

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TRABAJO DE DIPLOMA

SIMULACIÓN DE LA INTERACCIÓN SUELO-APERO MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

Tesis para aspirar al título de Ingeniero Agrícola

Autor: David Elago TN
Tutor: MSc. Elvis López Bravo

Santa Clara 2012

Cuba

DEDICATORIA

A mi mamá y mi papá Monica Elago y Petrus Elago por ser los mejores padres, por su motivación, consejo, apoyo, amor y la confianza que han tenido en mí.

A mis hermanas y hermanos: Frieda Elago, Albertina Elago, Elina Elago, Petrus Elago por su amor, respeto, consejo, dedicación y consagración.

A mis sobrinas, sobrinos, primos y primas por su amor y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Al no encontrar las frases más adecuadas para agradecer a mi tutor Elvis López Bravo, solo se me ocurre decir ¡Gracias por tu dedicación, confianza y valor!

Agradezco a todos los profesores de la facultad y de departamento de Ingeniería Agrícola: Acebedo, Miguel Herrera, Miguel Orozco, Sotero, Maikel, Elvis, Carlos, Ariel, Joan y todos los demás que me han ayudado desde el primer año hasta hoy con sus orientaciones, consejos y enseñanzas.

Igualmente de forma especial agradezco a mis compañeros de aula: Michel, Lázaro, yoadry, Bravo, Lester, Janser, Duniel, y Komuni y a todos los del cuarto año de Ingeniería Agrícola que han compartido conmigo durante estos años en el UCLV. No quiero olvidar a Edmir Betancourt y su esposa a los que le agradezco mucho sus consejos, dedicación, están todos en mi corazón y nunca los olvidaré.

De igual forma sentiré eternamente un agradecimiento a mis amigos Linus Nalukaku, Theofilus Nuugulu, fillemon Namufa por ser los mejores amigos, los quiero mucho con mi corazón y gracias por sus consejos, nunca los olvidaré.

También quiero expresar mi más sentido agradecimiento a mis amigas en la UCLV, Leanna Wallace, Marinice Paul, Emilíne Bapoh, Safia Loita, Joelle Thomas, Dhamelta Maxwell, Tercy Joseph, Neusa Spinola y Luani Yanira Dianllyis. María Irene porque tengo que olvidarte mi amor, te quiero mucho y gracias por toda mi vida.

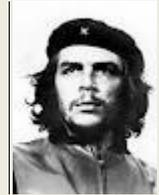
De igual forma me sentiré eternamente agradecido de todos mis compañeros: Paulus Shihepo, Samuel Kalonda Pombili Sheehama Anacleto Alogo, Ignacio Trillo, Souleymane Coulibaly, Nouredine Baybiegue, Mohamed Loita, Hurut, France, Israel, Simon, Loide, Talishi,

Delfina, Tonata, Pohamba, Silas y Dox que me han dado motivación y consejo.

Finalmente agradezco a todos los que de una forma u otra han ayudado a la realización de este trabajo.

PENSAMIENTO

“En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y dar más, que digan mejor ahora que mañana”.



Ché.

RESUMEN

El siguiente trabajo muestra la implementación de un modelo numérico para la simulación de la interacción del suelo con la herramienta de labranza. Para ello se emplea el método de elementos discretos el cual posibilita definir los contactos entre los elementos del suelo y el apero considerando el medio discontinuo. El modelo se programa en el software DEMeter++ y se basa en los criterios de falla de Mohr-Coulomb. En el mismo se determinan además de las fuerzas normales y tangenciales la fuerza de fricción y la cohesión. La determinación de los parámetros macros del modelo se realiza a partir de ensayos de compresión triaxial y corte directo modificado mediante los cuales se calculan el módulo de Young, la cohesión, la adherencia, la fricción interna y la fricción externa del suelo. La relación entre las propiedades micros y macros del modelo se realiza mediante un proceso de calibración donde se obtienen las relaciones entre ambos parámetros. La verificación de las magnitudes de las fuerzas de tiro obtenidas en condiciones diferentes del suelo son consideradas adecuadas en comparación con las obtenidas en las mediciones efectuadas en el canal de suelo. La simulación de una operación de cultivo brindó criterios acerca de la distribución de las tensiones en el suelo así como la variabilidad de la densidad según la posición del apero.

Palabras claves: Labranza, Modelo, Fuerza de tiro, Fricción, Canal de suelo, Densidad.

ABSTRACT

The following work it shows the implementation of a numerical model for the simulation of the interaction of the soil with the tool of cultivation. For it which uses the method of discrete elements that makes it possible to defining the contacts among the elements of the soil and the tool considering the discontinuous midway. The model programs in the software DEMeter + + itself and it is based on the fault of Mohr-Coulomb's criteria. In the same software they determine in addition normal and tangential force of friction and the cohesion. The determination of parameters accomplishes macros of the model itself as from test of triaxial compression and direct court modified intervening which calculate Young's module, the cohesion, the adherence, the internal friction and the external friction of the soil themselves. The relation among properties micros and a process of calibration where they obtain the relations among both parameters accomplishes macros of the model itself intervening. They are considered as verification of the magnitudes force of throw obtained in different conditions of the soil adequate as compared with the obtained in measurements made of the soil bin. The simulation of an operation of cultivation offered criteria about the distribution of tensions in the soil as well as the variability of density according to the position of the tool.

Key words: Cultivation, Model, Force of throw, Friction, Soil bin, Density.

Índice

<i>INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>Capítulo 1</i>	6
1.1 <i>Métodos empleados para la modelación del suelo.</i>	6
1.2 <i>Modelos para simular la interacción del suelo.</i>	7
1.3 <i>Aplicación del método de partículas en modelos de suelo.</i>	8
1.4 <i>Detalles constructivos y uso de los canales de suelo.</i>	9
1.5 <i>Concepción general del método de elementos discretos</i>	11
1.6 <i>Criterios sobre la calibración de los parámetros DEM.</i>	14
<i>Capítulo 2</i>	16
2.1 <i>Propiedades físicas del suelo en estudio.</i>	16
2.2 <i>Metodología del ensayo de compresión triaxial.</i>	17
2.3 <i>Metodología para el ensayo de corte directo modificado.</i>	20
2.4 <i>Constitución del Modelo de Elementos Discretos.</i>	22
2.5 <i>Metodología para el Ensayos en el canal de suelo.</i>	25
2.2.1 <i>Modelo geométrico para el ensayo de corte directo.</i>	26
2.2.2 <i>Conformación de la muestra por medio de simulación.</i>	27
<i>Capítulo 3</i>	28
3.1 <i>Comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo</i>	29
3.1.1 <i>Curva de tensión-deformación</i>	28
3.1.2 <i>Resistencia cortante del suelo</i>	29
3.1.4 <i>Comportamiento de la cohesión del suelo.</i>	32
3.1.5 <i>Comportamiento de adhesión del suelo.</i>	33
3.1.6 <i>Fricción interna y externa del suelo.</i>	34
3.2. <i>Resultados de los experimentos virtuales.</i>	36
3.2.1 <i>Influencia de los tamaños de las partículas.</i>	36
3.2.2 <i>Relación de los parámetros de macro y micro fricción.</i>	38

3.2.3 Comparación entre los resultados del canal de suelo y la simulación.....	40
3.2.4 Simulación de una operación de labranza.	41
3.2.5 Variación de la densidad del suelo y tensiones en el suelo.....	42
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES	46
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	47

INTRODUCCIÓN

Los estudios encaminados a la predicción de la fuerza de tiro durante la labranza, la distribución del tamaño de los terrones así como los daños por la erosión han sido algunos de las aplicaciones que han tenido como objeto las técnicas de simulación numérica. Los datos de las mediciones de de campo y los resultados experimentales obtenidos en los laboratorio se combinan en modelos matemáticos apoyado por el incremento en los recursos informáticos cada vez más precisos, y rápidos han posibilitado realizar pronósticos más extendidos y certeros. Técnicas computacionales como el métodos de elementos finitos (FEM), los métodos de elementos discretos (DEM), las redes neuronales artificiales (RNA) y dinámica de fluido computacional (CFD) son usados indistintamente con diferentes propósitos en la simulación del comportamiento del suelo (Abo-Elnor, Hamilton et al. 2004).

La geometría de la herramienta de labranza es un factor decisivo en el sistema que integra el manejo y la conservación del suelo. Los implementos deben tener la cualidad de mantener los residuos de cultivos en la superficie del suelo, mantener la materia orgánica dentro de la capa superior cultivable y además no invertir el prisma de suelo. Siguiendo los requisitos anteriores las herramientas para la labranza conservacionista pueden prevenir la degradación del suelo por la erosión así como la liberación del carbono y la compactación. La labranza mínima o labranza de sitio específico y la siembra directa son las principales técnicas de labranza de conservación. El propósito de estos procedimientos es reducir la labranza dirigida a reducir operaciones, tomando ventajas económicas y medio-ambientales. Como consecuencia la calidad del suelo mejora, se utiliza menos energía y el tiempo para las operaciones de labranza se reduce al mínimo (Ahmari and Ahmadi 2009).

Las investigaciones sobre la optimización de los aperos se han centrado en la modificación geométrica que han sido llevadas a cabo en arados de vertedera fundamentalmente, obteniendo una reducción significativa de la fuerza de tracción necesaria para mover la herramienta en diferentes condiciones de suelo (Asaf, Rubinstein et al. 2007).

Otros trabajos han estado encaminados a la evaluación de los aperos en ecosistema tomando varias formas de herramientas y velocidades de operaciones para medir la demanda de fuerzas así como el impacto medioambiental del, los diseños más eficientes fueron evaluados a nivel de finca e introducido a la producción con las modificaciones con mejores resultados (Cundall and Strack 1979).

La predicción de la fuerza de tiro mediante el método de ANN de tres diseños de arados de vertedera fue probada en suelos arenosos en diferentes rangos de velocidades y condiciones de suelo, el experimento mostró una buena correlación de los valores calculados a partir de las ecuaciones de predicción y los resultados de la simulación(Cundall and Strack 1979). Por otra parte teniendo en cuenta el suelo como un medio continuo, varios modelos constitutivos se han creado y mejorado.

Por otra parte el modelo Cam-Clay Modificado se desarrolló para obtener el efecto de la deformación del suelo siendo este dependiente del tiempo. Este modelo incluye la anisotropía y la fluencia que como resultado afectó la redirección de los esfuerzos principales. La confirmación de la simulación se realizó mediante un ensayo de corte sin drenaje y con el ensayo de fluencia (Mouazen, Smolders et al. 2007).El criterio de falla de Von-Mises para modelos perfectamente plásticos se incorpora el método de Lagrange, donde se incluye la tensión de ablandamiento y la tasa de dependencia. Los autores presentan un modelo numérico para la resistencia a la penetración de cono en un suelo arcilloso. La influencia del índice de rigidez y la anisotropía así como la rugosidad se correlacionaron con la teoría de la expansión de la cavidad mostrando resultados adecuados(Godwin 2007). Varios estudios mediante método FEM se han realizado empleando simples y complejas geometrías de aperos con el objetivo de determinar el efecto de la velocidad de corte y los principales ángulos de trabajo (Hentz, Daudeville et al. 2004).

Los modelos en tres dimensiones en la implementación de los métodos DEM suponen un importante paso para la resolución de las fuerzas en los contactos entre cuerpos de geometría arbitraria, el desarrollo de un algoritmo para detectar contactos de forma rápida y clasificar los mismos ha permitido el uso de los métodos de partículas en ordenadores personales (Roul, Raheman et al. 2009). Este desarrollo ha sido propiciado además por una metodologías para la obtención de los parámetros micro-mecánica de los modelos la cual se basa en las propiedades obtenidas mediante ensayos de laboratorios y una calibración final que incluye la optimización de los datos estadísticos con el fin de minimizar las diferencias entre los resultados reales y la simulación. (Sahu and Raheman 2006).

Dentro del los modelos de partículas los modelos cohesivos han sido desarrollados teniendo en cuenta la influencia de las fuerzas de fricción y la cohesión, las mismas son determinadas a partir del ángulo de rozamiento intergranular y la fuerza cohesiva de los enlaces entre las partículas, experimentos triaxiales para validar y calibrar los parámetros del modelo se han llevado a cabo, este tipo de simulación se ha utilizando en la reproducción de las fallas del suelo sometido a derrumbes(Sharda, Singh et al. 1994).

Por su parte la simulación de la interacción suelo-apero se ha realizado mediante modelos que han utilizando la herramientas simples en suelos con alta deformación plástica, las partículas del suelo en estos modelos han sido obtenidas por la combinación de dos disco entre los cuales actúa la fuerza de cohesión, el comportamiento del flujo del suelo así como los valores de tensión en la herramienta estuvo en concordancia con los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio (Shmulevich, Asaf et al. 2007).

El medio discreto de partículas se aplica ampliamente en la simulación de procesos dinámicos en el área de las construcciones civiles y la ingeniería agrícola. La relación entre las partículas en los modelos DEM tiene una gran semejanza con la interacción mecánica de los granos del suelo en condiciones reales. El método posibilita la implementación de varios modelos de contacto los que pueden ser incluidos en función de cómo cada elemento interactúa con cada uno de los otros, estos modelos de contactos rigen el comportamiento del medio en general, los parámetros de las propiedades micro para el modelo se puede deducir de las propiedades mecánico del suelo. La simulación numérica brinda un pronóstico preciso sobre el comportamiento del suelo así como la demanda de la fuerza de tiro en las operaciones de labranza.

Problema científico

Obtener un modelo numérico que logre predecir con adecuada correspondencia el comportamiento del suelo durante la interacción con la herramienta de labranza así como la demanda de fuerza necesaria para operaciones de labranza.

Objeto de estudio

El objeto de estudio son los modelos de contactos que se establecen entre las partículas de suelo y su resolución a través de métodos numéricos que brinden una adecuada correspondencia con los resultados de los ensayos mecánicos.

Hipótesis

Mediante el método de elementos discretos es posible implementar un modelo mediante el cual sea posible obtener un pronóstico adecuado de la magnitud de las fuerzas de tiro y el comportamiento del suelo durante la interacción con la herramienta de corte.

Objetivo General

El objetivo del presente estudio es la simulación numérica de la interacción suelo-herramienta de labranza para la predicción de las fuerzas de tiro y el comportamiento de las partículas del suelo durante la labranza, utilizando el Método de los Elementos Discretos.

Objetivos Específicos

1. Determinar las propiedades macro-mecánicas de un suelo cohesivo mediante la realización de los ensayos de corte directo y de compresión triaxial.
2. Fundamentar un modelo en Elementos Discretos que incluya las fuerzas de cohesión y fricción dentro del esquema de la resolución de contactos entre las partículas.
3. Realizar la medición de las fuerzas en sentido horizontal y vertical en un implemento de labranza en diferentes condiciones de humedad y densidad del suelo en el canal de prueba.

4. Construir un modelo virtual del suelo y la herramienta de labranza mediante el método de partículas que responda a las particularidades de un los suelos cohesivos y que permita pronosticar los esfuerzos durante operaciones de labranza.

Capítulo 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Métodos empleados para la modelación del suelo.

En el área de la simulación y la geo-estadísticas se han desarrollado múltiples métodos para predecir el comportamiento del suelo en tiempo real, dentro de los más importantes se encuentra el que determina mediante la medición de la reacción de las fuerzas de labranza en la herramientas de corte el estado tensión del suelo, la introducción de este procedimiento logró mayor precisión sobre los métodos tradicionales (penetrómetro Saeys et al, 2004;. Mouazen y Ramón, 2006; Adamchuk et al., 2004).

Por otro lado, la simulación del suelo se ha convertido en una poderosa herramienta para aumentar la calidad del diseño de las herramientas de labranza, sin embargo, los pronósticos sobre el comportamiento del suelo pueden resultar erróneos si no se consideran con adecuado rigor los fenómenos que ocurren en las interfaces de contacto suelo-suelo y suelo-apero.

Los modelos donde prevalece la fricción, los elastoplásticos, los plástico así como los viscosos requieren un grupo considerable de parámetros del suelo que se determinan sobre la base de ensayos de laboratorio como son: módulo de elasticidad, coeficiente de poisson, densidad del suelo, fricción interna y cohesión del suelo.

Los valores adecuados de todas estas propiedades son las que definen el pronóstico acertado de la deformación del suelo y la fuerza de tiro. La simulación del comportamiento del suelo mediante el método de elementos finito ha sido abordado por autores tales como: (Abo-Elnor et al, 2004; Huang et al, 2004; Mootaz et al, 2003). Asimismo los métodos de elementos discretos han sido empleados en los trabajos relacionados con la deformación del suelo por autores tales como: (Asaf et al, 2007; Shmulevich et al, 2007; Coetzee y Els, 2009^a; Perón et al, 2009) .Además de reproducir los experimentos de laboratorio, estas simulaciones mostraron la precisión en términos de fuerza y desplazamiento y la relación general entre las propiedades mecánicas del suelo con las condición físicas del mismo.

Uno de los modelos predictivos desarrollado básicamente para reproducir el comportamiento de la arcilla es el conocido modelo Cam-clay, mediante el cual se obtuvieron alentadores resultados

al respecto. Sin embargo, sólo es adecuado para simular el comportamiento de las arcilla con cementación baja. Nuevas evoluciones del modelo Cam-clay proponen añadir nuevos parámetros teniendo en cuenta el efecto de la estructura del suelo, proporcionando resultados satisfactorios en ensayos de compresión y cizallamiento (Liu y Carter, 2002).

1.2 Modelos para simular la interacción del suelo.

Los resultados de las investigaciones encaminadas a reproducir la dinámica de la interacción del suelo con las herramientas de labranza muestran en los trabajos de (Mouazen, 2002) que el incremento de la fricción del suelo y la cohesión es proporsional al incremento de la densidad del suelo, un comportamiento similar tienen las propiedades elásticas, como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

Las pruebas de fractura simple de los metales se adaptaron para determinar la fragilidad de los suelos agrícolas, las muestras de arena, arcilla y limo muestran un incremento en la fuerza de fractura para diferentes densidades de suelo. Mediante este método se intentó reproducir la acción de los aperos en el corte del suelo (Aluko y Chandler, 2006).

Un método para medir la resistencia a tracción en las muestras de suelo preparadas directamente en el laboratorio usando suelo arenoso, se llevaron a cabo en tres experimentos con contenidos de humedad diferente y densidades, se encontraron que el secado del suelo después de densificación puede mejorar la resistencia del suelo independiente a la trayectoria de la compactación (Ibarra et al., 2005).

La propuesta de ecuaciones empíricas para predecir el comportamiento del suelo tomando en cuenta la cantidad de algunos de sus constituyentes ha sido objeto de investigación constante. Con este objetivo (Dexter et al., 2007) propone una ecuación para predecir la resistencia a la penetración del suelo en función de la textura, la densidad y el contenido de agua y se compararon los resultados con otras ecuaciones mostrando una mayor concordancia con respecto a los datos de laboratorio, la predicción incluyen también el grado de compactación y la contribución de la presión de poros sobre la resistencia del suelo.

Los suelos arcillosos tienen una dificultad especial debido al proceso de cementación, el agua es absorbida por la arcilla mineral aglomerada la superficie externa e interna del grano, la cantidad de agua en la capa intermedia dependerá de la composición química de la arcilla (Grim, 1988). La cohesión intergranular también depende de la superficie por unidad de masa. Asimismo (Dolinar y Trauner, 2004) encontraron la relación entre la cantidad de agua y la resistencia al

corte, basada en los límites de líquido y plástico. Las investigaciones sobre el impacto de la composición del mineral en el suelo en las propiedades mecánicas subrayan la importancia del índice de plasticidad (Dolinar, 2010).

1.3 Aplicación del método de partículas en modelos de suelo.

La modelación mediante el método de partículas ha sido identificado como un método apropiado y con gran potencial para describir el comportamiento reológico del suelo. Al respecto se han realizado variados estudios durante los últimos quince años. Con el fin de analizar la discontinuidad del suelo y evaluar la aplicabilidad del modelo se realizó la simulación utilizando una barra de penetración. Para comparar los resultados de la simulación y simulación discontinuo se encontró, destacando el papel de los parámetros para que el suelo modelo sea útil (Tanaka et al., 2000).el Modelo para simular la gran deformación discontinua han desarrollado problemas de interacción suelo-vehículos para demostrar la viabilidad de funcionamiento del sistema granular (Horner et al., 2001).

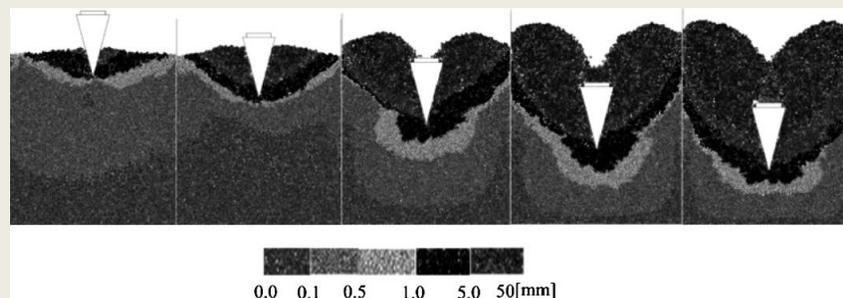


Figura: 1.1

La influencia de la succión de un suelo no saturado colapso el comportamiento de la fuerza de adhesión entre las partículas. La estructura de la tela y la estabilidad de las partículas de la muestra para simular en una prueba de compresión biaxial fueron investigados (SH Liu, 2002). Simulación de compresión triaxial isotrópica y ensayos de corte en la ruta de las tensiones estáticas drenadas y no drenadas de las ensamblajes esferas sueltas y densas demostraron el comportamiento del material micro-mecánica. El estudio utilizó la evolución del número de coordinación, cambios de anisotropía, así como la curva de tensión-deformación para evaluar la capacidad para reproducir la prueba mecánica granular (Thallak. Sitharam G., 2002).

Un buen acuerdo cualitativo entre los resultados obtenidos por la simulación del comportamiento dinámico del suelo FEM, DEM y las pruebas de laboratorio se encontró análogos potencial de los métodos de partículas para montar la estructura del suelo (Tadesse, 2004). Los valores de los parámetros semi-empírica de desempeño fueron evaluados en los modelos 2D discretas de interacción de las placas y el suelo. El estudio se considera como herramienta de la simulación eficiente y correcta para analizar el fenómeno del suelo dinámica (Asaf et al., 2006). Figura: 1.1

La variedad de corte de la cuchilla interacción suelo fueron simulados utilizando cuatro diferentes formas, el suelo estaba representado por grupos de dos discos con fuerza de cohesión entre las partículas. El experimento muestra el efecto importante afiliación de suelo desde la cuchilla Los resultados de la simulación se compararon con las teoría clásicas mecánica de los suelos consiguiendo una buena correlación (Shmulevich. et al., 2006). El ángulo de fricción entre grano y la fuerza cohesiva son los parámetros fundamentales que convirtió la base del modelo para describir el comportamiento de los suelos cohesivos. Utilizaron las pruebas de laboratorio para obtener los parámetros de macro numéricas que estaban en la contribución de la rigidez de las partículas y la coeficiente de fricción en los resultados de la fuerza de cizallamiento (Coetzee y Els, 2009b).

Figura: 1.1 Predicción de las fuerzas de instrumento de los suelos simple no cohesivos y los resultados se compara con de la prueba de laboratorio a pequeña escala. El estudio fundamentó en el comportamiento del material granular bajo una condición cuasi-estática que muestra la importancia de la calibración interna de ángulo de fricción. El modelo era capaz de predecir la fuerza de reacción para proponer una configuración sencilla y eficiente numéricamente (Martin Obermayr, 2011).

1.4 Detalles constructivos y uso de los canales de suelo.

El canal de suelo es un medio importante para el estudio de las operaciones de labranza. Existen diferentes modelos donde la velocidad de trabajo es variable alcanzando hasta 6 m/ Stafford (1979). Una instalación de un canal suelo generalmente se compone de la bandeja del suelo, el carro para el transporte de la herramienta, equipos para el tratamiento del suelo, sistema de accionamiento, instrumentación y sistemas de control y adquisición de datos. Los contenedores de suelo se pueden agrupar en dos clases, una recta o circular, donde la herramienta de prueba se

mantiene estacionaria y la otra clase implica una bandeja de suelo recta y fija. Una ventaja significativa del segundo tipo es que puede proporcionar un mayor control de las condiciones del suelo.

Los canales de suelo considerados grandes no puede ser fácilmente automatizado dejando de comportarse como una unidad (Figura 1.2). Un gran recipiente de suelo se mantiene cubierto generalmente en áreas exteriores y ocupan un complejo de instalaciones para sus actividades. En ellos se podrán realizar los estudios a escala natural. En los canales de suelo de grandes dimensiones se tienden a realizar una serie de actividades separadas y distintas que requieren vehículos separados de apoyo. La mayoría de los canales de suelo son instalaciones pequeñas de propiedad de las universidades o industrias (Ref).



Figura 1.2. Instalaciones de un canal de suelo de grandes dimensiones.

Para estudiar y comprender el proceso de interacción entre el suelo, residuos, y la labranza en condiciones casi reales requiere una infraestructura innovadora para apoyarlo donde juegan un papel importante los diseños de los contenedores de suelo en correspondencia a las exigencias de las operaciones. En los estudios realizados con herramientas oscilantes se ha observado que el máximo aprovechamiento de la energía se produce a una frecuencia de oscilación cercana a la frecuencia natural del suelo. Por lo tanto, los valores óptimos de frecuencia y amplitud de la oscilación se determinaron sobre la base de la superficie terrón máxima producida por unidad de energía. (Gupta y Rajput 1993)

En la verificación de la simulación de los efectos de los neumáticos sobre el suelo se determinó que la carga por eje y el número de pases de neumáticos fueron los factores más importantes que influyen fuertemente sobre la compactación del suelo (Figura 1.3). Por otra parte, el contenido de humedad del suelo, relación de aspecto, y la presión de inflado de los neumáticos también reveló efectos significativos. La compactación del suelo mayor ocurrió durante los tres primeros pasos de la cubierta de neumático. Los modelos de la compactación del suelo se han establecido y se considera que presenta buenas predicciones. La tendencia establecida por los modelos significa que las relaciones generales pueden ser establecidas para predecir la compactación de los suelos relacionados con los tipos de suelo (Canillas y Salokhe 2001).



Figura 1.3# Pruebas de rodamiento de neumáticos en un canal de suelo

1.5 Concepción general del método de elementos discretos

El método de los elementos distintos está encaminado a la solución de un conjunto de ecuaciones de equilibrio que representan las fuerzas resultantes y los momentos. Estas se expresan en forma matricial como:

$$M\Delta\ddot{X} + C\Delta\dot{X} + S\Delta X = \Delta F \quad (1)$$

Donde M representa la matriz de masa, C es el vector de amortiguamiento, S es la matriz de rigidez y F la fuerza, este vector incluye el momento y la fuerza incremental (M.Oda y Iwashita, 1999)

El contacto entre dos disco A y B en 2D es presentado en la figura 1.3, Estos elementos se consideran en contacto si la distancia DAB entre los centros de los discos x^a y x^b es menor que la suma de sus radios R^a y R^b .

$$d^{ab} < r^a + r^b \quad (2)$$

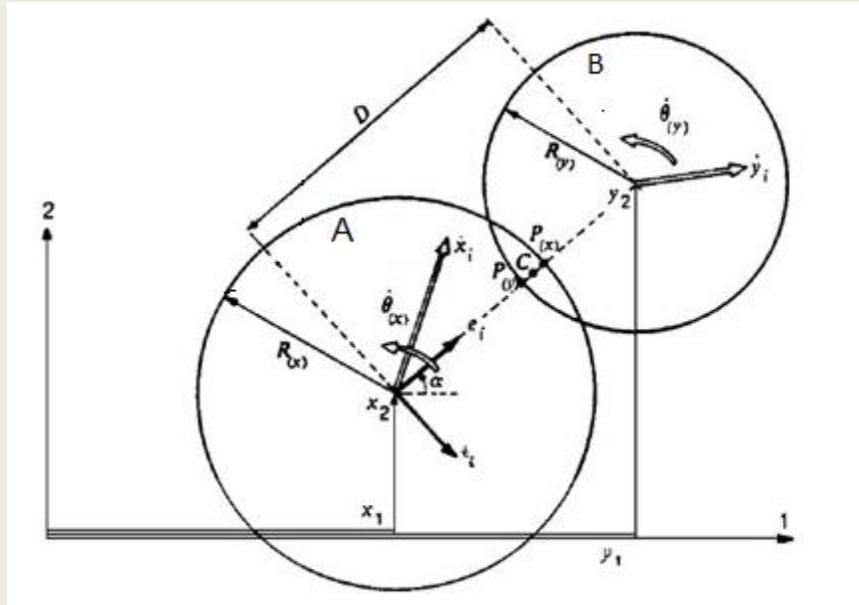


Figura 1.4 Modelo clásico del contacto de dos esferas en elementos discretos.

La distancia entre centros de dos discos se calcula por la ecuación siguiente:

$$d^{ab} = |\mathbf{x}^b - \mathbf{x}^a| \quad (3)$$

Si la condición anterior se cumple el vector unitario normal en el punto de contacto se calcula como:

$$\mathbf{n}^{ab} = (\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^b) / d^{ab} \quad (4)$$

La superposición de los discos A y B pueden ser directamente calculado a partir de sus posiciones como:

$$\lambda^{ab} = r^a + r^b - \|\mathbf{x}^a - \mathbf{x}^b\| \quad (5)$$

El vector unitario tangencial \mathbf{t}^{ab} se define mediante la rotación del vector normal \mathbf{n}^{ab} en sentido de las agujas de reloj a 90° .

El desplazamiento relativo entre los discos en el punto de contacto durante un intervalo de tiempo se determina por la integración de la velocidad relativa normal (\dot{X}_n^{ab}) y la dirección tangencial.

$$\dot{X}_n^{ab} = \dot{X}^{ab} \mathbf{n}^{ab} \quad (6)$$

$$\dot{X}_s^{ab} = \dot{X}^{ab} \mathbf{t}^{ab} \quad (7)$$

La velocidad relativa normal de un punto A con respecto al punto B se expresa como:

$$\dot{X}^{ab} = (\dot{x}^a - \dot{x}^b) - (\dot{\omega}^a r^a + \dot{\omega}^b r^b) \mathbf{t}^{ab} \quad (8)$$

El desplazamiento relativo incremental en las direcciones normal y tangencial se obtienen derivando la velocidad relativa con respecto al paso de tiempo.

$$\Delta u_n = \dot{X}_n^{ab} \Delta t \quad (9)$$

$$\Delta u_s = \dot{X}_s^{ab} \Delta t \quad (10)$$

Los incrementos de las fuerzas en direcciones normales y tangenciales se calculan multiplicando el incremento del desplazamiento relativo por los coeficientes de rigidez en ambas direcciones,

$$\Delta F_n = k_n \cdot \Delta u_n \quad (11)$$

$$\Delta F_s = k_s \cdot \Delta u_s \quad (12)$$

Las fuerzas efectivas se obtienen añadiendo los incrementos de las fuerzas normales y tangenciales a las del paso de tiempo anterior.

$$F_n^t = F_n^{t-1} + \Delta F_n \quad (13)$$

$$F_s^t = F_s^{t-1} + \Delta F_s \quad (14)$$

Cuando las fuerzas en dirección normal y tangencial se determinan para todos los contactos relacionados con la partícula incluyendo la fuerza de gravedad se suman respecto a los ejes de coordenadas determinando las fuerzas resultantes y los momentos que actúan sobre el disco. Para actualizar la posición de la partícula se utiliza la segunda ley de Newton. Por último, las nuevas coordenadas de las partículas se obtienen a partir de considerar la velocidad constante:

$$\dot{x}_{t+1} = \dot{x}_{t-1} + (\Sigma F/m)_t \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$\dot{\omega}_{t+1} = \dot{\omega}_{t-1} + (\Sigma F/I)_t \cdot \Delta t \quad (16)$$

1.6 Criterios sobre la calibración de los parámetros DEM.

De modo general las simulaciones que se han obtenido mediante el método de partículas del comportamiento mecánico del suelo han mostrado una satisfactoria correlación desde el punto de vista cualitativo con los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio (Tanaka et al, 2007; Oida A, 1997; Ibuki T, 2000), pero los resultados cuantitativos no siempre se correlacionan bien. La causa principal es la dificultad para determinar el valor adecuado de los parámetros del modelo y la inconsistencia entre el tamaño de las partículas de suelo y los elementos del modelo.

La determinación de micro-propiedades y su correlación con las propiedades de parámetros como la rigidez, amortiguación, el coeficiente de fricción y la cohesión han sido objeto de calibración con el fin de obtener los resultados cuantitativos de acuerdo a los experimentos reales. En investigaciones realizadas donde se simula la resistencia a la penetración del suelo se evalúa el efecto de la micro-fricción sobre la resistencia que brinda el suelo. El experimento muestra que mientras el coeficiente de fricción incrementa, el movimiento de los elementos cerca de la barra se hace mayor. Mediante este estudio se propone un método para seleccionar el valor apropiado del coeficiente de micro-fricción para diferentes tipos de partículas (Tanaka et al., 2000).

Otros procedimientos de calibración más complejos incluyen la combinación del coeficiente de fricción con la cohesión del suelo. Un ejemplo de ello es la obtención de la curva para el ajuste de los resultados de la simulación con las pruebas de rotura, la cual se realizó utilizando modelos semi-empíricos para determinar el esfuerzo cortante (Asaf et al., 2006). Otros procedimientos han sido utilizados empleando diferentes combinaciones de fricción interna y rigidez de las partículas, como resultado de la simulación numérica con un conjunto único de parámetros se obtuvo el módulo de Young y el ángulo de reposo del material correspondiente al suelo utilizado como patrón (Coetzee y Els, 2009b).

Capítulo 2

MATERIALES Y METODOS

2.1 Propiedades físicas del suelo en estudio.

La muestra de suelo se obtuvo en áreas comúnmente utilizadas para la producción cañera ubicadas en el norte de la provincia de Villa Clara, región central de la Isla de Cuba. El suelo en el momento de tomar la muestra tenía un año de descanso después de cinco años de uso en plantaciones de caña de azúcar. Cuatro puntos fueron seleccionados en diagonal tomados en una hectárea a tres profundidades diferentes: 15, 30 y 50 cm. La textura y propiedades físicas mostradas en la tabla 1 fueron obtenidas por la combinación de tamiz y pruebas de hidrómetro según (Archer y Marks, 1985). El suelo fue clasificado como un Vertisol de acuerdo a la clasificación internacional de la FAO. La importancia económica de este suelo se soporta en su relación directa con la industria azucarera la cual tiene gran impacto social y de desarrollo en Cuba, Su importancia radica en el hecho de que el 40% de las plantaciones de caña de azúcar crece en suelos arcillosos (Suelos, 1975).

Tabla 1. Propiedades físicas del suelo.

<i>Depth, cm</i>	<i>Gs</i>	<i>PL</i>	<i>LL</i>	<i>PI</i>	<i>Sand</i>	<i>Silt</i>	<i>Clay</i>
15	2.61	24.5	63.5	44.9	7	27	66
30	2.64	28.6	78.9	50.3	6	29	66
50	2.62	17.2	67.9	50.7	8	29	63

Una de las principales características de este suelo es la similitud entre el horizonte A y B. El color rojo-grisoso es resultado del contenido de roca calcárea, cuanta con un alto contenido de arcilla expansiva o montmorillonita lo cual lo hace propenso a formar grietas profundas en las estaciones secas del año (Figura 2.1). Sin embargo, bajo régimen de riego se comporta con gran friabilidad, debido a su alta fertilidad y microbiológicos se clasifican como los mejores suelos para usos agrícolas

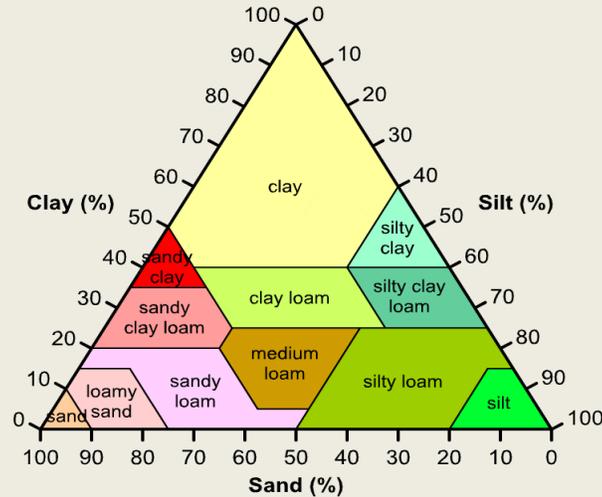


Figura 2.1 Clasificación de los suelos según el contenido de arcilla, arena y limo.

Dado que las pruebas de laboratorio, las operación de labranza a nivel de canal y la simulación se realizan en el primer horizonte de suelo (hasta 15 cm), los estudios en lo adelante se centran en la determinación de las propiedades mecánicas relacionadas con esta capa del suelo.

2.2 Metodología del ensayo de compresión triaxial.

Las propiedades mecánicas del suelo referentes a la interacción suelo-suelo de la capa superior fueron determinadas por ensayos de compresión triaxial, comúnmente utilizados en las investigaciones de ingeniería civil y aplicaciones agrícolas. Para capturar la variación de las condiciones físicas del suelo en función de su humedad y densidad se siguió un diseño experimental de tipo factorial a múltiples niveles donde se establecieron como variables dependientes: la resistencia al corte, el ángulo de fricción interna, la cohesión del suelo, la adherencia y el módulo de Young.

El contenido de humedad (u) se varió en cinco niveles: (16, 20, 24, 28 y 32%). La densidad (δ) por su parte se varió en tres niveles: (1, 1,2 y 1,4 g/cm³). Sin embargo, la humedad y la densidad final de los experimentos varían ligeramente respecto a lo planificado. Como resultado se obtienen quince puntos experimentales a partir de la combinación anterior, cada uno de ellos se repite en cuatro diferentes presiones axiales obteniendo un total de 60 experimentos.

El contenido de humedad se calcula de acuerdo al siguiente procedimiento. Se mide la masa de la muestra de suelo húmedo, luego es secado en un horno por 12 horas a una temperatura de 110⁰C y finalmente se toma el peso seco (ASTM 2216-92). Los valores buscados de la humedad se obtienen mediante la formulación siguiente expresada como en porcentaje del peso seco de la muestra:

$$u = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \cdot 100 \quad (17)$$

Donde:

m_{wet} : masas de la muestra antes del secado en el horno.

m_{dry} : masas de la muestra después del secado en el horno.

La muestra de suelo (Figura 2.2) se obtiene por el mezclado y conformado del horizonte superior hasta obtener un cuerpo cilíndrico de 50 mm de diámetro por una altura de 100 mm. La representación esquemática de la instalación de prueba se muestra en la figura 2.2, Para el ensayo el espécimen de suelo se cubre por una membrana de goma es confinado en un recipiente hermético cilíndrico lleno de agua destilada como muestra la figura 2.2.

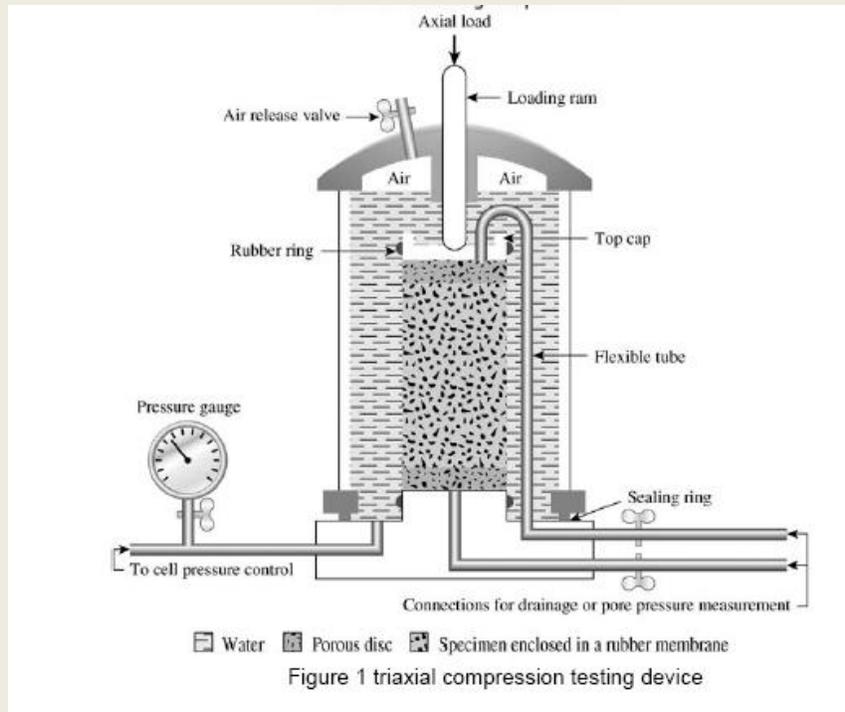


Figura 2.2. Esquema del aparato de compresión triaxial.

Cuatro muestras con el mismo contenido de humedad y densidad se ensayaron modificando las presiones radiales a 30, 50, 70 y 90 kPa, obteniéndose de este modo cuatro tensiones axiales diferentes para cada combinación experimental. La fuerza de tensión principal se obtiene durante el ensayo presionando por la parte superior del cilindro a una velocidad constante de 1 mm/min. La carga se detiene cuando el esfuerzo desviador ha llegado al máximo y luego decrece un 20%.

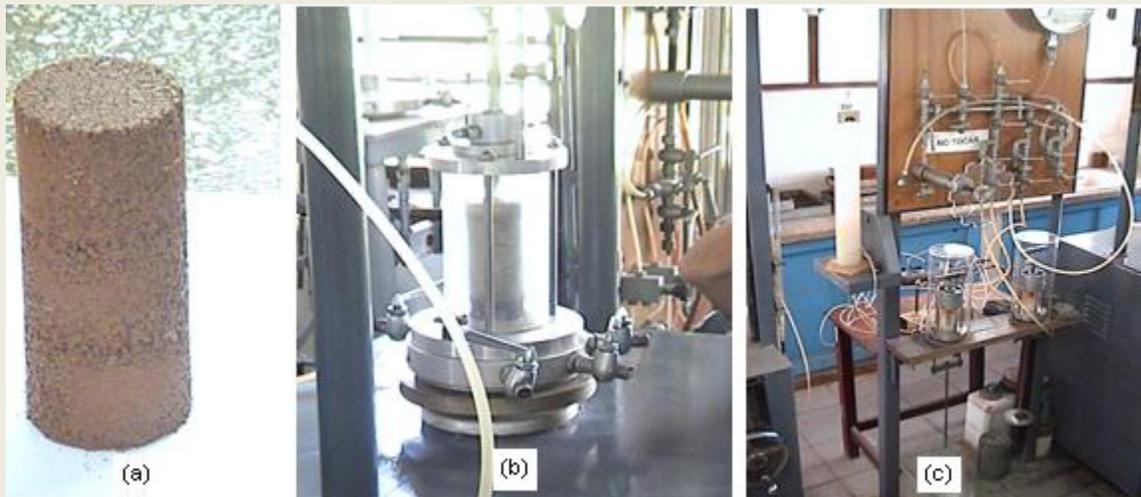


Figura: 2.3. Aparatos de compresión triaxial utilizados en los experimentos.

El esfuerzo desviador después de contar con los datos experimentales se calcula como la diferencia entre las tensiones principales mayor y menor en los ensayos de compresión triaxiales ($\sigma_1 - \sigma_3$), La tensión principal mayor σ_1 en la muestra es igual al esfuerzo desviador más la presión de la cámara, y la tensión principal menor σ_3 en la muestra es igual a la presión de la cámara.

Para calcular el esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_3$) la carga vertical en la muestra se obtiene directamente del transductor de fuerza:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = P / A_c \quad (18)$$

Donde:

P: carga aplicada axial, N.

A_c : Area corregida transversal de la muestra, m^2

Para corregir el área de la sección transversal (A_0), para cada medida, se aplica la siguiente relación:

$$A_c = A_0 / (1 - \varepsilon) \quad (19)$$

Donde (ε) es la deformación axial y determina como:

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad (20)$$

Donde:

ΔL : cambio en la longitud de la muestra, mm.

L_0 : longitud inicial de la muestra antes de la carga, mm.

Realizando el gráfico de la relación entre el esfuerzo desviador y la deformación axial, tomando el esfuerzo desviador en las ordenadas y la deformación axial en las abscisa, se determinan la tensión máxima de falla ($\sigma_3 - \sigma_1$) obtenidas para las cuatro presiones de confinado. De este modo se obtiene el plano de tensión de corte a partir del criterio de superficie de falla cónica de Mohr-Coulomb el cual se utiliza para determinar el ángulo de fricción del suelo y la cohesión.

2.3 Metodología para el ensayo de corte directo modificado.

El ensayo de corte directo es un experimento que se basa en deformar la muestra a una velocidad constante en un plano de corte determinado por la configuración del aparato a diferentes presiones normales. La modificación realizada consiste en hacer deslizar el suelo por una superficie de acero para determinar el ángulo de fricción externa y la adherencia del mismo. La modificación consiste en introducir en la cavidad media superior cilíndrica una muestra de acero, garantizando el contacto durante el experimento.(Sánchez-Girón Renedo, 1999).

Este experimento es utilizado para la determinación de las propiedades referentes a la interface suelo-metal y constituye el método para reproducir los fenómenos que ocurren durante la interacción del suelo y la superficie de acero del apero durante la operación de labranza.

Las muestras de suelo fueron remoldeadas para la prueba de corte directo en un aparato estándar de corte directo (Figura 2.4). La dimensiones de las muestras fueron de 70 mm de diámetro y 16 mm de altura, La muestra de metal y de suelo se colocan en los anillos cilíndricos que conforman el cuadro principal. Para determinar la influencia del contenido de agua y la densidad en la adherencia del suelo y la fricción durante el contacto con el acero se realizan los experimentos siguiendo el mismo diseño factorial explicado en el epígrafe anterior.

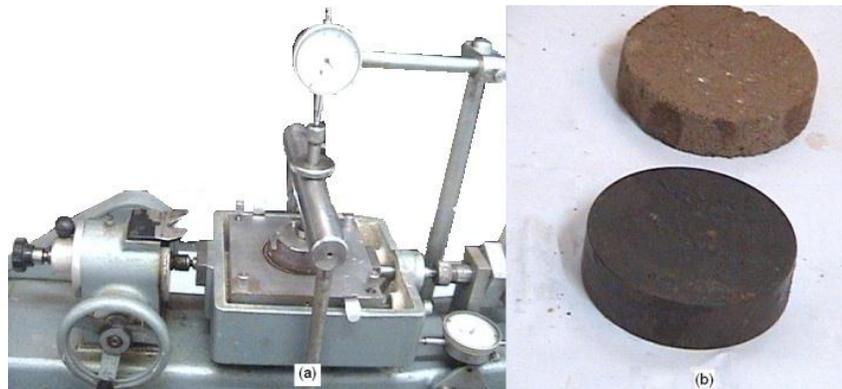


Figura: 2.4. Aparato de corte directo

Tomando cuatro muestras y realizando su preparación con contenido de humedad y densidad similares se someten a las pruebas de corte directo con cargas normal a 30, 50, 70 y 90 kPa. Los quince puntos experimentales se prueban siguiendo el mismo procedimiento. La velocidad se mantiene constante a 1 mm/min la cual se le aplica a la mitad inferior para hacerla deslizar

garantizando las condiciones de drenaje. Los datos del desplazamiento relativo de las cajas de corte respecto a la fuerza de cizallamiento se compilan durante el tiempo de deslizamiento para trazar la curva cortante-desplazamiento correspondiente. El ensayo se termina cuando el desplazamiento alcanza el 20% del diámetro de la muestra.

El estrés durante el cizallamiento se obtiene por la relación entre la fuerza nominal cortante F , y el área de la muestra $A = F / A$. (21)

2.4 Constitución del Modelo de Elementos Discretos.

Los componente gráfico y los cálculos numéricos se llevaron a cabo utilizando el software DEMéter ++, desarrollado por grupo de investigación en partículas de la Universidad Católica de Lovaina. Este programa proporciona las herramientas necesarias para la construcción y cálculo de las interacciones entre elementos geométricos básicos y complejos. Incluye además la detección de contactos, las velocidades de los elementos, el cálculo de las fuerzas de contacto, la integración en el tiempo etc. La estructura del programa ha sido escrita en el lenguaje de programación C ++ lenguaje de programación lo que posibilita utilizar las bibliotecas de código abierto que se desarrolladas por otros autores, además es posible compilar su propios proyectos y crear finalmente archivos ejecutables independientes de otra aplicación. Es un sistema elaborado para usos investigativos posibilitando realizar por el usuario todos los cambios correspondientes al modelo así como a los datos de salida. Para realizar el análisis numérico de los resultados el sistema de archivos se hace compatible con los ficheros .mat los que son manejados por el software MatLab.

El modelo clásico de DEM propuesto por Cundall y Strack (Cundall y Strack, 1979) se utiliza para calcular la interacción entre las partículas del suelo y la herramienta de labranza, dos tipos de contactos se implementaron: el suelo-suelo y el suelo-aper, para ambos tipos se aplican los mismos esquemas de cálculo y resolución de contactos variando sólo en los valores de las propiedades mecánicas introducidas como datos de entrada. El modelo funciona a partir de considerar las fuerzas normales, tangenciales, la gravedad, la cohesión y la fricción (figura: 2.4). La fuerza de cohesión está dirigida en dirección normal, su acción mantiene unidas las partículas

a cierto valor de solapamiento. La fuerza de fricción por su parte se aplica sólo durante el deslizamiento cuando la fuerza de corte es mayor que el criterio de fricción de Morh-Coulomb.

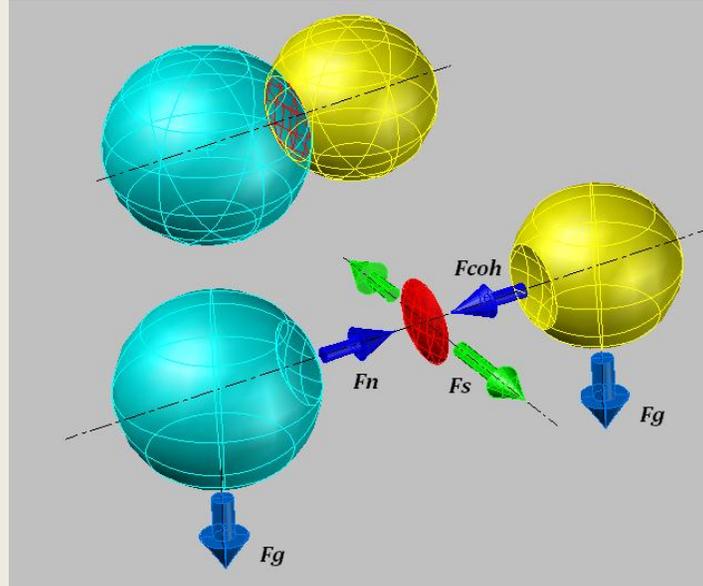


Figura: 2.5 Esquema de distribución de las fuerzas de contacto.

La determinación de las propiedades micros del modelo se calculan tomando en cuenta las propiedades definidas como macros correspondientes a las propiedades mecánicas antes mencionadas de los parámetros geométricos de las partículas en contacto en cada paso de tiempo.

La fuerza en dirección normal se calcula por:

$$F_n = k_n \cdot \Delta u_n + \eta_n (\Delta u_n / \Delta t) \quad (22)$$

Donde k_n significa la rigidez normal, η_n es la viscosidad o amortiguamiento viscoso y la Δt es la variación paso del tiempo.

La ecuación para determinar la rigidez normal encierra la relación entre las propiedades elásticas del suelo y los parámetros dimensionales:

$$k_n = \frac{E_{ab} \tilde{A}_{int}}{D_{eq}^{ab}} \left[\frac{1 + \alpha_k}{\beta_k (1 + \nu) + \gamma_k (1 - \alpha_k)} \right] \quad (23)$$

Dónde E_{ab} es el módulo equivalente de Young de los dos elementos de contacto, A_{int} es el área interior del contacto y D_{eq} es la distancia equivalente entre los dos objetos, la otra parte de la ecuación es la relación entre la proporción del coeficiente de Poisson con los coeficientes de relacionados a la porosidad y distribución de las partículas (Hentz et al., 2004). La fuerza en dirección tangencial por su parte se calcula por medio de a siguiente ecuación:

$$F_s = k_s \cdot \Delta u_s + \eta_s (\Delta u_s / \Delta t) \quad (24)$$

Siendo k_s la resistencia tangencial, η_s es la viscosidad y Δu la variación del desplazamiento.

El valor de k_s depende del valor de k_n , y se obtiene por medio de:

$$K_s = K_n \left(\frac{1 - \alpha_k \nu}{1 + \nu} \right) \quad (25)$$

Asimismo el amortiguamiento viscoso en dirección normal y tangencial se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \beta \cdot 2 \sqrt{\frac{m_a m_b}{m_a + m_b}} \quad (26)$$

Dónde β es el coeficiente de amortiguamiento viscoso y m_{ab} son las masas de dos objetos en contacto.

La fuerza de cohesión se activa cuando el solapamiento es mayor a la deformación elástica máxima del suelo calculado a una presión normal de 50 kPa el cual se denomina desplazamiento de Cauchy. Este método es sensible a las dimensiones de las partículas garantizando cambios proporcionales en el medio de partículas respecto de suelo real.

La interdependencia entre los valores de micro-fricción, micro-cohesión y la cohesión del suelo son determinados utilizando un procedimiento de interpolación donde se obtiene la siguiente relación (Utili y Nova, 2008):

$$\phi_{coh} = \frac{c(\tan \phi \mu)^{k_4}}{k_3} \quad (27)$$

Donde c es la cohesión entre los dos objetos en contacto obtenidas en los experimentos de laboratorio, $\phi \mu$ es el coeficiente de micro-fricción. Las constantes del material son K_3 y K_4 con la distribución de tamaños de partículas en el medio simulado. La fuerza de adhesión por su parte se obtiene como el producto de la micro-cohesión con el área de contacto entre dos esferas en contacto y se realiza de forma dinámica.

2.5 Metodología para el Ensayos en el canal de suelo.

Con el fin de comparar las fuerzas de reacción en las direcciones horizontal y vertical obtenidas por medio de la simulación, se prepara el canal de suelo para dos condiciones previamente establecidas: suelo suelto-húmedo y suelo duro-seco. El canal está formado por un recipiente de suelo de 1,5 por 8 metros relleno por el suelo Vertisol, el mismo utilizado para llevar a cabo las pruebas de laboratorio explicadas anteriormente (Figura 2.6). Las fuerzas de se miden utilizando un transductor de anillo ortogonal fijado y calibrado entre la herramienta de labranza y el carro. El sistema de adquisición de datos está constituido por el autómeta *CrioRio* y ha sido configurado mediante una aplicación de LabView la cual corre sobre un ordenador portátil HP. Las mediciones se realizan tomando 200 muestras por segundo a lo largo del tiempo de medición.



Figura: 2.6. Instalación de la herramienta en el canal de suelo.

2.2.1 Modelo geométrico para el ensayo de corte directo.

La parte geométrica en la instalación virtual de corte está dividida en las secciones superior e inferior de la caja, cada una tiene una cavidad cilíndrica interna para perfeccionar la linealidad, los demás componentes son la base y la prensa, la cual está dispuesta en la parte superior, no se considera ningún contacto entre los elementos estructurales de la instalación. Los elementos tipos planos y cilindros de la biblioteca de DEMeter son las formas elementales utilizadas para construir el aparato de corte, dieciocho planos en los arreglos circulares completan cada cavidad cilíndrica que termina en cilindros, dispuestos en cada intersección angular. El mismo número de planos se colocaron en distribución horizontal formando un agujero en el centro que rodea la estructura central. Un total de 3.680 partículas esféricas se utilizó para la prueba con el radios entre 1 y 2.5 mm (Figura 2.7).

Las muestras virtuales de suelo se obtiene mediante una secuencia de pasos que comienzan en la generación de las esferas con determinado arreglo. Este procedimiento asigna un espacio único a cada una de las partículas definidas anteriormente. Para ubicar las esferas primero se genera el volumen de la cavidad cilíndrica donde utilizando una red hexagonal compacta se ubica la posición previa de cada una de ellas.

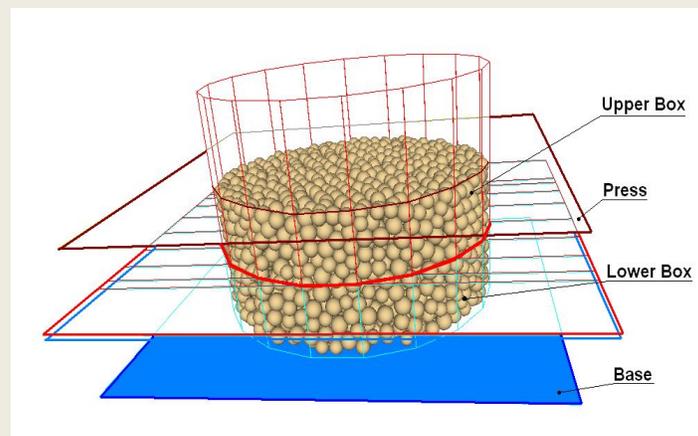


Figura: 2.7 Instalación virtual para la simulación del ensayo de corte directo.

Sin embargo, como el tamaño final de las partículas es asignado por el radio lo cual sucede después de que el centro se había colocado aparecen nuevos agujeros en el interior de la muestra

lo cual constituye un efecto positivo sobre la estructura final el cual permite una red de porosidad que de hecho existen en el suelo real como una consecuencia de las fracturas granulométricas, los procesos biológicos y físicos.

2.2.2 Conformación de la muestra por medio de simulación.

El punto medio experimental con contenido de humedad de 21,3% y la densidad 1,18 g/cm³ fue seleccionado para la calibración numérica de la fricción donde se realiza la conformación de la muestra en tres pasos: la caída libre de las partículas, la compresión y la descompresión. La simulación comienza con la caída libre de las partículas después de ser aplicada la fuerza de gravedad, el modelo utiliza los parámetros macroscópicos calculados por las ecuaciones empíricas. En la tabla 2. Se muestran todos los parámetros del modelo.

Parameters	Values	Units
ρ_d	1.18	g/cm ³
E	47.3	Mpa
ν	0.26	
t_{50}	535.4	Kpa
c	86.3	Kpa
ca	4,5	Kpa
ϕ	22.1	°
δ	15.7	°

Tabla: 2 Micro-parámetros que se utilizan para simular el corte directo.

En la segunda simulación se ejecuta el desplazamiento de la prensa, lo que disminuye el espacio en el cilindro y aumentando las fuerzas entre las partículas, debido a la interacción entre las partículas y las partículas y las paredes se cubren los espacios vacíos. El objetivo de la compresión es obtener una estructura compacta que garantice un solapamiento mayor que el punto de cohesión. Finalmente la descompresión de la muestra es la última simulación con el fin de preparar el modelo para la el ensayo de corte.

Capítulo 3

RESULTADO Y DISCUSSION

3.1 Comportamiento de las propiedades mecánicas del suelo.

3.1.1 Curva de tensión-deformación.

Las tensiones máximas obtenidas en los ensayos triaxiales se alcanzaron cuando el contenido de humedad es mínimo en las muestra de suelo. La curva de tensión-deformación muestra la forma típica del comportamiento de los materiales frágiles. (Figura 3.1) El proceso de cementación forma fuertes enlaces intergranular como resultado del alto contenido de arcilla y las presiones. Otros estudios sobre suelos arcillosos muestran que los valores de resistencia a la cizalladura depende también de las propiedades mineralógicas de arcilla (Dolinar, 2010).

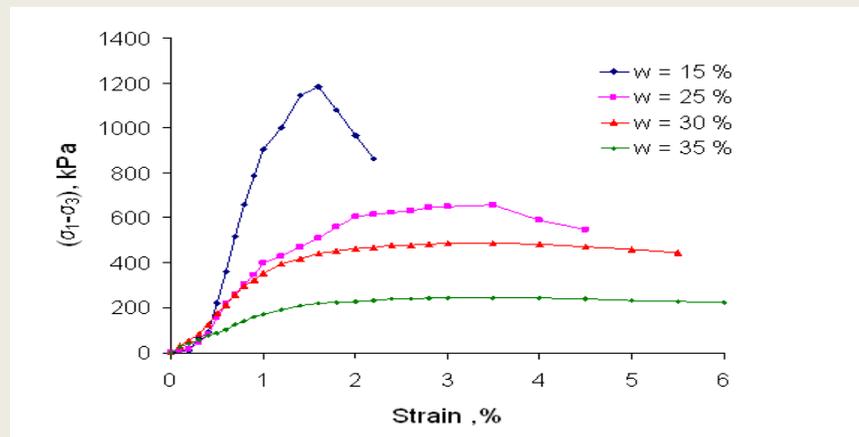


Figura: 3.1·Relación tensión-deformación del suelo con densidad de $1,2 \text{ g cm}^3$.

Por el contrario una gran deformación plástica para niveles altos de humedad del suelo es lo más característico en estos casos, haciendo difícil definir el punto de falla del suelo. Para todas las combinaciones de humedad el suelo presentó valores altos de resistencia en comparación con suelos limosos y arenosos (McKyes y Maswaure, 1997). Estudios llevados a cabo en un suelo Ferrasol con el 32% de arcilla (Suárez et al., 2008) reportaron valores de resistencia al corte alrededor de 15% menores en el punto de falla, sin embargo, el patrón resultó ser el mismo.

3.1.2 Resistencia cortante del suelo.

Los resultados de la resistencia del suelo calculada a presión axial de 50 kPa mediante el ensayo triaxial de compresión muestran un incremento considerable cuando disminuye la humedad del suelo para todos los niveles de densidades estudiadas (figura: 3.2),

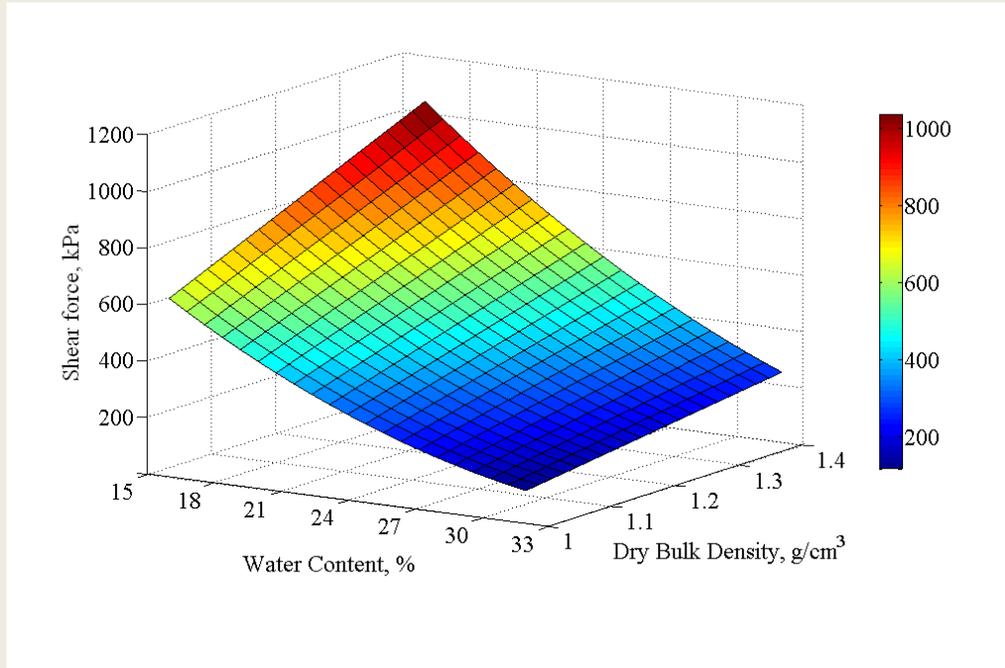


Figura: 3.2 Variación de tensión cortante a presión axial igual a 50kPa.

Como muestra la figura para el suelo compactado el incremento es mayor cuando disminuye la humedad mostrando una mayor linealidad con respecto a esta; no obstante, Los valores máximos de tensión alcanzan los 1,000 kPa para condiciones secas con suelo endurecido, con el aumento de la humedad y el descenso de la densidad estas alcanzan solo 150 kPa. Este comportamiento puede ser resultado de que el agua para valores de humedad mayor a 25% puede actuar en el suelo como una capa lubricante que facilita la disolución de los enlaces entre las partículas. El modelo estadístico que describe el comportamiento de la resistencia al corte del suelo a presión axial de 50 kPa (τ_{50}) muestra la siguiente forma:

$$\tau_{50} = \mathbf{a} u + \mathbf{b} \rho + \mathbf{c} * u^2 + \mathbf{d} * u * \rho \quad (28)$$

Los coeficientes que satisfacen el modelo para unos límites de confianza del 95% son los siguientes:

$$a = -41,54 (-59.73, -23.36)$$

$$b = 1706 (1410, 2001)$$

$$c = 1.098 (0.4484, 1.748)$$

$$d = -43.3 (-56.19, -30.41)$$

Estadística del ajuste:

Error estándar (SSE): 1.191e 004

R-cuadrado: 0,98

R-cuadrado ajustado: 0,98

Media del error estándar: RMSE: 32,91

3.1.3 Comportamiento del módulo de Young.

El módulo de Young caracteriza la propiedad elástica del suelo, y brinda el criterio acerca de si el mismo puede volver a su tamaño original después de ser traccionado o comprimido. El módulo elástico se puede calcular como la relación de tensión y el desplazamiento. Sin embargo los suelos en general no muestran una curva de tensión lineal. La pendiente de la línea secante trazada desde el origen hasta un punto en la curva donde se inicia la deformación plástica es el criterio adoptado para el cálculo del módulo elástico (E).

Esta propiedad exhibe una gran relación con el contenido de agua y también con la densidad del suelo como se muestra en la Figura: 3.3. Resultados obtenidos a partir del estudios en tres tipos de suelos diferentes (Kézdi, 1980), mostraron el mismo patrón, donde la elasticidad crece de forma lineal respecto a la humedad.

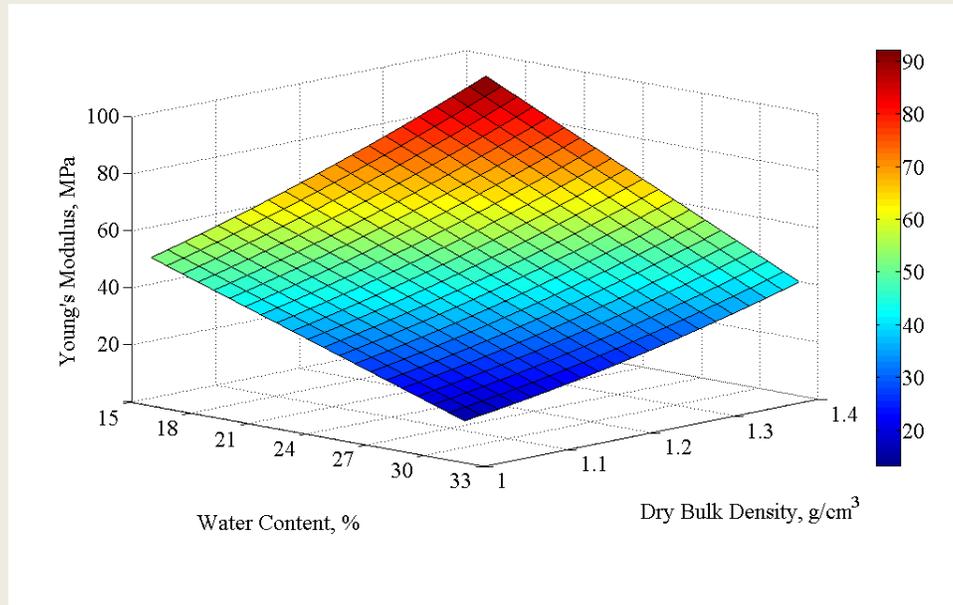


Figura 3.3 Comportamiento del módulo de elasticidad respecto a la humedad y densidad.

Para todas las densidades el módulo E muestran el mismo patrón de comportamiento. El mismo muestra un aumento sostenido hasta alcanzar valores de 95 MPa para el suelo seco y compacto. Para valores máximos de humedad y baja densidad esta propiedad solo alcanza valores de 15 MPa, incidiendo en ello la alta porosidad que constituye una fuente de amortiguación que propicia el comportamiento plástico.

La relación estadística obtenida como expresión de la previsible del comportamiento del Módulo Elástico respecto a la humedad y la densidad es la siguiente:

$$E = a + b u \rho + c \rho^2 \quad (29)$$

Los coeficientes obtenidos con límites de confianza del 95% son:

$$a = 32.1 \quad (20.75, 43.46)$$

$$b = -2.33 \quad (-2.7, -1.96)$$

$$c = 57.19 \quad (49.42, 64.96)$$

Estadísticas del ajuste:

$$\text{SSE: } 210,4$$

$$\text{R-cuadrado: } 0,96$$

R-cuadrado ajustado: 0,95

RMSE: 4.187

3.1.4 Comportamiento de la cohesión del suelo.

La cohesión del suelo, obtenido por medio del ensayo de compresión triaxial muestra una fuerte dependencia con ambos factores (Figura: 3.4), el incremento en la densidad hace crecer de forma cuadrada la cohesión del mismo, asimismo a medida de que aumenta la humedad esta propiedad decrece hasta alcanzar valores de 25 kPa, el efecto de la cementación causada por el alto contenido de arcilla se refleja en los valores obtenidos para valores altos de compactación donde se alcanzan 130 kPa.

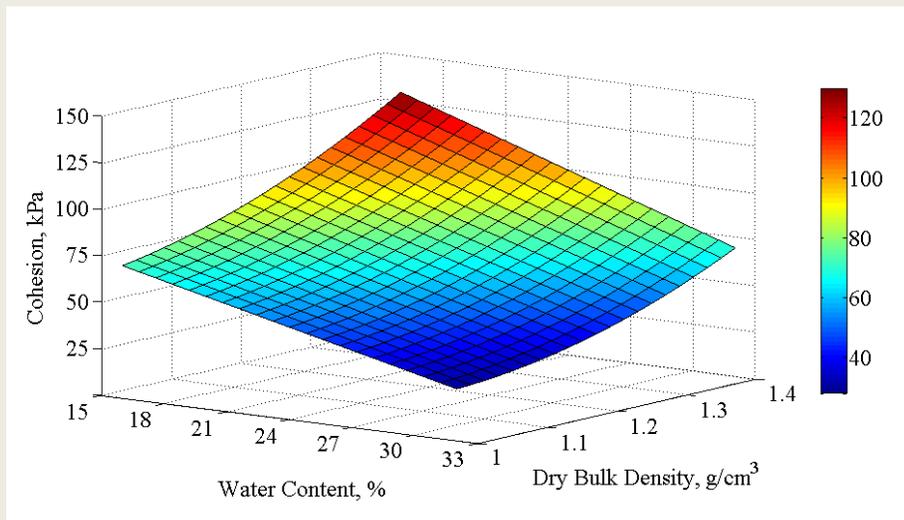


Figura: 3.4. Resultados de la cohesión del suelo.

Para muestras inferiores a 1.2 g/cm^3 de densidad la cohesión un incremento lento, por encima de este valor es ligeramente mayor denotado la reducción de la plasticidad del mismo al alcanzar la porosidad. Resultados similares se obtuvieron en suelos arcillosos (McKyes et al, 1994; Zhang et al, 1986), donde la humedad crítica de compactación es función de la densidad del suelo. Otros estudios realizados en suelos arenosos (Mouazen et al., 2002) mostraron también la variación en forma lineal de la cohesión respecto al contenido de humedad y no linealmente con la densidad.

La ecuaciones estadística del análisis de regresión para predecir la cohesión se escriben como:

$$c = a + b\rho + d\rho^2 + e\rho \quad (30)$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

$$a = 220.7 (-16.41, 457.7)$$

$$b = -2.709 (-3.126, -2.292)$$

$$d = 211 (39.68, 382.4)$$

$$e = -317.1 (-723.3, 89.08)$$

Estadísticas del ajuste:

SSE: 238,6

R-cuadrado: 0,9745

R-cuadrado ajustado: 0,9676

RMSE: 4.657

3.1.5 Comportamiento de adhesión del suelo.

Los suelos arcillosos generalmente son más propensos a adherirse a la superficie del apero, esta propiedad conocida como adherencia se determinó mediante el corte directo modificado explicado en las metodologías. Es conocido que el agua en la interface suelo-metal forma una película que ayuda al deslizamiento del suelo, sin embargo para valores dentro de 24-30% la misma manifiesta un crecimiento sustancial de la adherencia (Figura: 3.5). La densidad por su parte tiene un papel secundario respecto al comportamiento de la adherencia, mostrando un ligero incremento lineal con el aumento de la misma.

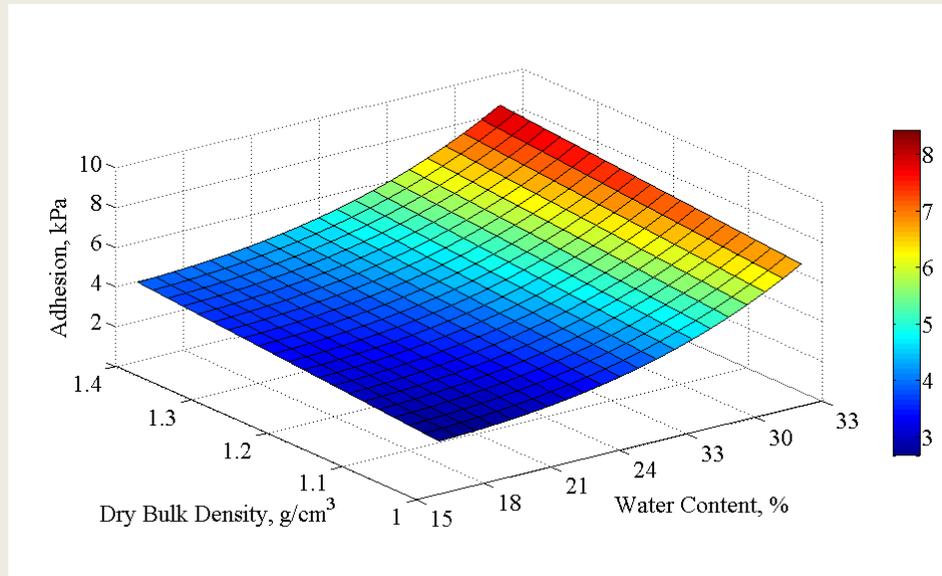


Figura: 3.5 Comportamiento de la adherencia del suelo.

La ecuación estadística de regresión múltiple para predecir la adhesión del suelo se escribe como:

$$ca = \mathbf{a} \rho + \mathbf{b} u^2 \quad (31)$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

Estadística del ajuste:

SSE: 2.067

R-cuadrado: 0,9719

R-cuadrado ajustado: 0,9698

RMSE: 0,3988

3.1.6 Fricción interna y externa del suelo.

El ángulo de fricción interna del suelo tiende a alcanzar el valor máximo para el suelo con alta densidad. La humedad por su parte afecta esta propiedad aumentándola ligeramente. Resultados similares fueron encontrados en suelos limosos (Yao y D.Zeng., 1988). Sin embargo, otros autores no encontraron relación entre la fricción interna del suelo y la densidad aparente (McKyes et al, 1994; Mouazen et al, 2002).

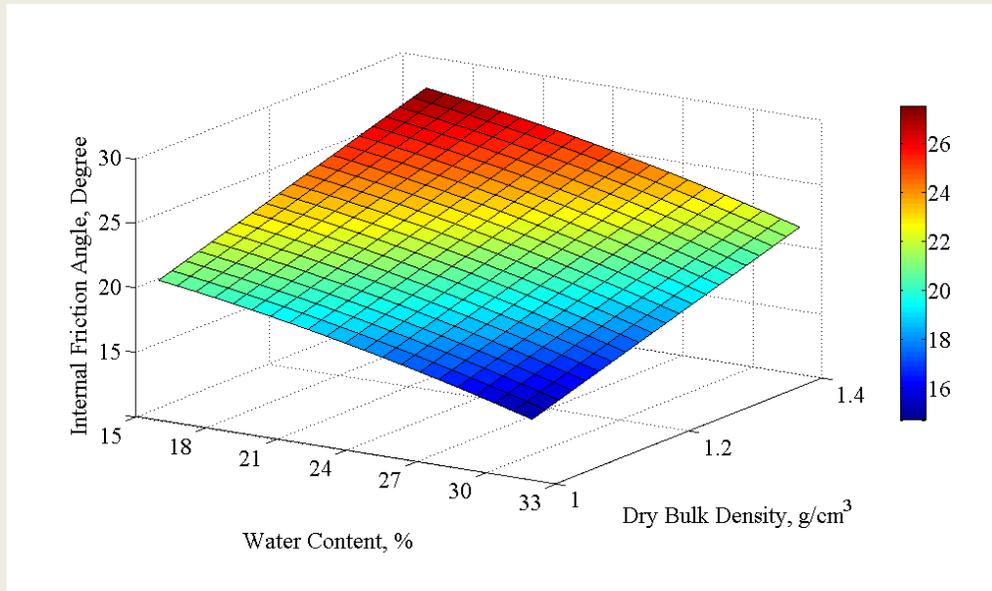


Figura: 3.6 Comportamiento de la fricción interna del suelo.

Las relaciones para la predicción de ángulos de fricción del suelo fueron escritas como:

$$\phi = a\rho + bu^2 + c \quad (32)$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

$$a = 16.67 \quad (13.47, 19.86)$$

$$b = -0.007976 \quad (-0.0098, -0.006152)$$

$$c = 6.204 \quad (2.232, 10.17)$$

Estadística del ajuste:

SSE: 8.1

R-square: 0.9489

Adjusted R-square: 0.9404

RMSE: 0.8216

Por su parte la fricción externa del suelo respecto al acero se determinó por medio del ensayo modificado de corte directo de metal. El mismo muestra una dependencia sustancial al contenido de humedad del suelo, aumentando de forma cuadrática hasta un valor máximo de 17° para el valor mínimo de humedad (Figura: 3.7). Por su parte con el aumento de la densidad solo se registra un crecimiento discreto y lineal de esta propiedad.

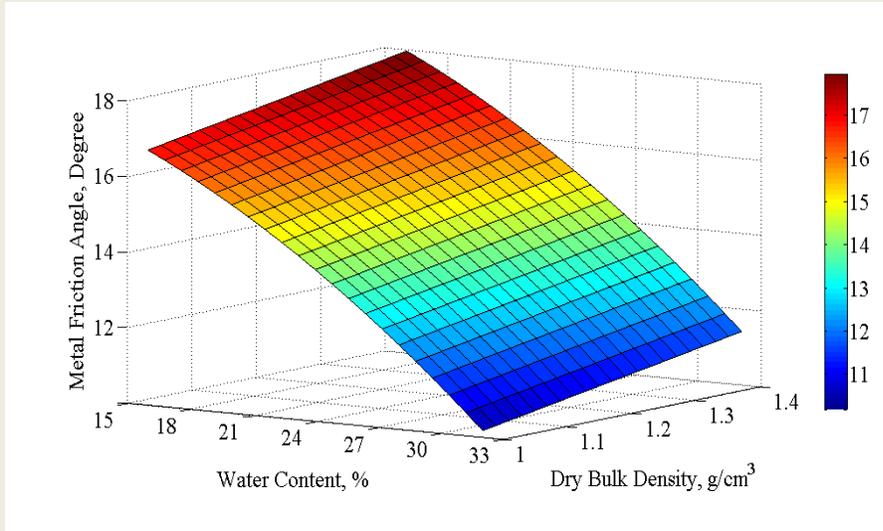


Figura: (3.7) Las relaciones para la predicción de ángulos de fricción del suelo fueron escritas como:

$$\delta = a + b\rho + cu^2 \quad (33)$$

Los coeficientes para límites de confianza del 95% son:

$$a = 15.88 \quad (13.05, 18.7)$$

$$b = 3.029 \quad (0.7592, 5.299)$$

$$c = -0.008523 \quad (-0.009818, -0.007227)$$

Estadística del ajuste:

SSE: 4.088

R-square: 0.9471

Adjusted R-square: 0.9383

RMSE: 0.5836

3.2. Resultados de los experimentos virtuales.

3.2.1 Influencia de los tamaños de las partículas.

La influencia de tamaños de las partículas en la respuesta mecánica del modelo se evalúa por medio de la simulación del ensayo de compresión triaxial (Figura: 3.8). El mismo se realizó

empleando partículas esféricas con radio de 0,6, 2,5 y 3,2 mm formando una probeta cilíndrica de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura.

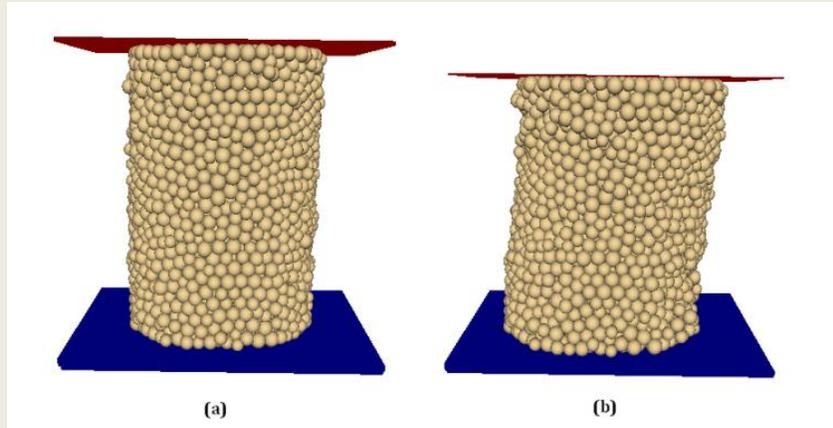


Figura:(3.8) Simulación del ensayo de compresión triaxial.

Como resultado de la disminución del radio de las partículas en la simulación del ensayo triaxial disminuye el efecto de la oscilación vertical de la fuerza. Para las partículas de menores dimensiones el proceso se hace más uniforme Figura: (3.9) Sin embargo aumenta considerablemente el tiempo de computacional necesario para calcular un mayor número de contactos, asimismo para mantener la estabilidad numérica se necesita además reducir el espacio de tiempo lo que hace más lenta la simulación.

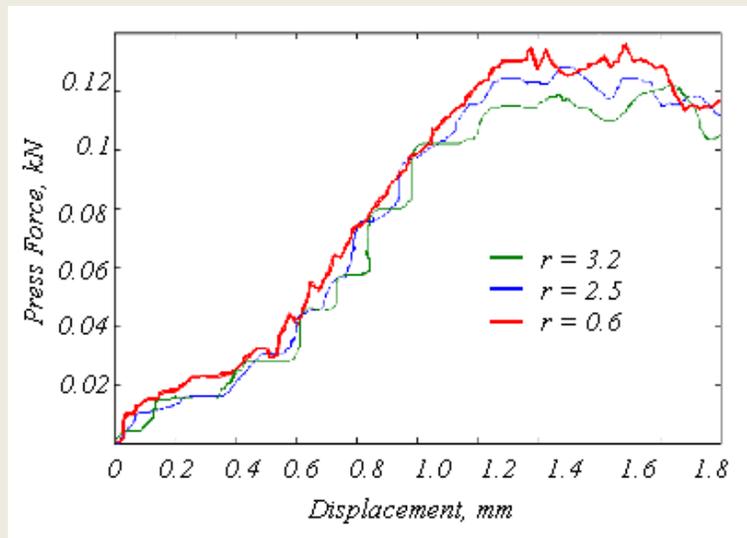


Figura: (3.9) Fuerzas resultantes para diferentes radios de partículas.

Finalmente se adopta el radio de 2.5 mm para realizar los ensayos subsiguientes a partir de considerar los valores de dispersión adecuados y de ese modo mantener en valores mínimos el tiempo de cómputo.

3.2.2 Relación de los parámetros de macro y micro fricción.

La relación entre los valores microscópicos del modelo y macroscópicos de la fricción del suelo se obtuvieron simulando con valores constantes de los demás parámetros varios ángulos de micro-fricción. Se emplearon valores en el siguiente rango: 3,8, 4,6, 5,4, 6,2 ° y luego se trazó la curva entre tensión tangencial y presión normal empleando los valores máximos de la fuerza alcanzado en cada ensayo (Figura 3.10).

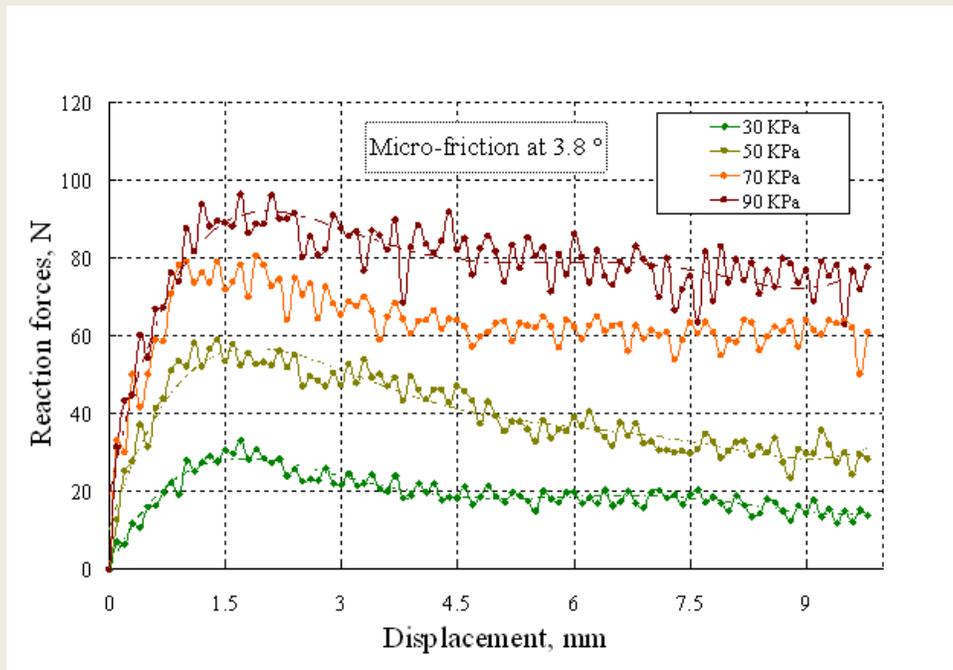


Figura 3.10. Resultado del ensayo de corte directo simulado.

Se realizaron un total de dieciséis simulaciones, ejecutando cada ensayo para valores de 30, 50, 70, 90 KPa de presión normal. Al aumentar la presión un nuevo valor de resistencia a la fuerza cortante se alcanza, la distribución de los resultados por cada valor de micro-fricción empleada en la figura 3.11 donde se aprecia una relación lineal entre la micro-fricción y las tensiones cortantes.

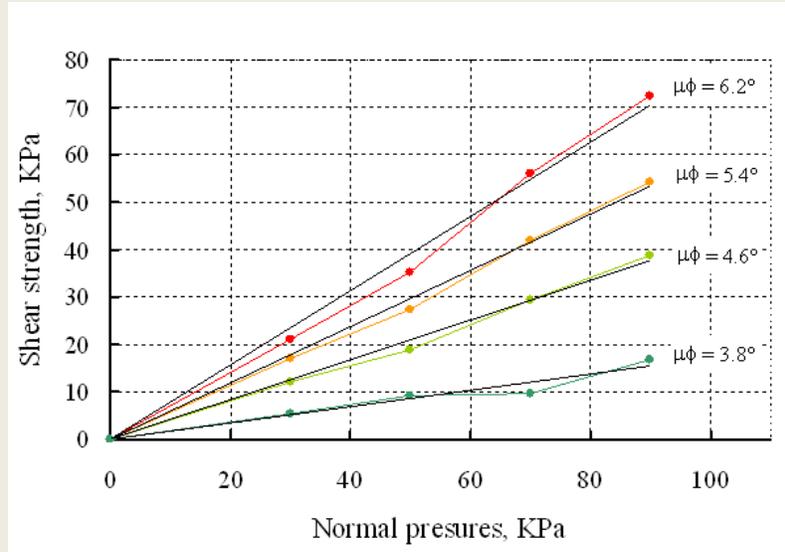


Figura: 3.11 Resultados de las tensiones cortantes para diferentes valores de micro-fricción.

Del mismo modo se determinó el ángulo de fricción interna el cual se obtiene como la pendiente de las líneas que une cada uno de los valores obtenidos en la simulación a diferentes valores de micro-fricción (Figura:3.11).

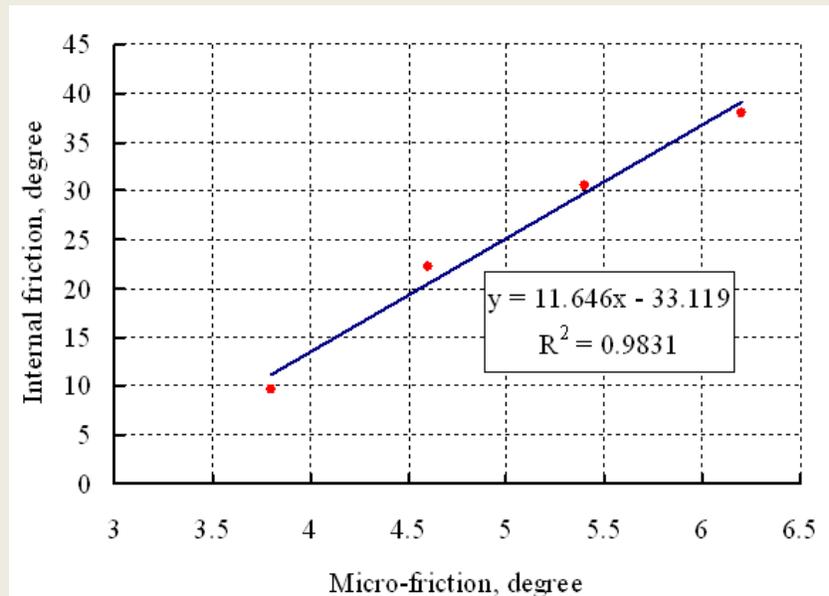


Figura: 3.11 Relación entre la fricción interna y la micro-fricción.

La relación empírica obtenida del análisis de regresión lineal entre la fricción interna y microfricción se expresa en ecuación siguiente:

$$\phi\mu = (\phi + \mathbf{a}) / \mathbf{b} \quad (34)$$

3.2.3 Comparación entre los resultados del canal de suelo y la simulación.

Con el fin de validar los resultados del modelos con respecto a los valores obtenidos en los ensayos realizados en el canal de suelo se generó un bloque de suelo en 500x300x250 mm empleando un total de 40.000 partículas esféricas. La figura (3.12) muestra el resultado de las fuerzas de tiro obtenidas para condiciones de alta humedad y baja densidad y para alta densidad y baja humedad donde el suelo se comporta de forma diferente.

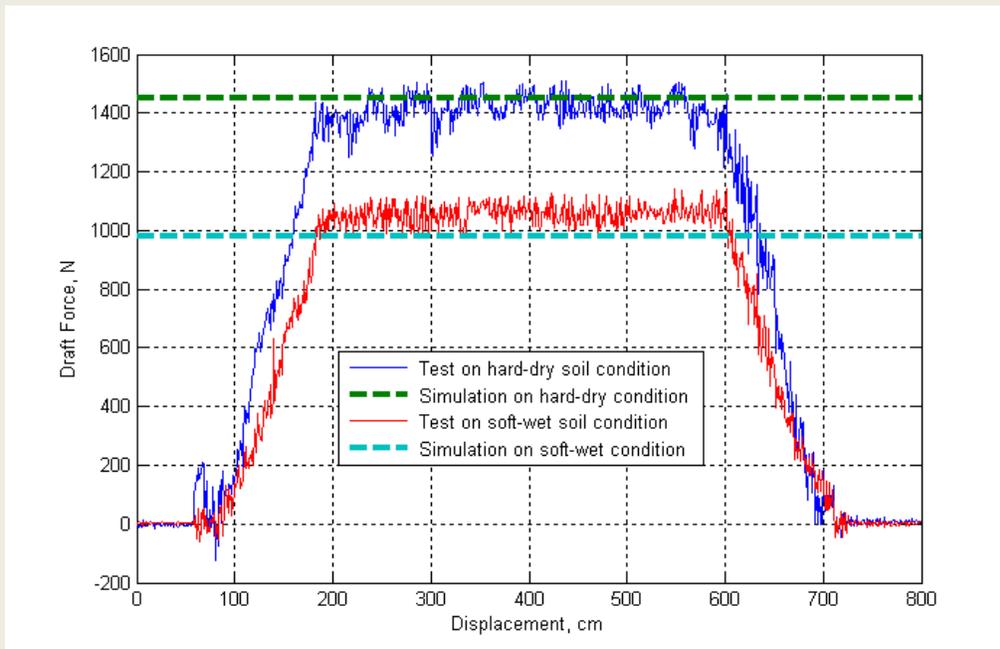


Figura: 3.12. Proyecto de medidas de fuerza en el suelo-bin y prueba de simulación.

El valor promedio alcanzado por la simulación para el caso del suelo compacto-seco es ligeramente mayor al obtenido en similares condiciones durante el ensayo en el canal, esta diferencia puede tener como causa principal el proceso de cementación que se propicia durante la preparación de las muestras en los ensayos de mecánica de suelo. Este proceso posibilita el aumento de propiedades como la cohesión y la elasticidad las cuales dentro del modelo aumentan los valores de la resistencia de los contactos. Sin embargo los valores obtenidos se encuentran en el rango de dispersión del ensayo real. Por otra parte para la condición de suelo húmedo-suelto, los valores de fuerza obtenidas en la simulación son menores, esto está relacionado a la acción que ejerce el peso del suelo sobre este componente de la fuerza. No obstante las diferencias obtenidas se encuentran en el orden de 80 N en sentido longitudinal y 60 N en sentido vertical lo que representan un error de 5.8% y 5.3% respectivamente, considerado satisfactorio para en 90% de probabilidad del modelo.

3.2.4 Simulación de una operación de labranza.

Para la simulación de la labranza se prepararon tres condiciones de suelo diferentes para lo cual se generó un bloque de suelo en 650x400x300 mm empleando un total de 45.000 partículas esféricas (Figura:3.13). El tamaño de las partículas se distribuyó en tres capas diferentes con un radio de 8.10, 6.5 y 4.3 mm en el centro, la parte superior e inferior respectivamente.

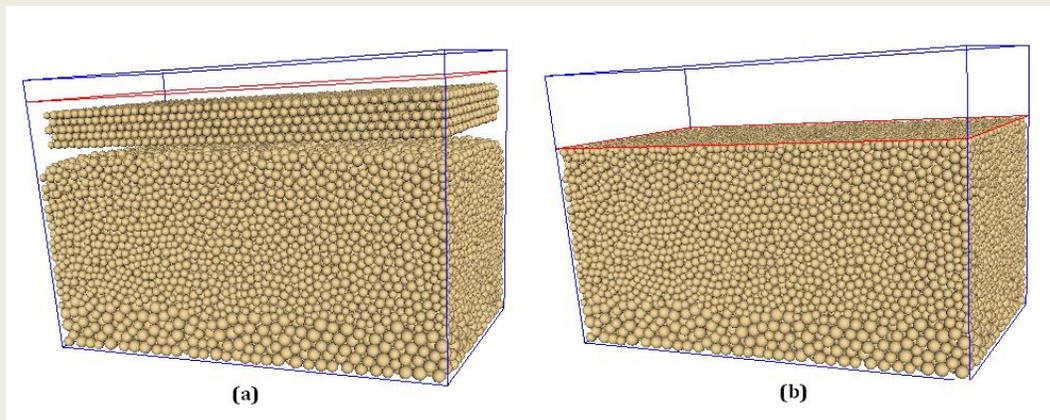


Figura: 3.13 Generación de bloques virtual de suelo.

El bloque de suelo se preparo para tres condiciones diferentes, modificando para ello la humedad y la densidad. El objetivo fue la obtención del suelo húmedo-suelto, friable y compacto-seco. La herramienta por su parte se le asignó una velocidad constante de 3,6 km/h.

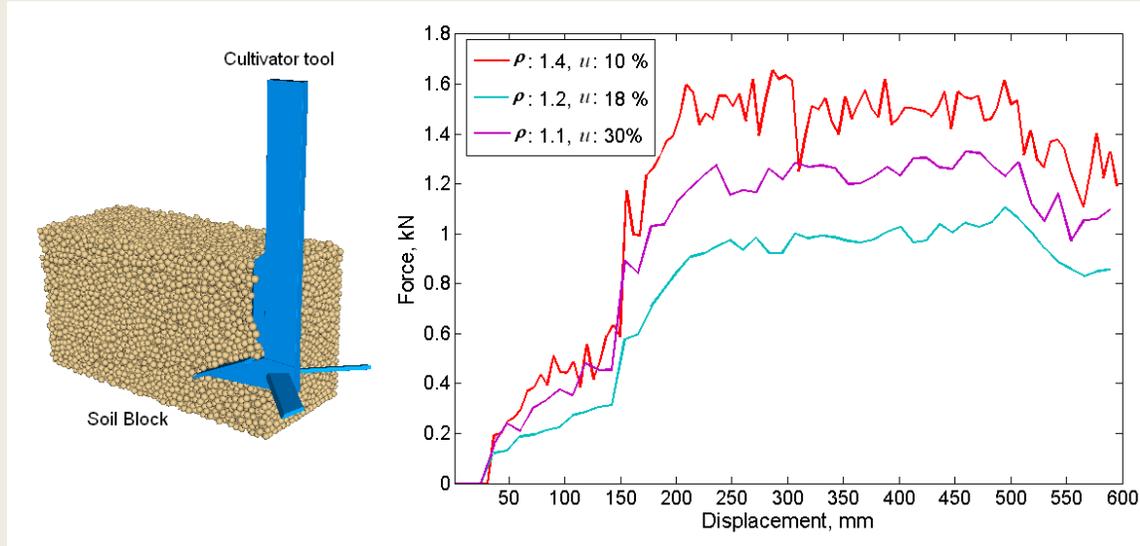


Figura: 3.14. Proyecto de la fuerza de los cultivadores de herramientas en condiciones de suelo húmedo suave, friable, duro y seco.

Los resultados de las fuerza de tiro obtenidas en las tres condiciones mencionadas se muestran en la figura (3.14) como resultado de la simulación de una operación de cultivo. La fuerza se incrementa a medida que aumenta la densidad del suelo en correspondencia con la variación que experimentan las propiedades macros del modelo las cuales determinan la respuesta del medio. Asimismo la oscilación de los valores de la fuerza o dispersión también es mayor para el suelo compactado-seco, para las condiciones del suelo friable y húmedo-suelto la oscilación disminuye considerablemente debido a la ocurrencia de un menor número de enlaces entre partículas para estos casos y la aparición de valores de tensión de falla menores.

3.2.5 Variación de la densidad del suelo y tensiones en el suelo.

La variación de la densidad se analizó a partir de dividir el bloque de suelo en siete secciones a las cuales se le calculó el volumen después de la interacción con la herramienta de labranza. De

este modo se determinó el efecto del implemento a través del suelo mostrado en la figura (3.15) donde se aprecia la mayor disminución de la densidad en la zona central por donde pasa la cuña y el cuerpo principal de la herramienta, este patrón es similar para los tres niveles de densidad analizadas.

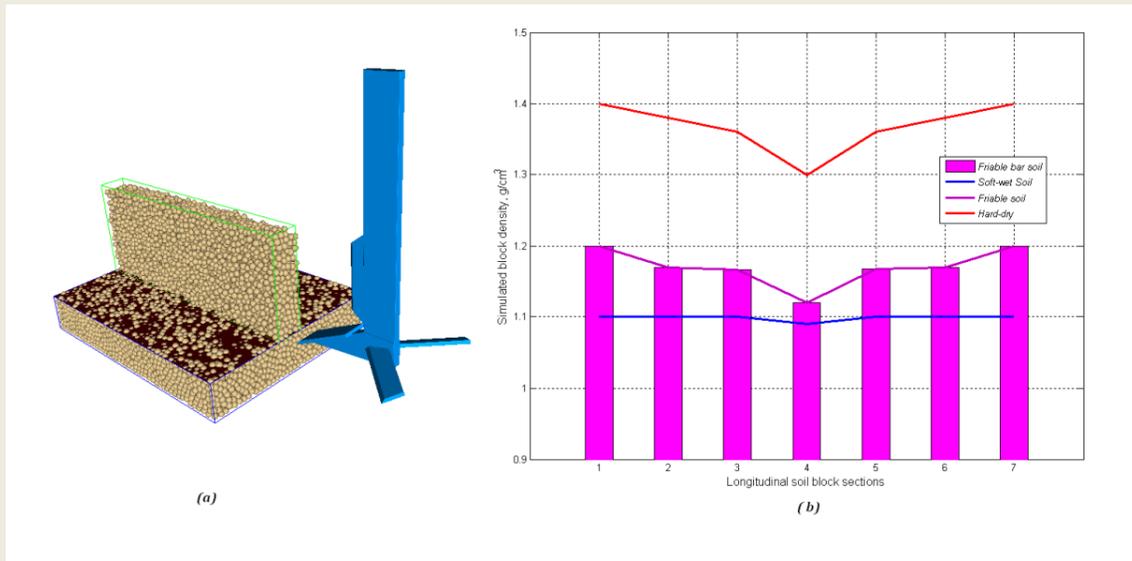


Figura: 3.15. Cambios de densidad del suelo después de la simulación.

Como un resultado de la simulación se considera además la posibilidad de hacer una representación gráfica de las fuerzas a que están sometidas las partículas ubicadas debajo del trayecto de la herramienta. La figura (3.16) muestra dicha distribución en la secciones del bloque de suelo en condición de compacto-seco (a) y friable (b).

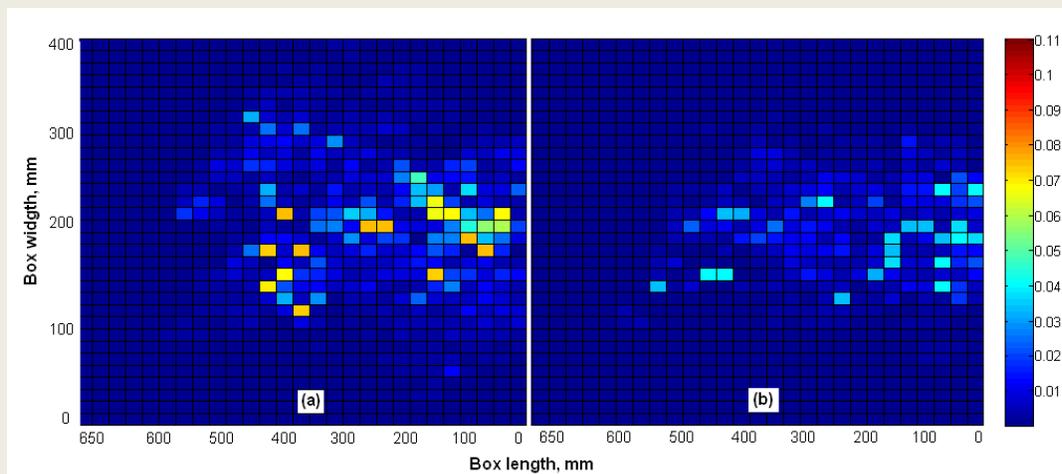


Figure: 3.16. Distribución de las tensiones en las partículas por debajo del apero.

En ambos casos la zona central del bloque resulta la parte más tensionada con la diferencia que para el suelo friable solo alcanzan las fuerzas de en la partícula valores de 0.04 N y para el suelo compactado-seco llegan hasta 0.08 N. Estos valores de fuerza pueden convertirse en presiones considerando el área sobre la cual actúa lo que nos brinda criterios para valorar los diseños de los aperos y su efecto en el piso de labranza.

CONCLUSIONES

1. Las propiedades macroscópicas del suelo necesarias para la implementación de un modelo de elementos discretos se obtienen por medio de la ejecución de ensayos de compresión triaxial y corte directo modificado.
2. Empleando un diseño factorial, con la posterior selección del modelo estadístico, se obtiene la relación existente entre las propiedades mecánicas del suelo con respecto a la densidad y la humedad.
3. El contenido de humedad y la densidad constituyen factores que modifican el comportamiento mecánico del suelo estudiado. El módulo de Young, la cohesión y la fricción aumentan su magnitud con el aumento de la densidad y disminuyen con el aumento de la humedad, obteniéndose una ecuación empírica para cada una de ellas.
4. Las fuerzas de tiro, para suelos con diferentes condiciones de humedad y densidad, obtenidas por medio de la simulación mostraron valores adecuados, comparados con las obtenidas bajo las mismas condiciones en el canal de suelo, para un intervalo de confianza del 90%.
5. La variación de la densidad y la distribución de las fuerzas en las partículas del bloque de suelo virtual posibilita establecer criterios para modificar los aperos y predecir las tensiones a que pueden estar sometidas las diferentes capas del interior del suelo.

RECOMENDACIONES

1. Llevar a una validación de campo los resultados obtenidos en el canal de suelo con el fin de establecer la validez del modelo.
2. Emplear diferentes modelos de aperos para simular operaciones de labranza, subsolado y otras que comúnmente se aplican durante la preparación y el manejo del suelo.
3. Extender el modelo a otros tipos de suelos que posibilite la predicción de las fuerzas así como el comportamiento del suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abo-Elnor, M., R. Hamilton, and J.T. Boyle, *Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis*. Soil and Tillage Research, 2004. **75**(1): p. 61-73.
2. Ahmari, S. and M. Ahmadi, *Finite-element modelling of laterally loaded piles in clay*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Geotechnical engineering, 2009. **162**(3): p. 151-163.
3. Asaf, Z., D. Rubinstein, and I. Shmulevich, *Determination of discrete element model parameters required for soil tillage*. Soil and Tillage Research, 2007. **92**(1-2): p. 227-242.
4. Carter, M.R. and H. Daniel, *CONSERVATION TILLAGE*, in *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 2005, Elsevier: Oxford. p. 306-311.
5. Cundall, P.A. and O.D.L. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*. Geotechnique 1979. **29** (1).
6. Cundall, P.A., *Formulation of a three-dimensional distinct element model--Part I. A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1988. **25**(3): p. 107-116.
7. Davoudi, S., et al., *A Two Dimensional Finite Element Analysis of a Plane Tillage Tool in Soil Using a Non-linear Elasto-Plastic Model*. American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci., 2008. **3**(3): p. 498-505.
8. Gebregziabher, S., et al., *Design of the Ethiopian ard plough using structural analysis validated with finite element analysis*. Biosystems Engineering, 2007. **97**(1): p. 27-39.
9. Godwin, R.J., *A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces*. Soil and Tillage Research, 2007. **97**(2): p. 331-340.
10. Hentz, S.b., L. Daudeville, and F.d.r.V. Donze, *Identification and Validation of a Discrete Element Model for Concrete*. Journal of Engineering Mechanics, 2004. **130**(6): p. 709-719.
11. Karmakar, S. and R.L. Kushwaha, *Dynamic modeling of soil-tool interaction: An overview from a fluid flow perspective*. Journal of Terramechanics, 2006. **43**(4): p. 411-425.
12. Liyanapathirana, D.S., *Arbitrary Lagrangian Eulerian based finite element analysis of cone penetration in soft clay*. Computers and Geotechnics, 2009. **36**(5): p. 851-860.
13. Mootaz, A.E., H. R., and J.T. Boyle, *3D Dynamic analysis of soil-tool interaction using the finite element method*. Soil & Tillage Research, 2003. **40**: p. 51-62.
14. Mouazen, A.M. and M. Neményi, *Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil*. Soil and Tillage Research, 1999. **51**(1-2): p. 1-15.
15. Perdok, U.D. and J.K. Kouwenhoven, *Soil-tool interactions and field performance of implements*. Soil and Tillage Research, 1994. **30**(2-4): p. 283-326.

16. Roul, A.K., et al., *Predicting the draught requirement of tillage implements in sandy clay loam soil using an artificial neural network*. Biosystems Engineering, 2009. **104**(4): p. 476-485. (Abo-Elnor, Hamilton et al. 2004)
17. Sahu, R.K. and H. Raheman, *Draught Prediction of Agricultural Implements using Reference Tillage Tools in Sandy Clay Loam Soil*. Biosystems Engineering, 2006. **94**(2): p. 275-284.
18. Sharda, V.N., et al., *A Finite Element Model for Simulating Runoff and Soil Erosion from Mechanically Treated Agricultural Lands 2. Field Validation and Applications*. Water Resour. Res., 1994. **30**.
19. Shmulevich, I., Z. Asaf, and D. Rubinstein, *Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method*. Soil and Tillage Research, 2007. **97**(1): p. 37-50.
20. Shrestha, D.S., G. Singh, and G. Gebresenbet, *PM--Power and Machinery: Optimizing Design Parameters of a Mouldboard Plough*. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001. **78**(4): p. 377-389.
21. Utili, S. and R. Nova, *DEM analysis of bonded granular geomaterials*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2008. **32**(17): p. 1997-2031.