

Fundamentación teórico metodológica para la determinación del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal

Methodological theoretical foundation for the determination of the coefficient of friction dynamic soil-metal

M.Sc. Alexander Laffita Leyva, M.Sc. Ernesto Ramos Carbajal, Dr.C. Armando García de la Figal Costales, Ing. María del Carmen Sigler, Ing. Carlos Eloy Rodríguez Díaz

Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Mecanización Agropecuaria, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. Del análisis de los modelos constitutivos existentes para determinar las propiedades en la interfase suelo superficie metálica, numerosos investigadores utilizan la solución gráfica de Mohr-Coulomb, la cual no explica la influencia de los esfuerzos normales, la adherencia y velocidad de deslizamiento en la determinación del coeficiente de fricción dinámico μ_d . El modelo propuesto por Deriaguin (MTD) considera la fricción y la adherencia indisolubles, dependiendo la resistencia a dicho deslizamiento y el coeficiente de fricción dinámico μ_d , de las propiedades físicas mecánicas de suelo y del material en fricción, así como de las cargas externas y de adherencia entre ellas. Se dispone de una metodología experimental para la determinación de los valores del coeficiente de fricción dinámico suelo - superficie metálica, en función de la velocidad de desplazamiento relativo entre ellas, la presión normal, la humedad volumétrica y la adherencia entre ellas.

Palabras Claves: Fricción suelo; adherencia; método experimental.

ABSTRACT. From the analysis of existent constitutive models to determine the properties in the interphase soil metallic surface, numerous investigators utilize Mohr Coulomb's graphic solution, which does not explain the influence of normal stress, the adherence and sliding speed in the determination of the coefficient of dynamic friction μ_d . The model proposed by Deriaguin (MTD) considers the friction and adherence indissoluble. It states that the resistance to the mentioned sliding and the coefficient of dynamic friction μ_d , depend on physical mechanical properties of soil and the metallic surface in friction, as well as on the external loads and adherence among them. Was development an experimental method for to obtain the values of the coefficient of dynamic friction soil -metallic surface, taking into account the relative velocity among them, the normal stress, the soil water content and adherence among them.

Keywords: friction soil - metallic surface; adherence; experimental method.

INTRODUCCIÓN

Análisis de la fricción suelo metal

El valor del coeficiente de fricción dinámico suelo-material debe variar con la velocidad relativa de deslizamiento, dependiendo de las propiedades físico-mecánicas de ambos, sobre todo de la humedad del suelo (García de la Figal, 1978; Persson, 1998). Sobre la base de las investigaciones de Onwualu y Watts (1998); Plouffe *et al.* (1998); Mouazen *et al.* (1999); Mouazen *et al.* (2003); Tadesse (2004); Aluko y Chandler (2004); Liu

y Kushwaha (2006); Asaf *et al.* (2007); Herrera *et al.* (2008); Shmulevich (2010), el modelo constitutivo Mohr-Coulomb, no explica totalmente la variación del coeficiente de fricción suelo-metal con los esfuerzos normales y la velocidad de deslizamiento y, para los suelos arcillosos de Cuba, no esta investigado la variación de este con respecto a la velocidad (Herrera *et al.*, 2001; García de la Figal, 1978; Herrera *et al.*, 2007; Herrera *et al.*, 2008).

Nichols (1931), con el aumento de la humedad y diferentes contenidos de la fracción arcillosa, divide la variación del valor

del coeficiente de fricción suelo-metal respecto a la humedad en las fases: a) compresión; b) fricción; c) adherencia y d) lubricación, mientras que Quiem (1971), según García de la Figal (1978), sobre la base de la teoría electro-molecular de la fricción, lo divide de forma más precisa en: a) fricción externa, seca; b) fricción-adherencia externa; c) fricción-adherencia mezclados; d) fricción interna y lubricada, lo cual está confirmado por el segundo, al determina los valores de dos suelos Ferralítico rojo típico y Negro plástico o Vertisol.

Según García de la Figal (1978), los principales resultados obtenidos por varios investigadores sobre el proceso de fricción y adherencia son: a) Schübler, G. en 1830: el aumento de la adhesividad ocurre con el aumento de la fracción arcillosa del suelo y disminuye con la presencia de humus; b) Gologurskii, T. M. en 1916: el coeficiente de fricción aumenta con el aumento de la humedad hasta un máximo y luego disminuye; c) Kachinskii, N. A. 1937: el comienzo de la adhesividad del suelo con la tracción del mismo surge con cerca de un 50% de humedad relativa, por lo que la humedad óptima del suelo para ser labrada debe ser 2 a 3% menor que la humedad del comienzo de la adherencia; d) Vadiunin, F. en 1939: diferentes suelos poseen diferentes fracciones dispersas y con el empeoramiento de la estructura del suelo la adhesividad aumenta; e) Nichols, en 1925; Schuchin, en 1949; Söhne *et al.*, en 1952 y Ysimbal, en 1960; Prigozhaya, en 1965; Kosaechuk en 1970: con el aumento de la presión el valor del coeficiente de fricción suelo-metal disminuye; f) Sagach y Griechkosiei, en 1972: el coeficiente de fricción no cambia en función de la presión para la arena limpia con poca capacidad de sustentación; g) G. Tsimbal, en 1960; Burchenko *et al.* en 1961; Vinogradov y Podskrebko, en 1962; Bajtin, en 1969 y Nguen, en 1971: el aumento de la presión normal disminuye el valor del coeficiente fricción suelo-metal sólo hasta determinado valor y, posteriormente, tiende al aumento.

Deriaguin (1963), sobre la base de la teoría molecular de la fricción, propone que la resistencia a la fricción es la suma de: a- la fuerza por las carga externa y b- la tangencial producto de la adherencia molecular. Kraguelkii y Binogradova (1962), señalan que la teoría molecular de la fricción es cierta sólo para los cuerpos absolutamente sólidos y de superficies lisas y no analiza la cinética de las interacciones moleculares; por lo tanto, la fricción es un fenómeno complejo de interacciones mecánicas y moleculares entre las superficies de dos cuerpos en contacto y con deslizamiento relativo. Hasta el presente, prácticamente no existen valores de este en función de la velocidad de desplazamiento relativo entre el suelo y el metal superiores a 0,4 m/s, para las condiciones de la producción agrícola.

Los modelos existentes para el cálculo de los valores de la fuerza F y del coeficiente de fricción μ son:

Amontón, en 1699, conocido también como ley de fricción para el rozamiento seco:

$$F = \mu \cdot N, N \quad (1)$$

donde:

N - carga normal entre las superficies de los cuerpos en contacto, N .

Coulomb, en 1779, que incluye la adherencia o cohesión entre los dos cuerpos en movimiento σ_{adh} :

$$\tau_{desl} = \sigma_{adh} + \sigma \cdot \tan\delta, \text{ kPa}, \quad (2)$$

donde:

σ -esfuerzo externo factual de contacto entre los dos cuerpos en movimiento,

kPa;

δ -ángulo de fricción dinámico suelo-metal, rad;

$\tan\delta$ -coeficiente de fricción dinámico μ_d .

Deriaguin (1963), sobre la base de la teoría molecular de la fricción -fricción y adherencia- propuso:

$$F = \mu_d \cdot S_f(\sigma + \sigma_{adh}), N, \quad (3)$$

donde:

S_f -área factual de contacto, m^2 ;

σ -esfuerzo externo factual de contacto entre los dos cuerpos en movimiento, kPa;

σ_{adh} -esfuerzo por adherencia molecular entre los dos cuerpos en contacto, kPa.

La expresión (2), modelo constitutivo de Coulomb (MTC), explica primeramente la existencia de cohesión o adherencia sin cargas externas entre las dos superficies en contacto y, posteriormente, en el proceso de deslizamiento su resistencia se incrementa solo con el incremento de la carga externa, lo que presupone que la cohesión o adherencia se manifiestan como un valor constante durante todo el proceso; que no depende de las cargas externas. Sin embargo, el modelo constitutivo de Deriaguin (MTD), considera la fricción y la adherencia indisolubles, por lo que el proceso de deslizamiento transcurre de forma simultánea y continua, dependiendo los valores de su resistencia a dicho deslizamiento y el coeficiente de fricción dinámico μ_d , de las propiedades físicas mecánicas de suelo y del material en fricción, así como de las cargas externas y de adherencia entre ellas. Por estas razones, es escoge el modelo (MTD) como principal para la determinación experimental de los valores del coeficiente fricción dinámico μ_d en función de la velocidad de desplazamiento, humedad volumétrica y esfuerzo normal sobre el suelo.

Los métodos y principios que se utilizan para determinar experimental del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal se dividen en dos grupos: 1- cuando se desliza una lámina del material a experimentar por la superficie del suelo (García de la Figal, 2010; Zhang *et al.* 2001) y 2- por el deslizamiento de probetas de suelo por la superficie del material a experimentar (Owende y Ward, 1996; Durairaj y Balasubramanian, 1997; Makanga *et al.*, 1997; Onwualu y Watts, 1998; Hermawan *et al.*, 1998; Herrera *et al.*, 2006).

Estos se diferencian en que: en el primero el proceso de fricción está acompañado de la deformación por aplastamiento del suelo, con el surgimiento de una huella por donde desliza la lámina del material a experimentar y en el segundo, al final del experimento se observa el alisamiento de la superficie en fricción de la probeta de suelo, como resultado del desgaste específico de dicha superficie, al existir capas de suelo adheridas muy finas o no -en dependencia de la humedad y de las otras variables antes analizadas- en las zonas de la superficie del material a experimentar. Como en las condiciones reales de explotación de los órganos de trabajo de la maquinaria agrícola,

el área de las superficies metálicas que están en contacto con el suelo son mucho menores que el área de las superficies de los prismas de suelo que deforman y deslizan por las primeras, deformándose y desplazándose las partículas del suelo en las zonas de contacto, el fenómeno de la fricción suelo-metal incluye la deformación de la superficie del suelo, por lo que el primero es el más adecuado para la determinación del coeficiente de fricción suelo-metal.

MÉTODOS

Se utiliza el Canal de Suelo, del Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), con longitud, ancho y profundidad de 9, 1 y 0,5 m, respectivamente. El suelo se prepara sin destruir su textura y manteniendo su estructura, desterronando y eliminando las gravas (Onwualua y Watts, 1998); el canal de suelo se divide en cinco secciones: las 1- 2- 4- 5 de 1 m cada una y la 3 de 0,5 m. Esta última se divide a la mitad con una plancha de madera colocada a 0,025 m del nivel del suelo para obtener condiciones de humedad diferentes entre las secciones 1- 2 y 4- 5 (Figura 1). La superficie del suelo se compacta con un rodillo de 850 N y

se nivela con la ayuda de un perfil rectangular, comprobado mediante un nivel de burbuja con precisión de 0,258°.

Determinación experimental del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal (μ_d): El experimento se planifica mediante un diseño factorial 3^3 para un total de 27 tratamientos con tres repeticiones cada una, durante las corridas experimentales (Tabla 1), con las variables independientes o factores: velocidad V_{el} , m/s; esfuerzo normal σ , kPa y humedad volumétrica H_v , %.

Se coloca sobre el suelo una superficie metálica con diferentes masas calibradas a 0,5 m antes de la marca de inicio de la sección 1 y se desliza, mediante una maqueta experimental diseñada y construida a tal efecto (Figura 2), que consta de: motor de corriente directa (1), para variar la velocidad de rotación a partir de la variación de voltaje de armadura; fuente de voltaje de corriente directa (2), para variar dicho voltaje; reductor de velocidad (3) que comunica el movimiento de rotación al tambor motriz (4) sobre el cual se enrolla el cable (5) de masa despreciable, para la tracción del conjunto plancha metálica-masa calibrada (6). El transductor de fuerza tipo S (7) realiza el sensado de la fuerza de tracción que se aplica a dicho conjunto.

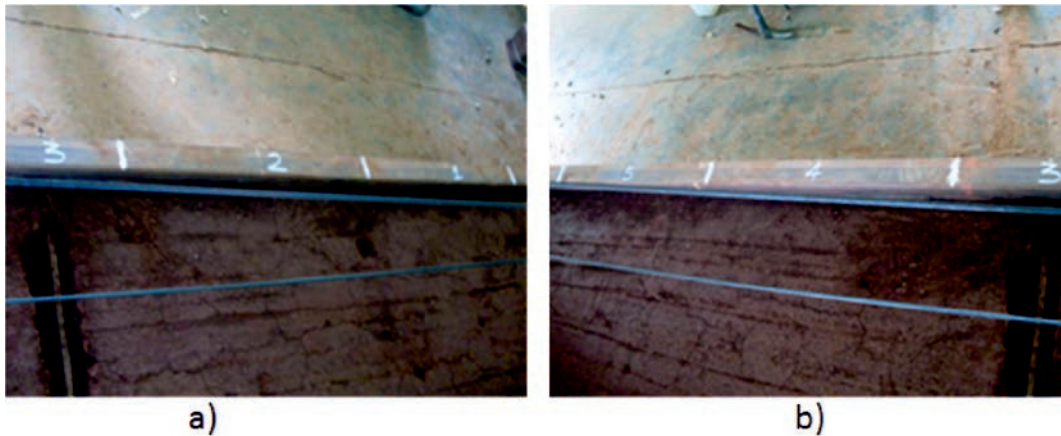


FIGURA 1. Vista parcial del canal de suelo en secciones: a) sección 1-2-3; b) sección 3-4-5.

Tabla 1. Matriz de tratamientos para determinar el coeficiente de fricción dinámico (μ_d) en función de los factores o variables independientes: velocidad V_{el} , m/s; esfuerzo normal σ , kPa y humedad volumétrica H_v , %

Variables	Tratamientos									
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
V_{el} , m/s	0,6	0,9	1,3	0,6	0,9	1,3	0,6	0,9	1,3	0,6
σ , kPa	2	2	2	3	3	3	4	4	4	2
H_v , %	26	26	26	26	26	26	26	26	26	29

Variables	Tratamientos	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27
	V_{el} , m/s		0,6	0,9	1,3	0,6	0,9	1,3	0,6	0,9
σ , kPa		2	2	2	3	3	3	4	4	4
H_v , %		32	32	32	32	32	32	32	32	32



FIGURA 2. Maqueta experimental utilizada en la investigación: 1 -motor de corriente directa; 2 -fuente de voltaje de corriente directa; 3 -reductor de velocidad; 4 -tambor motriz, 5 -cable de masa despreciable; 6 -conjunto plancha metálica-masa calibrada; 7 -transductor de fuerza tipo S.

Para el registro de la señal del transductor de fuerza se utiliza el sistema de análisis y adquisición de datos dinámico (8) integrado por (Figura 3): amplificador tensométrico; tarjeta de conversión analógico-digital y software YE-7600 con una resolución de 751 lecturas por segundo para la manipulación de la señal, realizándose una calibración inicial de todo el sistema, una vez que se aplica la pretensión inicial del cable de acero sobre el conjunto plancha metálica-masa calibrada. Se utilizan sensores laser-foto diodo (9) como señal de referencia para delimitar el momento en que el conjunto plancha metálica-masa calibrada comienza y termina su paso por cada sección.



FIGURA 3. Instrumentación utilizada en la investigación, a) sistema dinámico de adquisición de datos; b) sistema laser-foto diodo.

Humedad volumétrica, H_v , %: El suelo se humedece diferenciado las secciones 1-2 de 4-5, cubriéndose este con mantas de polietileno a lo largo y ancho del canal por un período de

24 h (Rajaram y Erbach, 1998; Ren *et al.*, 2006) para garantizar una distribución uniforme de la humedad. Los valores de humedad volumétrica (H_v) se obtiene del instrumento

TDR modelo HH2, acoplado a una sonda del tipo Delta-T modelo Theta probe ML2X (Tapias, 2001; Walker *et al.*, 2004).

En cada sección se obtienen siete mediciones de H_v (puntos de color rojo) según el esquema (Figura 4) introduciendo la sonda del TDR aproximadamente a 2 cm del borde de la huella dejada por la superficie metálica durante el deslizamiento sobre el suelo.

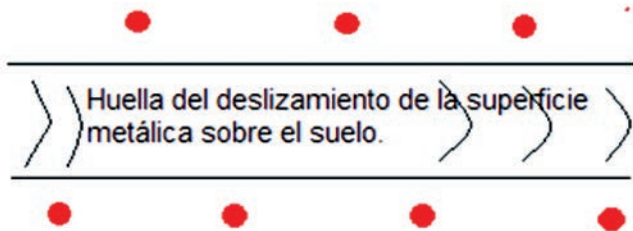


FIGURA 4. Esquema para la toma de datos experimentales de humedad volumétrica (H_v), (círculo de color rojo) en cada sección.

Resistencia a la penetración vertical del suelo P_s , kPa:

Se introduce en el suelo lentamente y a velocidad constante el penetrómetro de cono, marca Field Scout, con lecturas a intervalos de profundidad de 25 mm, hasta los 100 mm (O’Sullivan *et al.*, 1987). Se realiza la toma de datos en siete puntos contiguos a los obtenidos para la humedad volumétrica.

Velocidad de deslizamiento V_{et} , m/s: Se determina como el cociente entre la longitud de cada sección y el tiempo que demora el conjunto superficie metálica-masa calibrada en atravesarla a partir de la señal de referencia emitida por sensores laser-foto diodo, captadas por el sistema tensométrico y procesadas por el software.

Esfuerzo normal σ , kPa: Se determina como el cociente entre la sumatoria de la fuerza peso de la plancha metálica y masa calibrada, determinadas mediante una a balanza semiautomática de precisión de 0,01 g y el área de contacto entre la primera y el suelo.

Resistencia al deslizamiento σ_{dest} , kPa: Se determina como el cociente entre la fuerza promedio proveniente del transductor durante las corridas experimentales y el área de contacto entre la superficie metálica y el suelo.

Esfuerzo de adherencia suelo-metal σ_{adh} , kPa: Se determina a partir de modelos estadísticos obtenidos de forma experimental en función de la humedad volumétrica y la resistencia a la penetración, teniendo en cuenta los valores promedios obtenidos de estos factores para las condiciones en estudio. El experimento se planifica en primera aproximación según un diseño de naturaleza factorial 3^3 para un total de nueve tratamientos a realizar durante las corridas experimentales con tres repeticiones cada uno (Tabla 2).

Se realiza la preparación del suelo para tres niveles de humedad H_v y se coloca sobre el mismo un plato metálico de diámetro igual a 144,5 mm y masa 540 g, colocándose indistintamente masas calibradas, para obtener tres niveles de esfuerzo normal σ . Se desliza la superficie metálica sobre el suelo aproximadamente 20 mm y mediante una maqueta experimental (Figura 5) se separa del suelo en la dirección vertical, a una velocidad constante de 0,5 mm/s.

El esfuerzo de adherencia σ_{adh} se determinan como el cociente entre la diferencia del valor máximo obtenido durante la separación de la superficie metálica del suelo con respecto al alcanzado durante el estado de equilibrio estático una vez que ha sido suspendido (Figura 6), proveniente del transductor de fuerza y el área de suelo adherido a la superficie metálica obtenido mediante una cámara y procesada por el software Imagen Tool. Las muestras de suelo para determinar la humedad volumétrica H_v , %, se toman en los transeptos vertical y longitudinal, aproximadamente a 2 cm del borde del área donde se coloca la superficie metálica con cuatro mediciones y el TDR.

TABLA. 2. Matriz de tratamientos para determinar la adherencia suelo-metal σ_{adh} , en función de los factores: esfuerzo normal σ y humedad volumétrica H_v

Variables	Tratamientos								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
σ , kPa	2	3	4	2	3	4	2	3	4
H_v , %	26	26	26	29	29	29	32	32	32

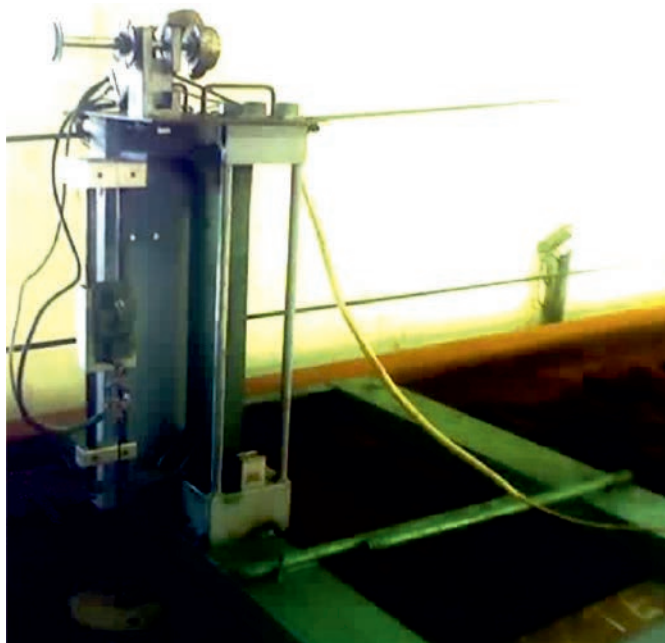


FIGURA 5. Maqueta para la determinación de la adherencia suelo-metal σ_{adh} .

Metodología para el procesamiento estadístico matemático de los datos experimentales

Se emplea análisis descriptivo, análisis de varianza y análisis de regresión multivariado para obtener modelos estadísticos que permitan la predicción de las diferentes variables estudiadas. Su procesamiento se realiza mediante los programas Statgraphics plus, versión 5.1, Table Curve 2D versión 5.0 y Microsoft Excel. Se determina el número de muestras a emplear en las corridas experimentales de las variables objeto de estudio, según Luyarati (1997) citado por Valdés (2008).

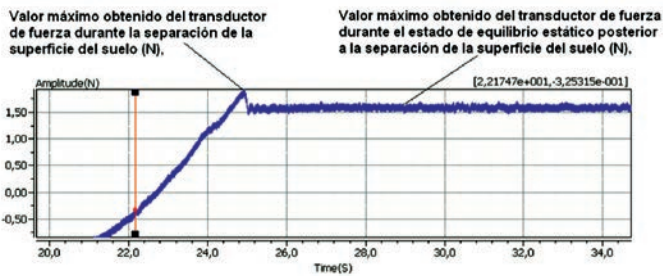


FIGURA 6. Señal del transductor de fuerza durante la separación de la plancha metálica del suelo.

Estimación de los errores en las mediciones experimentales: El valor más probable de la magnitud medida X_j es igual al valor exacto X_{mj} y al error total por sesgo y precisión U_{ij} (García de la Figal, 2011):

$$X_j = X_{mj} \pm U_{ij} = X_{mj} \pm \sqrt{(U_{ej}^2 + U_{cj}^2 + U_{aj}^2)} \quad (4)$$

donde:

X_{mj} – valor medio de la magnitud medida;

j - cada una de las variables medidas, $j=1,2,3,..N$;

U_{ej} ;- error de escala de la instrumentación empleada;

U_{cj} – error de calibración de la instrumentación de medición, suministrado por el fabricante;

U_{aj} – error de la aleatoriedad de la variable medida determinada por:

- Error de aleatoriedad U_{aj} :

$$U_{aj} = t_{\delta;p} * \sigma_j / \sqrt{n_j} \quad (5)$$

donde:

$t_{\delta;p}$ - coeficiente de la $t_{\delta;p}$ de Student para $\delta=(n - 1)$ grados de libertad y p probabilidad estadística, escogido para 0,95;

σ_j -desviación estándar de la variable j medida;

n -número de veces que se mide cada variable j .

El error absoluto depende de la variable de medida utilizada, por lo que para una mejor comprensión se determina el error relativo ΔX_{rj} , como:

$$\Delta X_{rj} = \frac{U_{ij}}{X_{mj}} \times 100, \% \quad (6)$$

CONCLUSIONES

- Para determinar las propiedades en la interfase suelo superficie metálica se utiliza la solución grafica de Mohr-Coulomb, la cual no da respuesta a la influencia de los esfuerzos normales, de la adherencia y velocidad de deslizamiento en la determinación del coeficiente de fricción.
- Por lo general el intervalo de velocidades experimentadas hasta el momento no rebasa los 0,4 m/s, por lo que la mayoría de ellas son en condiciones cuasi-estáticas.
- El modelo constitutivo de Deriaguin (MTD) considera la fricción y la adherencia indisolubles, por lo que el proceso de deslizamiento transcurre de forma simultánea y continua, dependiendo la resistencia a dicho deslizamiento y el coeficiente de fricción dinámico μ_d , de las propiedades físicas mecánicas de suelo y del material en fricción, así como de las cargas externas y de adherencia entre ellas.
- Se dispone de una metodología experimental para la determinación de los valores del coeficiente de fricción dinámico suelo superficie metálica, en función de la velocidad de desplazamiento relativo entre ellas, la presión normal, la humedad volumétrica y la adherencia entre ellas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ALUKO, O. B.; CHANDLER H. W: "Characterisation and Modelling of Brittle Fracture in Two-dimensional Soil Cutting", *Biosystems Engineering*, 88(3): 369–381, 2004.
2. ASAF, Z.; RUBINSTEIN, D.; SHMULEVICH, I: "Determination of discrete element model parameters required for soil tillage". *Review Soil & Tillage Research* 92: 227–242, 2007.
3. DERIAGUIN, B. V. *Qué es la fricción*, Editorial de la Academia de Ciencias de la URSS No.2-e, 230 p. 1963.
4. DURAIRAJ, C. D.; BALASUBRAMANIAN, M: "Influence of tool angles and speed on the soil reactions of a bent leg plough in two soils", *Soil Tillage*, 44: 37-150, 1997.
5. GARCÍA DE LA FIGAL, C. A: "Estudio de la fricción suelo-metal y suelo-plástico para dos suelos cañeros cubanos". *Ciencias Técnicas. Ingeniería en Construcción de Maquinaria*, 3: 107–122, 1978.
6. GARCÍA DE LA FIGAL, C. A: *Análisis de fricción suelo metal y plástico antifricción*, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, (material digital), Mayabeque, Cuba, 21, 2010.
7. GARCÍA DE LA FIGAL, C. A: *Análisis de Incertidumbre*, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, (material digital), 9, 2011.
8. HERMAWAN, W.; YAMAZAKI M.; OIDA, A: "Experimental analysis of soil reaction on a lug of a movable lug Wheel", *Journal of Terramechanics*, 35: 119-135, 1998.
9. HERRERA, M.; C. IGLESIAS; M. RODRÍGUEZ; A. GARCÍA DE LA FIGAL; R. PÉREZ y M. FERNÁNDEZ: "Propiedades dinámicas de los vertisuelos que intervienen en el diseño de órganos escarificadores (parte 2)", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 10(3): 29-36, 2001.

10. HERRERA, S. M.: *Simulación del comportamiento mecánico de los suelos Ferralíticos rojos mediante el método de elementos finitos*, 107pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2006.
11. HERRERA, S. M.; IGLESIAS C. C.; GONZÁLEZ C. O.; LÓPEZ B. E.; SÁNCHEZ I. A.: *Estudio de nuevos materiales para la construcción de órganos de trabajo empleados en la labranza de suelos Abrasivos*, Informe final de Proyecto B-27, Villa Clara, Cuba: 106, 2007.
12. HERRERA, S. M.; IGLESIAS C. C.; GONZÁLEZ C. O.; LÓPEZ B. E.; SÁNCHEZ I. A.: "Propiedades mecánicas de un Rhodic Ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el Método de elementos Finitos: Parte II", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 17(4): 50-54, 2008.
13. KRAGUELKII, I. V.; BINAGRA DOVA I. E.: *Coeficiente de fricción*, pp. 33-34, Segunda Edición, Editora MASHGUIZ, Moscú: 1962.
14. LIU, J.; KUSHWAHA R. L.: "Modeling of Soil Profile Produced by a Single Sweep Tool", *Agricultural Engineering International, CIGRE journal*, Manuscript PM 06 008, 8: 13, 2006.
15. MAKANGA, J., T.; SALOKHE V. M.; GEE-CLOUGH, D.: "Effects of tine rake angle and aspect ratio on soil reactions in dry loam soil", *Journal of Terramechanics*, 34(4): 235-250, 1997.
16. MOUAZEN, M. A.; NEMÉNYI M.: "Finite element analysis of subsoiler cutting in non homogeneous sandy loam soil", *Soil & Tillage Research*, 51: 1-15, 1999.
17. MOUAZEN, M. A.; DUMONT K. M.; RAMON K. H.: "Two dimensional prediction of spatial variation in topsoil compaction of a sandy loam field-based on measured horizontal force of compaction sensor, cutting depth and moisture content", *Soil & Tillage Research*, 74: 91-102, 2003.
18. NICHOLS, M. L.: "The Dynamic Properties of Soil. I. An Explanation of the Dynamics Properties of Soils", *Agricultural Engineering*, 12(7): 256 - 264, 1931.
19. O'SULLIVAN, C.: *The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage soil analysis, physical methods*, Editorial Marcel Dekker, Inc.; St. Joseph, Michigan, USA, 34(3): 399-423, 1987.
20. ONWUALU, A. P.; WATTS K. C.: "Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools", *Soil & Tillage Research*, 48: 239-253, 1998.
21. OWENDE, O. P.; WARD M., M.: "Characteristic loading of light mouldboard ploughs at slow speeds", *Journal of Terramechanics*, 33(1): 29-53, 1996.
22. PERSSON, B. N.: *Sliding friction: physical principles and applications*, Editorial Berlin, Springer, Germany, 1998.
23. PLOUFFE, C.; MARC J. R.; TESSIER, S.; LAGUË, C.: *Validations of mouldboard plow simulations with fem on a heavy clay soil*. Presentation at the 1998 ASAE Annual International Meeting, Paper No. 98-1065. Disney's Coronado Springs Resort Orlando, Florida, USA, 1998.
24. RAJARAM, G.; ERBACH D. C.: "Drying stress effect on mechanical behaviour of a clay-loam soil", *Soil & Tillage Research*, 49: 147-158, 1998.
25. REN, LU-QUAN; HAN Z. W.; JIAN-QIAO LI.; JIN TONG: "Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction", *Soil & Tillage Research*, 85: 1-12, 2006.
26. SHMULEVICH, I.: "State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method", *Soil & Tillage Research*, 111: 41-53, 2010.
27. TADESSE, D.: *Evaluating DEM results with perspectives of load-soil interaction*, Disertación en la Universidad Wageningen, Junio, 2004, ISBN 90-8504-011-6, Güeldres, Holand, 2004.
28. TAPIAS, J. M.; SALGOT M. C.: *Utilidad de la técnica TDR para la medida de la variación espacial y temporal de la humedad del suelo en campos de golf, [en línea] Edafología*, 8(3): 1-10. 2001 Disponible en: <http://edafologia.ugr.es/revista/tomo8c/a1v8ct.pdf> [Consulta: 25 de enero 2010].
29. VALDES, H. P.: *Modelación físico-matemática del proceso tecnológico del órgano de corte de tambor en las picadoras de forraje con alimentación manual*, 186pp., **Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias)**, Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2008.
30. WALKER, J. P.; G. R. WILLGOOSE & KALMA, J. D.: "In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques". *J. Hydrol*, 293: 85-99, 2004
31. WULFSOHN, D.: "Part I. Constitutive Modeling of Soils", Soil Dynamics, Chapter 1, *American Society of Agricultural Engineers*, 2: 1-116, 2002.
32. ZHANG, C.; ARAYA K.: "A Three-stage Soil Layer Mixing Plough for the Improvement of Meadow Soil. Part 1: Mechanical Properties of Soils", *Journal Agriculture Engineer Research*, 78(3): 253-260, 2001.

Recibido: 28 de febrero de 2012.

Aprobado: 24 de julio de 2013.

Alexander Laffita Leyva, Especialista, Universidad Agraria de La Habana, Centro de Mecanización Agropecuaria, Autopista Nacional km 23 ½, Carretera de Tapaste, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Correo electrónico: alexl@isch.edu.cu