

Bases teóricas para la simulación del desgaste de los órganos de trabajo de los aperos de labranza mediante el Método de los Elementos Distintos (MED)

Theoretical basis for wear simulation of tillage tools by means of Distinct Elements Method (DEM)

M.Sc. Ángel Lázaro Sánchez Iznaga^I, Dr.C. Miguel Herrera Suárez^{II}, Dr.C. Carlos Alberto Recarey Morfa^{II},
Dr.C. Ciro Iglesias Coronel^{III}

^I Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

^{II} Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

^{III} Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

RESUMEN. En el presente trabajo se establecen las bases teóricas para la modelación del desgaste de los órganos de trabajo de los aperos de labranza mediante el Método de los Elementos Distintos. Estas bases incluyen la definición de los modelos de contacto microestructural entre las partículas de suelo y entre el suelo y la herramienta de labranza, además, como elemento novedoso se incluye el efecto de la adhesión suelo-herramienta de labranza. Finalmente se analizan los efectos de la temperatura en el desgaste y se formulan las ecuaciones para la determinación del desgaste adaptando la ley de Archard. Los resultados permiten establecer un modelo de elementos distintos para la simulación del desgaste de los órganos de trabajos de los aperos de labranza de suelos agrícolas, mostrando la necesidad de contar como datos primarios los parámetros macroestructurales y microestructurales que definen la respuesta mecánica del suelo, la herramienta de labranza y la interfase entre ambos.

Palabras clave: modelación, interacción suelo herramienta de labranza, parámetros macro estructurales, parámetros microestructurales.

ABSTRACT. The theoretical bases are established for the modelling of tillage tool wear by means of the Distinct Elements Method. These bases include the definition of the microstructural contact models between soil particles and between the tillage tool surface and soil particles, also, as novel element was included the effect of the tool-soil adhesion. Finally the effect of the temperature was analysed in the wear and the equations for the determination of the wear are formulated by adapting the Archard's law. The results allow establishing a distinct elements model for the wear simulation of tillage tool, showing the necessity to count as primary dates the microstructural and macrostructural parameters that define the mechanical response of the soil during soil tillage.

Keywords: modelling, interaction, soil, tillage tool, macrostructural parameters; microstructural parameters.

INTRODUCCIÓN

Para la determinación del desgaste tradicionalmente se han empleado los métodos analíticos y experimentales (Martínez y Rodríguez, 1985; López *et al.*, 2005; Gutiérrez y Fuentes, 2007; Macías *et al.*, 2009; Graff, 2010), sin embargo, con el desarrollo de las novedosas técnicas de la computación se han incorporado los métodos numéricos, dentro de estos el Método de Elementos Distintos o Discretos (MED), (Shmulevich, 2010).

El MED es un método que ha sido empleado para el análisis de problemas de mecánica de rocas con enfoque macroestruc-

tural para el estudio de materiales granulares y su interacción con cuerpos sólidos, así como para el estudio de procesos agrícolas ingenieriles, incluyendo el desgaste (Recarey *et al.*, 2001; Burrell, 2003; Zhang y Li, 2004; Soni y Salokhe, 2006; Asaf *et al.*, 2007; Coetzee *et al.*, 2007; Gutiérrez y Fuentes, 2007; Khot *et al.*, 2007; Shmulevich *et al.*, 2007; Tanaka *et al.*, 2007; Malone y Xu, 2008; Nakashima, 2008; Coetzee y Els, 2009; Coetzee *et al.*, 2009; Shmulevich *et al.*, 2009; Graff, 2010; Shmulevich, 2010; López *et al.*, 2012). En estos modelos

la definición de las leyes de contacto entre elementos incluyen las fuerzas de cohesión y fricción, aspectos que permiten modelar la fractura y la descohesión o pérdida de cohesión del material. Esta consideración en el modelo posibilita a su vez delimitar la formación de micro-fisuras y fisuras que provocan al final el colapso.

Para el caso particular del desgaste de los órganos de trabajo de los aperos de labranza las investigaciones reportadas hasta el momento, han estado dirigidas a estudiar su magnitud e intensidad, tanto en órganos de trabajo que difieren en forma y geometría a las herramientas de labranza, como en los aperos empleados en el corte de rocas, la excavación en minas y en materiales que difieren del suelo agrícola en lo referente a sus características mecánicas (García de la Figal, 1978; Recarey *et al.*, 2001; Burrel, 2003; Graff, 2010), por lo tanto, los modelos usados en las investigaciones antes referidas tienen como inconveniente para aplicar en suelos agrícolas que no toman en cuenta la adherencia del suelo a la herramienta de labranza. La inclusión de esta propiedad en dichos modelos permitirá la simulación del desgaste de los aperos de labranza en los suelos agrícolas.

Los modelos desarrollados en MED para la simulación de problemas relacionados con geomateriales, como es el caso del desgaste de los aperos de labranza durante su interacción con el suelo, toman como datos de entrada parámetros referidos a la macro y microestructura del suelo y de la interfase suelo-herramienta de labranza. Los parámetros macroestructurales se determinan mediante ensayos experimentales (Coetzee *et al.*, 2007; Graff, 2010) y los microestructurales por lo general mediante la estimación a partir de los macroestructurales (Recarey *et al.*, 2001; Burrel, 2003).

Tomando en cuenta esta problemática se decide realizar el presente trabajo que tiene como objetivo establecer las bases teóricas para la simulación del desgaste de los órganos de trabajo de los aperos de labranza de suelos agrícolas mediante el Método de los Elementos Distintos.

TEORÍA GENERAL DEL MED

El Método de los Elementos Distintos (MED) utiliza partículas o elementos discretos que en su conjunto permiten describir y simular el comportamiento de un fenómeno dado (Cundall y Strack, 1979).

Los elementos discretos que conforman el medio se desplazan de manera independiente unos de otros, trayendo como resultado que interactúen entre si describiendo un movimiento de traslación y rotación, cambiando de posición en el tiempo bajo la acción de fuerzas de contacto y las fuerzas volumétricas. Estos cambios de posición están referidos a un sistema de coordenadas globales que definen la ubicación de las partículas en el espacio global, y a un sistema de coordenadas locales que identifica la ubicación de estas con respecto al sistema de coordenadas global y al resto de las partículas vecinas (Figura 1).

Para describir la traslación y la rotación de los elementos discretos que conforman el sistema de partículas en MED se recurre a ecuaciones de la dinámica de Newton-Euler.

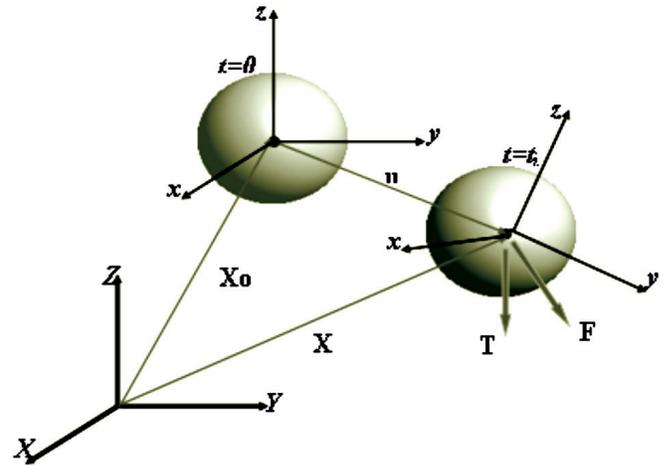


FIGURA 1. Sistemas de referencia global y local de las partículas (Recarey *et al.*, 2001).

Ecuaciones de Movimiento

El movimiento y la rotación del elemento *i*-ésimo de un conjunto de partículas producido por la acción de las fuerzas y momentos resultantes de la interacción entre estas, la acción fuerzas volumétricas, elementos de contorno, y obstáculos en un instante de tiempo dado (t_n), se determinará mediante la aplicación de la 2^{da} ley de Newton, como:

$$m_i \ddot{u}_i = F_i \quad (1)$$

$$I_i \dot{\omega}_i = T_i \quad (2)$$

donde:

u - es el vector de desplazamiento del centroide de la partícula en un sistema de coordenadas global (X),

ω - es la velocidad angular de la partícula respecto al sistema de referencia local (x), con la partícula y el origen en el centro del mismo, rad/s;

m - masa del elemento o partícula *i*-ésimo, kg;

I - momento de la inercia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

F_i - fuerza resultante, N;

T_i - momento resultante, N·m.

Durante la interacción de las partículas se producen oscilaciones las cuales se regularán con un amortiguamiento que se impone durante el contacto. De manera análoga a los problemas cuasi-estáticos las oscilaciones de los modos de vibración más bajos se regulan a través de la imposición de un amortiguamiento exterior o global, a partir de lo cual se reformulan las ecuaciones 1 y 2, como:

$$m_i \ddot{u}_i = F_i + F_i^{Amortig} \quad (3)$$

$$I_i \dot{\omega}_i = T_i + T_i^{Amortig} \quad (4)$$

donde:

$F_i^{amortig}$ - fuerza resultante de amortiguamiento, N;

$T_i^{amortig}$ - momento resultante de amortiguamiento, N·m.

El cálculo del amortiguamiento global estará en función de la consideración, o no de la viscosidad del medio. En los medios viscosos el amortiguamiento quedará definido, por:

$$F_i^{amortig} = -\alpha^{VT} m_i \ddot{u}_i \quad (5)$$

$$T_i^{amortig} = -\alpha^{Vr} I_i \dot{\omega}_i \quad (6)$$

y para el caso no viscoso:

$$F_i^{amortig} = -\alpha^{nVT} \|F_i\| \frac{\dot{u}_i}{\|\dot{u}_i\|} \quad (7)$$

$$T_i^{amortig} = -\alpha^{nVr} \|T_i\| \frac{\dot{\omega}_i}{\|\dot{\omega}_i\|} \quad (8)$$

donde:

α^{vT} , α^{vr} , α^{nVT} , α^{nVr} son las constantes de amortiguamiento.

Integrando las ecuaciones 3 y 4 en un intervalo tiempo dado (Δt) mediante un esquema de diferencias finitas central, el movimiento de traslación y rotación de los elementos discretos para el paso de tiempo n -ésimo se determinará, como:

$$\ddot{u}_i^n = \frac{F_i^{amortig} + F_i^n}{m_i} \quad (9)$$

$$\dot{u}_i^{n+\frac{1}{2}} = \dot{u}_i^{n-\frac{1}{2}} + \ddot{u}_i^n \Delta t \quad (10)$$

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \dot{u}_i^{n+\frac{1}{2}} \Delta t \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_i^n = \frac{T_i^{amortig} + T_i^n}{I_i} \quad (12)$$

$$\omega_i^{n+\frac{1}{2}} = \omega_i^{n-\frac{1}{2}} + \dot{\omega}_i^n \Delta t \quad (13)$$

FORMULACIÓN DEL MODELO CONSTITUTIVO DE CONTACTO EN MED

Contacto entre las partículas de suelo

El modelo constitutivo de contacto entre las partículas de suelo, se formulará tomando en cuenta que en la dirección normal del contacto las mismas tendrán una reacción viscoelástica que está dada por la inclusión de la rigidez normal (k_n) y la constante viscosa en la dirección normal (C_n), representada por la acción de un muelle y un amortiguador trabajando en paralelo, según el Modelo de Kelvin (Figura 2a). En el sentido tangencial del contacto el modelo constitutivo comprende una reacción elástica del suelo representada por la rigidez tangencial (k_t), la constante viscosa en la dirección tangencial, además de la acción de la fricción interpartículas dada por el coeficiente de Coulomb (μ) que se tomará como dato la fricción interna del suelo (Figura 2b).

Contacto entre las partículas de suelo y la herramienta de labranza

Para el caso del modelo constitutivo de contacto entre las partículas de suelo y la herramienta de labranza (Figura 2b), se formulará de forma similar al caso anterior, con la diferencia que el coeficiente de fricción que se tomará como dato corresponde a la fricción externa correspondiente la fricción suelo-metal.

Una vez detectados los contactos entre partículas, se calculan las fuerzas en los mismos.

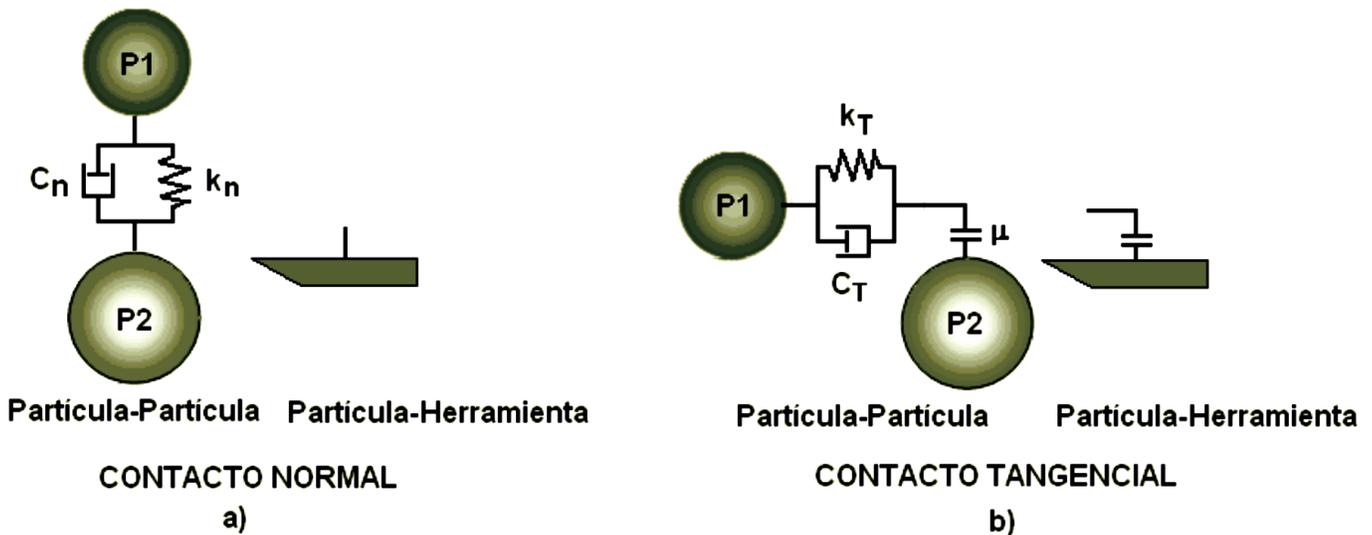


FIGURA 2. Modelo constitutivo de contacto interpartículas y partículas-herramienta de labranza. Contacto en la dirección normal, a; contacto en la dirección tangencial, b.

Determinación de las fuerzas de contacto

Las fuerzas de acción-reacción que surgen durante la interacción entre las partículas de suelo que entran en contacto, o entre las partículas de suelo y la herramienta de labranza (Figura 3), se determinarán a partir de la tercera ley de Newton, representada por la ecuación 14.

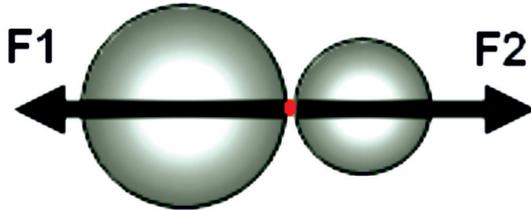


FIGURA 3. Fuerzas de acción reacción que se originan durante el contacto.

$$F_1 = -F_2 \quad (14)$$

donde:

F_1 – fuerza de acción;

F_2 – fuerza de reacción.

La magnitud de la fuerza F_2 se determina, como:

$$F_2 = F_n \cdot n + F_T \quad (15)$$

donde:

F_n - componente normal, N;

F_T - componente tangencial, N;

n - vector unitario normal a la superficie de la partícula en el punto de contacto.

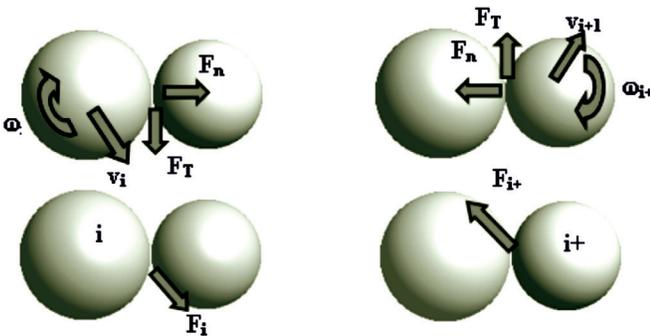


FIGURA 4. Fuerzas de contacto, velocidad y velocidad angular de las partículas (Recarey *et al.*, 2001).

La determinación de las fuerzas de contacto (F_n) y (F_T) dependen de las ecuaciones de equilibrio, ya sea entre las partículas del suelo, o entre las partículas de suelo y la herramienta de labranza.

Los modelos constitutivos de contactos presentados en ambos casos presuponen la existencia, tanto de amortiguamiento elástico como viscoso, por lo tanto, la fuerza normal (F_n) estará compuesta por en una fuerza normal elástica (F_{ne}) y una fuerza normal amortiguada (F_{nd}), siendo:

$$F_n = F_{ne} + F_{nd} \quad (16)$$

La parte amortiguada es proporcional a la componente normal de la velocidad relativa (v_{rn}) entre los centros de las

partículas, por lo que la fuerza normal amortiguada de contacto se determinará; como

$$F_{nd} = c_n \cdot v_{rn} \quad (17)$$

donde:

C_n – coeficiente de amortiguamiento;

V_{rn} – velocidad relativa normal de los centros de las partículas, m/s.

El valor del amortiguamiento (c_n) se toma como la fracción del amortiguamiento crítico del sistema (C_{cr}), formado por dos sólidos rígidos de masas m_1 y m_2 , conectados mediante un muelle de rigidez (k_n), y se determinará como:

$$C_{cr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{m_1 \cdot m_2 \cdot k_n}{m_1 + m_2}} \quad (18)$$

La velocidad relativa normal de los centros de las partículas (V_{rn}) se determinará como:

$$v_{rn} = (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) \cdot n \quad (19)$$

donde:

\dot{u}_1, \dot{u}_2 - velocidades de traslación de las partículas, m/s;

La componente elástica de la fuerza normal (F_{ne}), dependerá de la rigidez normal en el contacto (k_n), y la separación existente entre las partículas (u_{rn}), determinándose su magnitud como:

$$F_{ne} = k_n \cdot u_{rn} \quad (20)$$

donde:

k_n – rigidez normal en el contacto, $N \cdot m^{-1}$;

u_{rn} – separación entre partículas, m.

La separación entre partículas se determinará como:

$$u_{rn} = d - R_{p1} - R_{p2} \quad (21)$$

donde:

d - distancia entre los centro de las partículas, m;

R_{p1} – radio de la partícula 1, m;

R_{p2} – radio de la partícula 2, m.

Tomando en cuenta que la rigidez a nivel microestructural (k_n) está estrechamente relacionada con los parámetros que caracterizan la rigidez de la macroestructura, la rigidez en la dirección normal (k_n), se determinará, como:

$$k_n = \frac{4G(1-\nu)\sqrt{R}}{3(1-\nu^2)} \quad (22)$$

donde:

G – módulo cortante, kPa.

ν – Coeficiente de Poisson;

R - radio equivalente, m.

El radio equivalente se determina, según:

$$R = \frac{R_{p1}R_{p2}}{R_{p1} + R_{p2}} \quad (23)$$

La fuerza elástica correspondiente a la dirección tangencial (F_T) será proporcional al desplazamiento relativo tangencial

entre partículas, con un factor de proporcionalidad (k_T), y se determinará por:

$$F_T = k_T \cdot U_{rT} \quad (24)$$

donde:

k_T - rigidez en el sentido tangencial al contacto, $N \cdot m^{-1}$;

u_{rT} - solapamiento entre las partículas, m.

La rigidez tangencial tomando en cuenta el módulo cortante se determinará como:

$$k_T = \frac{2G^{\frac{2}{3}} \left[3(1-\nu_p)RF_n \right]^{\frac{1}{3}}}{2-\nu_p} \quad (25)$$

donde:

ν_p - coeficiente de Poisson de las partículas, adimensional.

R - radio de las partículas, m.

Detección de contacto

Para la detección del contacto entre pares de esferas en ausencia de cohesión debe cumplirse la condición siguiente:

$$u_{rn} \leq 0$$

Si el contacto entre las partículas es cohesivo debe cumplirse la condición siguiente:

$$u_{rn} \leq U_{rn,max}^+$$

donde:

$U_{rn,max}^+$ - separación que debe crearse para que el contacto entre dos esferas o discos se rompa por completo, la cual debe determinarse en base al modelo constitutivo y las propiedades del material.

Ruptura de los contactos

La ruptura de los contactos entre partículas se debe fundamentalmente a la aplicación de cargas externas al sistema, la acción de las fuerzas volumétricas, y las fuerzas de reacción que generan las colisiones entre partículas. Esta ruptura se produce una vez que se supera la magnitud de la fuerza máxima cohesiva del contacto en la dirección tangencial o normal ($F_n > R_n$ ó $F_T > R_T$). Se cumplirá como condición que los contactos no pueden restituirse después de romperse.

En cada contacto la fuerza normal crecerá proporcionalmente al desplazamiento relativo normal entre elementos con un factor de proporcionalidad igual a (k_n). Dicho factor puede tomar distintos valores según la fuerza normal sea de tracción o de compresión (Figura 5). Cuando la fuerza normal de tracción alcance un valor igual a (R_n), el contacto romperá y dejará de existir tal fuerza.

En este mismo contacto habrá una fuerza tangencial que será proporcional al desplazamiento tangencial relativo entre los elementos, y al alcanzar esta fuerza el valor de (R_T) se romperá el contacto.

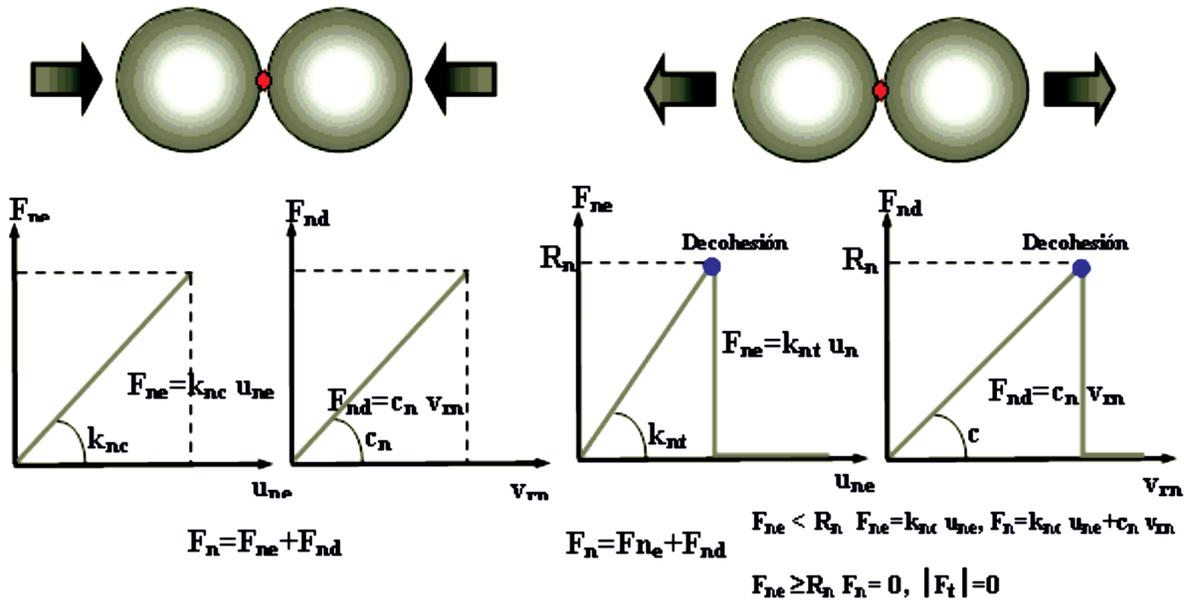


FIGURA 5. Fuerzas de contacto normal versus desplazamiento relativo en la dirección normal y fuerza de contacto normal amortiguada versus velocidad relativa en la dirección normal (compresión o tracción) (Recarey *et al.*, 2001).

En ausencia de cohesión o después de la rotura del contacto la fuerza de rozamiento se calculará por:

$$F_T = -F_T \cdot \frac{V_{rT}}{|V_{rT}|} \quad (26)$$

donde:

V_{rT} - componente tangencial de la velocidad relativa entre los puntos en contacto de las partículas, $m \cdot s^{-1}$.

$$V_{rT} = V_r - V_r \cdot n \quad (27)$$

donde:

n - vector de la unidad normal a la superficie de la partícula en el punto de contacto (por tanto, para elementos esféricos o discos tiene la dirección de la recta que une las dos partículas y su dirección es apuntando hacia afuera respecto a la partícula 1)

La velocidad relativa (V_r) es proporcional a la diferencia de velocidades entre los puntos de contacto, y se determinará por:

$$V_r = (\dot{u}_2 + \omega_2 \times r_{c2}) - (\dot{u}_1 + \omega_1 \times r_{c1}) \quad (28)$$

donde:

\dot{u}_1, \dot{u}_2 - velocidades de traslación de las partículas en contacto, $m.s^{-1}$;
 ω_1, ω_2 - velocidades de rotación de las partículas en contacto, $rad.s^{-1}$;
 r_{c1} y r_{c2} - vectores que conectan los centros de las dos partículas en contacto.

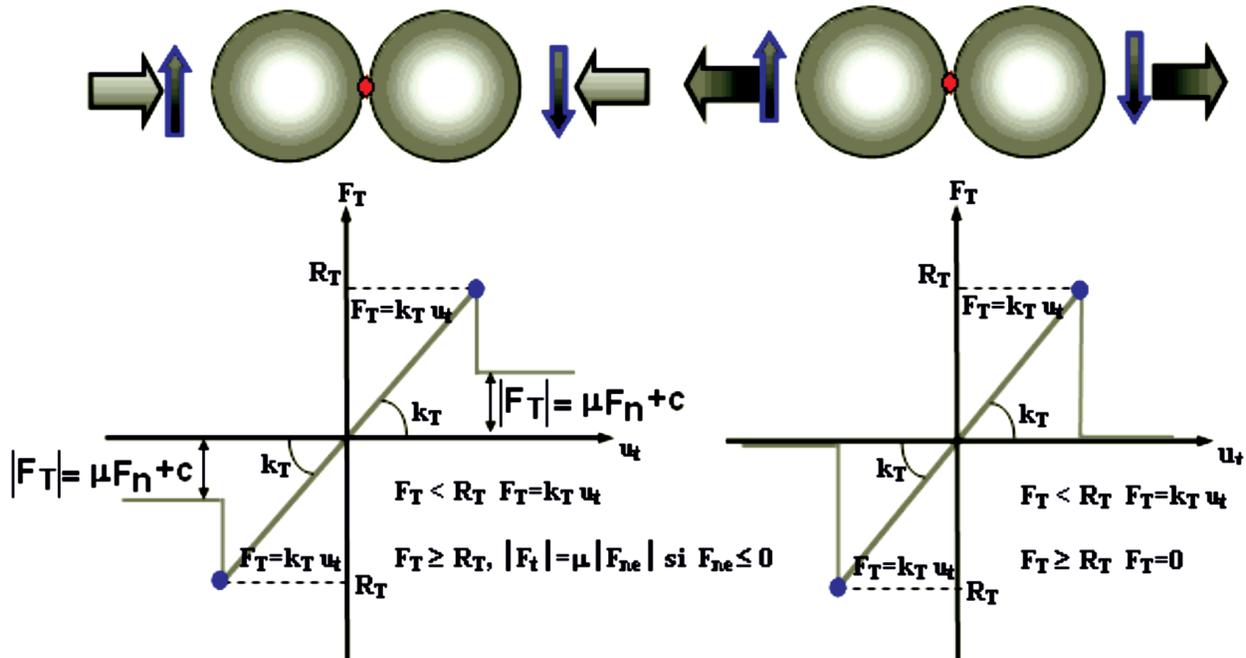


FIGURA 6. Fuerza de contacto tangencial versus desplazamiento relativo en la dirección tangencial, para el caso de contacto en compresión o tracción (Recarey *et al.*, 2001).

En esta formulación la fuerza de rozamiento que surge como consecuencia de la interacción entre las partículas de suelo se determinará aplicando la ley de Coulomb, como:

$$F_T = \mu_\phi \cdot F_n + c \quad (29)$$

donde:

μ - coeficiente de fricción interpartículas;
 c - cohesión del suelo, kPa.

El coeficiente de fricción interpartículas se determinará como:

$$\mu_\phi = \tan \phi \quad (30)$$

La cohesión microestructural se determinará como:

$$C' = n \sqrt{\frac{1,5}{6 - 19\mu_\phi^2}} \cdot c \quad (31)$$

donde:

C' - cohesión microestructural, kPa;
 n - porosidad, %.

Cuando la fuerza de rozamiento está referida al contacto suelo-herramienta de labranza (F_{Ts-h}), se procede de forma similar al caso anterior, pero se tienen en cuenta la fricción suelo-metal y la adherencia, y se determinará como:

$$F_{Ts-h} = \mu_\delta \cdot F_n + C_a \quad (32)$$

donde:

μ_δ - coeficiente de fricción externa;
 C_a - adherencia suelo-herramienta de labranza, kPa.

El coeficiente de fricción externa se determinará como:

$$\mu_\delta = \tan \delta \quad (33)$$

La porosidad se determina experimentalmente a partir de las relaciones volumétricas del suelo, es decir determinando la proporción entre el volumen de vacíos (aire y H_2O) y el volumen total de la muestra, según las expresiones que se muestran a continuación.

$$n = \frac{e}{1 + e} \cdot 100 \quad (34)$$

$$e = \frac{G_s}{\gamma_d}$$

donde:

e - índice de poros;
 G_s - peso específico, N/m^3 ;
 γ_d - densidad seca del suelo, g/cm^3 .

EL DESGASTE

Para determinar el desgaste en esta formulación se ha tenido en cuenta la ley de Archard, empleada con éxito en la simulación del corte de rocas, y el desgaste de útiles de excavación y movimiento de suelo no agrícola (arena sílice y grava), mediante el Método de Elementos Distintos por (Recarey *et al.*, 2001; Burrel, 2003; Gutiérrez y Fuentes, 2007), la misma asume que la magnitud de desgaste (\dot{w}) es proporcional a la presión en el contacto (p_n) y la velocidad de deslizamiento (V_t) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\dot{w} = k \cdot \frac{p_n \cdot V_t}{H} \quad (35)$$

donde:

H – medida de la dureza de la superficie de contacto, HB;

k – parámetro adimensional.

Si se asume que H depende de la temperatura T , se tiene en cuenta su influencia en el desgaste.

$$H = H(T) \quad (36)$$

La fricción se evalúa mediante la ley de Coulomb:

$$p_t = \mu \cdot p_n \quad (37)$$

Operando con las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$\dot{w} = \bar{k} \cdot \frac{p_t \cdot v_t}{H(T)} = \bar{k} \cdot \frac{\dot{D}}{H(T)} \quad (38)$$

donde:

\dot{D} – es el coeficiente de disipación friccional.

$$\bar{k} = \frac{k}{\mu} \quad (39)$$

Integrando la ecuación 38 en el tiempo, la magnitud del desgaste en un intervalo de tiempo se determinará, como:

$$w = \int \dot{w} dt \quad (40)$$

Una vez que dicho desgaste alcanza el tamaño de la partícula que conforma la superficie de la herramienta de labranza, se considera que está partícula ya no forma parte de la herramienta, por tanto, la geometría de la herramienta se modifica a lo largo del tiempo, tal como sucede durante el proceso de labranza del suelo.

CONCLUSIONES

El Método de Elementos Distintos (MED) ha tenido aplicación en la simulación del desgaste abrasivo de los órganos de trabajo de las herramientas que se emplean en el movimiento y excavación de suelos no agrícola, arena sílice y rocas, sin embargo, en suelos agrícolas no se han reportado aplicaciones;

- Los parámetros que se usarán como datos de entrada para la corrida de los modelos son los parámetros macroestructurales del suelo: módulo cortante (G), coeficiente de Poisson (ν), cohesión (c), fricción interna (ϕ) y microestructurales del suelo: cohesión interna o fuerza cohesiva (C'), rigidez normal (k_n), rigidez tangencial (k_t), coeficiente de fricción interpartículas (m_ϕ), coeficiente de amortiguamiento (c_n) y la porosidad (n), que definen la rigidez y pérdidas de contacto entre las partículas de suelo, y los parámetros macroestructurales de la interfase suelo-herramienta de labranza: adhesión suelo-herramienta de labranza (C_a) y coeficiente de fricción suelo-herramienta de labranza (m_δ);
- El modelo que se fundamenta pretende simular, tanto la respuesta del suelo a nivel de la microestructura, como la pérdida de material producida por el desgaste de la herramienta de labranza durante su interacción con el suelo;
- La Ley de Archard ha tenido aplicación en el Método de Elementos Distintos para la simulación del desgaste de útiles de excavación, movimiento de suelos no agrícolas y rocas, por lo que será usada en esta formulación con el mismo propósito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAF, Z.; D. RUBINSTEIN & I. SHMULEVICH: "Determination of discrete element model parameters required for soil tillage", *Journal of Soil & Tillage Research*, 92 (1): 227-242, 2007.
- BURREL, S.: *Estudio del problema de desgaste empleando el método de las partículas*, Master Science Thesis, Escuela Técnica Superior de caminos, canales y puertos de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2003. 27- 44pp.
- COETZEE, C. J.; A. H. BASSON & P. A. VERMEER: "Discrete and continuum modelling of excavator bucket filling", *Journal Terramechanics*, (44): 177-186, 2007.
- COETZEE, C. J. & D. N. ELS: "Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade-granular material interaction", *Journal Terramechanics*, 30 (46): 15-26, 2009.
- COETZEE, C. J.; D. N. ELS & G. F. DYMOND: "Discrete element parameter calibration and the modeling of dragline bucket filling", *Journal Terramechanics*, (30): 1-12, 2009.
- CUNDALL, P. A. & L. D. O. STRACK: "A distinct element model for granular assemblies", *Journal Geotechnique*, (29): 47-65, 1979.
- GARCÍA DE LA FIGAL, C. A.: "Estudio de la fricción suelo-metal y suelo-plástico para dos suelos cañeros cubanos", *Ciencias Técnicas*, CUJAE, (3): 107-122, 1978.
- GRAFF, L.: *Discrete element method simulation of wear due to soil-tool interaction*. Master Science Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2010. 120pp.

- GUTIÉRREZ, S. A. y B. D. FUENTES: "Estudio del desgaste en materiales mediante el Metodo de Elementos Discretos". En: *8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, pp. 1-12, Cusco, Perú, 23 al 25 de Octubre 2007.
- KHOT, L. R.; V. M. SALOKHE; H. P. W. JAYASURIYA & H. NAKASHIMA: "Experimental validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction", *Journal Terramechanics*, 44 (6): 429-437, 2007.
- LÓPEZ, B. E.; C. I. CORONEL; A. C. CRUZ; M. S. HERRERA y O. C. GONZÁLEZ: "Aumento de la resistencia al desgaste de aperos mediante la aplicación del recargue superficial por soldadura automática", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 16 (4): 1-4, 2005.
- LÓPEZ, E.; M. HERRERA; O. GONZÁLEZ; E. B. TIJSKENS y H. RAMÓN: "Determination of basics mechanical properties in a tropical clay soil as a function of dry bulk density and moisture", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21 (3): 5-11, 2012.
- MACÍAS, I. S.; M. E. RAMOS y A. V. LÓPEZ: "Influencia de la fricción en la aparición del desgaste en diferentes mecanismos de las máquinas agrícolas", *Revista Electrónica Granma Ciencia*, 13 (2): 1-13, 2009.
- MALONE, K. F. & B. H..XU: "Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems", *Journal Particuology*, 6 (6): 521-528, 2008.
- MARTÍNEZ, F. & G. RODRÍGUEZ: *Sobre la selección de materiales para el trabajo de suelos*, La Habana, (Monografía), 1985. 17pp.
- NAKASHIMA, H.: "A Serial Domain Decomposition Method for Discrete Element Method Simulation of Soil-Wheel Interactions", *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript PM 08 006, Vol. 10. November, 2008. pp. 10,
- 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*, Ed. UCLV, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, 2001 25pp..
- SHMULEVICH, I.: "State of the art modeling of soil-tillage interaction using discrete element method", *Journal Agricultural Engine*, (3): 41-53, 2010.
- SHMULEVICH, I.; Z. ASAF y D. RUBINSTEIN: *Interaction between Soil and a Wide Cutting Blade Using the Discrete Element Method*, Haifa 32000, Ed. Technion - Israel Institute of Technology, Israel, 2007. pp.46,
- SHMULEVICH, I.; D. RUBINSTEIN y Z. ASAF: "Capter 5: Discrete Element Modeling of Soil-Machine Interactions". En: *Advances in Soil Dynamics*. S.K. UPADHYAYA, W.J. CHANCELLOR, D. WULFSOHN, and T.R. WAY, eds., St. Joseph, Mich.: ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009. Vol 3. pp. 399-413.
- SONI, P. & V. SALOKHE: "Theoretical Analysis of Microscopic Forces at Soil-tool Interfaces: A Review", *Journal Agricultural Engineering International*, (8): 1-25, 2006.
- TANAKA, H.; A. OIDA; M. DAIKOKU; K. INOOKU; O. SUMIKAWA; Y. NAGASAKI & M. MIYAZAKI: "DEM Simulation of Soil Loosening Process Caused by a Vibrating Subsoiler", *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, (9): 2007.
- ZHANG, R. & J. LI: "Simulation on Mechanical Behavior of Cohesive Soil by Distinct Element Method ". En: *Memorias del 7th Asia-Pacific Conference and 25th Annual Meeting of the Japanese Society for Terramechanics of the ISTVS*, Changchun, China. Sept 11 to 16 2004. pp. 9,

Recibido: 21 de septiembre de 2012.

Aprobado: 28 de enero de 2014.

Ángel Lázaro Sánchez Iznaga, Profesor Asistente, Universidad de Cienfuegos, Dpto. Tecnología Agropecuaria, Cienfuegos, Correo electrónico: alsanchez@ucf.edu.cu