A. N.; L. O. GUMBE Abril & S. K. MWEA: "Mechanical behavior of a hard-setting luvisol soil as influenced by soil water and effective confining stress", *Journal Agricultural Engineering International*, 10: 1-14, 2008.
17. GONZÁLEZ, C. O.; C. C. IGLESIAS; S. M. HERRERA; B. E. LÓPEZ y I. Á. L. SÁNCHEZ: "Influencia de la humedad en parámetros elastoplasticos empleados para la modelación de la compactación del suelo", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(3): 1-5, 2008.

18. HERRERA, M. S.; C. C. IGLESIAS; C. O. GONZÁLEZ; B. E. LÓPEZ y I. Á. L. 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.
19. HERRERA, S. M.: *Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores*, Ed. Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), La Habana, Cuba, 2002.
20. HERRERA, S. M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, 100pp., **Tesis (presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana, La Habana, Cuba, 2006.
21. MARRÓN, G. R.: *Curso para profesionales. Maquinaria agrícola y labranza*, pp. 1-16, Bahía Blanca, Argentina, 2002.
22. MOUAZEM, M. A.: "Mechanical behavior of the upper layers of a sandy loam soil under shear loading", *Journal of Terramechanics*, 39(3): 115-126, 2002.
23. MOUAZEM, M. A.; R. J. HERMAN & J. D. BAERDEMAEKER: "Effects of bulk density and moisture content on selected mechanical properties of sandy loam soil", *Journal Biosystems Engineering*, 83(2): 217-224, 2002.
24. NÁPOLES, M. A.; C. ALEMANY; A. GONZÁLEZ; J. VÉLEZ y O. DÍAZ: *Características Edafológicas de Cuba*, Ed. Dirección Nacional de Suelos, Ministerio de Cultura. Editorial Científico-Técnica ed, La Habana, Cuba, 1992.
25. NC 10:1998: "Geotecnia. Preparación de las muestras de suelos Vig Diciembre 1998".
26. NC 20:1999: "Geotecnia. Determinación de la granulometría de los suelos. Vig. Abril 1999".
27. NC 19:1999: *Determinación del peso específico de los suelos*, Geotecnia, Vig. Febrero 1999
28. NC 58:2000: *Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos*, Geotecnia, Vig. Septiembre 2000
29. NICHOLDS, M. L.: "Dynamics properties of soil affecting implement desing", *Journal Agricultural Engineering (EUA)*, 2(6): 201-204, 1930.
30. OBANDO, R. T.: *Evaluación de la situación actual de inestabilidad del terreno en el área del centro de salud, Murra, Nueva Segovia*, 1-26pp., Huelva, España, Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/situacion-inestabilidad-terreno-centro-salud/situacion-inestabilidad-terreno-centro-salud.pdf>. [Consulta: 25 de Junio del 2012].
31. PÉREZ DE CORCHO, R. J.; S. M. HERRERA y C. C. IGLESIAS: Determinación de las propiedades físico-mecánicas de suelos ferralíticos rojos en áreas de producción de piña. En: **Sexta Conferencia Científica Internacional**, 18-21 de Octubre, Ciego de Ávila, Cuba, 2004.
32. RAPER, R. L. & C. D. ERBACH: "Effect of variable linear elastic parameters on finite element prediction of soil compaction", *Journal Transactions of the ASAE*, 33(3): 731-736, 1990.
33. RE CAREY, C. A.; E. OÑATE; J. MIGUEL; J. ROJEK; F. ZARATE y S. BURREL: *Simulación de problemas de desgaste en la interacción herramienta de corte terreno empleando el Método de los Elementos Discretos*, 1-25pp., 2001.
34. RODRÍGUEZ, O. M.: *Estudio de las propiedades físico-mecánicas de los suelos de mal drenaje de la costa norte de villa clara, relacionadas con la compactación y la traficabilidad*, (Informe de investigación terminada, Proyecto CITMA Territorial. Co: 080103), Villa Clara, Cuba, 1999.
35. SHMULEVICH, I.: "State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method", *Journal Agricultural Engine*, 3: 41-53, 2010.
36. SOIL SURVEY STAFF: *Key to soil taxonomy*, 1-556pp., 5th Edition. SMSS technical monograph ed, Virginia, 1992.
37. SONI, P. & V. SALOKHE: "Theoretical Analysis of Microscopic Forces at Soil-tool Interfaces: A Review", *Journal Agricultural Engineering International*, 8: 1-25, 2006.
38. SRIVASTAVA, A. K.; G. F. GOERRING & R. ROHRBARCH: "Engineering Principles of Agricultural Machines: Soil Mechanics", *Journal of the ASAE, USA*, 1993.