

## Simulación de la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza

### Simulation of the soil mechanical behavior in the soil tillage tool interface

*Miguel Herrera Suárez<sup>1\*</sup>, Omar González Cueto<sup>1</sup>, Fidel Diego Nava<sup>2</sup>, Jaime Ruiz Vega<sup>2</sup>, Elvis López Bravo<sup>1</sup>, Ciro Enrique Iglesias Coronel<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Central de Las Villas-UCLV, carretera a Camajuaní km 5 ½, Santa Clara, VC., Cuba.

<sup>2</sup> CIIDIR Oaxaca, IPN. Xoxocotlán, Oaxaca., México.

<sup>3</sup>Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA), Universidad Agraria de La Habana-UNAH. Mayabque, Cuba.

(Recibido el 27 de Agosto de 2012. Aceptado el 11 de Octubre de 2013)

#### Resumen

A partir del desarrollo que han alcanzado los medios de computación en las últimas décadas, la aplicación de los métodos numéricos en la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza, ha ganado en aceptación. Como paso previo a la simulación de este fenómeno se hace necesaria la definición de los modelos que predicen con mayor exactitud la respuesta mecánica del suelo. Tomando en cuenta estos aspectos se desarrolla el presente trabajo que tiene como objetivo simular la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza, mediante el método de elemento finito a partir del empleo de un modelo que se basa en criterios friccionales, con la inclusión de la adherencia y el establecimiento de una tensión de deslizamiento límite, como penalidad para restringir el desplazamiento relativo entre ambas superficies. Los modelos fueron implementados en la herramienta computacional ABAQUS Ver 6.4, a partir de lo cual se simuló el deslizamiento del suelo sobre una superficie metálica. Los resultados evidenciaron la validez del modelo implementado para simular la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta. Los errores en la predicción del estado tensional oscilaron de 1,45 a 5,45 %, para el caso de las deformaciones varió entre 2,22 a 3,57 %.

**Palabras clave:** Simulación, suelo, apero, labranza, propiedades mecánicas suelo

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 53 + 42 + 283149, fax: + 53 + 42 + 281329, correo electrónico: miguelhs@uclv.edu.cu (M. Herrera)

## Abstract

Starting from the development that has reached the computational means in the last decades, the application of the numeric methods in the simulation of the interaction soil tillage-tool, has won in acceptance. As previous step, to the simulation of this phenomenon becomes necessary the definition of the models that predict with more accuracy the soil mechanical behavior. Taking into account these aspects the objective of present work is, to simulate the soil mechanical behavior in the soil-tillage tool interface by means of the finite element method. Starting from the employment of a model that is based on frictional approaches, with the inclusion of the adherence and the establishment of a tension of slip limit, as penalty to restrict the relative displacement between both surfaces. The models were implemented in the computational tool ABAQUS 6.4, starting from that which the soil-metal relative displacement was simulated. The results evidenced the validity of the model implemented to simulate the soil mechanical response in the soil-tool interface. The errors in the prediction of the soil stress oscillated from 1,45 to 5,45%, for the case of the soil vertical deformations it varied among 2,22 to 3,57%.

**Keywords:** Simulation, soil, implements, tillage, mechanical soil properties

## Introducción

El desarrollo de los medios de producción y la necesidad creciente de obtener mayor cantidad de alimentos en el menor tiempo posible, ha propiciado una lógica evolución de los aperos de labranza de suelo, lo cual ha repercutido en el desarrollo de estos medios tomando como premisa fundamental la elevación de la productividad, eficiencia energética, calidad del trabajo y la conservación de las cualidades físicas del suelo. El consumo de energía es uno de los principales aspectos que se toma en cuenta a la hora de diseñar y explotar estos aperos, pues las operaciones de labranza inciden considerablemente en los costos de producción.

Partiendo de esta problemática y de la necesidad de conservar los suelos agrícolas, en la mayoría de los países con cierto grado de desarrollo de la mecanización se crean nuevos diseños de aperos capaces de adaptarse a las disímiles condiciones de los suelos a laborar, protegiendo sus cualidades físicas, además de posibilitar la reducción de los costos de producción, producto del crecimiento

de la productividad del trabajo y de la eficiencia energética.

Para la investigación de los órganos de trabajo de los aperos de labranza con el objetivo de mejorar o modificar los parámetros de diseño se han empleado varios métodos, siendo los más empleados los que se basan en investigaciones experimentales y los que se soportan en métodos analíticos y/o numéricos.

Los métodos numéricos han tomado gran auge en la investigación de la interacción suelo-apero de labranza, a partir del desarrollo acelerado que han tenido los medios de computación en las últimas tres décadas, fundamentalmente en el aumento de su capacidad de almacenamiento y velocidad de procesamiento, así como el desarrollo y disponibilidad de los programas especializados en la modelación de estos problemas.

Dentro de los métodos numéricos el de Elementos Finitos es el que ha encontrado mayor aplicación en la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza a nivel mundial, lo cual ha posibilitado el inicio de una nueva etapa para

el estudio diseño y optimización de este tipo de máquinas [1-11]

Durante la interacción suelo-herramienta de labranza se hace evidente la existencia de una interfase donde ocurre el deslizamiento del suelo cortado sobre la superficie de la herramienta de labranza, conocida como la interfase suelo-herramienta de labranza. Para la simulación de la respuesta mecánica del suelo en la misma se han desarrollado modelos que parten de la inclusión de la adhesión, la fricción, o ambas, dependiendo de la naturaleza del suelo a modelar [12-15].

El modelo exponencial desarrollado en 1960 por [12], presupone una relación tensión-deformación exponencial para suelos sueltos, representando una relación no lineal entre las tensiones de deslizamiento y el desplazamiento relativo del suelo sobre el metal, este fue modificado en 1986 por [15].

El modelo elastoplástico desarrollado en 1984 por [14], asume que la tensión que se opone al deslizamiento del suelo sobre el metal, se incrementa linealmente con el aumento del desplazamiento relativo entre ambas superficies, hasta que alcanza un máximo valor. Después de este valor ocurre una deformación perfectamente plástica, permaneciendo la tensión de deslizamiento constante ante el aumento del desplazamiento relativo.

El modelo hiperbólico extendido desarrollado en 1971 por [13], propone una relación hiperbólica entre la tensión de deslizamiento del suelo sobre el metal y el desplazamiento relativo entre ambas superficies.

De los modelos descritos anteriormente el de Clough y Duncan es el que más aplicación ha encontrado en la modelación de la interacción suelo-herramienta de labranza, mediante el Método de Elementos Finitos.

No obstante las ventajas que presentan estos modelos la mayoría de los programas destinados a la solución de problemas mediante el Método de Elementos Finitos, que se encuentran disponibles no los tienen implementados, lo

que representa sin dudas una limitación para su aplicación. Lo anterior ha propiciado el empleo de formulaciones regidas por criterios friccionales, para la definición del contacto entre ambas superficies [7, 8, 10, 11, 16]

Como criterios friccionales se ha empleado en la mayoría de los casos el criterio de la fricción seca de Amonton y Coulomb, el cual desestima la influencia de la adherencia del suelo a superficie del apero de labranza, fenómeno que se manifiesta durante el laboreo de la mayoría de los principales suelos agrícolas. La gran utilización de modelos que se basan en estos criterios ha estado condicionada por su implementación en la mayoría de los programas que se encuentran disponibles comercialmente. Dentro de estos programa, el ABAQUS permite incluir la adherencia y la fricción, además de permitir el establecimiento de una tensión límite como penalidad durante la simulación del deslizamiento relativo entre dos superficies [17, 18]. En este caso particular se emplea el modelo de Mohr-Coulomb modificado para simular el desplazamiento relativo suelo-herramienta, tomando en cuenta el fenómeno de la fricción y adherencia simultáneamente.

Tomando en cuenta esta problemática se decide realizar el presente trabajo que tiene como objetivo simular la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza mediante el método de elemento finito a partir del empleo de un modelo que se basa en criterios friccionales, con la inclusión de la adherencia y el establecimiento de una tensión de deslizamiento límite como penalidad para restringir el desplazamiento relativo entre ambas superficies.

A partir de esta problemática se decide la realización del presente trabajo que tiene como objetivo simular la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza, mediante el método de elemento finito a partir del empleo de un modelo que se basa en criterios friccionales, con la inclusión de la adherencia y el establecimiento de una tensión de deslizamiento límite, como penalidad para restringir el desplazamiento relativo entre ambas superficies.

## Fundamentos teóricos que definen el contacto e interacción en la interfase suelo-herramienta de labranza

Para simular el contacto del suelo con la herramienta se implementa un modelo friccional (ecuación (1)), que parte del criterio de Mohr-Coulomb modificado, pues incluye el parámetro de la adherencia, a diferencia del que se basa en el criterio de la fricción seca de Amonton y Coulomb.

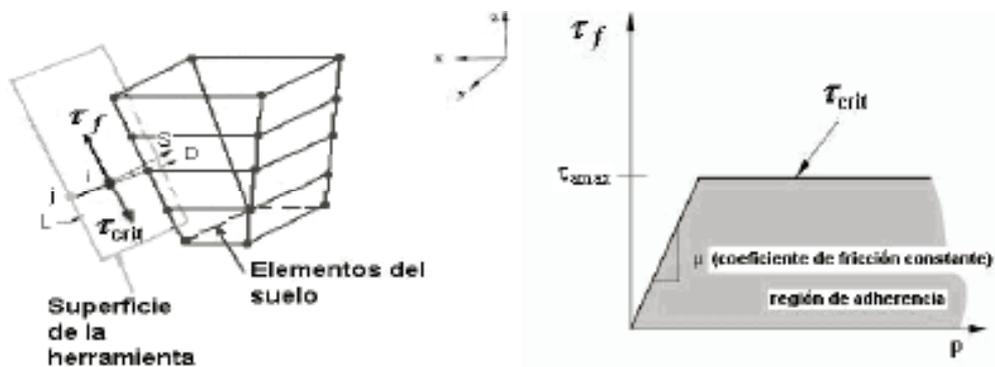
$$\tau_a = C_a + \sigma \tan \delta \quad (1)$$

Siendo  $t_a$  la resistencia al cortante o tensión que se opone al deslizamiento en la interfase suelo-herramienta,  $C_a$  adhesión suelo-herramienta,  $\sigma$

las tensiones normales y  $\delta$  el ángulo de fricción suelo-herramienta.

El modelo se fundamenta a partir del establecimiento de un límite a la tensión de deslizamiento permisible [ $t_a$ ], que representa el máximo valor de tensión que puede ser alcanzado, antes de que el suelo quede totalmente adherido a la superficie de la herramienta.

Partiendo del esquema mostrado en la figura 1a, se fija la condición que plantea la existencia de deslizamiento relativo entre ambas superficies (ecuación (2)), si las tensiones friccionales equivalentes que surgen en la interfase son menores a las tensiones críticas, o sea la tensión límite que marca la frontera del estado de adherencia del suelo sobre la superficie de la herramienta (figura 1b).



**Figura 1** Interfase suelo-herramienta. a) Sistema de fuerzas que condicionan el desplazamiento relativo entre ambas superficies [6]. b) Fronteras que definen la región de adherencia y deslizamiento en el modelo friccional formulado [18].

Dicha condición se formula, como:

$$\bar{\tau}_f < \tau_{crit} \quad (2)$$

Donde  $t_f$  es la tensión de cizallamiento que surge en los elementos de la superficie en contacto, durante el deslizamiento del suelo sobre la superficie de la herramienta y  $t_{crit}$ , tensión de cizallamiento crítica

## Modelación de la respuesta mecánica del suelo

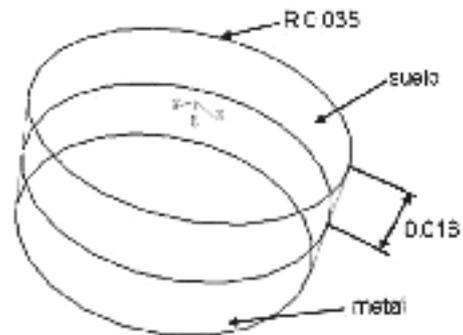
### Definición de la herramienta computacional

A partir de las posibilidades que brinda el programa ABAQUS en lo referente a la variedad de modelos de materiales que tiene implementados, capaces de reproducir con exactitud la respuesta mecánica del suelo, así como la posibilidad que brinda de incluir la adherencia en los modelos de contacto, se define este programa como la herramienta computacional a utilizar durante la simulación.

### Implementación del modelo en la herramienta computacional

El problema objeto de simulación está relacionado con el proceso de deslizamiento del suelo sobre la superficie de la herramienta de labranza, una vez que este ha fallado producto de la acción de la herramienta, proceso que comúnmente se puede recrear por vía experimental mediante la realización de un ensayo de cortante directo modificado con el equipamiento convencional existente en los laboratorios de mecánica de suelo [6]. Dicho experimento consiste en el deslizamiento de un espécimen de suelo sobre una superficie metálica, bajo un régimen de velocidad y cargas constantes. Las cargas actúan en la dirección normal del espécimen de suelo comprimiéndolo durante el deslizamiento.

Tomando en cuenta el problema descrito el modelo físico a implementar en la herramienta computacional representa en forma idealizada el ensayo de cortante directo modificado, describiendo el problema investigado de forma simplificada. El mismo está compuesto por dos elementos tridimensionales en forma de cilindro, que se encuentran en contacto entre sí (figura 2), representando la parte superior al suelo y la inferior a la superficie metálica que se coloca en la parte deslizante de la caja de corte.



**Figura 2** Dimensiones modelo físico ensayo corte directo modificado (m)

Sus dimensiones coinciden con las de los elementos empleados en los ensayos experimentales. Dicho modelo comprende el deslizamiento del suelo sobre la superficie metálica bajo un régimen de velocidad constante y la acción de una carga que actúa en la normal a la superficie de la muestra. El suelo en este ensayo se encuentra confinado lateralmente y no puede deformarse en este sentido.

### Modelo constitutivo del suelo

El modelo constitutivo empleado para caracterizar el comportamiento material de suelo objeto de estudio fue el elastoplástico de Drucker-Prager. La formulación de estos modelos asume que durante el laboreo las herramientas de labranza someten al suelo a grandes desplazamientos y deformaciones, hasta que es obligado a fallar. Por lo que los incrementos de las deformaciones totales se dividen en una parte elástica recuperable y otra plástica o irre recuperable.

El modelo de Drucker-Prager está regido por un criterio de fluencia (ecuación (3)), las reglas de flujo del material (asociado y no asociado), y por las leyes del trabajo de endurecimiento [18].

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = t - p \tan \beta - d \quad (3)$$

Donde  $s_1, s_2, s_3$ , son las tensiones principales máximas, intermedias y mínimas,  $t$  las tensiones desviadoras determinadas experimentalmente,  $p$  las tensiones normales que actúan sobre el suelo,  $d$  la cohesión, y el ángulo  $\beta$  es el que define la pendiente de la superficie de fluencia

lineal. Este último comúnmente está referido al ángulo de fricción interna del material.

**Propiedades mecánicas del suelo y parámetros requeridos como datos de entrada por el modelo cosntitutivo**

La simulación se realizó para dos niveles de humedad y densidad de volumen del suelo, comprendiendo los puntos extremos (mínimos y máximos),

tabla 1. Esta decisión se fundamentó a partir de los resultados obtenidos experimentalmente mediante ensayos de compresión triaxial del suelo rápidos no drenados [19] cortante directo, los cuales mostraron que la resistencia mecánica del suelo estudiado varía significativamente en estos estados de humedad. Como el comportamiento de la curva tensión-deformación del suelo es similar para los niveles intermedios y máximos de humedad, no se incluyen los primeros en las corridas.

**Tabla 1** Datos de entrada requeridos por los modelos

<i>W, %</i>	<i>γ<sub>d</sub>, g/cm<sup>3</sup></i>	<i>v, adim</i>	<i>E, kPa</i>	<i>s<sub>f</sub>, kPa</i>	<i>ψ, (°)</i>	<i>Modelo Drucker-Prager</i>	
						<i>K, adim</i>	<i>β, (°)</i>
20	0,967	0,4	24824,0	454,3	0	0,778	56,99
40	1,096	0,2	3 588,6	18,3	0	0,778	13,48

El cilindro metálico se consideró como un material lineal elástico durante la implementación del modelo, por lo que las propiedades requeridas para simular su respuesta mecánica son el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson, los cuales toman valores de  $2 \cdot 10^8$  kPa y 0,3 respectivamente.

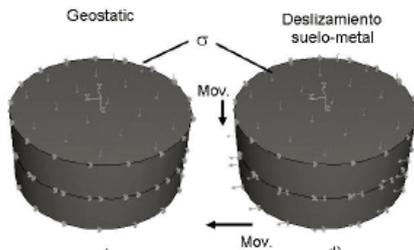
Las propiedades mecánicas necesitadas como datos de entrada por el modelo formulado

para simular el proceso de interacción y deslizamiento del suelo-sobre el metal (Mohr-Coulomb modificado), fueron determinadas experimentalmente mediante un ensayo de corte directo modificado [20] mecánica de suelo, interfase suelo-herramienta, las mismas se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2** Propiedades mecánicas del suelo relacionadas con la interfase suelo-metal

<i>W, %</i>	<i>γ<sub>d</sub>, g·cm<sup>-3</sup></i>	<i>δ, grado</i>	<i>Ca, kPa</i>	<i>μ</i>	<i>t<sub>amax</sub>, kPa</i>
21	0,99	25,22	9,67	0,47	42,00
40	1,09	17,46	14,54	0,31	34,00

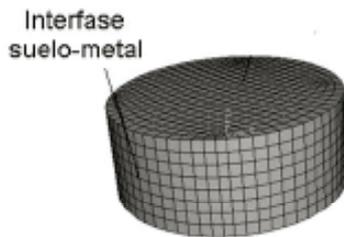
Las condiciones de frontera definidas comprendieron en el paso inicial, la restricción del desplazamiento de la muestra de suelo en los ejes horizontales de coordenadas (figura 3a). La superficie superior de la muestra se puede desplazar en ambos sentidos del eje vertical. Perpendicular a esta superficie actúa una presión semejante a la presión normal ( $\sigma$ ), empleada en los ensayos experimentales (25, 50, 75, 100 kPa). El movimiento de la superficie inferior de la muestra de suelo queda libre de restricciones en el eje vertical. En este paso inicial se anula totalmente el movimiento del cilindro metálico en los ejes horizontales, quedando libre de restricciones la superficie superior del cilindro metálico. En el segundo paso del programa se mantienen las condiciones de frontera previamente establecidas, permitiendo el desplazamiento horizontal del cilindro metálico (2,5 cm).



**Figura 3** Condiciones de frontera a) Triaxial paso inicial; b) deslizamiento suelo-metal

### Discretización del modelo

El modelo se discretizó a partir de un mallado estructurado, empleando 384 elementos lineales hexaédricos de ocho nodos, del tipo C3D8R (figura 4).



**Figura 4** Malla de elementos finitos

La zona del contacto entre la superficie del suelo y el metal se modeló según la teoría del contacto entre dos cuerpos deformables del programa ABAQUS [18], la cual considera que al entrar en contacto dos superficies se define una como principal o maestra (*master surface*) y la otra como esclava o secundaria (*slave surface*). En este modelo se designó la superficie del metal como la superficie maestra, pues sobre esta se desliza el suelo. La superficie contactora del suelo se designó como la superficie esclava.

### Método para determinar el error de pronóstico de los modelos

Para corroborar la validez del modelo fundamentado, se debe analizar los errores de pronóstico. Con este fin se emplean diferentes normas de distancia o error, entre los valores de pronósticos y los resultados experimentales [21].

Para variables métricas (se requiere escala de intervalos como mínimo), se pueden emplear diferentes tipos de medidas de distancia o error que permiten precisar, cuál modelo es el que mejor se ajusta al comportamiento del material que se estudia. Para el caso particular de este estudio el error de pronóstico se determinará según la ecuación (4):

$$\% \text{ Error} = \frac{M_{\text{obs}} - M_{\text{pred}}}{M_{\text{obs}}} \cdot 100 \quad (4)$$

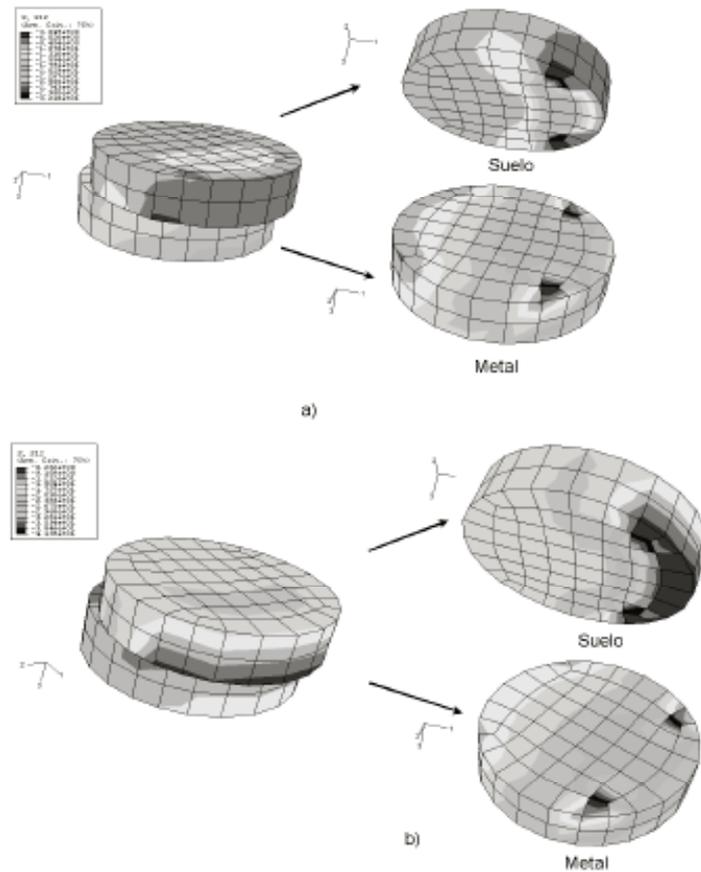
Donde, % Error se identifica como el error de pronóstico en %,  $M_{\text{obs}}$  es la magnitud real observada experimentalmente, y  $M_{\text{pred}}$  es la Magnitud de pronóstico.

### Resultados y discusión

Los resultados de la simulación de la respuesta mecánica del suelo en la interfase muestran, que la formulación desarrollada fue capaz de predecir con exactitud las tensiones cortantes que surgen durante el deslizamiento del suelo sobre el metal, los errores en la predicción oscilaron entre 1,45 a 5,45 %. Según los resultados mostrados en

la figura 5a, las máximas tensiones cortantes se encontraron en la superficie del suelo que se desliza

sobre el metal, específicamente en la zona donde ocurre la pérdida de contacto de ambas superficies.

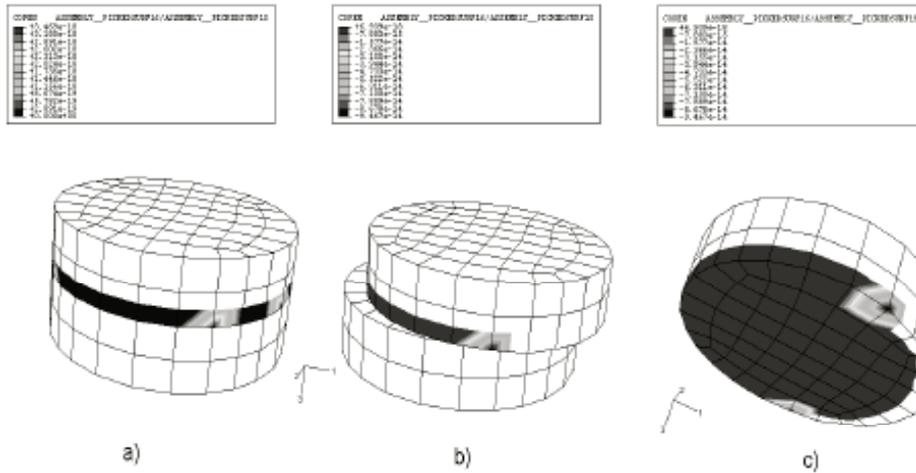


**Figura 5** Distribución de las tensiones cortantes que en el plano de deslizamiento suelo-metal. a)  $W= 40 \%$ ,  $\gamma_d = 0,9 \text{ g/cm}^3$ ; b)  $W= 20 \%$ ;  $\gamma_d= 0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Al comparar los resultados obtenidos en cada corrida se puede observar que las condiciones físicas del suelo (humedad y densidad) ejercen una gran influencia en la respuesta mecánica del suelo, obteniéndose las máximas tensiones cuando el suelo posee un bajo contenido de humedad (20 %), figura 5b.

Los resultados mostrados en la figura. 6a, indican que en el modelo desarrollado, el

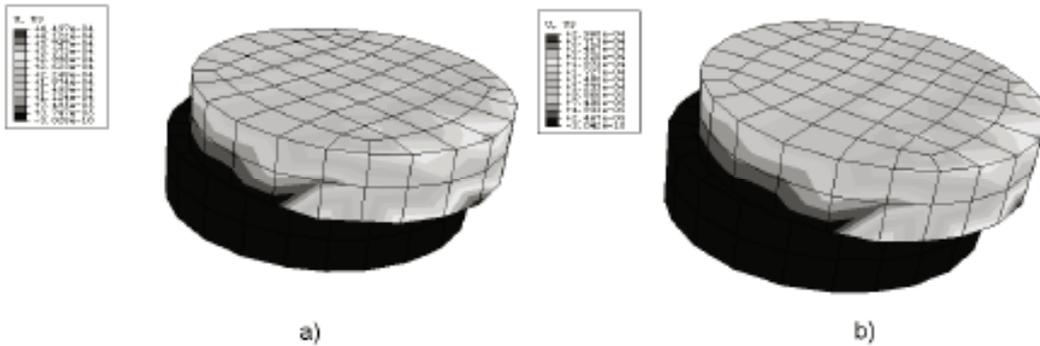
suelo al establecer contacto inicialmente con la superficie metálica ajusta los nodos de la superficie maestra (metal) con los de la superficie esclava (suelo), manteniéndolos en contacto durante el desplazamiento. En la medida que el cilindro metálico se desplaza y deja de contactar con el suelo, los nodos en dicha interfase pasan a la condición de nodos abiertos (figura 6 bc).



**Figura 6** Ajuste nodal entre las superficies maestra y esclava. a) zona de contacto; b) y c) zona de pérdida de contacto entre las superficies maestra y esclava

Por otra parte los resultados de la modelación mostraron que los errores en la predicción de la deformación vertical del espécimen de suelo

oscilaron entre el 2,22 a 3,57 %, garantizando la exactitud requerida para este tipo de modelos, (figura 7).



**Figura 7** Deformación vertical de las muestras de suelo. a)  $H= 40 \%$ ,  $\gamma_d = 0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ; b)  $W= 20$

$\gamma_d = 0,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

### Conclusiones

De los resultados obtenidos durante la modelación mediante el método de elemento finito del deslizamiento del suelo sobre la superficie metálica, se puede concluir, que:

El modelo de contacto fundamentado a partir de criterios friccionales con la inclusión de la

adherencia es capaz de predecir con la exactitud requerida en los cálculos ingenieriles, tanto el estado tensional, como las deformaciones que surgen durante dicha interacción, evidenciando la validez de este modelo para simular la respuesta mecánica del suelo en la interfase suelo-herramienta de labranza.

Los errores en la predicción del estado tensional del suelo durante el deslizamiento sobre la superficie metálica oscilaron entre 1,45 a 5,45 %.

El contenido de humedad y el estado de densificación del suelo condicionan la respuesta mecánica del suelo.

El modelo implementado es capaz de identificar los nodos que se encuentran en contacto durante la interacción de la superficie del suelo con el metal, así como la separación de los nodos una vez que se pierde el contacto entre ambas superficies

Los errores en la predicción de la deformación vertical del espécimen de suelo oscilaron entre el 2,22 a 3,57 %, garantizando la exactitud requerida para este tipo de modelos.

## Referencias

1. R. Young, A. Hanna. "Finite element analysis of plane soil cutting". *J. Terramech.* Vol. 14. 1977. pp. 103-125.
2. L. Chi, R. Kushawaha. "Finite element analysis of forces on a plane soil blade". *Canadian Agric. Eng.* Vol. 31. 1989. pp. 135-140.
3. L. Chi, R. Kushawaha. "Three dimensional finite element interactions between soil and a simple tillage tool". *Transactions of the ASAE.* Vol. 34. 1991. pp. 3623-3626.
4. R. Kushawaha, J. Shen. "Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool". *Transactions of the ASAE.* Vol. 37. 1995. pp. 1315-1319.
5. A. Mouazen, M. Nemenyi. *A finite element model of soil loosening by a subsoiler with respect to soil conservation.* Memorias del 9<sup>th</sup> Conference of the International Soil Conservation Organisation. Aug 1996. Bonn, Germany. pp. 549-556.
6. J. Shen, R. Kushawaha. *Soil-machine interactions: A finite element perspective.* 1<sup>a</sup> ed. Ed. Marcel Dekker Inc. New York, USA. 1998. pp. 325.
7. U. Rosa, D. Wulfsoh. "Constitutive model for high speed tillage using narrow tools". *Journal of Terramechanics.* Vol. 36. 1999. pp. 221-234.
8. M. Abo, R. Hamilton, J. Boyle. "3D dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method". *Journal of Terramechanics.* Vol. 40. 2003. pp. 51-62.
9. N. Abu, R. Reeder. "A non linear 3d finite element analysis of the soil forces acting on a disk plow". *Soil Till. Res.* Vol. 74. 2003. pp. 115-124.
10. M. Abo, R. Hamilton, J. Boyle. "Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3d finite element analysis". *Soil & Tillage Research.* Vol. 75. 2004. pp. 61-73.
11. J. Milton. "Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements whit soil". *J. Agric. Eng. Res.* Vol. 74. 1999. pp. 91-101.
12. M. Beeker. *Introduction to terrain-vehicle systems.* 1<sup>a</sup> ed. Ed. University of Michigan Press. Ann Arbor, Michigan, US. 1960. pp. 120
13. G. Clough, J. Duncan. "Finite element analysis of retaining wall behavior". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division.* Vol. 97. 1971. pp. 1657-1673.
14. C. Desai, H. Siriwardarne. *Constitutive laws for engineering materials, with emphasis on geologic materials.* 1<sup>a</sup> ed. Ed. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs. New Jersey, USA. 1984. pp. 468.
15. Q. Zhang, V. Puri, H. Manbeck. "Determination of elastoplastic constitutive parameters for wear en masse". *Transactions of the ASAE.* Vol. 29. 1986. pp. 1739-1746.
16. A. Mouazen, M. Nemenyi. "Tillage tool design by finite element method: Part I. Finite element modeling of soil plastic behavior". *J. Agric. Eng. Res.* Vol. 72. 1999. pp. 37-51.
17. S. Karlsson. "Soil triaxial compression". *Abaqus benchmark manual.* 6.4. ed. Ed. Pawtucket. Providence, USA. 2004. pp. 35.
18. S. Karlsson. *Abaqus theory manual.* 6.4. ed. Ed. Pawtucket. Providence, USA. 2004. pp. 76.
19. M. Herrera, C. Iglesias, O. Gonzalez, E. López, A. Sánchez. "Propiedades mecánicas de un rhodic ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el método de elementos finitos: Parte I". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.* Vol. 17. 2008. pp. 31-37.
20. M. Herrera, C. Iglesias, O. Gonzalez, E. López, A. Sánchez. "Propiedades mecánicas de un rhodic ferralsol requeridas para la simulación de la interacción suelo implemento de labranza mediante el método de elementos finitos: Parte II. Interfase suelo-herramienta". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias.* Vol. 17. 2008. pp. 50-54.
21. V. Berberena, D. Izada. *Estadística.* 1<sup>a</sup> ed. Ed. CIMNE. Barcelona, España. 2006. pp. 350.