

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FCA
Facultad de
Ciencias Agropecuarias

Departamento Ingeniería Agrícola

TRABAJO DE DIPLOMA

Modelación de la interacción suelo-paratill mediante el
Método de Elementos Discretos

Autor: Milena Camacho Marín

Tutores: Dr. C. Elvis López Bravo

Consultante: Ms.C. Maykel Díaz Cruz

2018

Santa Clara
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una investigación sobre la interacción del suelo con un implemento de tipo *paratill* empleando el método de elementos discretos. El modelo se realiza en el software EDEM donde se implementan tres modelos de suelo que responden a diferentes geometrías de partículas, los modelos se definen con las mismas propiedades físicas y mecánicas del suelo. Se diseña además el *paratill* y se simula el movimiento del mismo a través de los tres bloques de suelo. Los resultados mostraron los patrones de movimiento de las partículas de suelo así como los posibles valores de esfuerzos durante el proceso de labranza. Se realiza además el análisis resistivo del implemento así como la influencia del diámetro de las partículas en la precisión de los resultados. Finalmente se verifica el modelo mediante formulaciones de la mecánica de suelo mostrando su validez.

ABSTRACT

In the present work a research on the interaction of the soil with an implement type paratill was doing using the Discrete Element Method. The model is made in EDEM software, where three soil models are implemented that respond to different particle geometries, the models are defined with the same physical and mechanical properties of the soil. The shape of the paratill is also designed, and its the movement is simulated through the three blocks of soil. The results showed the movement patterns of the soil particles as well as the possible stress values during the tillage process. The implement resistive analysis is also carried out, as well as the influence of the diameter of the particles on the precision of the results. Finally the model is verified by formulations of soil mechanics showing its validity.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma en primer lugar a mi mamá Dayamis Marín Santiesteban por ser lo más importante en mi vida y siempre estar presente en mi corazón y en todas mis acciones, por ser mi faro, mi guía y mi mayor inspiración para seguir adelante.

A mi hermana Melisa Camacho Marín.

A mi papá Mario Cesar Camacho Martínez.

A mi tío Ismael Marín Santiesteban.

A mi abuela Concha y abuela Edilia.

A mi amiga y hermana Lisbetty Álvarez Ulloa.

A mi prima Zulia Cárdenas Roche.

A mis segundos padres Duniesqui y Norbertico.

A todos que de una u otra forma ayudaron en la realización de esta tesis.

Milena Camacho Marín

AGRADECIMIENTOS

A mi madre hermosa porque sin sus consejos, su amor, su ayuda y todo lo que me enseñó me hizo una mejor persona y donde quiera que esté espero vea que cumplí su último deseo. Te amo.

A mi hermana Melisa por ayudarme con todas mis obligaciones para que pudiese estudiar.

A mi papá Mario por ayudarme, apoyarme y enseñarme siempre que con sacrificios todo se puede.

A mi tío Ismaelito por todo su apoyo.

A mis abuelos por estar siempre que los he necesitado.

A mi amiga y hermana Lisbetty por aguantarme estos cinco años y siempre estar conmigo en las buenas y malas.

A mi prima Zulia porque sin sus consejos y ayuda nunca hubiese logrado acabar la carrera.

A mi profesor y tutor Maykel que siempre me guió y ayudó en toda mi trayectoria por la UCLV.

A mi tutor Elvis por toda su ayuda, paciencia y dedicación para la realización del trabajo diploma.

Y a todas las personas que de una manera u otra me ayudaron y me apoyaron a cumplir el sueño de llegar a ser una profesional.

ÍNDICE

RESUMEN	II
DEDICATORIA	II
ÍNDICE	IV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	3
1.1 EL Método de los Elementos Discretos (MED)	3
1.2 Revisión bibliográfica de los modelos DEM	5
1.3 Labranza sin inversión del el prisma	6
1.4 Generalidades del EDEM	9
1.5 Principales teorías sobre la falla de los suelos	9
CAPÍTULO 2	12
MATERIALES Y MÉTODOS	12
3.1 Modelo matemático de interacción	12
3.2. Metodología para implementar el modelo DEM; Error! Marcador no definido.	
2.4. Descripción del órganos de trabajo	16
CAPÍTULO 3	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
Generación de los bloques de suelo	18

Análisis de la rigidez de la Herramienta	19
Análisis del patrón de Velocidad de las partículas	21
Resultados de la velocidad y la fuerza de tiro	22
Análisis de la variación de la energía cinética	23
3.7 Influencia de las dimensiones de las partículas	24
3.8 Verificación analítica	25
CONCLUSIONES	27
RECOMENDACIONES	28
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

INTRODUCCIÓN

Para el crecimiento y desarrollo de las plantas se requiere que el suelo esté perfectamente mullido, con una adecuada aireación y humedad y nutrientes necesarios. Estos requerimientos se logran con una correcta preparación del suelo y el mantenimiento a los cultivos. En nuestro país el empleo de técnicas inadecuadas de roturación y cultivo, el excesivo número de operaciones de laboreo del suelo y el uso de implementos y máquinas inadecuadas han contribuido que los suelos se hayan ido erosionando de una forma alarmante. Como se conoce, las tecnologías tradicionales de roturación y cruce se han basado en el volteo y corte vertical del suelo, lo cual contribuye a generar numerosos efectos contraproducentes a la agricultura. Cuando los arados tradicionales vuelcan el prisma del suelo, ponen a la intemperie una masa orgánica acompañada de su fecunda micro fauna. Con la inclemencia de los rayos del sol tropical, no solo se altera negativamente la materia orgánica mencionada, sino que, además, se extingue la micro población referida, creadora de nutrientes para las plantas. Además, con esa forma de laboreo se pierde la humedad superficial del suelo y aparece la compactación. Con los equipos tradicionales, la llamada preparación de tierra equivale a la esterilización de esta. Otro efecto adverso de la inversión del prisma es el persistente enyerbamiento, pues lejos de desaparecer las semillas de las malezas, estas se propagan como si estuviesen impulsadas por atomizadores. A lo anterior agreguemos que, con el antiguo volteo del prisma, la maleza no logra incorporarse al suelo como materia orgánica; con el multiarado ocurre todo lo contrario, porque el corte del implemento se hace de manera horizontal, lo cual posibilita que la maleza muera en la superficie y mantenga la humedad del área.

La geometría de las herramientas de labranza es un factor decisivo para la conservación de los suelos agrícolas. Los aperos deben tener la capacidad de mantener determinado nivel de residuos de las cosechas sobre la superficie así como evitar el enterramiento de la materia orgánica, del mismo modo remover el

suelo de forma localizada. De este modo es posible reducir los efectos de la erosión, la liberación del carbono y la compactación del suelo (Carter and Daniel, 2005).

La evaluación de tecnologías de labranza usando herramientas de cincel, no labranza y labranza flexible ha mostrado un incremento en los indicadores de calidad del suelo comparado a los resultados obtenidos con la labranza convencional. Los efectos indeseados de la erosión y la compactación fueron menores para las tecnologías de conservación (Barber et al., 1996). Otros estudios han demostrado que la actividad del carbono es afectado principalmente por el nivel de destrucción de los agregados del suelo. Los autores concluyeron que la retención de los residuos de la cosecha decrece la descomposición del carbono orgánico lo que incrementa las propiedades agronómicas del suelo (Chivenge et al., 2007).

Objeto de estudio: Simulación de operaciones de labranza.

Problema científico: No se cuenta con modelos que realicen una descripción de la dinámica de la interacción suelo-implemento de labranza.

Objetivo General: Implementar un modelo para simular la interacción del suelo con un implemento tipo paratill empleando el método de los elementos discretos.

Tareas de la Investigación:

1. Selección y análisis resistivo de la herramienta de corte.
2. Creación de un modelo suelo-paratill mediante el método de elementos discretos.
3. Interpretación de los patrones dinámicos y esfuerzos mecánicos durante la simulación de la labranza.
4. Análisis de la influencia del diámetro de las partículas en los esfuerzos de corte.
5. Validación analítica de los resultados del modelo empleado.

CAPÍTULO 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 EL Método de los Elementos Discretos (MED)

El método de los elementos discretos simula el comportamiento mecánico de un medio formado por un conjunto de partículas las cuales interaccionan entre si a través de sus puntos de contacto (Coetzee, 2017, Cai et al., 2017). La disposición de las partículas dentro del conjunto global del sistema o medio es aleatoria, por lo que se puede formar medios con diferentes tamaños de partículas distribuidos a lo largo del conjunto, idealizando de este modo la naturaleza granular de los medios que usualmente se analiza y se simula mediante esta técnica numérica. Principalmente se pueden distinguir las siguientes propiedades básicas que definen de forma global y a grandes rasgos este método de análisis numérico:

- Las partículas como elementos discretos que en su conjunto conforman el sistema complejo de partículas.
- Estos elementos distintos como también se le conoce se desplazan independientemente uno de otros e interaccionan entre sí en las zonas de contacto.
- En este método a nivel de cada partícula se hace uso de la mecánica del cuerpo rígido y los elementos discretos se consideran elementos rígidos en sí.

Desde el punto de vista geométrico dos partículas están en contacto si un solapamiento es el resultado de la colisión. La energía y el momento son disipadas como consecuencia de la naturaleza inelástica del medio (Tijssens et al., 2003).

Las fuerzas que resultan de la interacción de dos partículas es gobernada por la segunda ley de Newton y se escribe como:

$$m_i \mathbf{a}_i = \mathbf{G}_i + \sum_c \mathbf{F}_{ci}, \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_i \boldsymbol{\alpha}_i = \mathbf{H}_i + \sum_c \mathbf{r}_{ci} \times \mathbf{F}_{ci}, \quad i = 1 (N). \quad (2)$$

Los modelos en elementos discretos se descomponen en reacciones normales y tangenciales al contacto como se muestra en la Figura 1.

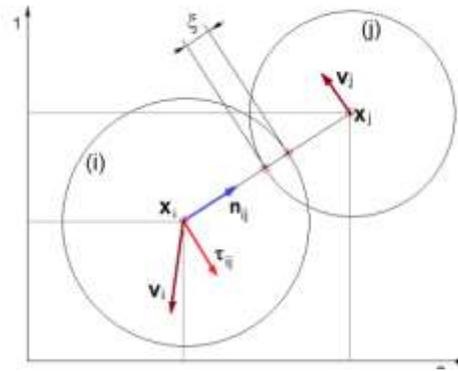


Figura 1. Esquema de interacción en un modelo DEM.

Para obtener las posiciones relativas entre las partículas i y j el vector unitario normal \mathbf{n}_{ij} , y tangencial $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ se definen como:

$$\mathbf{n}_{ij} = (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) / |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_{ij} = \mathbf{v}_{ij} / |\mathbf{v}_{ij}| \quad (4)$$

La fuerza normal incluye la acción de la rigidez normal así como el amortiguamiento viscoso y se determina por la siguiente ecuación:

$$F_n(\xi, \dot{\xi}) = k_n \xi + \gamma_n \dot{\xi} \quad (5)$$

El esquema de integración del paso de tiempo se determina como:

$$\mathbf{v}_{t+\Delta t/2} = \mathbf{v}_{t-\Delta t/2} + \mathbf{a}_t \Delta t \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_{t+\Delta t} = \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_{t+\Delta t/2} \Delta t. \quad (7)$$

Las partículas esféricas se seleccionan basados en su bajo costo computacional, el contacto entre ellas se verifica por la siguiente relación:

$$\xi_{ij} \equiv (r_i - r_j) - \| \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j \| > 0 \quad (8)$$

1.2 Revisión bibliográfica de los modelos DEM

La modelación mediante DEM posee suficientes recursos para lograr una representación geológica acertada del suelo, para ello numerosos estudios se ha desarrollado donde se ha demostrado que mediante la simulación se pueden obtener resultados considerablemente certeros respecto a la respuesta del suelo referente a la variación de sus propiedades (Zheng et al., 2017, Ucgul et al., 2017, Sun et al., 2018). El análisis de la naturaleza discontinua del suelo durante su deformación durante la modelación de un ensayo de penetración permitió establecer la influencia de los parámetros micros en la resistencia mecánica a la deformación. En este estudio los autores consideran que las dimensiones de las partículas es esencial para garantizar parámetros de fluctuación de las fuerzas razonables. La introducción de la adherencia entre partículas ha sido introducida para determinar la influencia de la fuerza de succión durante el colapso de las estructuras del suelo así como la influencia de la porosidad (S. H. Liu, 2002, Peng et al., 2017, Hang et al., 2017). Por otra parte la simulación de ensayos mecánicos en condiciones drenadas y no drenadas fue realizado con el objetivo de explicar la influencia de los parámetros micro del modelo en la respuesta macro (Thallak et al., 2002, Yin et al., 2018). LA combinación entre los métodos DEM y FEM también ha sido incluido como parte de la simulación del corte del suelo y rocas (Oñate and Rojek, 2004). El resultado de la modelación por ambos métodos ha sido comparado a través de los resultados obtenidos en la simulación del efecto del inflado de los neumáticos agrícolas en la estructura del suelo (Tadesse, 2004). Para estimar los parámetros de los modelos discretos se han propuesto metodologías basadas en ensayos de suelo (Asaf et al., 2007, Vannier et al., 2018). Por su parte la modelación de la interacción del suelo con el apero a sido realizada a través de herramientas de simple geometría (Shmulevich. et al., 2006, Gabiri et al., 2018) y sin cohesión del suelo (Obermayr et al., 2011). Sin embargo la calibración de la respuesta del suelo

como función de la fricción a la cohesión ha sido tratada en la modelación del derrumbe del suelo en condiciones de alta humedad por Utili and Nova.

1.3 Labranza sin inversión del el prisma

➤ *El multiarado*

El multiarado constituye un nuevo concepto de labranza: es un implemento versátil, pues puede realizar labores de preparación de suelos y cultivo, tales como: rotura, cruce, surcado, subsolado, cultivo de deshierbe, cultivo con aporque, cultivo y fertilización, etc., sustituyendo a varios implementos de labranza y cultivo. Para ello posee un conjunto de accesorios que le permite adoptar diferentes configuraciones de trabajo, en dependencia de la labor. Es ecológico, ya que realiza el laboreo de los suelos mediante el corte vertical-horizontal, o sea, sin invertir la capa superficial, que es la más fértil. Sus ventajas económicas radican en que logra un mayor ancho de trabajo con la misma fuerza traccional que un arado común de discos.

Puede ser empleado en diferentes condiciones topográficas y en todo tipo de suelos (excepto en suelos pedregosos), con alto grado de compactación y amplios rangos de humedad. Se puede utilizar en cualquier cultivo. Reduce la erosión, pues al no voltear la capa del suelo, deja los rastrojos sobre la superficie; Reduce la propagación de malas hierbas, por lo que disminuye el uso de herbicidas; Favorece el desarrollo de las raíces del cultivo; Ahorra agua porque retiene la humedad en el suelo; Conserva la materia orgánica y por tanto ahorra fertilizantes; Combate la compactación facilitando la infiltración y el drenaje; Deja el terreno nivelado, poroso y mullido; Con un solo equipo se pueden hacer varias labores; Reduce la cantidad de pases; Disminuye los gastos generales de explotación, especialmente combustible, piezas, salarios, etc.

➤ *El paratill*

El Paratill descompacta el suelo sin destruir su estructura, simplemente lo remueve logrando en mayor medida que no se alteren sus propiedades. Este apero posee un brazo o soporte con un ángulo de inclinación de 45 grados con respecto a la horizontal que le posibilita levantar suavemente el suelo y fracturarlo a lo largo de

sus planos naturales de falla, dejándolo caer ya mullido en la posición original. El levantamiento suave del suelo permite no mezclar la capa superficial con el subsuelo, crear terrones, o enterrar los residuos de cosechas anteriores lo cual es de gran importancia para la labranza conservacionista del suelo (Bigham & Brothers Co, 2008). Esto mejora además la infiltración y absorción del agua, estimula el desarrollo de las raíces y permite la colocación de fertilizantes en zonas más profundas.

Dentro de la concepción de los aperos se ha tenido en cuenta también el fenómeno del desgaste de sus elementos estructurales para lo cual se le ha concebido la colocación de elementos de recambio que protegen las principales partes del órgano de trabajo que entran en contacto con el suelo y se exponen al desgaste abrasivo (Herrera et al., 2008). Las ventajas que posee este nuevo apero se resumen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Ventajas de los órganos de trabajo tipo Paratill.

Acción	Beneficio
La superficie del suelo es cortada y levantada en forma tal que queda nivelada.	Posibilidad de realizar la siembra directa; No se requieren labores de cultivo posteriores para la nivelación del suelo; La re compactación del suelo queda abolida.
Se mantiene la cobertura del suelo por la mantención de los residuos de cosecha.	Se mejora la infiltración del suelo; Se disminuye la erosión del viento y del agua; El subsuelo no se mezcla con el suelo de los horizontes superiores del suelo; La capa superficial de suelo que contiene la materia orgánica no es mezclada.

El grado de descompactación del suelo es optimizado a través de todo el perfil del suelo.	Reducción del consumo de combustible; Mantenimiento de los surcos durante la labor;
El suelo es descompactado a lo largo de los planos de falla naturales del suelo.	Bajo requerimiento de energía. No inversión del prisma del suelo.
Los órganos de trabajo son regulables.	Efectiva descompactación para un amplio rango de tipos de suelos y condición de humedad; Elevada productividad.
El implemento es operacionalmente atractivo.	Requerimientos mínimos de mantenimiento; Protección contra el desgaste abrasivo. Fácil regulación de campo.

Por su parte los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas.

Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos. Los agricultores han tenido que desarrollar métodos para prevenir la alteración perjudicial del suelo debida al cultivo excesivo y para reconstruir suelos que ya han sido alterados con graves daños.

1.4 Generalidades del EDEM

Generalmente, los ingenieros necesitan analizar el comportamiento una vez que el trabajo de tierra debe hacerse. Esta puede ser la rotación del suelo en el lote de arar o el plegado de material de la parte superior de una buldócer. En estos ejemplos, es crítico crear una capa de material lo suficientemente largo como para permitir que el equipo alcance la condición de estado estacionario, pero la creación de un lecho largo de materiales puede dar como resultado un tiempo de simulación más largo.

Para ayudar a los usuarios a generar lechos grandes más rápido y más fácil, EDEM 2018 presenta una aplicación de generación camas de material que genera una capa grande rápidamente copiando pequeños bloques de material. Los bloques pueden ser reutilizados, almacenados y transferidos fácilmente entre múltiples usuarios y simulaciones, lo que ahorra tiempo de configuración y tiempo de simulación (Mousaviraad et al., 2016).

Una segunda función clave agregada a EDEM 2018, es **Dynamic Domain**, que hace posible crear un dominio activo para resolver sólo contactos en las áreas necesarias. La capa de material restante se congela hasta que es necesario, de modo que se puede utilizar una cama mucho más grande de una manera mucho más eficiente. Resolviendo solamente para la región activa, el lecho material se puede hacer mucho más grande sin ninguna preocupación sobre el coste de cálculo de la simulación.

1.4 Principales teorías sobre la falla de los suelos

Para representar el estado tensional en determinado punto del suelo es comúnmente aceptada la teoría del estado de equilibrio límite. Este método es solamente útil para obtener información sobre el valor máximos de las fuerzas antes de que el suelo sea (Shen and Kushwaha, 1998). Esta teoría tiene como principal asunción que el suelo se comporta como un material rígido, de esta forma la falla ocurre en la interface suelo-suelo o suelo-muro. El patrón de fractura está predeterminado según las fuerzas que interactúan en las superficie del suelo, estas

están gobernadas por la ecuación de Mohr-Coulomb descrita en Coulomb (1776) y citada por Lambe (1969):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (9)$$

Donde:

τ = tensión de falla [Pa],

c = cohesión [Pa],

σ_n = presión normal [Pa],

$\tan \phi$ = ángulo de fricción.

El criterio de Mohr-Coulomb es además usado para determinar el límite de la fuerza de corte en la interface suelo-apero usando los parámetros referentes al área de contacto.

$$\tau = c_a + \sigma_n \tan \delta \quad (10)$$

Donde:

c_a = adherencia [Pa],

δ = Ángulo de fricción externa.

Mediante el círculo de Mohr se logra una representación gráfica de los del estado tensional de suelo en el espacio normal y cortante (Figura 1.1).

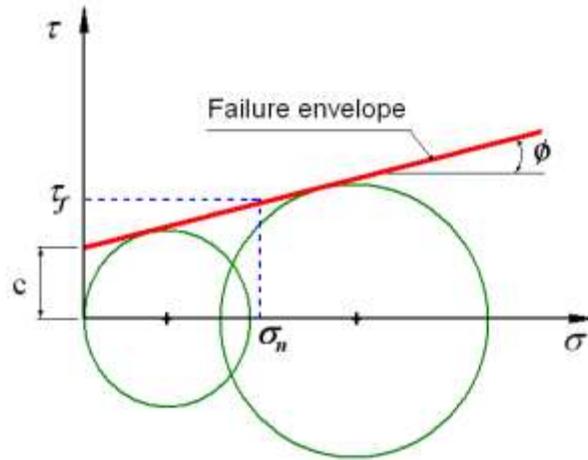


Figura 1.2. Criterio de falla de Mohr-Coulomb.

La línea recta obtenida de la combinación de las tensiones principales es conocida como la superficie de falla mediante la cual se puede medir el ángulo de fricción (ϕ) respecto al eje horizontal, de la intercepción con el eje vertical resulta la cohesión (c).

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo matemático de interacción suelo-apero

Para describir la interacción entre partículas cohesivas fue implementado explícitamente un modelo el cual se divide en dos modelos de contacto que considera la interacción entre partículas de suelo y entre estas y el medio de labranza. Para ello se introdujeron las propiedades evaluadas del suelo anteriormente en las formulaciones que además consideraron el efecto de la adherencia y la fricción sobre la resultante.

Los enlaces entre por la acción de la fuerza cohesiva son creados por la combinación del efecto de la micro-cohesión y la micro-fricción las cuales son activadas en direcciones normal y tangencial respectivamente de acuerdo al criterio de falla de Mohr-Coulomb:

$$F_t^{max} < F_n \cdot \tan(\phi_\mu) + c_\mu \quad (11)$$

Donde:

F_t^{max} = límite tangencial [N],

F_n = fuerza normal [N],

ϕ_μ = ángulo de micro-fricción [N],

c_μ = micro-cohesión [N].

La variación de la fuerza normal se determina como:

$$\Delta F_n = k_n \cdot u_n + \eta_n (u_n / \Delta t) \quad (12)$$

Donde:

k_n = rigidez normal [N/m],

u_n = desplazamiento normal [mm],

η_n = coeficiente de viscosidad [kg/s],

Δt = paso de tiempo [s].

La rigidez normal es calculada a través del modelo propuesto por Liao (1997):

$$k_n = \frac{E_{ab} \cdot A_{int}}{D_{eq}} \left[\frac{1 + \alpha_k}{\beta_k(1 + \nu) + \gamma_k(1 - \alpha_k)} \right] \quad (13)$$

Donde:

E_{ab} = Modulo de Young [Pa],

A_{int} = Superficie interna [m²],

D_{eq} = distancia equivalente [m],

ν = coeficiente de Posición

α_k = recorrido de carga

β_k = factor de ablandamiento

γ_k = rango de interacción

De forma similar la variación de la fuerza tangencial se determina como:

$$\Delta F_s = k_s \cdot \Delta u_s + \eta_s (\Delta u_s / \Delta t) \quad (14)$$

Donde:

k_s = rigidez tangencial [N/m],

Δu_s = solapamiento tangencial [m],

η_s = viscosidad tangencial [kg/s].

3.2. Descripción del bloque de suelo

Para la realización del trabajo se diseñó un bloque de suelo de que posee cinco caras con las siguientes dimensiones por eje de las (x) 250 mm, (y) 130 mm y (z) 100 mm. Posee además un volumen Surface de tipo physical. La densidad del sólido es de 2500 kg/m^3 y una posición del radio de 0,25 como se muestra en la figura 2.1 a continuación.

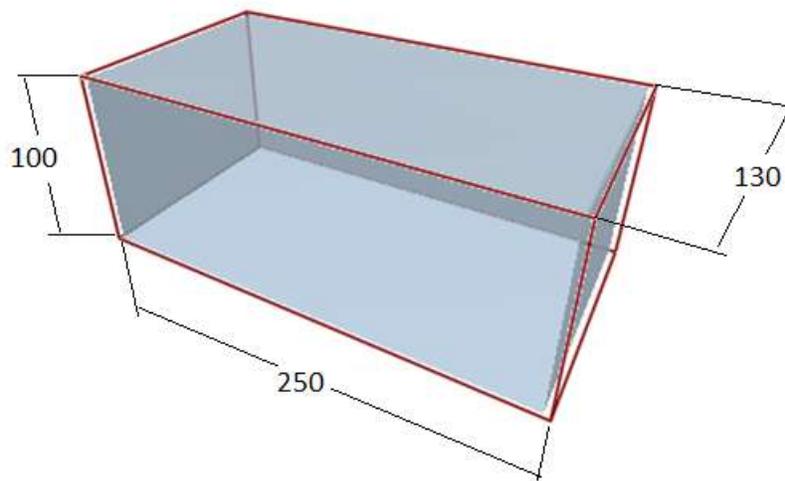


Figura 2.1. Bloque de suelo, medidas en mm.

3.2.1 Descripción de las partículas

Para el modelo de suelo 1 se emplea una partícula esférica de radio 2 mm (Figura 2.2) con masa de $8,37758 \times 10^{-5} \text{ kg}$, volumen de $3,35103 \times 10^{-8} \text{ m}^3$, momento de inercia (X) $1,34041 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2$, momento de inercia (Y) $1,34041 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2$, momento de inercia (Z) $1,34041 \times 10^{-10} \text{ kg/m}$. La misma partícula se emplea en el modelo 2 con una distribución al azar de radios entre 0.2 y 2 mm.

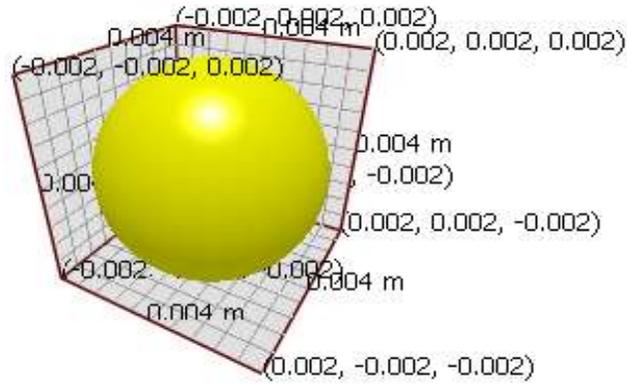


Figura 2.2. Partícula de 2mm.

Para el tercer experimento se forma el bloque de suelo con partículas combinadas las cuales una posee un radio de 2 mm con una posición (x) de 5 mm y (y) y (z) de 0 una masa de $8,37758e-05$ kg, un volumen de $3,35103e-08$ m³, un momento de inercia (x) de $1,34041e-10$ kg/m², (y) de $1,34041e-10$ kg/m² y (z) de $1,34041e-10$ kg/m² como se muestra en la figura.2.3.

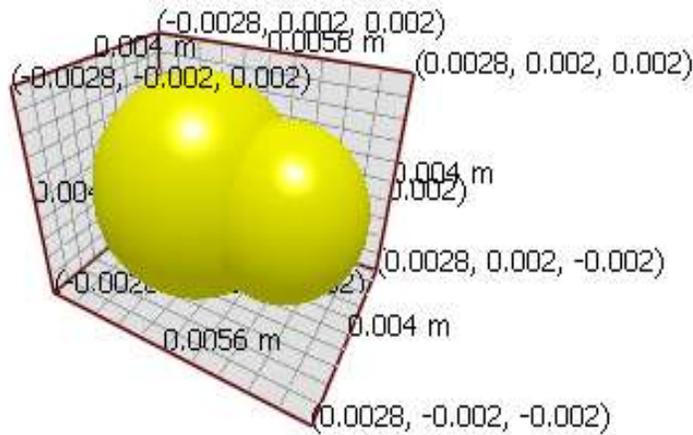


Figura 2.3. Partícula de suelo combinada.

2.4. Descripción del órgano de trabajo

Para modelar la interacción apero-suelo se diseñó en el software *SolidWorks 2018* una herramienta de labranza de tipo paratill la cual se muestra en la figura 2.4, la misma se hace pasar a través del bloque de suelo. Las propiedades del suelo simuladas responden a las condiciones de suelo seco y no cohesivo.

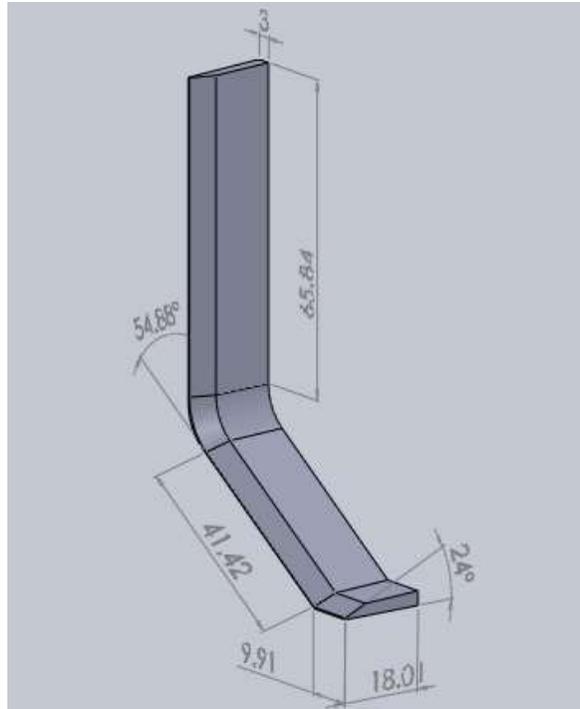


Figura 2.4. Implemento virtual tipo paratill.

2.5 Metodología para verificar la precisión del modelo

Para realizar la verificación analítica del modelo propuesto se analizaron los modelos semi-empíricos usados para predecir la respuesta del suelo (Payne, 1956, Hettaratchi and Reece, 1967, McKyes and Ali, 1977, Perumpral et al., 1983, Swick and Perumpral, 1988).

El modelo Perumpral-Grisso-Desai fue seleccionado dado la similitud de los parámetros utilizados en el mismo con los estudiados en el suelo así como su

comprobada valdes para suelos cohesivos, en el mismo la fuerza de tiro se determina mediante la siguiente ecuación:

$$D = w_t (\gamma z^2 N_\gamma + cz N_c + c_a z N_a) \quad (15)$$

Donde:

D = fuerza de tiro [N],

w = ancho del apero [mm],

γ = densidad [g/cm³],

z = profundidad [mm],

c = cohesión [Pa],

c_a = adherencia [Pa],

N_γ, N_c, N_a = coeficientes [].

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Generación de los bloques de suelo

Siguiendo el procedimiento descrito en el epígrafe 3.2 se obtuvieron tres bloques de suelo los cuales fueron llenados a partir de la generación de partículas con un total de 15 000, 20 000 y 15 000 para las tres variantes definidas (P1, P2 y P3). Como se muestra en la figura 3.1 las partículas se crean en la cara superior del prisma donde mediante el método *Factory Plane* definido en EDEM, la posición de aparición se hace siguiendo un orden aleatorio lo que posibilita el llenado de cada parte del cuerpo del prisma de forma regular y sin definir patrones, las partículas caen por efecto de la gravedad y al hacer contacto se activan las fuerzas de cohesión definidas en el modelo.

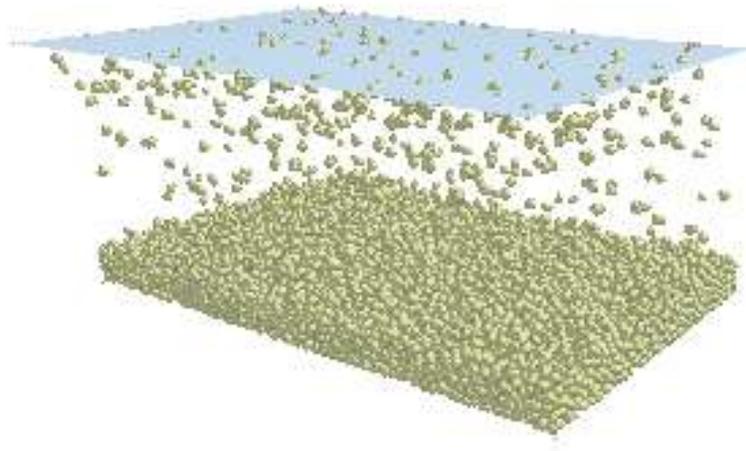


Figura 3.1. Generación de las partículas de suelo.

La figura 3.2 muestra la distribución de la Energía Cinética durante el procedimiento de llenado, en la que se aprecia el incremento de la energía durante la caída libre de las partículas hasta alcanzar los valores mínimos de equilibrio en reposo.

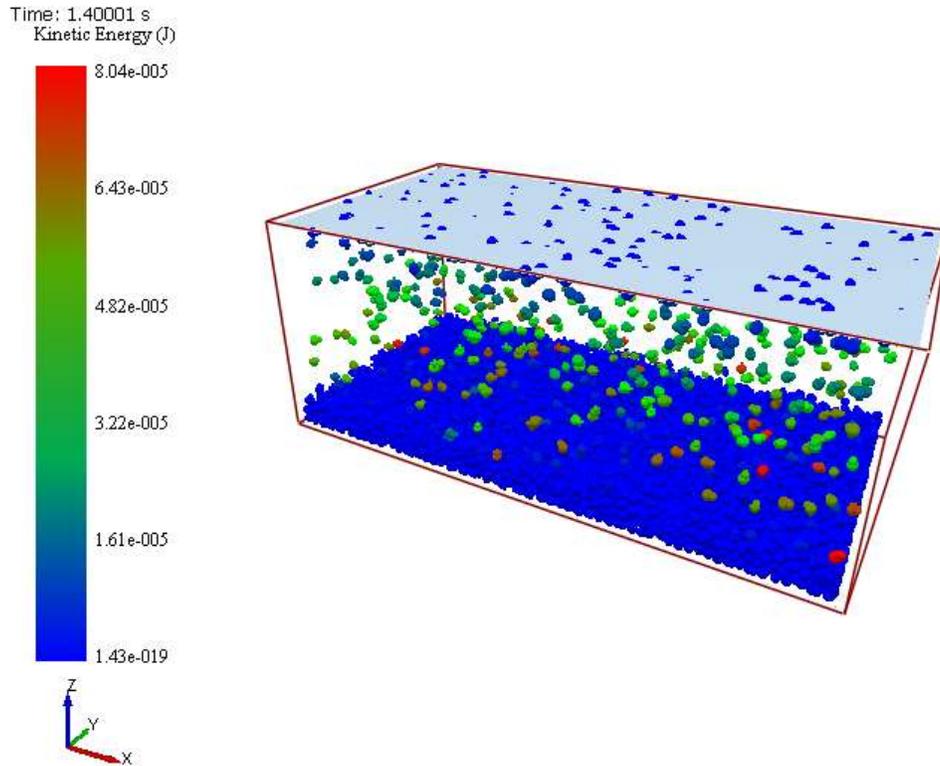


Figura 3.2. Energía cinética durante la caída de las partículas de suelo.

3.2 Análisis de la rigidez de la herramienta

Para establecer el diseño del apero empleado se realizaron los correspondientes análisis de resistencia empleando para ello el método de los Elementos Finitos. Como se muestra en la siguiente figura 3.3. Se establecieron restricciones en la base de la herramienta y en la superficie lateral de la misma las que corresponden a la fijación de esta al bastidor del arado. Las fuerzas por su parte se aplicaron en la superficie frontal a lo largo del filo donde tiene lugar la interacción del suelo con la misma.

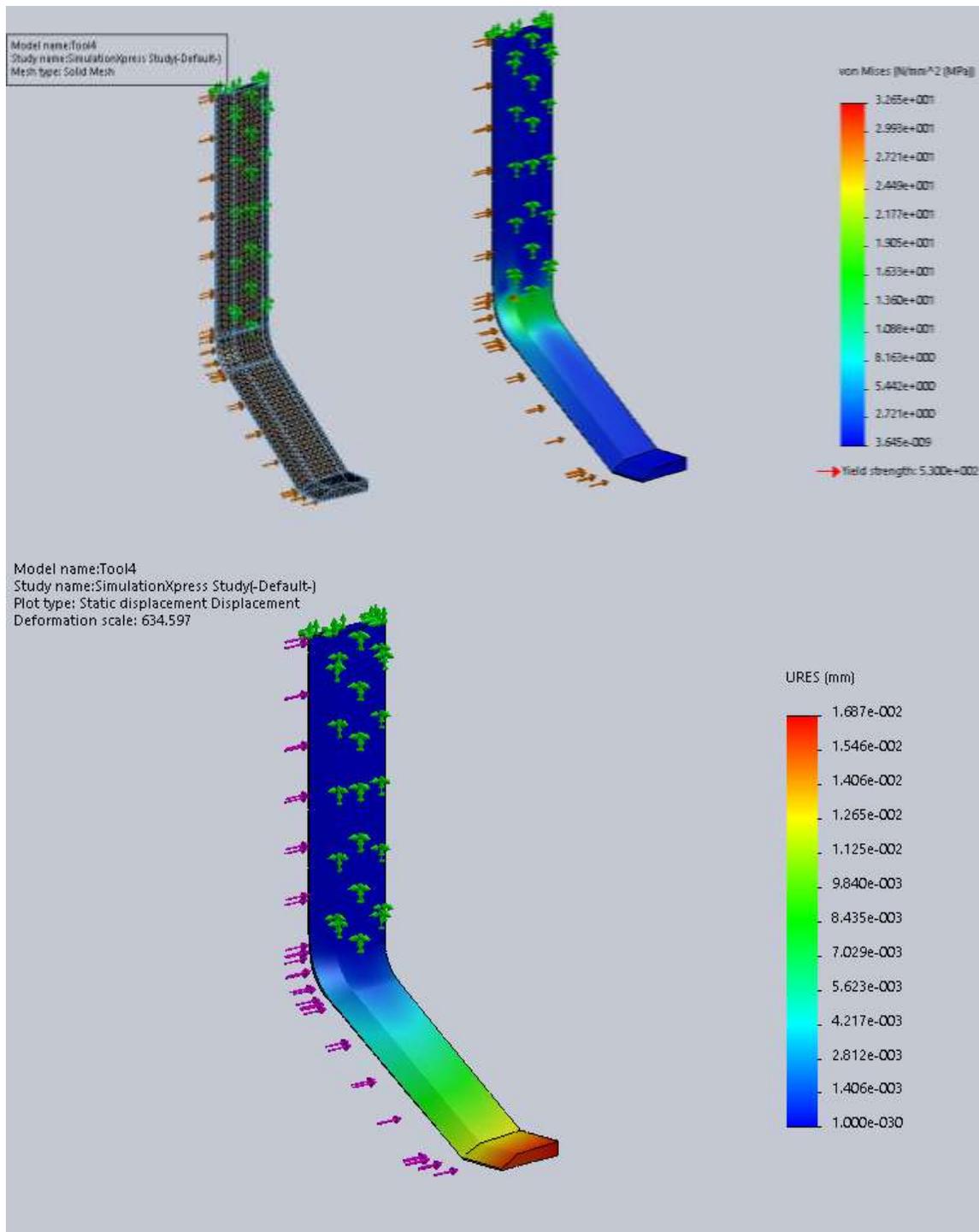


Figura 3.3. Estudio del apero por el Método de Elementos Finitos.

Como se muestra en los resultados la distribución de esfuerzos Von Mises los valores máximos se encuentran en la superficie curva del implemento, sin embargo estas son considerablemente menores al coeficiente de seguridad del material, las demás secciones no presentan valores significativos.

El análisis del desplazamiento mostró valores solo de 0.01 mm correspondientes a la punta de la herramienta, dicha deformación decrece de forma uniforme a medida que se acerca a la fijación. De tal modo se considera que el diseño propuesto cumple con las exigencias estructurales a partir del empleo del material y las sollicitaciones de la interacción con el suelo.

3.3 Análisis del patrón de Velocidad de las partículas

Como se muestra en la Figura 3.4 las partículas de suelo se mueven en correspondencia a las principales zonas de presión dentro del bloque, producto al impacto y el arrastre que provoca la herramienta las mismas aumentan su velocidad hasta valores máximos de 7mm/s para las que están directamente en contacto con el apero, se muestra además que un considerable número de estas se desplazan sobre el suelo lo que denota el considerable incremento de la energía específica.

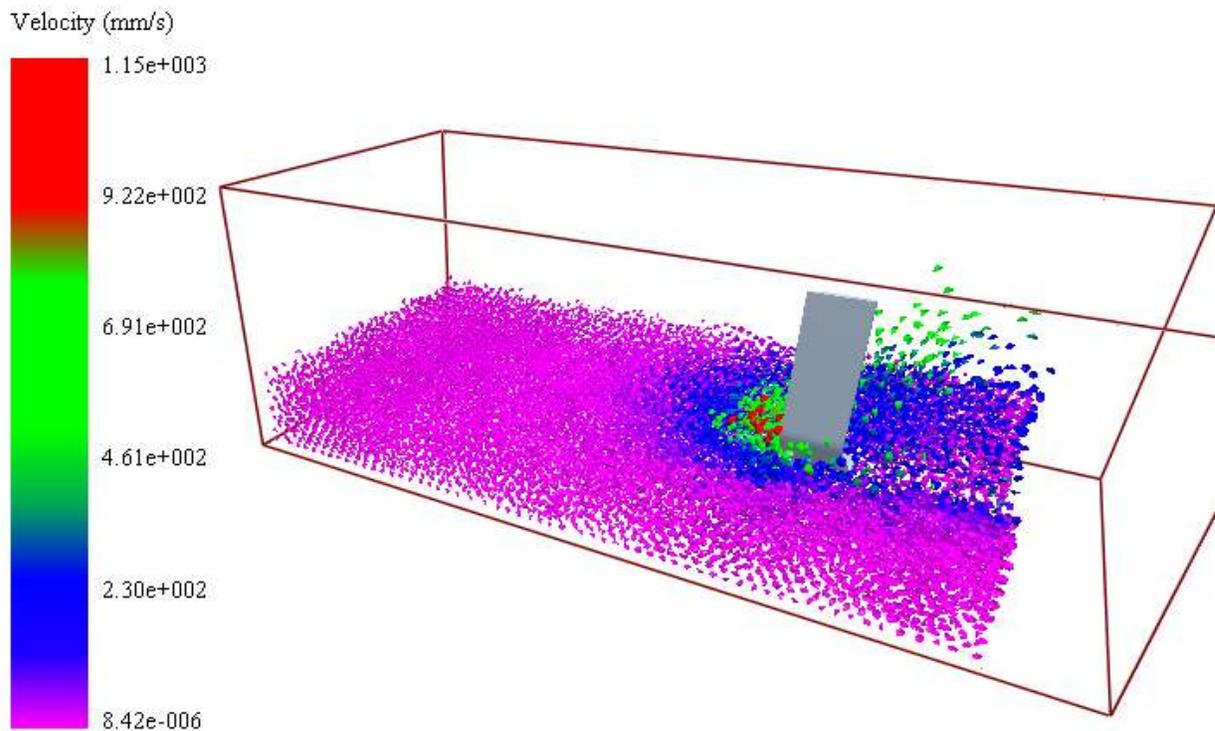


Figura 3.4. Análisis de la velocidad de las partículas.

3.4 Resultados de la velocidad y la fuerza de tiro.

Como se conoce, la componente principal durante las operaciones de labranza es la fuerza de tiro la cual actúa en sentido contrario al movimiento del apero, mediante la simulación es posible la determinación de la misma y su variación en función de las condiciones del suelo así como el diseño del implemento. En el análisis de los casos de estudio se valoran además componentes como la presión sobre el suelo y la energía del proceso. Como se muestra en la Figura 3.5 la fuerza de tiro incrementa a partir del contacto de la herramienta con el bloque de suelo, la oscilación de los valores responde a los diferentes contactos que se establecen durante el proceso. El valor promedio (línea azul) de la fuerza en este sentido define la demanda traccional del implemento y está relacionada directamente a la cohesión del suelo.



Figura 3.5 Grafico de fuerza total contra el tiempo.

Los valores que se obtuvieron de las componentes transversales (Figura 3.6) muestra el equilibrio tensional que predomina en ambos sentidos del implemento.

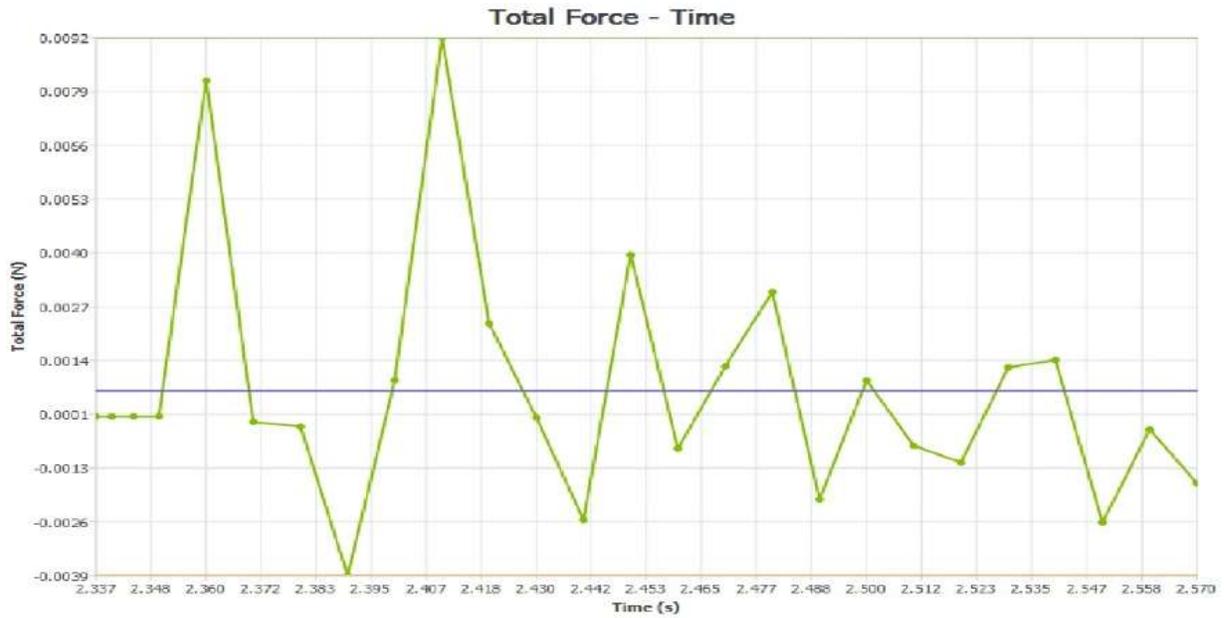


Figura 3.6. Gráfico de fuerza total.

3.5 Análisis de la variación de la energía cinética

La energía cinética tanto de las partículas de suelo como del implemento varía considerablemente durante todo el proceso en función de la fuerza y la velocidad del proceso.

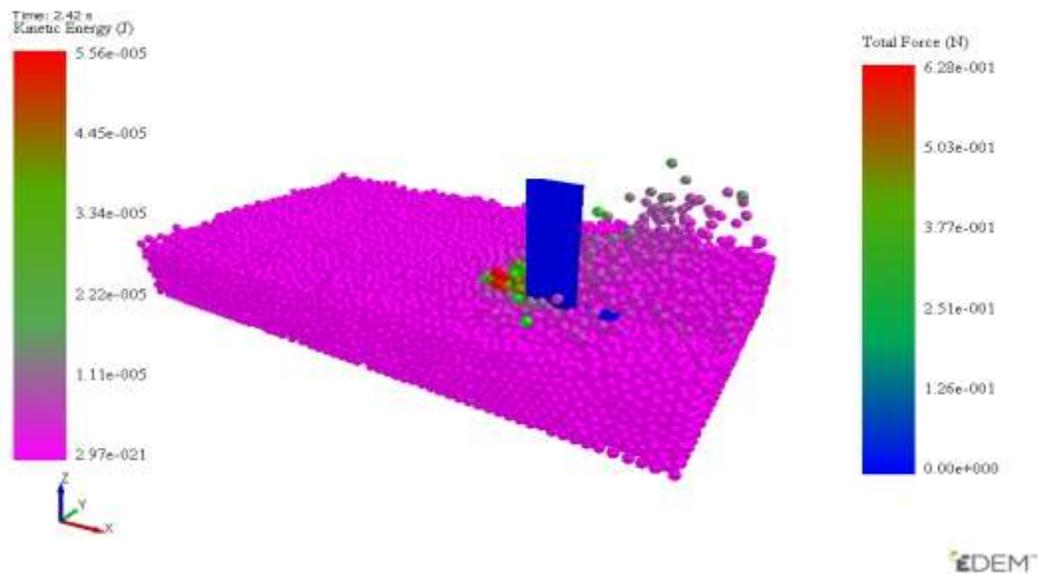


Figura 3.7. Energía cinética durante el corte.

La representación de las mismas muestra las zonas con mayores demandas energéticas lográndose establecer la dinámica del proceso. Como se presenta a continuación en la figura 3.7.

La distribución de la Energía cinética a nivel de partículas se muestra en la figura 3.8, mostrando los mayores valores en la zona de corte tanto para las partículas como para el implemento.

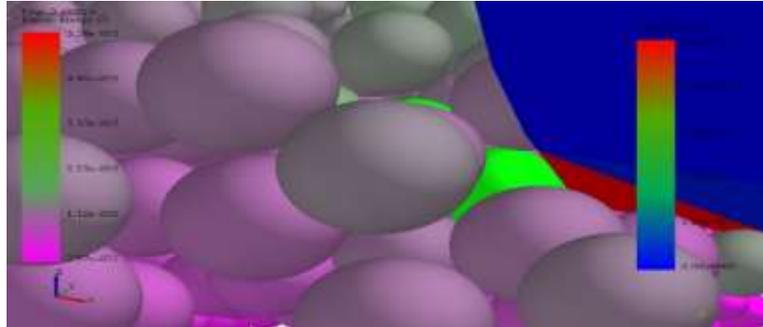


Figura 3.8. Distribución de la Energía cinética en la zona de corte.

Detalle entre la zona de contacto entre la herramienta y las partículas donde se muestra de color rojo la fuerza que ejerce la cuchilla al cortar el suelo evidenciando que las partículas más cercanas a la zona de contacto son las más afectadas por la misma.

3.6 Influencia de las dimensiones de las partículas.

Para la determinación de la influencia en la variación de la fuerza de tiro durante la simulación de la interacción del suelo con la herramienta de labranza se realizó un experimento donde se evaluaron tres radios de partículas $r = 5, 7$ y 9 mm, se confirmó además un bloque de suelo de $40 \times 50 \times 130$ mm (Figura 3.9).

Las curvas obtenidas de fuerza versus desplazamiento se muestran en la Figura 3.10. Como se puede apreciar la fluctuación de las fuerza resultante incrementa con el radio sin embargo la magnitud de las mismas no sufre cambios significativos.

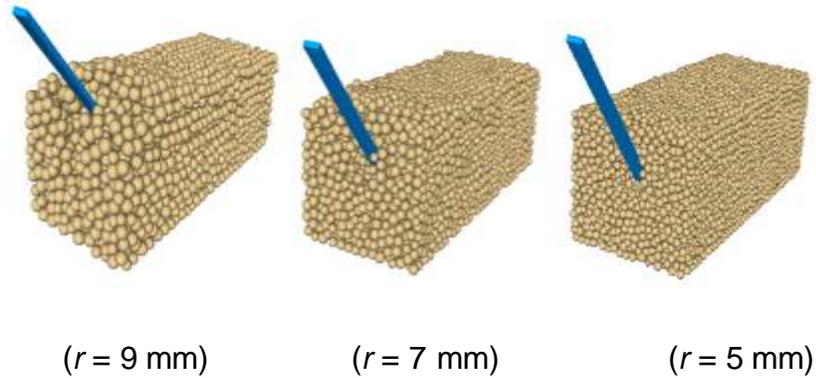


Figura 3.9. Bloques de Suelo a diferentes radios de partículas.

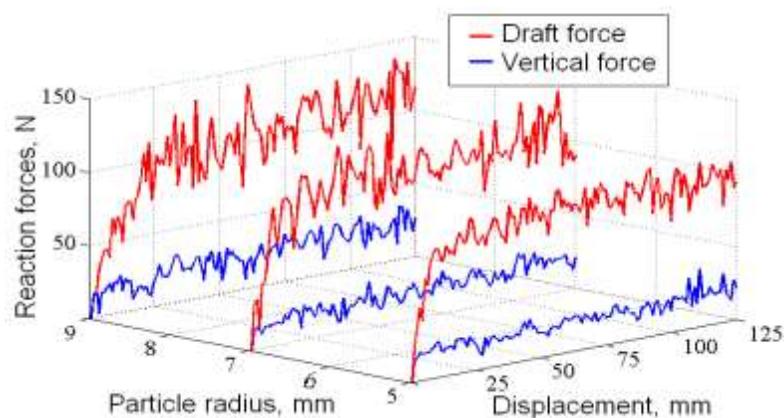


Figura 3.10. Curvas de fuerzas durante la interacción suelo-apero simple.

El resultado que se muestra en la figura 3.10 se aprecia que la variación del radio no ejerce una influencia en la magnitud promedio de la fuerza de tiro, pero si se aprecia una marcada alteración en la desviación estándar lo que amplifica el efecto oscilatorio de la fuerza.

3.7 Verificación analítica.

Los parámetros del modelo fueron trasladados a una secuencia de la simulación de la interacción del suelo con la herramienta simple y a través de la ecuación se determinó el valor de la fuerza de tiro como se muestra en la Figura 3.11.

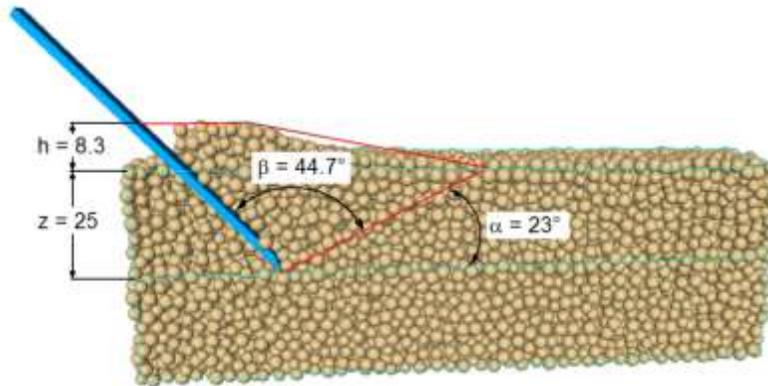


Figura 3.11. Parámetros del modelo empíricos.

Los resultados obtenidos mostraron que el mediante el modelo Perumpral-Grisso-Desai la fuerza calculada es de 88.2 N para un valor de 97.3 N obtenido durante la simulación estos valores muestran una diferencia de un 10.3% lo que se es aceptable considerando la constante variación de los ángulos que tiene lugar debido al movimiento de las partículas durante la simulación así como la variación de la altura del suelo frente a la herramienta. Por otra parte los resultados de los modelos empíricos se enmarcan de un 60 a 80 % de precisión. (Shen and Kushwaha, 1998). Es de considerar además que los modelos DEM muestran cierta tendencia a sobre estimar los valores de las fuerzas. (Obermayr et al., 2011).

CONCLUSIONES

1. Se realizó el análisis de la resistencia del implemento de labranza tipo paratill demostrando que el mismo cuenta con la resistencia adecuada y un elevado coeficiente de seguridad.
2. Se logra modelar el sistema implemento-suelo empleando el método de los elementos discretos para un modelo simplificado con partículas discretizadas en configuraciones de radio 2; 0.2 - 2 mm. Se creó además una partícula de la unión de esferas de radio 2 y 1.5 a una distancia de 1.3 mm.
3. Mediante la simulación del movimiento del paratill a través del bloque de suelo se exponen los patrones de movimiento y deformación de las partículas y el bloque de suelo así como los principales esfuerzos a que está sometida la herramienta de labranza.
4. Se analizó la influencia del diámetro de las partículas mostrando que a medida que se disminuye el radio de las partículas de suelo mejora la precisión de los resultados.
5. La verificación analítica del modelo propuesto se verificó empleando las ecuaciones de Perumpral-Grisso-Desai corroborando la capacidad del modelo para la simulación.

RECOMENDACIONES

1. Modelar la labranza empleando diferentes implementos de labranza.
2. Realizar la validación del modelo propuesto en condiciones de laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASAF, Z., RUBINSTEIN, D. & SHMULEVICH, I. 2007. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, 92, 227-242.
- BARBER, R. G., ORELLANA, M., NAVARRO, F., DIAZ, O. & SORUCO, M. A. 1996. Effects of conservation and conventional tillage systems after land clearing on soil properties and crop yield in Santa Cruz, Bolivia. *Soil and Tillage Research*, 38, 133-152.
- BIGHAM & BROTHERS CO. 2008 *Subsoilers: Shear Bolt Paratill* [Online]. Bigham Brothers, Inc. Available: <http://www.bighambrothers.com/ptillshr.htm> [Accessed 10/3/2008].
- CAI, Y., ZHANG, L. & QIAN, J. 2017. Discrete Element Method Simulation and Experimental Verification on Roller Compaction of Fine Sand. *Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University*, 45, 527-532.
- CARTER, M. R. & DANIEL, H. 2005. CONSERVATION TILLAGE. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Oxford: Elsevier.
- CHIVENGE, P. P., MURWIRA, H. K., GILLER, K. E., MAPFUMO, P. & SIX, J. 2007. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils. *Soil and Tillage Research*, 94, 328-337.
- COETZEE, C. J. 2017. Review: Calibration of the discrete element method. *Powder Technology*, 310, 104-142.
- COULOMB, C. A. 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture. *Mem. Acad. Roy. des Sciences, Paris*, 3, p.38.
- GABIRI, G., DIEKKRÜGER, B., LEEMHUIS, C., BURGHOF, S., NÄSCHEN, K., ASIIMWE, I. & BAMUTAZE, Y. 2018. Determining hydrological regimes in an agriculturally used tropical inland valley wetland in Central Uganda using soil

- moisture, groundwater, and digital elevation data. *Hydrological Processes*, 32, 349-362.
- HANG, C., HUANG, Y. & ZHU, R. 2017. Analysis of the movement behaviour of soil between subsoilers based on the discrete element method. *Journal of Terramechanics*, 74, 35-43.
- HERRERA, M., IGLESIAS, C., GONZALEZ, O., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. L. 2008. 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, 31-37.
- HETTARATCHI, D. R. P. & REECE, A. R. 1967. Simetrical three-dimensional soil failure. *Journal of Terramechanics*, 4, 45-67.
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V. 1969. *Soil Mechanics*, Massachusetts Institute of Technology, New Yorks, JOHN WILLEY & SONS.
- LIAO, C.-L., CHANG, T.-P., YOUNG, D.-H. & CHANG, C. S. 1997. Stress-strain relationship for granular materials based on the hypothesis of best fit. *International Journal of Solids and Structures*, 34, 4087-4100.
- MCKYES, E. & ALI, O. S. 1977. The cutting of soil by narrow blades. *Journal of Terramechanics*, 14, 43-58.
- MOUSAVIRAAD, M., TEKESTE, M. & ROSENTRATER, K. Discrete element method (DEM) simulation of corn grain flow in commercial screw auger. 2016. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- OBERMAYR, M., DRESSLER, K., VRETTOS, C. & EBERHARD, P. 2011. Prediction of draft forces in cohesionless soil with the Discrete Element Method. *Journal of Terramechanics*, 48, 47-58.
- OÑATE, E. & ROJEK, J. 2004. Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* , 193 3087-3128.
- PAYNE, P. C. J. 1956. The relationship between the mechanical properties of soil and the performance of simple cultivation implements. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4, 312-325.

- PENG, C., ZHOU, M. & WU, W. 2017. Large deformation modeling of soil-machine interaction in clay. *In: DYSKIN, A., PAPAMICHOS, E., PAPANASTASIOU, P. & PASTERNAK, E. (eds.). Springer Verlag.*
- PERUMPRAL, J. V., GRISSO, R. D. & DESAI, C. S. 1983. A soil-tool model based on limit equilibrium analysis. *Transactions of the ASABE*, 26, 991-996.
- S. H. LIU, D. A. S. 2002. Simulating the collapse of unsaturated soil by DEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26, 633-646.
- SHEN, J. & KUSHWAHA, R. L. (eds.) 1998. *Soil-Machine interactions: A finite element perspective.*, New York: Marcel Dekker, Inc.
- SHMULEVICH., ASAF, Z. & RUBINSTEIN, D. 2006. *Interaction between Soil and a Wide Cutting Blade Using the Discrete Element Method.* Technion - Israel Institute of Technology.
- SUN, J., WANG, Y., MA, Y., TONG, J. & ZHANG, Z. 2018. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth >40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics. *Advances in Engineering Software*, 119, 30-37.
- SWICK, W. C. & PERUMPRAL, J. V. 1988. A model for predicting soil-tool interaction. *Journal of Terramechanics*, 25, 43-56.
- TADESSE, D. 2004. *Evaluating DEM with FEM perspectives of load soil-interaction.* Philosophical Doctor, Wageningen University.
- THALLAK, G., SITHARAM, S., DINESH, V. & SHIMIZU, N. 2002. Micromechanical modelling of monotonic drained and undrained shear behaviour of granular media using three-dimensional DEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26, 1167-1189.
- TJISKENS, E., RAMON, H. & BAERDEMAEKER, J. D. 2003. Discrete element modelling for process simulation in agriculture. *Journal of Sound and Vibration* 266 493-514.
- UCGUL, M., SAUNDERS, C. & FIELKE, J. M. Particle and geometry scaling of the hysteretic spring/linear cohesion contact model for discrete element modelling of soiltool simulation. 2017. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

-
- VANNIER, E., TACONET, O., DUSSÉAUX, R. & DARBOUX, F. 2018. A study of clod evolution in simulated rain on the basis of digital elevation models. *Catena*, 160, 212-221.
- YIN, S., ZHU, Z., WANG, L., LIU, B., XIE, Y., WANG, G. & LI, Y. 2018. Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 1695-1712.
- ZHENG, K., HE, J., LI, H., ZHAO, H., HU, H. & LIU, W. 2017. Design and Experiment of Combined Tillage Implement of Reverse-rotary and Subsoiling. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 48, 61-71.