

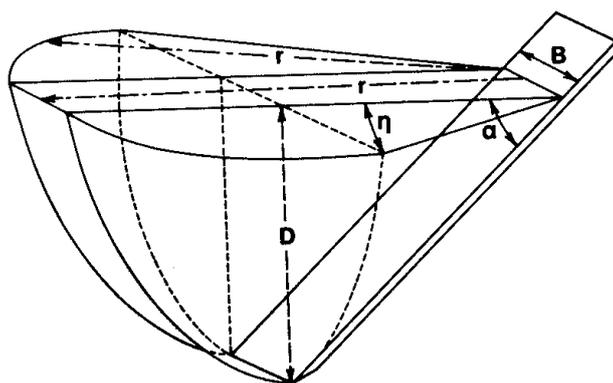
**UNIVERSIDAD CENTRAL DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**



**DPTO. MECANIZACIÓN DE LA
PRODUCCIÓN AGROPECUARIA**

Trabajo de Diploma

INVESTIGACIÓN DE LA VALIDEZ DE LOS MODELOS ANALÍTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE ESFUERZOS DURANTE LA LABRANZA DE LOS SUELOS FERRALÍTICOS ROJOS



Autor: Yuriel León Silverio.

Tutor: Dr. C. Miguel Herrera Suárez.

CURSO: 2009 - 2010

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**



**DPTO. MECANIZACIÓN DE LA
PRODUCCIÓN AGROPECUARIA**

Trabajo de Diploma

INVESTIGACIÓN DE LA VALIDEZ DE LOS MODELOS ANALÍTICOS PARA LA PREDICCIÓN DE ESFUERZOS DURANTE LA LABRANZA DE LOS SUELOS FERRALÍTICOS ROJOS

Autor: Yuriel León Silverio.

Tutor: Dr. C. Miguel Herrera Suárez.

CURSO: 2009 - 2010

RESUMEN

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo investigar la validez de los modelos de fallas del suelo que se basan en la teoría de las presiones pasivas, en las condiciones de los suelos ferralíticos rojos compactados cubanos, para lo cual se implementan en el software Mathcad 14, los modelos de Godwin y Spoor, 1977; McKyes y Ali, 1977; Grisso et al, 1980. Los principales resultados muestran la incapacidad de estos modelos para predecir con exactitud los esfuerzos durante la labranza de suelos altamente cohesivos como es el caso de los suelos objeto de estudio, imponiéndose la necesidad de realizar investigaciones más profundas que permitan encontrar los coeficientes N, adecuados para la predicción de esfuerzos en este tipo de suelos. Por primera vez en Cuba se utilizan estos modelos con este objetivo.

ÍNDICE

Tabla de Contenido

Pág.

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO I. TEORÍAS DE FALLA DEL SUELO, SITUACIÓN ACTUAL.....	9
1.1. Métodos para la investigación de los aperos de labranza.....	9
1.2. Teorías de falla o rotura del suelo bajo la acción de los aperos de la branza.....	13
1.3. Análisis teórico del sistema de fuerzas actuantes en los órganos de trabajo empleados en la descompactación, durante su interacción con el suelo.....	21
1.4. Conclusiones parciales del capítulo.....	25
CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES.....	27
2.1. Programa.....	27
2.2. Metodología de las investigaciones experimentales.....	27
2.2.1. Caracterización física del suelo objeto de estudio.....	28
2.2.2. Preparación y acondicionamiento del canal de suelos.....	28

ÍNDICE

2.2.3. Determinación experimental del sistema de fuerzas actuantes sobre el órgano de trabajo.....	32
2.2.3. Determinación experimental de la velocidad de avance de la herramienta de labranza.....	33
2.2.4. Planificación de los experimentos.....	36
2.2.5. Metodología para la determinación de las condiciones del suelo	40
2.3. Conclusiones parciales del capítulo.....	41
CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VALIDEZ DE LOS MODELOS FUNDAMENTADOS.....	47
3.1. Implementación de los modelos en el software Mathcad 14.....	47
3.2. Resultado de la corrida de los modelos.....	50
3.3. Comprobación experimental de la validez de los modelos.....	53
3.4. Conclusiones parciales del capítulo.....	54
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	57
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En el mundo entero la agricultura tiene gran importancia ya que ella es uno de los sustentos para la economía, para ello se cuenta con una gran cantidad de maquinaria y aperos de labranza para trabajar en los diferentes tipos de suelos. El hombre se ha preocupado por realizar estudios sobre los métodos para la investigación de los aperos de labranza. Estos estudios datan del principio del siglo pasado (1927), siendo (Goriachkin, 1927) y (Nichols y Read, 1934), los pioneros o iniciadores de los mismos. A partir de estos estudios muchas investigaciones han sido conducidas mediante métodos experimentales o teóricos. Donde los métodos experimentales por lo general se desarrollan directamente en el campo, en las condiciones naturales de las zonas a estudiar en cuestión, o en canales de suelos diseñados para este tipo de estudios (Pezzi; Afifi *et al.*, 2001; Manor, 2001; Andrade *et al.*, 2002; Karmakar y Kushawaha, 2003; Chen, 2003 ; Kheirallos, 2004; Liu, 2004; Hall y Raper, 2005; Ibarra *et al.*, 2005; Karmakar, 2005) Tienen como ventaja la posibilidad de obtener experiencia sobre el funcionamiento y la evaluación de los diferentes aperos de labranza. En los teóricos tenemos dos tipos de métodos el analítico que ha sido empleado extensivamente en la predicción de los esfuerzos actuantes sobre los aperos de labranza, para condiciones estáticas o dinámicas y el otro es el numérico que tenido gran expansión en las últimas tres décadas, producto del aumento de su potencia y disponibilidad Además se realizó las teorías de fallas o rotura del suelo bajo la acción de los aperos de labranza, que

INTRODUCCIÓN

estos se basan en un detallado conocimiento de sus propiedades dinámica. Para estas teorías de fallas se realizaron diferentes tipos de cálculo para determinar varios parámetros, se encuentran zonas de fallas en los modelos tridimensionales para herramientas de labranza estrechas y fallas características de las herramientas de labranza anchas. Dentro de estos modelos tenemos el Modelo de Terzaghi, Godwing y Spoor 1977, Hettiaratchi y Reece 1967, Mckyes y Alí 1977 y el de Perumpral, Grisso y Dessaii 1983. Se realizó un análisis teórico del sistema de fuerzas actuantes en los órganos de trabajo empleados en la descompactación, durante su interacción con el suelo, donde el sistema de fuerzas actuante en las herramientas de labranza, fuerzas que actúan en el filo de las cuchillas, diagrama de fuerzas actuantes en el órgano de trabajo, Suelo herramientas fuerzas de reacción y Segmento de suelo en el plano inclinado de la herramienta de labranza. Estos estudios se hacen con el fin de ver si estas teorías nos sirven para la predicción de los esfuerzos en los suelos cubanos.

Tomando en cuenta estos aspectos el **objetivo** del presente trabajo es: investigar la validez de los modelos de fallas del suelo que se basan en la teoría de las presiones pasivas, en las condiciones de los suelos ferralíticos rojos compactados cubanos.

Las **tareas de investigación** a desarrollar se definen, como:

1. El análisis de la situación actual del desarrollo de los modelos analíticos para la predicción de esfuerzos durante la labranza;
2. El análisis teórico de las principales teorías de falla del suelo que se fundamentan en los principios de las presiones pasivas;
3. La modelación de las esfuerzos que actúan sobre los aperos de labranza;

INTRODUCCIÓN

4. La determinación experimental de la validez de los modelos de Godwing y Spoor, 1977; McKyes y Alí, 1977, Grisso y Dessaii 1983, para predecir los esfuerzos durante la labranza de los suelos ferralíticos rojos compactados.

CAPITULO I. TEORÍAS DE FALLA DEL SUELO, SITUACIÓN ACTUAL

1.1. Métodos para la investigación de los aperos de labranza.

Los primeros estudios del sistema suelo-máquina datan del principio del siglo pasado (1927), siendo (Goriachkin, 1937) y (Nichols y Read, 1934), los pioneros o iniciadores de los mismos. A partir de estos estudios una gran cantidad de investigaciones han sido conducidas mediante métodos experimentales o teóricos.

Los Métodos experimentales se soportan en la realización de experimentos que por lo general se desarrollan directamente en el campo, en las condiciones naturales de las zonas a estudiar en cuestión, o en canales de suelos diseñados para este tipo de estudios (Kheirallos, 2004; Liu, 2004a; Hall y Raper, 2005; Ibarra *et al.*, 2005; Karmakar, 2005). Tienen como ventaja la posibilidad de obtener experiencia sobre el funcionamiento y la evaluación de los diferentes aperos de labranza. Sus principales desventajas radican en la imposibilidad de extender en la mayoría de los casos los experimentos a varias condiciones de pruebas y épocas del año, debido a que los gastos de los mismos se elevan tanto que pueden llegar a ser incosteables. También se puede mencionar como otra desventaja importante la gran cantidad de equipamiento y recursos (materiales y humanos) a emplear, aspecto que se torna decisivo a la hora de realizar este tipo de investigaciones.

Estas investigaciones parten del planteamiento de una hipótesis enfocada a la determinación de las características y parámetros de diseño (óptimas o racionales) de los aperos, a partir de una planificación factorial de experimentos, que de conjunto con las técnicas de correlación y regresión posibilitan la determinación de las relaciones

empíricas que existen entre los diferentes factores en estudio, (Norton Dosou, 1987; Fielke, 1994; Pérez Sendín, 1997; Taniguchi y Col, 1999; Afifi *et al.*, 2001; Camacho y Magalhães, 2002; Chandron y Kushawaha, 2002; Fenyvesi y Jóri, 2002; Rahman *et al.*, 2002; Raper, 2002; Karmakar y Kushawaha, 2003; Karmakar *et al.*, 2003; Sánchez y Col, 2003; Liu, 2004a; Zhao, 2004).

Los métodos analíticos han sido empleados extensivamente en la predicción de los esfuerzos actuantes sobre los aperos de labranza, para condiciones estáticas o dinámicas, soportándose en un modelo analítico que idealiza físicamente el fenómeno a describir mediante un modelo o ecuación matemática (Mouazem Mounem y Nemenyi, 1999).

Los métodos numéricos han tenido gran expansión en las últimas tres décadas, producto del aumento de su potencia y disponibilidad, desarrollándose varios métodos específicos que han sido aplicados en este tipo de investigaciones. Los métodos más empleados son el Método de Elementos Distintos (**MED**) o Elementos Discretos, el Método de Fluido Dinámica Computacional (**FDC**) y el Método de Elementos Finitos (**MEF**).

El Método de Elementos Distintos (MED) se basa en una técnica explícita que trata el suelo como una colección de partículas individuales que pueden estar interconectadas o no, las mismas interactúan mediante una serie de leyes de contacto, y el movimiento de las partículas es controlado por las leyes del movimiento de Newton (Mouazem Mounem y Nemenyi, 1999). Sus aplicaciones en la modelación de la interacción suelo-apero de labranza se han visto limitadas, debido a que este método aun se encuentra en desarrollo, estando la mayoría de sus aplicaciones en fase experimental.

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

El Método de Fluido Dinámica Computacional (FDC) toma el suelo como un flujo laminar, dinámico, y no homogéneo, que interactúa con la herramienta de labranza, a la cual se le considera como un obstáculo en el paso de dicho flujo. Sus aplicaciones en este tipo de estudios se han limitado a los trabajos iniciados por (Karmakar *et al.*, 2003; Karmakar, 2003a; b; 2004), donde se simula la interacción de una cuchilla simple con el flujo de suelo. Dicho método se encuentra en una fase inicial de desarrollo en lo referente a la solución de problemas relacionados con la dinámica y mecánica de suelos.

El Método de Elementos Finitos (FEM) se considera como un método efectivo en la simulación de la interacción suelo-herramienta de labranza. Su primera aplicación en el análisis del proceso de corte del suelo por una herramienta de labranza se realizó en 1977 por (Young y Hanna, 1977), posteriormente ha tenido varias aplicaciones en la solución de estos problemas (Chi y Kushawaha, 1989; Chi, 1990; Chi y Kushawaha, 1990; Chi, 1991; Kushawaha, 1995; Rosa Aparecido, 1997; Chi y Kushawaha, 1998; Plouffe y Col, 1998b; Plouffe y Col, 1998a; Fielke Milton, 1999; Mouazem Mounem y Nemenyi, 1999; Mounem Mouazem y Nemenyi, 1999; Mouazem Mounem y Ramon, 2002; Abu Hamed y Reeder, 2003). Su principal desventaja radica en la demanda de recursos computacionales de gran capacidad de procesamiento, dada la complejidad del procesamiento matemático producto de la no linealidad del suelo. Además se requiere de una especialización o preparación previa antes de la utilización de las herramientas computacionales.

En los casos donde no se disponen de los recursos computacionales adecuados, así como se desconoce el método, es cuando resulta muy útil la utilización de los métodos analíticos.

1.2- Teorías de falla o rotura del suelo bajo la acción de los aperos de la branza.

Durante la interacción suelo aperos de labranza la primera reacción en la parte delantera de implemento producto de su avance es tomar una parte del suelo y conducirlo hacia el exterior en forma de cono o cuña. El cono es comprimido hasta que la resistencia a compresión exceda el valor de la resistencia al esfuerzo cortante. Formándose sucesivamente los planos de corte, mientras que la masa de suelo viaja a través de la herramienta de labranza (Lade, 1982).

Cuando la herramienta de labranza rompe el suelo a una profundidad (p) el área afectada, así como la resistencia ofrecida son funciones de las propiedades dinámicas del suelo, la geometría de la herramienta y su velocidad de corte, (Abu Hamed y Reeder, 2003).

Las teorías de falla o rotura del suelo se basan en un detallado conocimiento de sus propiedades dinámicas.

Las teorías que tratan de explicar el proceso de falla o rotura del suelo por la acción de los aperos de labranza se dividen en dos grandes grupos:

- El que utiliza criterios dinámicos, es decir, el que refiere la condición de falla a los esfuerzos actuantes;
- El que utiliza criterios cinemáticas, en los que la falla se mide en términos de deformaciones.

Actualmente se siguen criterios dinámicos y los correspondientes al segundo grupo no gozan de buen predicamento.

Las teorías que utilizan criterios dinámicos han desarrollado modelos tanto para herramientas anchas (en el plano) como para estrechas (tridimensionales) basadas en la teoría de las presiones pasivas del suelo de Terzaghi (Mckyes, 1985).

Cuando se labora el suelo con herramientas anchas, es decir cuando el ancho de trabajo es mayor que la profundidad, se parte del presupuesto que plantea que cuando la herramienta se desplaza con un ángulo de inclinación (α) con respecto a la horizontal

(Fig. 1), la falla se produce longitudinalmente formando un ángulo de $45-(\phi/2)$. El tramo AB se asocia a la ecuación de una espiral logarítmica cuyo origen es el polo P (Abu Hamed y Reeder, 2003). En la medida que la herramienta va avanzando el suelo se eleva en la zona OD en forma de bloques, Fig. 1.1.

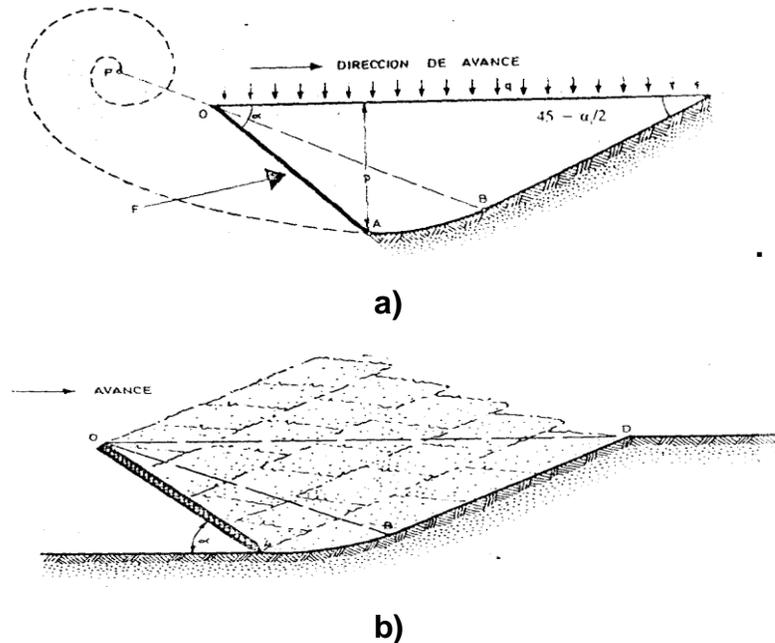


Fig. 1.1. Falla característica de las herramientas de labranza anchas. a) Modelo de falla; b) Desplazamiento del suelo sobre la herramienta

La fuerza por unidad de ancho necesaria para producir la rotura en este modelo es función de las propiedades mecánicas del suelo y de la geometría de los aperos de labranza

$$F = f(\gamma, \phi, C, \delta, Ca, \alpha, D, q) \quad (1.1)$$

donde: F-fuerza de tiro;

γ -peso específico del suelo;

C-cohesión del suelo;

δ -ángulo de fricción suelo-metal;

Ca- adherencia del suelo;

α - ángulo de ataque de la herramienta;

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

D- profundidad de trabajo de la herramienta;

q-presión de sobrecarga de la superficie libre del suelo.

La ecuación 1 escrita en su forma adimensional es:

$$\frac{F}{\gamma D^2} = f\left(\frac{C}{\gamma D^2}; \frac{C_a}{\gamma D^2}; \frac{q}{\gamma D^2}; \delta; \phi; \alpha\right) \quad (1.2)$$

Dicha ecuación escrita como una ecuación lineal queda de la siguiente forma:

$$F = \gamma D^2 \cdot N_\gamma + CD \cdot NC + C_a \cdot DN_a + q \cdot D \cdot N_q \quad (1.3)$$

donde: N_γ , NC , N_a ; N_q - factores adimensionales.

Cuando se trata de herramientas estrechas donde el ancho de trabajo es la tercera o cuarta parte de la profundidad como es el caso de los escarificadores y subsoladores, la falla se define como un problema tridimensional, reconociéndose tres zonas de falla bien definidas Fig 2a. El análisis tridimensional de la falla asume que la configuración de la misma está compuesta por regímenes de falla delanteros y laterales, definiéndola fuera de la interface suelo-herramienta, e incluyendo el movimiento horizontal desde el centro de dicha interface (Mckyes, 1989). La fuerza total o resultante es la suma de los vectores de las fuerzas debido a la falla delantera (P_f) y lateral (P_s). Además de la fuerza de adhesión en la interface-suelo herramienta, que provoca una alteración lateral a la herramienta del suelo y la formación de una cuña de suelo delante de la herramienta Fig. 2b.

Los modelos que mayor utilización han tenido para describir la falla con aperos estrechos son:

Hettiaratchi y Reece 1967;

Godwing y Sopor 1977;

Mckyes y Alí 1977;

Perumpral, Grisso y Dessaii 1983.

En la totalidad de los modelos se estima la fuerza P de resistencia que opone el suelo al movimiento de la herramienta, a partir de la siguiente ecuación general.

$$P = (\gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma + C \cdot D \cdot N_C + Ad \cdot D \cdot N_a + q \cdot D \cdot N_q) \cdot W \quad (1.4)$$

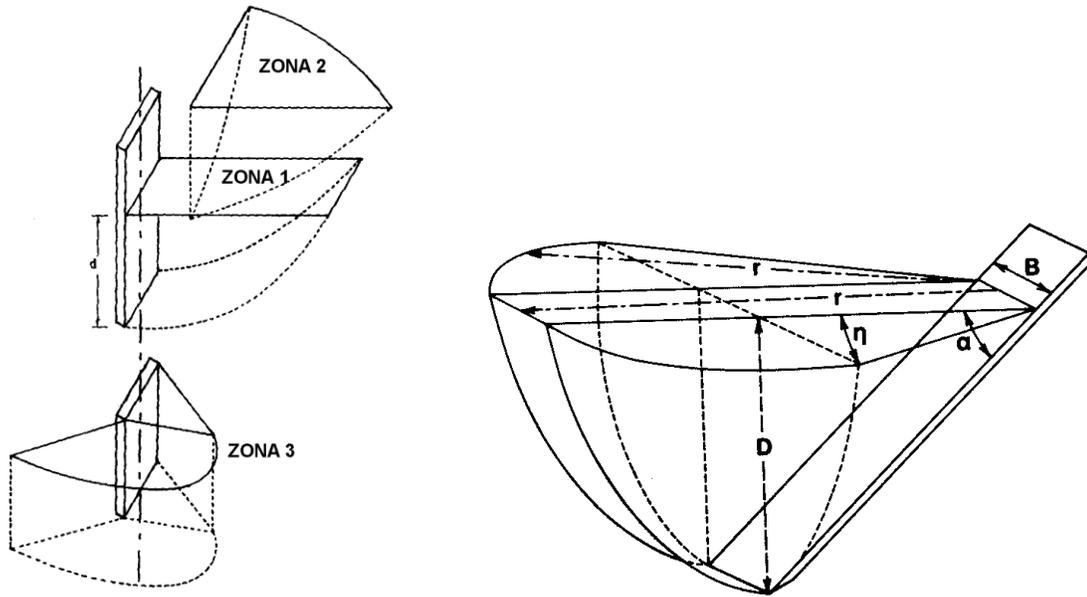


Fig.1.2. Modelo de falla tridimensional para herramientas estrechas. a) zonas de falla; b) Modelo de Godwing y Spoor.

La dirección de la fuerza resultante es afectada por el ángulo de fricción de la cuchilla (δ) y el ángulo de levantamiento (α).

El modelo de Hettiaratchi y Reece se puede emplear en herramientas rugosas y lisas, así como rectas e inclinada /139/. Propone ecuaciones para la determinación de la falla delantera y lateral a partir de los coeficientes adimensionales (N), dependientes del ángulo de rozamiento interno (ϕ), el ángulo de fricción suelo metal (δ) y la posición de la herramienta (α).

$$P_f = \gamma \cdot D^2 \cdot B \cdot N_\gamma + C \cdot D \cdot B \cdot N_c + Ad \cdot D \cdot B \cdot N_a + q \cdot N \cdot B \cdot N_q \quad (1.5)$$

$$P_s = \left[\gamma \left(D + \frac{q}{\gamma} \right)^2 \cdot B \cdot N_s \cdot \gamma + C \cdot D \cdot B \cdot N_{sc} \right] \cdot k\alpha \quad (1.6)$$

donde: P_f - Fuerza de tiro horizontal debido a la falla delantera, N;

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

- Ps- Fuerza de tiro horizontal debido a la falla lateral, N;
C- Cohesión del suelo, N/cm²;
Ad- Adhesión suelo-metal, N/cm²;
 γ - Peso volumétrico del suelo, N/cm³;
B- Ancho de la herramienta, cm;
D- Profundidad de la herramienta, cm;
q- Presión de sobrecarga de la superficie libre del suelo, N/cm²;
K α - Factor de inclinación.
N- Coeficientes adimensionales.

El factor de sobrecarga se determina como:

$$K\alpha = \frac{\tan^{-1}(\sin \alpha \cdot \cot \phi)}{90 - \psi} \quad (1.7)$$

siendo ψ el ángulo de inclinación del plano de falla con respecto a la vertical:

$$\psi = 45 + (\phi / 2) \quad (1.8)$$

Las componentes de la fuerza de tiro en el eje vertical (Fz) y horizontal (Fx) se determinan como:

$$F_x = Pf \cdot \sin(\alpha + \delta) + Ps \cdot \sin \alpha + Ad \cdot D \cdot B \cdot \cot \alpha \quad (1.9)$$

$$F_z = Pf \cdot \cos(\alpha + \delta) + Ps \cdot \cos \alpha + Ad \cdot BD \quad (1.10)$$

Este modelo no se ha encontrado adecuado para la predicción de los esfuerzos en relaciones ancho/profundidad de trabajo de las herramientas mayores que seis (Mckyes, 1989).

El modelo de Godwing y Sopor se emplea fundamentalmente en herramientas que laboran a profundidades mayores que la profundidad crítica, dividiendo la cuña de falla en una cuña central y dos lados de falla creciente en forma circular Fig. 3. La profundidad crítica (Pc) se determina como:

$$P_c = 74\sqrt{Z} \quad (1.11)$$

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

Donde: P_c - Profundidad crítica por debajo de la cual aparecerá la compactación lateral del suelo, cm;

Z - Espesor de órgano de trabajo, cm.

La ecuación para determinar la fuerza que surge debido al lado creciente de falla se desarrolla para un radio (r) que se asume como constante, para los lados crecientes y extendidos al interior de un ángulo (η), donde:

$$\eta = \cos^{-1} \left[\frac{P_c}{r} \cdot \cot \alpha \right] \quad (1.12)$$

Esta ecuación toma en cuenta el volumen elemental de la cuña y las fuerzas actuantes en las mismas. Las relaciones para las componentes de las fuerzas horizontal (F_x) y vertical (F_z) se desarrollan combinando las relaciones para los lados crecientes y el centro de la cuña (Mckyes, 1989).

$$F_x = \left\{ \begin{array}{l} \gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma + C \cdot D \cdot N_c + q \cdot D \cdot N_q + \dots \\ \beta + (r \cdot \text{sen} \eta) \cdot \text{sen}(\alpha + \delta) + \dots \\ + A_d \cdot B \cdot D \cdot N_a \cdot \text{sen}(\alpha + \delta) + \cos(\alpha) \dots \end{array} \right\}$$

(1.13)

$$F_z = \left\{ \begin{array}{l} - \left[\gamma \cdot D^2 \cdot N_\gamma + C \cdot D \cdot N_c + q \cdot D \cdot N_q \right] \cdot \beta + r \cdot \text{sen} \eta \cdot \cos(\alpha + \delta) + \dots \\ - A_d \cdot D \cdot N_a \cdot \cos(\alpha + \delta) - \text{sen} \alpha \dots \end{array} \right\} \quad (1.14)$$

El modelo requiere de un previo conocimiento de la distancia de ruptura (r), para lo cual existe un gráfico que describe la relación entre la distancia de ruptura y el ángulo de levantamiento de la herramienta.

El modelo de Mckyes y Alí es similar al anterior con la diferencia que no requiere de un previo conocimiento de la distancia de ruptura (r), la superficie de falla se asume recta formando un ángulo (β) con respecto a la horizontal, creando las mínimas fuerzas pasivas.

La distancia de ruptura (r) se asume como:

$$r = D(\cot \beta + \cot \alpha) \quad (1.15)$$

Donde: D- profundidad de trabajo de la herramienta; cm,

β - ángulo de falla;

α - ángulo de levantamiento de la cuchilla,

Para el cálculo de la fuerza total solo se consideran las fuerzas distribuidas por el centro de la cuña y los lados crecientes proponiendo una aproximada superficie de falla de dos cuñas en forma de espiral logarítmica Fig.1.3. Esta superficie de falla es apropiada para herramientas con un elevado rango de rugosidad y ángulo de levantamiento. El lado de falla se asume en forma circular (Mckyes y Ali, 1977).

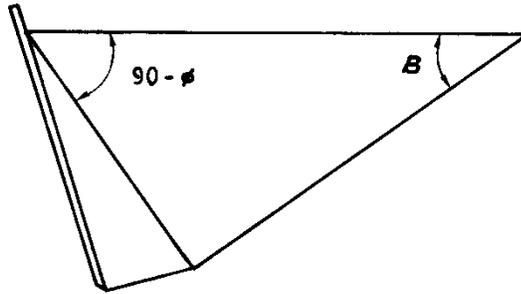


Fig.1. 3. Superficie de falla de dos cuñas aproximadas (Mckyes y Ali).

La ecuación final para calcular la fuerza de tiro es similar a la ecuación 2.4, definiéndose los N factores adimensionales como:

$$N_{\gamma x} = \frac{(r / 2D)(1 + 2r \sin \eta / 3B)}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \quad (1.16)$$

$$N_{c x} = \frac{[1 + \cot \beta \cot(\beta + \phi)] + r \sin \eta / B}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \quad (1.17)$$

$$N_{q x} = \frac{(r / D) + r \sin R / B}{\cot(\alpha + \delta) + \cot(\beta + \phi)} \quad (1.18)$$

El modelo de (Perumpral *et al.*, 1983). Modelo similar a los modelos 2 y 3, con la diferencia que los lados de los flancos son acuñaados, el centro de la cuña se toma como el modelo tres, la superficie de deslizamiento se asume recta Fig. 1.4

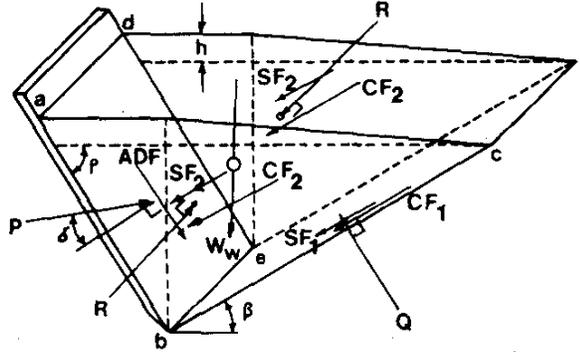


Fig. 1.4. Modelo de falla de propuesto por Perumpral, Grisso y Dessaii (1983)

Este modelo se ha encontrado apropiado para cuchillas de superficie liza con ángulos de levantamiento pequeños, formando un ángulo β con la horizontal, el mismo presupone que la cuña de suelo está en equilibrio y expresa el ángulo de fricción suelo-metal en función del ángulo de levantamiento de la cuchilla.

Los componentes de la fuerza de tiro horizontal y vertical se determinan como:

$$F_z = P \cos(\alpha + \delta') \quad (1.19)$$

ó

$$F_z = \left[\begin{array}{l} W_w + 2SF_2 \sin \beta + SF_1 \sin \beta + \dots \\ 2CF_2 \sin \beta + SF_1 \sin \beta + ADF \sin \alpha - Q \cos \beta \end{array} \right] \quad (1.20)$$

$$F_x = P \sin(\alpha + \delta') \quad (1.21)$$

ó

$$F_x = \left[\begin{array}{l} 2SF_2 \cos \beta + SF_1 \cos \beta + \dots \\ 2CF_2 \cos \beta + CF_1 \cos \beta + ADF \cos \alpha + Q \sin \beta \end{array} \right] \quad (1.22)$$

La fuerza de resistencia del suelo al movimiento de la cuchilla se expresa como:

$$P \frac{1}{\sin(\beta + \delta' + \alpha + \phi)} + \left\{ \begin{array}{l} - ADF \cos(\beta + \phi + \alpha) + 2SF \cos(\phi) + \dots \\ W_w \sin(\phi + \beta) + W_w \sin(\phi + \beta) + \dots \\ 2CF_2 \cos(\phi) + CF_1 \cos(\phi) \end{array} \right\} \quad (1.23)$$

Ecuación que escrita en términos suelo herramienta:

$$P \frac{1}{\sin(\beta + \delta' + \alpha + \phi)} + \left\{ \begin{array}{l} - ADBD(1 + h/D) \cdot \cos(\beta + \phi + \alpha) / \sin(\alpha) + \dots \\ \gamma A_1 \left[K_O^2 \sin(\phi) + \beta \sin(\phi + \beta) \right] + \dots \\ cF_1 \cos(\phi) \left[A_1 + BD / \sin \beta \right] \end{array} \right\} \quad (1.24)$$

1.3. Análisis teórico del sistema de fuerzas actuantes en los órganos de trabajo empleados en la descompactación, durante su interacción con el suelo.

En la interacción suelo-herramienta de labranza considerando la herramienta de labranza como una cuña simple se ha definido que el suelo ejerce una resistencia (r) formada por su componente normal a la superficie de trabajo (N), Fig. 1.6, que está inclinada un ángulo ϕ (fricción suelo metal) con respecto a la normal de la superficie de trabajo. Por otra parte las fuerzas que se oponen al deslizamiento del suelo sobre el metal (componentes friccionales), que en muchos casos se definen como $N \tan(\phi)$.

Las componentes de la fuerza (R) en el eje horizontal (R_x) y en el eje (R_z), determinan la resistencia al desplazamiento de la cuña y la capacidad de profundización respectivamente (García De La Figal Y Costales, 1977). La fuerza R_z se equilibra con las partes de apoyo del apero.(Nichols y Read, 1934)

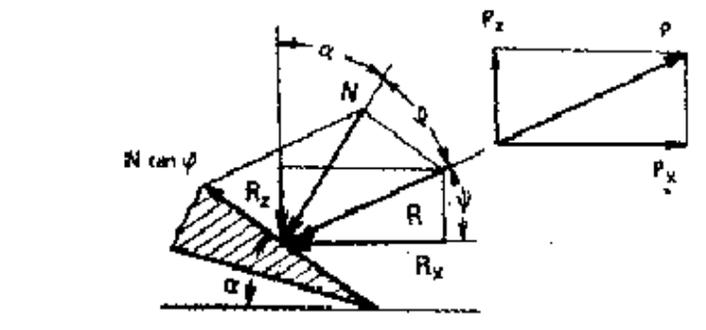


Fig. 1.6. Sistema de fuerzas actuantes en las herramientas de labranza.

Estas fuerzas de resistencia del suelo con la resultante de las reacciones que surgen durante el avance de la herramienta, siendo:

R_f- resistencia a la penetración del filo;

R_k- resistencia al suelo a la deformación;

R_p- peso del prisma;

F_i - fuerza de inercia del prisma;

La sumatoria de las componentes de la resistencia del suelo (P_x) que se oponen a la acción de la cuña en la dirección del movimiento, cuando se desplaza la herramienta con movimiento rectilíneo uniforme será igual a:

$$P_x = R_{px} + R_{kx} + R_{gx} + F_f i_x \quad (1.27)$$

La resistencia a la penetración del filo (R_p), para las rejas bien afiladas que trabajan en terrenos que no tienen ni piedras ni raíces fuertes y se incluye junto con la resistencia del suelo a la deformación, debido a la que no se puede determinar ni analíticamente ni experimentalmente por si sola. Con la formación de la capa posterior la resistencia K_p, toma valores considerables (Liu, 2004b).

La componente de dicha fuerza en el eje horizontal R_{px} (Fig. 1.7), se determina como:

$$R_{px} = 0.5qh^2b(\tan \varphi \cdot \cot \varepsilon_p + 1) \quad (1.28)$$

ó

$$R_{px} = 0.4G \cdot \tan(\varepsilon_p + \varphi) \quad (1.29)$$

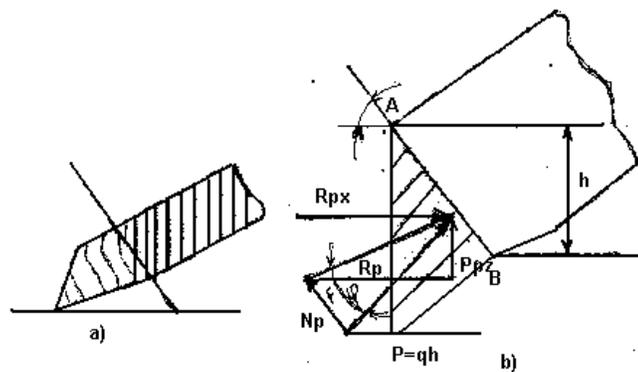


Fig. 1.7. Fuerzas que actúan en el filo de las cuchillas.

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

La expresión surge a partir del análisis que considera que la fuerza R_{pz} tendrá que ser menor o igual al 30 a 40 por ciento del peso máximo (G), que actúa sobre el órgano de trabajo, o sea $R_{pz} \leq 0.4G$

Donde: q - coeficiente de resistencia volumétrica del suelo;

h - espesor del suelo que comprime la cara de la cuchilla;

b - ancho de la cuchilla;

ϵ_p -ángulo que forma el plano de ataque de la cuchilla con respecto a la horizontal;

p - Presión específica máxima.

La resistencia específica del suelo a la deformación (R_k) es la resultante de las fuerzas elementales normales y tangenciales a la superficie de trabajo, aplicada cerca del filo de la cuña e inclinada respecto a la normal a su superficie un ángulo (φ) de fricción suelo metal (García De La Figal Y Costales, 1977). Siendo función de:

$$R_k = f(a, b, \sigma, \beta, \varphi) \quad (1.30)$$

Donde: a - profundidad del trabajo, m;

b - ancho de la cuña, m;

σ - resistencia a la deformación del suelo, kPa,

β - ángulo de levantamiento, grado;

φ - ángulo de fricción suelo-metal, grado.

La ecuación más utilizada para determinar dicha fuerza es:

$$R_k = K a b \quad (1.31)$$

Donde: K - coeficiente que depende de las propiedades del suelo y la forma geométrica de la cuña;

El peso del prisma del suelo (G) y su fuerza de inercia (F_i), se determinan partiendo de la consideración que presupone al prisma de suelo elástico y que se mueve sobre la superficie de trabajo de la cuña sin variar su longitud, Fig. 1.8.

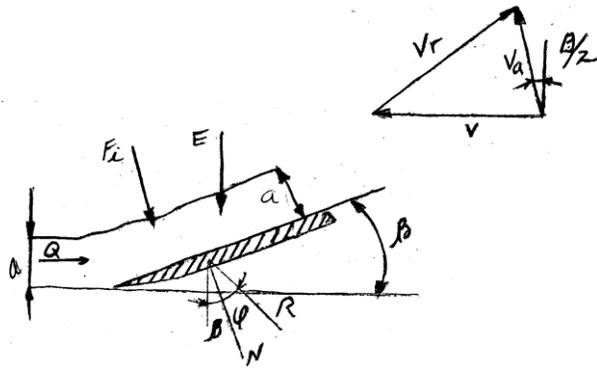


Fig. 1.8. Diagrama de fuerzas actuantes en el órgano de trabajo.

Donde: Q- reacción del suelo aun no deformado que se encuentra delante de la cuña;

F_i - fuerza dinámica de presión que surge producto de la inercia del prisma de suelo;

G- peso del prisma de suelo;

R- resultante de las fuerzas normales y elementales de la fuerza de fricción.

La fuerza necesaria para vencer la presión estática, determinada por el peso (G) se calcula como:

$$R_{gx} = a \cdot b \cdot l \cdot \gamma_o \cdot \tan(\beta + \varphi) \quad (1.32)$$

Donde: a- alto del prisma de suelo sobre la cuña, m;

b- ancho del prisma de suelo sobre la cuña, m;

l- longitud del prisma de suelo sobre la cuña, m;

γ_o - peso volumétrico del suelo g/cm^3 ;

β_o - ángulo de desterronamiento del suelo, grado;

φ - ángulo de fricción suelo metal, grado.

Siendo el término $G = a \cdot b \cdot l \cdot \gamma_o$ el peso del prisma de suelo sobre la cuña.

La componente de la fuerza de inercia del prisma de suelo en el eje x ($R_{f_i x}$) se determina por:

$$R_{f_i x} = \frac{a \cdot b \cdot l \cdot \gamma_o}{g} \cdot V^2 \cdot \text{sen}\beta \cdot \tan(\beta + \varphi) \quad (1.33)$$

Donde: V- velocidad del prisma de suelo sobre la cuña, m/s.

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

De esta forma y sustituyendo las ecuaciones (31) a (33), en la (27), las componentes de la resistencia del suelo (R_x) a la acción de la cuña en la dirección del movimiento se determinarían como:

$$P_x = \left[\begin{array}{l} 0.5qh^2b^2(\tan\varphi \cdot \cot\varepsilon_p + 1) + K_{ab} + ab\gamma_0 \cdot \text{tag}(\beta + \varphi) + \dots \\ \frac{ab\gamma_0 V^2}{g} \cdot \text{sen}\beta \cdot \tan g(\beta + \varphi) \end{array} \right] \quad (1.34)$$

El estudio de la interacción – suelo herramienta de labranza ha permitido desarrollar relaciones y esquemas que incluyen la fuerza de la adhesión del suelo sobre la superficie de trabajo de la herramienta de labranza, como una fuerza más que actúa sobre al herramienta de labranza, Fig.1.9, así como al resistencia la cortante del suelo. Dichas relaciones se basan en los mismos principios físicos que el modelo desarrollado anteriormente. En este caso la resistencia del suelo se divide en:

Las fuerzas que se oponen al corte del suelo: fuerzas de adhesión (CA_1) y la fuerza que se debe a la fricción interna del suelo (μF_1);

- Fuerzas de fricción suelo metal (μF_0);
- La aceleración del prisma de suelo (B);
- La fuerza de adhesión suelo-metal ($C\alpha A_0$);
- El peso del prisma de suelo (W).

Las fuerzas que se oponen al corte del suelo dependen de la cohesión del suelo actuante en el área del plano de corte (A_1), la fricción interna del suelo (μF_1), siendo (μ) el coeficiente de fricción interna y F_0 la reacción normal del suelo en el plano de corte.

El área del plano de corte (A_1) puede ser determinada a partir de la Fig. 1.10.

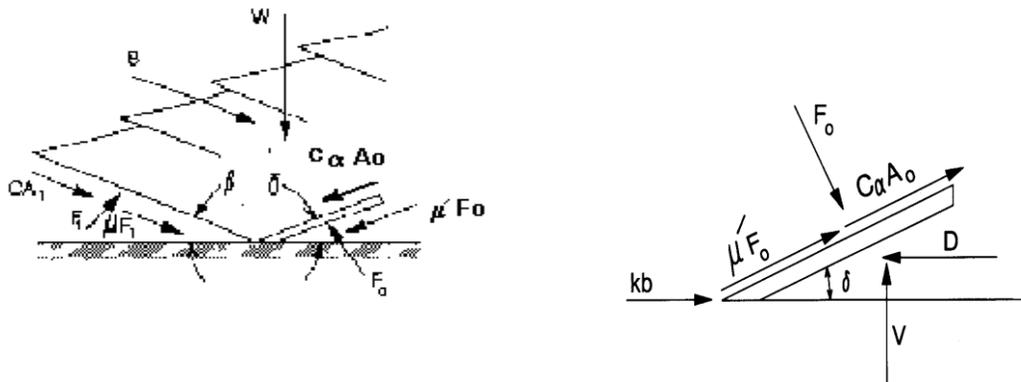


Fig.1.9. Suelo herramientas fuerzas de reacción (Soehne 1956). a) reacciones del suelo durante el avance de la herramienta; b) fuerzas actuantes en la herramienta de labranza.

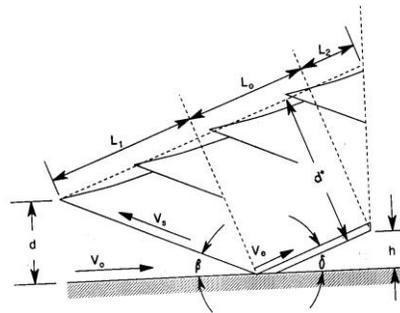


Fig.1.10. Segmento de suelo en el plano inclinado de la herramienta de labranza.

$$A_1 = \frac{b \cdot d}{\text{sen } \beta} \quad (1.35)$$

Donde: b- ancho de la herramienta, m;

d- profundidad de la herramienta, m;

β - ángulo de la superficie de falla delantera, rad.

El ángulo (β) se calcula como:

$$\beta = \frac{90 - \phi}{2} \quad (1.36)$$

Donde: ϕ - ángulo de fricción interna del suelo, grado.

La fuerza de fricción del suelo se determina a partir de la fuerza normal a la superficie de trabajo de la herramienta de labranza y el coeficiente de fricción suelo-metal, ($\mu = \tan \alpha$), donde (α) es el ángulo de fricción suelo-metal.

Capítulo I. Teorías de Falla del Suelo, Situación Actual

La fuerza de adhesión del suelo al metal ($C\alpha$) actúa en el área de la herramienta de labranza (A_0) sobre la cual se deslizan los bloques de suelo cortados.

El peso del prisma del suelo (w) se determina a partir de la Fig. 11 mediante la siguiente ecuación:

$$W = \gamma b d^* \left(L_0 + \frac{L_1 + L_2}{2} \right) \quad (1.37)$$

Donde: γ - peso volumétrico del suelo, kg/m^3 ;

$$d^* - d \frac{\cos(\delta + \beta)}{\sin \beta}, \text{ m};$$

$$L_1 - d \frac{\cos(\delta + \beta)}{\sin \beta}, \text{ m};$$

$$L_2 - d^* \tan \delta, \text{ m}.$$

La aceleración del prisma de suelo referida a la Fig. 11, puede calcularse como:

$$\beta = \frac{\gamma}{g} b V_0^2 \frac{\sin \delta}{\sin(\delta + \beta)} \quad (1.38)$$

Donde: g - aceleración de la gravedad, m/s^2 ;

V_0 . Velocidad del suelo sobre la cuña, m/s ;

δ - ángulo de levantamiento de la cuña, grado.

Finalmente las componentes de la fuerza de tiro en el plano horizontal (D) y vertical (V) pueden ser calculadas como:

$$D = \frac{W}{Z} + \frac{CA_1 + B}{Z(\sin \beta + \mu \cos \beta)} + \frac{C\alpha \cdot A_0}{Z(\sin \delta + \mu \cos \delta)} \quad (1.39)$$

$$V = \frac{D(\cos \delta - \mu' \sin \delta)}{\sin \delta + \mu' \cos \delta} \quad (1.40)$$

Donde: Z - factor geométrico, m.

$$Z = \left(\frac{\cos \beta - \mu \sin \beta}{\sin \beta + \mu \cos \beta} + \frac{\cos \delta - \mu \sin \delta}{\sin \delta + \mu' \cos \delta} \right) \quad (1.41)$$

1.4. Conclusiones parciales.

1. Los métodos analíticos han tenido una amplia utilización en la investigación de los órganos de trabajo de los aperos de labranza;
2. Los modelos de Godwin y Spoor, 1977; McKyes y Ali, 1977; Grisso, 1980, son los más utilizados para predecir los esfuerzos durante la labranza, basado en la teoría de las presiones pasivas;
3. Los valores predichos por estos modelos están altamente condicionados por las propiedades mecánicas del suelo.

CAPÍTULO II PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

2.1. Programa.

Las investigaciones experimentales comprendidas en las tareas de investigación requeridas para cumplimentar el objetivo planteado, se desarrollaron en dos fases o etapas fundamentalmente. La primera etapa de desarrollo en laboratorio de mecánica de suelo de La Empresa Nacional de Investigación Aplicada a La Construcción, en Villa Clara (ENIA.VC). La segunda se ejecutó en el canal de suelos del Centro Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Universidad Agraria de la Habana. Para el cumplimiento de las tareas comprendidas en cada una de las etapas se elaboró el programa de investigación que se muestra en la tabla 2.1, donde se establecen el orden de ejecución de cada tarea y el objetivo a estudiar con sus aspectos analizados, así como el lugar de ejecución.

La investigación se inicia en el año 2003 con la caracterización física del suelo contenido el canal (Ferralítico rojo compactado).

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

Tabla 2.1. Programa de investigación.

Tarea	Objeto de estudio	Aspectos a Analizar	Lugar
1	Caracterización física del suelo del canal.	<ul style="list-style-type: none">- Límites e índice de plasticidad;- Peso específico;- Granulometría.	Inicialmente se hará la recogida o acopio de las muestras de suelo en el canal de prueba del CEMA (UNAH). En una segunda etapa se determinarán las propiedades físicas del suelo acopiado, en el laboratorio de mecánica de suelo de la ENIA.VC.
2	Estado físico del suelo contenido en el canal	<ul style="list-style-type: none">- Contenido de humedad del suelo;- Magnitud de la parente del densidad a suelo.	Canal de suelo del CEMA (UNAH)
3	Fuerza de resistencia del suelo y velocidad de avance del sensor.	<ul style="list-style-type: none">- Fuerza de resistencia horizontal (Fx);- Velocidad de avance de la herramienta.	

2.2. Metodología de las investigaciones experimentales

2.2.1. Caracterización física del suelo objeto de estudio.

El suelo objeto de estudio se clasificó como un Oxisol según clasificación (FAO, 1988), y como un suelo Ferralítico Rojo Compactado, según la segunda clasificación genética de los suelos de Cuba (ISC, 1999). Su caracterización física se realizó a partir de la determinación de los límites de plasticidad (LL; LP, IP), peso específico y la granulometría, según el procedimiento metodológico de la (NC, 2000). En la Fig. 2.1 se muestra el equipamiento utilizado durante la experimentación.



Fig. 2.1. Equipamiento utilizado para la determinación de las propiedades físicas del suelo objeto de estudio.

Metodología para recolección y preparación de las muestras de suelo. Las muestras de suelo se tomaron directamente en el canal CS–CEMA-25 (Fig. 2.2), para lo cual se abrieron cinco calicatas de 60cm de ancho por 25 cm profundidad, en los 25 m de longitud del canal. El suelo cortado se depositó en sacos de nylon y se trasladó al laboratorio de mecánica de suelo de la ENIA.VC. En el laboratorio de suelos se procedió a la preparación de las muestras de suelo para su caracterización física, donde inicialmente se somete al suelo a un proceso de secado al aire libre bajo la influencia de los rayos solares hasta alcanzar su humedad higroscópica, posteriormente el suelo es fragmentado con macetas de madera para conservar su estructura. Finalmente se pasa por un tamiz, quedando listo para conformar o remoldear las probetas de suelo.

2.2.2. Preparación y acondicionamiento del canal de suelos.

La investigación experimental desarrollada con el fin de realizar el sensoramiento continuo de la compactación del suelo se llevó a cabo en el canal de suelos CS-CEMA-25, del Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA) de la Universidad Agraria de la Habana, (Fig. 2.2). El mismo fue modificado y perfeccionado con el objetivo de

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

garantizar los requisitos tecnológico-explotativo requeridos para este tipo de investigación.



Fig. 2.2. Canal de suelos CS-CEMA-25.

Descripción del canal de suelo. Dicho canal esta compuesto por un depósito de suelo (1), de 25 m de longitud por 0,80 m de ancho y 0,40 m de profundidad, Fig. 2.3. Para la sujeción y traslado del órgano de trabajo (2) posee un carro portaherramientas (3), que esta dotado de un asiento (4) que posibilita la presencia de un operador en caso de requerirse. Sobre el carro portaherramientas se monto una base (5) que permite la colocación de equipamiento empleado para la adquisición y almacenamiento de datos (6), como una opción de trabajo. El transductor de esfuerzos (7), se montó entre el órgano de trabajo y el carro portaherramientas. Como fuente energética para el accionamiento de los mecanismos de trasmisión se emplea un moto-reductor eléctrico (8), de 220 V corriente trifásica, con una potencia de 5,5 kW. Para transmitir la potencia entregada por el mismo se un emplea un mecanismo de cadena y sprocket (9), garantizando que el tambor (10) accione el cable de tracción (11), encargado del movimiento de traslación del carro portaherramientas, según las velocidades de trabajo prefijadas. Como mecanismo de seguridad se colocaron dos interruptores en ambos extremos del canal, que permiten su parada automática. La energía eléctrica requerida

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

por los equipos de medición se suministra por medio del conductor eléctrico (13). Para el accionamiento de la fuente energética se colocaron dos mandos eléctricos (14).



Fig. 2.3. Partes componentes del canal de suelos.

Como órgano de trabajo se desarrollo un escarificador alado (2), que fue construido en el taller de prototipos del CEMA. Los planos del taller de sus partes componentes y el plano de ensamble se muestran en la Fig. 2.4 a 2.6 del anexo B.

Preparación y acondicionamiento del suelo contenido en el canal. El procedimiento para el acondicionamiento del suelo contenido en el depósito del canal siguió una secuencia que garantizo el desmenuzamiento, humedecimiento y compactación del mismo.

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

Desmenuzamiento del suelo: El desmenuzamiento del suelo se realizó con la ayuda de un cultivador alado tipo escardillo, acoplado al carro portaherramientas, el mismo permitió descompactar el suelo y mullirlo hasta la profundidad de 0,30 m. El desmenuzamiento de los 0,80 m de ancho total del canal se logró variando la posición del bastidor que soporta la herramienta con respecto a su posición central. Cuando no se logró el grado de desmenuzamiento requerido por este medio se pasa al desmenuzamiento manual con la ayuda del tridente y la guataca.

Humedecimiento del suelo: El humedecimiento del suelo para proporcionar la humedad establecida en cada experimento se realizó con una regadera a la cual se le adicionó un contador de flujo para cuantificar el flujo de agua suministrado en un intervalo de tiempo dado. Para garantizar la uniformidad de riego se subdivide el depósito de suelo en 8 partes iguales de 3 m cada una. La cantidad de agua a añadir en cada caso se determina según la ecuación 2.1. Finalmente se tapa el depósito de suelo con una banda de nylon durante 24 h, para garantizar la homogenización de las condiciones de humedad del suelo.

$$aa = \frac{W_{opt} - W_{inic}}{100 + W_{inic}} \cdot cm \quad (2.1)$$

Donde: aa – Cantidad de agua a añadir, mL;

W_{opt} – Humedad óptima (Humedad de experimentación), %;

W_{inic} – Humedad inicial (higroscópica), %;

cm – Cantidad de suelo a remoldear (1200 g); g.

En los ensayos que se requiere que el suelo esté compactado se acopla al carro porta herramientas un rodillo que posibilita la compactación del suelo de forma mecanizada.

2.2.3. Determinación experimental del sistema de fuerzas actuantes sobre el órgano de trabajo.

Para la determinación de las fuerzas actuantes sobre el órgano de trabajo de los aperos de labranza se recurrió al empleo de la extensometría, para lo cual se desarrolló un sistema para la adquisición y almacenamiento de datos, integrado por:

- Transductor ortogonal de anillos extendidos (7), para la determinación de la fuerza horizontal actuante sobre el órgano de trabajo (D), Fig. 2.3;
- Amplificador de señales KYOWA de seis canales, (Fig. 2.7);
- Tarjeta de conversión analógica digital;
- Computadora personal Pentium IV con procesador a 1,5 GHz, 500 MB de memoria RAM y 40 HB de disco duro, Fig. 2.7. La computadora controla el sistema mediante un software (Tensoft) que posibilita la adquisición y almacenamiento, visualización y graficación de los datos registrados.



Fig. 2.7. Sistema de adquisición y almacenamiento de datos.

El traductor ortogonal se elaboró en el taller de prototipos del Centro de Mecanización Agropecuaria (CEMA). Detalles sobre el cálculo, diseño, material y tratamiento térmico empleado para fabricación se discuten en Herrera e Iglesias (2003). Dicho transductor

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

posee tres puentes de Weastone que posibilitan la determinación simultánea e independiente de los esfuerzos actuantes en los planos verticales y horizontales, así como del momento resultante. En el caso particular de este estudio no se tomaron en cuenta los valores F_z y M_{xz}

Los extensómetros empleados son del tipo KFC-20-C1-11 (KYOWA) y poseen una resistencia de $120 \pm 0.3 \Omega$; $2,10 \pm 1\%$ con factor de galga; rendimiento térmico de $\pm 1,8 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$; $10,8 \text{ PPM}/^\circ\text{C}$ como coeficiente de expansión térmica; longitud de 20 mm; y un cambio del factor de calibración con respecto a la variación de la temperatura de $0,015 \%/^\circ\text{C}$.

El pegamento empleado para fijar las galgas al transductor fue el cemento CC-33A comercializado por la KYOWA.

Las fuerza de resistencia que opone el suelo a ser cortado en el sentido del movimiento del sensor se determinó a partir de las lecturas de los voltajes de salida del transductor mediante la ecuación 2.2, obtenida durante la calibración del transductor.

$$D = \frac{V_s + 0,0002}{0,8213} \quad (2.2)$$

Donde: D, fuerza que opone el suelo a ser cortada en el sentido del movimiento del sensor, kN;

V_s , voltaje de salida del puente del transductor, mV.

2.2.3. Determinación experimental de la velocidad de avance de la herramienta de labranza.

Para la determinación de la velocidad de desplazamiento de la herramienta de labranza se desarrolló un sensor compuesto por un interruptor (1), que es accionado durante el desplazamiento del carro portaherramientas por seis cilindros metálicos (2) que están

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

fijados equidistantemente (seis partes iguales), propiciando el paso de la señal de corriente emitida por una batería convencional (3) de 1,5 V, (Fig. 2.8). La separación entre los cilindros y el interruptor se puede regular, mediante un mecanismo de tornillo corredera deslizante (4). La interacción de los cilindros con el interruptor permite obtener una señal de voltaje tipo pulso en un tiempo dado, lo cual permite determinar de forma indirecta, el espacio recorrido y la velocidad de avance del carro.

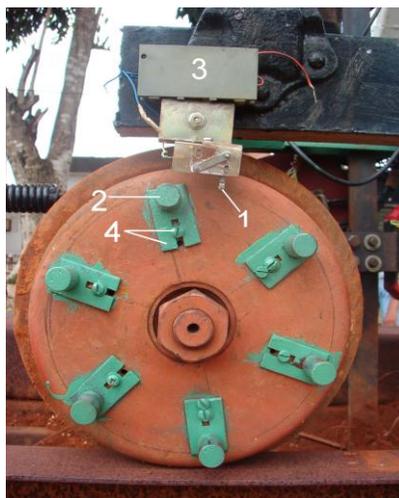


Fig. 2.8. Sensor de velocidad.

El espacio recorrido se determina partiendo de la igualdad entre el espacio recorrido por la rueda en una revolución y el perímetro de la misma, según:

$$Sr = Pr = \pi \cdot dr \quad (2.3)$$

Donde: Sr-Espacio recorrido por la rueda en una revolución, m;

Pr-Perímetro de la rueda, m,

Dr-Diámetro de la rueda, m;

Conociendo el número de pulsos equivalentes a una revolución y la cantidad de pulsos generados en un intervalo de tiempo dado, se determina el número de revoluciones de la rueda en dicho intervalo, como:

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

$$n_{rueda} = \frac{n_{pt}}{n_p} \quad (2.4)$$

Donde: n_{rueda} , número de revoluciones de la rueda en un intervalo de tiempo dado, pulsos/s;

N_{pt} , número de pulsos emitidos en un intervalo de tiempo dado, pulsos/s;

N_p , número de pulsos en una revolución de la rueda, pulsos/rev.

Finalmente el espacio recorrido por el carro en un intervalo de tiempo se determina como:

$$S_{rt} = n_{rueda} \cdot s_r \quad (2.5)$$

Donde: s_{rt} -espacio recorrido en un intervalo de tiempo dado, (m).

Conociendo el espacio recorrido en determinado intervalo de tiempo, se puede determinar la velocidad de avance de la herramienta de labranza, según se formula en la ley de Newton:

$$V = \frac{S_{rt}}{\Delta t} = \frac{S_{rt}}{t_1 - t_0} \quad (2.6)$$

Donde: V -velocidad de avance de la herramienta de labranza, m/s;

Δt , intervalo de tiempo, s;

t_1 , tiempo final, s;

t_0 , tiempo inicial, s.

Tanto el traductor ortogonal de anillos extendidos como el sistema para la determinación de una velocidad fueron construidos en el taller de prototipo del CEMA.

2.2.4. Planificación de los experimentos.

Partiendo de la necesidad de evaluar el funcionamiento del sensor de compactación del suelo en diferentes condiciones del suelo y velocidades de trabajo, así como, que el mismo determina la resistencia que opone el suelo a ser cortado para posteriormente con estos valores y el de la humedad del suelo estimar la densidad aparente seca del suelo, se define como variables independientes:

X_1 , velocidad de trabajo (V), km/h;

X_2 , humedad del suelo (MC), %;

X_3 , densidad volumétrica del suelo (BD), g/cm^3 ;

Como variable dependiente, se define:

Y_1 , fuerza que opone el suelo a ser cortado en el eje x (D), kN;

Para la investigación de estas variables se recurre a la planificación factorial de los experimentos empleados en un diseño 2^K , donde K es el número de factores en estudio, coincidentes con el número de variables independientes, que para el caso específico de este estudio toma valor $K=3$, por lo que el número de ensayos a realizar se determina, como:

$$N = P^K = 2^3 = 8 \text{ corridas experimentales} \quad (2.8)$$

Donde: N, número de ensayos, adimensional;

P, niveles experimentales (2), adimensional;

A partir de la definición de las variables involucradas en la experimentación, el tipo de diseño y los niveles de experimentación se establece la matriz del diseño experimental, según se muestra en su forma codificada en la tabla 2.3

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

Tabla 2.3 Matriz experimental (codificada).

Corridas	V	MC	BD
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

Las corridas experimentales se repetirán tres veces, sumando un total de 24 experimentos u observaciones.

Las variables humedad y densidad se tomarán a dos niveles de profundidad del suelo, considerando dos estados fundamentales del suelo para cada variable (húmedo o seco; suelto o compacto), a partir de lo cual se establecerán las diferentes combinaciones de estas variables, según se indica en la matriz experimental. Los valores absolutos de dichas variables en cada condición dependerán del estado del suelo en el momento de la experimentación.

La profundidad de trabajo se mantendrá constante a 0,20 m, aunque las mediciones de la densidad y humedad del suelo se harán en dos horizontes de profundidad 0 a 10 cm y 10 a 20 cm.

Para garantizar la ortogonalidad del diseño se agruparán los experimentos que sean comunes en cuanto al estado de humedad del suelo, es decir: se inicia la experimentación (1ra fase) por las corridas 3-7 y 4-8, que requieren un nivel bajo de humedad (tabla. 2.4). En una segunda fase se desarrollan corridas 1-5 y 2-6. De esta forma se garantiza que el suelo tenga igual contenido de humedad en las corridas comunes a cada nivel. Tomando en cuenta la necesidad de experimentar en dos

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

niveles de la densidad del suelo, en cada fase se inician los experimentos por las corridas donde el suelo posee el menor grado de compactación (2; 4; 6; 8).

Tabla. 2.4 Fases de la experimentación.

Corridas	V	MC	BD
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	+
4	+	-	-
5	-	+	+
6	-	+	-
7	-	-	+
8	-	-	-

1ra Fase

2da Fase

Conociendo que dentro de cada fase hay corridas o experimentos comunes en cuanto a las condiciones de suelo pero que, deberán desarrollarse a diferentes velocidades de trabajo se divide el canal en dos partes iguales (12,5 m), de forma tal que en la primera mitad se desarrollen las corridas que requieren del nivel alto de velocidad (≈ 5 km/h), (Fig. 2.9), quedando disponible la segunda mitad para las corridas correspondientes al nivel bajo ($\approx 1,2$ km/h) de la velocidad de avance del órgano de trabajo.

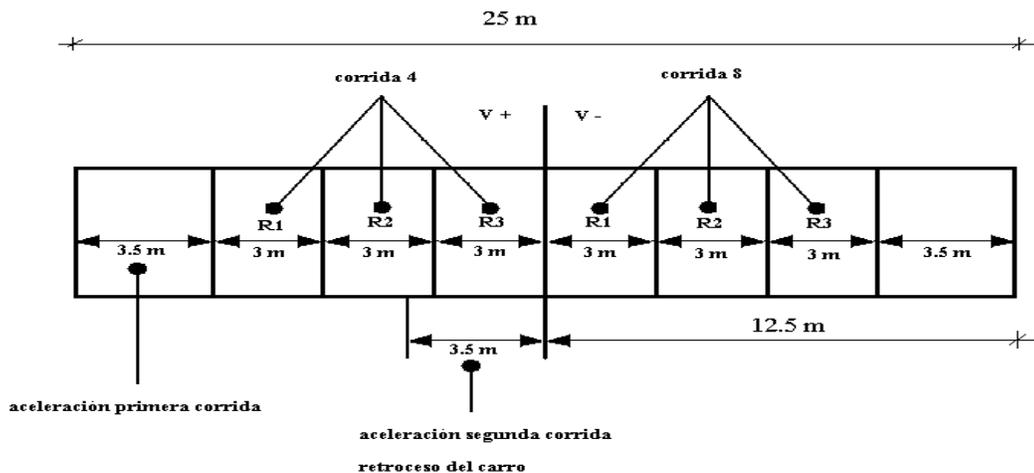


Fig. 2.9. Dimensiones de las parcelas y zonas de aceleración del carro porta herramientas.

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

El orden de las corridas será el siguiente:

Primero se realizarán las corridas 4 y 8, en la cuales el suelo se encuentra en estado seco y suelto, los diferentes niveles de velocidad se garantizan cambiando los sproket en la transmisión. Posteriormente en el mismo día e inmediatamente después de la primera corrida se pasa el rodillo compactador para alcanzar el nivel máximo de compactación del suelo (corridas 3 y 7), correspondiente al grado de humedad del mismo, Fig. 2.10.

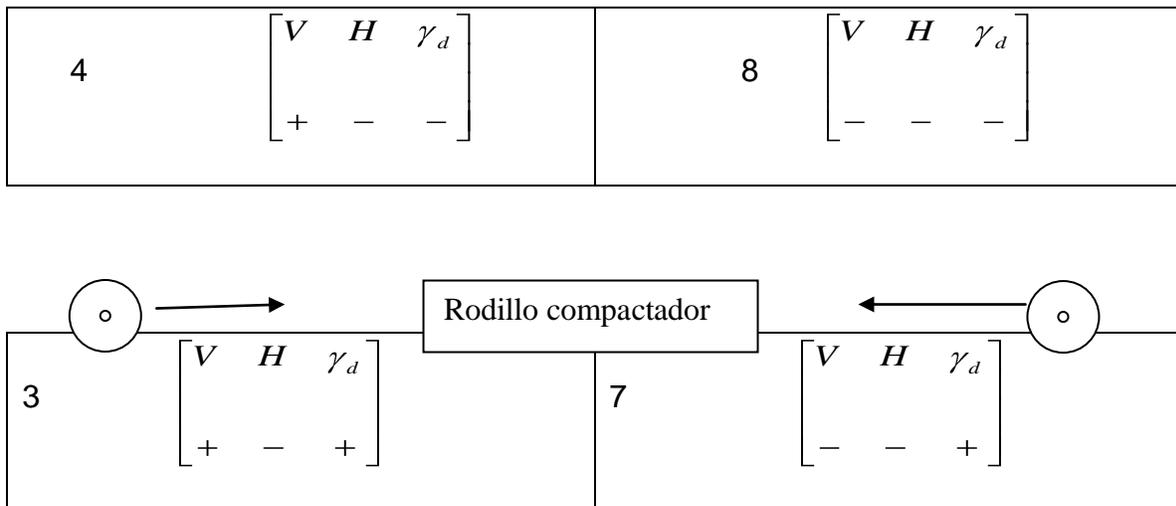


Fig. 2.10. Corridas experimentales correspondientes al nivel bajo de humedad.

Una vez realizadas las corridas correspondientes nivel bajo de humedad del suelo, se inicia la descompactación y desmenuzamiento del suelo, para posteriormente humedecer hasta alcanzar humedad alrededor de 35 %. Después tapar con la banda de nylon 5 días como mínimo para homogenizar humedad del suelo. Posteriormente se inician las corridas correspondientes al nivel máximo de la humedad del suelo, donde primeramente se experimenta con el suelo suelto. Posteriormente se sigue la secuencia anteriormente descrita hasta completar las corridas previstas en la matriz experimental, Fig. 2.11.

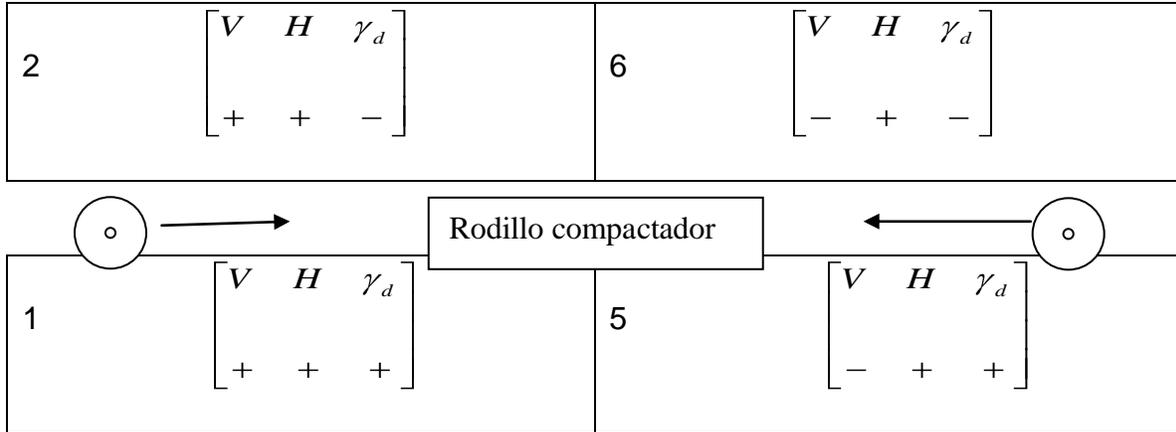


Fig. 2.11. Corridos experimentales correspondientes al nivel alto de humedad.

2.2.5. Metodología para la determinación de las condiciones del suelo

Para la determinación del estado de compactación y humedad del suelo las parcelas de pruebas coincidentes con cada una de las replicas de la corridas experimentales se diseñaron de forma tal que se atenuaron los posibles efectos de borde, pues en la misma se desechan 50 cm a ambos lados de las fronteras con las parcelas contiguas, (Fig. 2.9). Se procederá a la recolección de las muestras antes del paso del órgano de trabajo. El número de muestras en cada parcela (5), se determinó según el criterio de Student. Las mismas se tomarán en la zona de acción directa del órgano de trabajo, a dos niveles de profundidad (10 y 20 cm), Fig. 2.12.

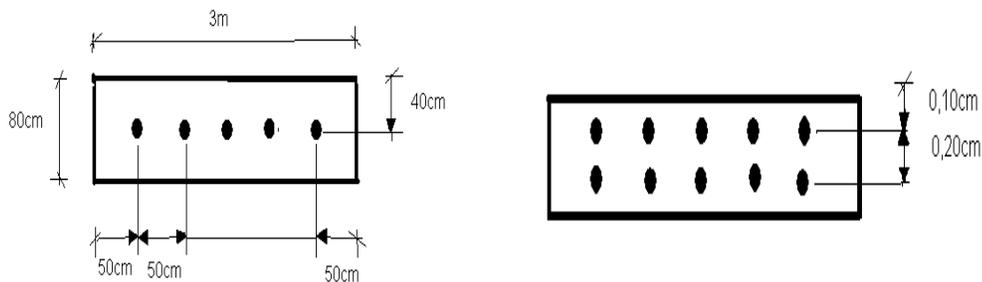


Fig. 2.12. Esquema de las zonas de muestreo en el canal de suelos. Vista en planta y lateral.

CAPÍTULO II. PROGRAMA Y METODOLOGÍA DE LAS.....

Como se muestra en la Fig. 2.9, la zona del canal destinada a cada corrida se subdividió en tres parcelas con el fin de garantizar tres réplicas en cada experimento.

Metodología para determinar la humedad del suelo. El método empleado fue el gravimétrico con secado en la estufa a 60 °C de temperatura durante 24 horas, hasta alcanzar una masa constante NAR 6-372:80. El valor de la humedad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$MC = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - m} \cdot 100 \quad (2.9)$$

Donde: Hs, humedad del suelo, %;

P1, masa del suelo húmedo dentro del recipiente, g;

P2, masa del suelo seco dentro del recipiente, g;

m, masa del recipiente sin muestra, g.

CAPITULO III COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VALIDEZ DE LOS MODELOS FUNDAMENTADOS

3.1. Implementación de los modelos en el software Mathcad 14.

La implementación de los modelos comprende una fase inicial o preparatoria donde se programan las ecuaciones comprendidas en los modelos de Godwing Spoor, 1977; Mckyes y Ali, 1977; Grisso et al. 1980, en el software Mathcad 14. Se describe el problema a modelar, y se definen los modelos físicos que representan en forma idealizada la interacción suelo-aperos de labranza, se declaran las propiedades mecánicas requeridas como datos de entrada de los modelos formulados.

Descripción del problema objeto de modelación. El problema objeto de modelación comprende el corte del suelo por una herramienta de labranza del tipo escarificador alado, el cual puede ser considerado como una herramienta estrecha, pues la relación profundidad/ancho de trabajo $d/w = 0,7$. Durante el corte del suelo este falla deslizándose por encima de la superficie de la herramienta a una velocidad constante.

Para la implementación de los modelos se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- El suelo que es interactuado por la herramienta, se considera como un suelo isotrópico y homogéneo;
- El modelo comprende parámetros que definen la cohesión y la fricción del suelo;

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

- La presencia de una interface suelo-herramienta definida por el ángulo de fricción externa (suelo-herramienta);
- La falla del suelo se describe mediante el modelo de Mohr-Coulomb;
- La densidad del suelo no se afecta durante la acción de la herramienta de labranza;
- No se toman en cuenta las fuerzas de aceleración del suelo en la herramienta de labranza.

Definición de los modelos físicos. Los modelos definidos en este estudio representan en forma idealizada un apero de labranza que interactúa con el suelo, los mismos parten de un esquema donde se muestra el cuerpo libre de la herramienta de labranza, donde las fuerzas actuantes sobre la misma se encuentran en equilibrio estático. Las dimensiones del escarificador alado se muestran en la Fig. 3.1.

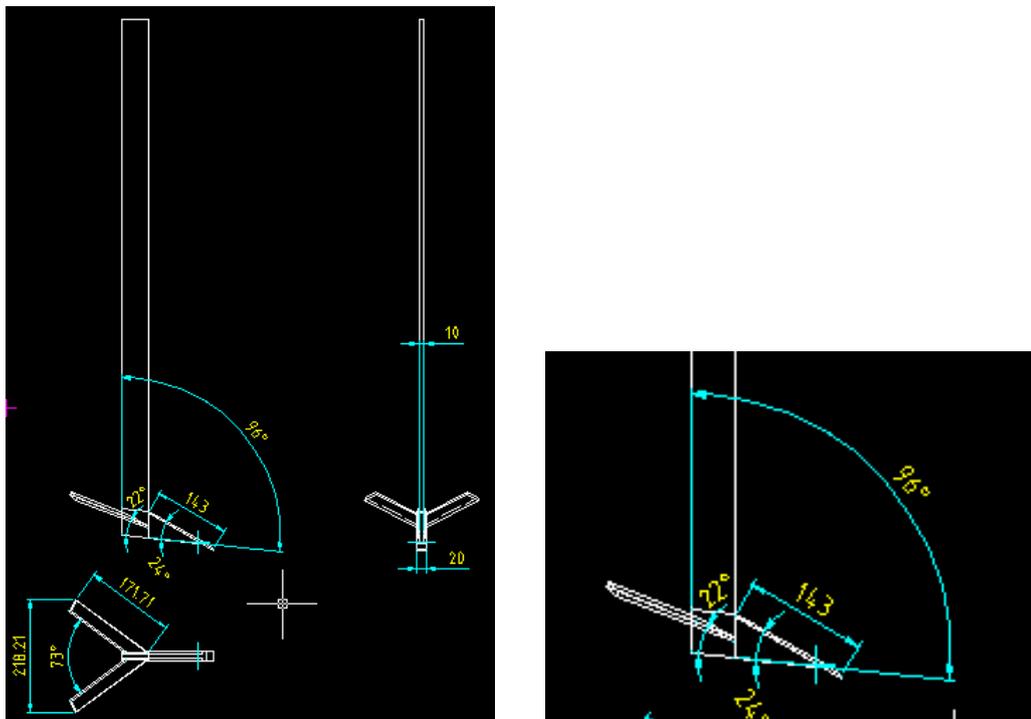


Fig. 3.1. Escarificador alado empleado en la validación de los modelos.

Tomando en cuenta que durante el trabajo del escarificador alado el suelo está sujeto a la acción de la reja y de las saetas laterales, en la presente investigación la idealización de los modelos comprende dos variantes:

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

- Variante I. El modelo idealiza la herramienta de labranza considerando la acción independiente de la reja y las saetas que están dispuestas 6, 2 mm por encima de la punta de la reja, es decir se computan de forma independiente los efectos de la reja y las saetas, Fig. 3.2. a. La zona de donde se solapa la acción de la reja y la saeta lateral se toma como la acción de la sobrecarga del suelo a la hora de calcular las fuerzas ejercidas por la saeta. Tanto la reja como las saetas provocan la falla de la cuña central del suelo, además de la falla lateral (Modelos de Godwin y Spoor; Mckyes y Ali).
- Variante II. Esta variante toma en cuenta las mismas consideraciones que el modelo la variante anterior con la diferencia que el suelo cuando es sometido a la acción de la saeta y la reja no falla lateralmente, solo se observa la cuña de falla central, según la teoría descrita en el modelo de Grisso et al.

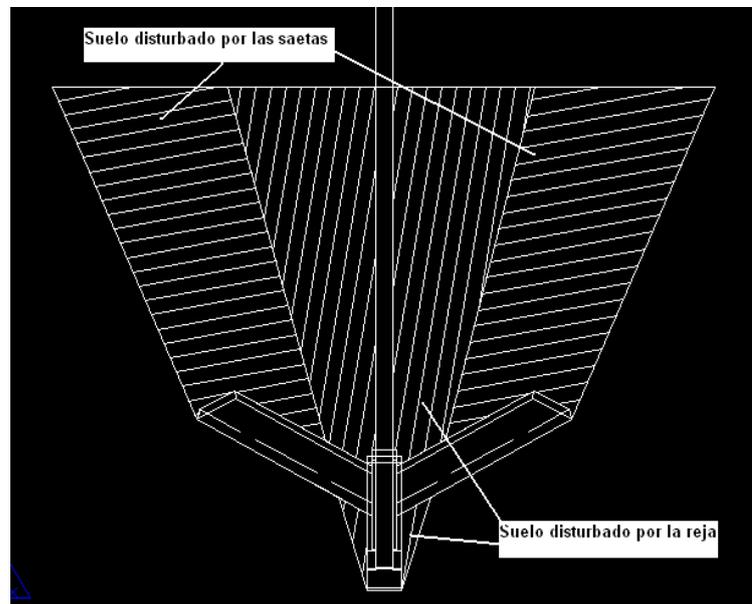


Fig. 3.2. Acción del escarificador alado. a) Variante I; b) Variante II.

Propiedades mecánicas del suelo y parámetros requeridos como datos de entrada por los modelos.

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

La simulación se realizó para un intervalo de humedades y densidades del suelo que garantizan la validez de los modelos tanto para suelos secos y húmedos, como para suelos sueltos y compactos, tabla 3.1. Esta decisión se fundamentó en las experiencias alcanzadas por Herrera, 2006, en la cuales se demuestra que la respuesta mecánica de los suelos objeto de estudio está condicionada por el estado de humedad y densidad del suelo.

Los valores de las propiedades mecánicas del suelo requeridas como datos para la corrida de los modelos fueron determinadas por las ecuaciones propuesta por Herrera, 2006, las cuales están en función de la humedad y densidad del suelo (Tabla 3.1), siendo:

Ángulo de fricción interna (ϕ):

$$\phi = 9,67268 \cdot (\gamma_d)^2 - 0,0758933 \cdot W^2 + 2,9675 \cdot W \quad (1)$$

donde: ϕ - ángulo de fricción interna, grado;

γ_d - densidad aparente, g/cm³;

W- humedad del suelo, %.

Cohesión:

$$C = 70,1472 - \frac{57,5689}{\gamma_d^2} + \frac{53540.2}{W^2} \quad (2)$$

donde: C- cohesión, kPa.

Fricción externa (δ):

$$\delta = -0,0192311 \cdot (W)^2 + 38,8436 \cdot \gamma_d \quad (3)$$

donde: δ - ángulo de fricción externa (suelo-metal), grado.

Adhesión suelo-metal (Ca):

$$Ca = 0,0392248 \cdot (W)^2 + 4,00493 \cdot (\gamma_d)^2 \quad (4)$$

donde: Ca- adhesión suelo-metal, kPa.

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

Tabla 3.1. Propiedades del suelo.

Condición de Suelo	W, %	γ_d , g/cm ³	ϕ , grado	C, kPa	δ , grado	Ca, kPa
1	27	1,15	37,40	77,37	31,80	8,16
2	33	1,12	27,19	49,50	23,68	9,29
3	22	1,31	45,00	129,74	42,89	8,77
4	17	0,91	36,41	149,66	30,70	4,45
5	35	1,00	20,33	26,28	16,28	8,80
6	33	1,12	27,193	49,50	23,68	9,29
7	22	1,31	45,00	129,74	42,89	8,77
8	21	0,89	36,37	81,00	26,98	4,90

En la tabla 3.2 se muestran las características físicas del suelo en estudio, el cual se clasifica como una arcilla loamosa muy plástica con un contenido de materia orgánica medio, (Herrera, 2006).

Tabla 3.2. Características físicas del suelo en estudio.

Estadígrafos	Gs, g/cm ³	Límites de consistencia, %			Granulometría, %		
		LP	LL	IP	Arena	Limo	Arcilla
	2,80	28,0	60,1	32,1	20	38	42
	2,79	28,9	58,7	29,8	20	38	42
	2,80	28,7	61,0	33,2	24	34	42
Media	2,80	28,53	59,93	31,7	21,3	36,6	42
S	0,006	0,006	1,159	1,73	2,30	2,30	0,0
S²	23,46	2442,9	10778,7	3020,6	1376,0	4044,0	0,0
e	0,003	0,27	0,66	1,00	1,33	1,33	0,0
CV, %	0,20	1,65	1,93	5,47	10,82	6,29	0,0

donde: S, varianza; S², desviación estándar; e, error estándar; CV, coeficiente de variación.

3.2. Resultado de la corrida de los modelos.

Posterior a la implementación de los modelos se pasó a la modelación de la interacción suelo-apero de labranza con el objetivo de determinar la exactitud de los modelos.

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

Resultados de la modelación según las idealizaciones previstas en los modelos o variantes.

Los resultados de la corrida de los modelos para la estimación de los esfuerzos muestran que los mismos difieren considerablemente entre si, lo cual es un indicador de la falta de uniformidad en los criterios teóricos que fundamentan dichos modelos.

Tabla 3.3. Resultados de la estimación de esfuerzos por los modelos en estudio.

Condición de Suelo	Modelo de Godwin y Spoor, 1977			Modelo de Mckyes y Ali, 1977			Modelo Grisso et al.		
	Reja Fx, kN	Saeta Fx, kN	Apero Fx, kN	Reja Fx, kN	Saeta Fx, kN	Apero Fx, kN	Reja Fx, kN	Saeta Fx, kN	Apero Fx, kN
1	25,32	1,16	26,48	16,75	1,71	18,46	10,13	9,93	20,06
2	8,48	0,7	9,18	6,96	1,32	8,28	5,07	4,91	9,98
3	53,53	2,29	55,82	49,72	3	52,72	13,66	24,52	38,18
4	34,5	0,86	35,36	28,65	1,25	29,9	18,96	18,48	37,44
5	3,4	0,43	3,83	2,56	1,03	3,59	2,26	2,24	4,5
6	8,48	0,3	8,78	6,73	1,32	8,05	5,07	7,58	12,65
7	52,52	0,007	52,527	49,72	2,86	52,58	23,96	36,49	60,45
8	15,21	0,002	15,212	13,31	1,04	14,35	9,29	13,78	23,07

El análisis de la determinación de los coeficientes mostró una gran diferencia entre los coeficientes (**N_γ**; **N_c**; **N_q**) determinados para cada modelo (Tabla 3.4), haciéndose más significativa esta diferencia para el modelo de McKyes y Ali, el cual alcanzó valores muy superiores a los mostrados por el resto de los modelos, (Fig. 3.3). La diferencia entre el resto de los modelos no fue muy significativa.

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

Tabla. 3.4. Determinación de los coeficientes N de los modelos.

Condición de Suelo	Modelo de Godwin y Spoor, 1977				Modelo de Mckyes y Ali, 1977				Modelo Grisso et al.			
	N_γ	N_c	N_q	β	N_γ	N_c	N_q	β	N_γ	N_c	N_{ca}	β
1	2,06	2,08	4,12	29	39,5	60,1	116,8	28	5,6	37,0	-0,48	33
2	1,55	1,78	3,10	33	24,9	42,2	73,4	33	4,4	31,7	-0,38	42
3	2,94	2,81	5,89	23	70,0	99,0	207,0	23	5,2	32,6	-0,88	34
4	1,99	2,05	3,98	29	36,4	54,4	107,3	29	5,4	36,2	-0,48	34
5	1,32	1,60	2,64	37	17,9	31,9	52,8	37	3,6	28,8	-0,40	50
6	1,55	1,79	3,10	33	24,5	40,8	72,2	34	4,4	31,7	-0,38	42
7	3,1	2,82	6,01	24	69,9	98,9	207,0	23	7,4	48,2	-0,57	25
8	1,89	1,86	3,79	32	32,8	42,2	96,7	31	5,1	34,1	-0,5	36

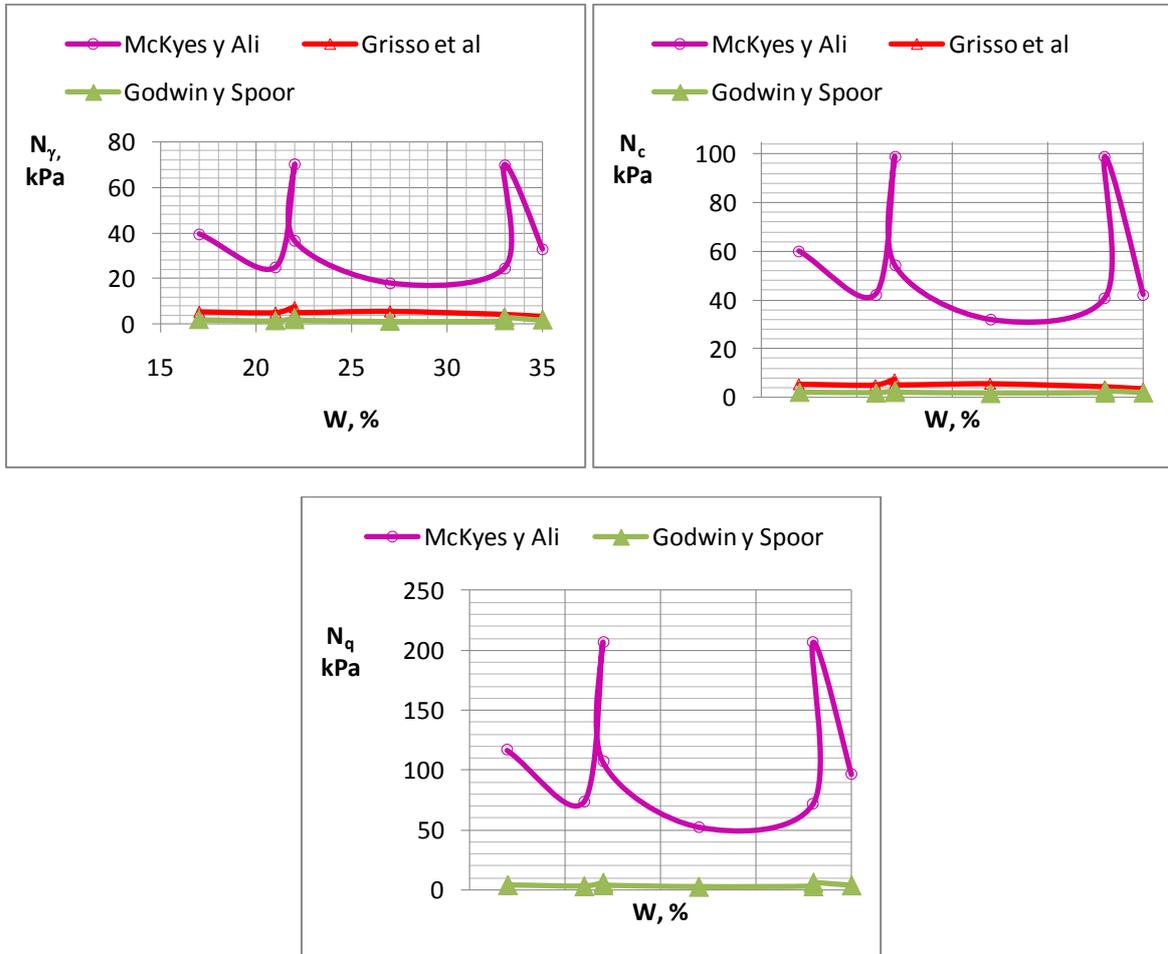


Fig. 3.3. Variación de los Coeficientes N, de los modelos ante los cambios de humedad del suelo.

3.3. Comprobación experimental de la validez de los modelos.

Los resultados experimentales de la determinación de la fuerza de tiro del escarificador alado mostraron que los valores de los esfuerzos oscilaron entre 0,37 a 1,07 kN, (tabla 3.5).

Tabla. 3.5. Determinación de los coeficientes N de los modelos.

Corrida	Prof, m	$F_{x_{m\acute{a}x}}$, kN	$F_{x_{m\acute{i}n}}$, kN
1	0,20	1,07	0,57
2	0,20	0,57	0,34
3	0,20	0,77	0,44
4	0,20	0,76	0,45
5	0,20	0,42	0,18
6	0,20	0,95	0,64
7	0,20	0,80	0,50
8	0,20	0,46	0,37

Comprobación de la validez de los modelos. Para la comparación de los resultados obtenidos experimentalmente con los estimados por los modelos, se tomaron los valores de la $F_{x_{m\acute{a}x}}$, mostrándose que los modelos sobrepredicen considerablemente los resultados experimentalmente (Fig. 3.4), problemática que está dada por la gran dependencia que tienen estos de la cohesión del suelo, pues los suelos objeto de estudio son altamente cohesivos.

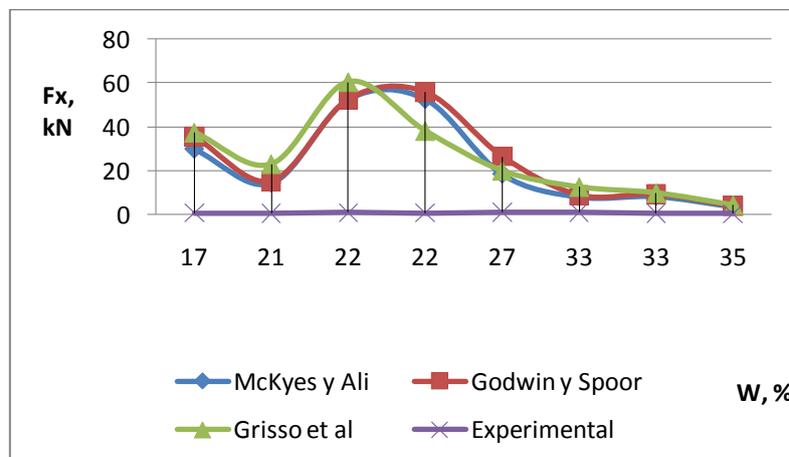


Fig. 3.4. Predicciones de los modelos.

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

El análisis estadístico (correlación) mostró que no existe relación entre las predicciones de los modelos y los resultados determinados experimentalmente (Tabla 3.6), lo cual es una muestra de la incapacidad de estos modelos para predecir los esfuerzos durante la labranza, para suelos altamente cohesivos como es el caso de los suelos arcillosos cubanos, cuando se encuentran en estado seco y compacto. El análisis evidenció además la estrecha relación entre los valores predicho por los modelos de Godwin y Spoor y McKyes y Ali, Fig. 3.5.

Tabla. 3.6. Análisis correlación entre los modelos en estudio y los resultados experimentales.

	Exp	Goodwin	Grisso	McKyes
Exp		0,3760	0,2796	0,2970
		(8)	(8)	(8)
		0,3587	0,5024	0,4750
Goodwin	0,3760		0,9092	0,9897
	(8)		(8)	(8)
	0,3587		0,0017	0,0000
Grisso	0,2796	0,9092		0,9253
	(8)	(8)		(8)
	0,5024	0,0017		0,0010
McKyes	0,2970	0,9897	0,9253	
	(8)	(8)	(8)	
	0,4750	0,0000	0,0010	

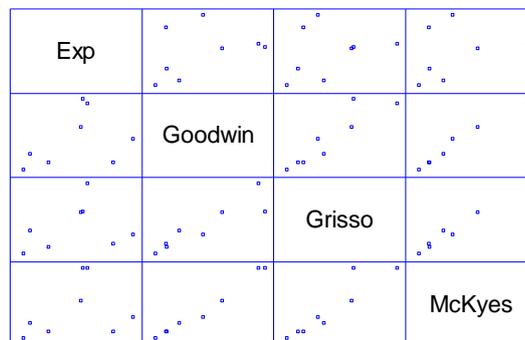


Fig. 3.5. Análisis de correlación de los resultados.

Una factor que puede ser determinante en la inexactitud de la predicciones es la desproporción a la hora de estimar el área de suelo removida, pues los cálculos muestran que la reja promueve un área mayor que el ancho total del órgano de trabajo, por lo que la saeta solo está afectada por la sobrecarga.

3.4. Conclusiones parciales del capítulo.

- Los resultados evidencian inexactitudes de los modelos objeto de estudio para predecir los esfuerzos durante las operaciones de labranza en suelo altamente cohesivos;

CAPITULO III. COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ...

- Los valores predichos por los modelos tienen poca variación entre sí, encontrándose las menores diferencias entre los modelos de Godwing y Spoor y McKyes y Ali;
- Los resultados no evidencian la incidencia de la velocidad de avance del órgano de trabajo en la predicción de los esfuerzos.
- Se hace necesario la búsqueda de coeficientes N válidos para la estimación de los esfuerzos durante la labranza mediante estos modelos.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados se arriba a las siguientes conclusiones:

1. Los modelos de falla del suelo analizados no predicen con exactitud los esfuerzos que surgen durante la labranza de los suelos ferralíticos rojos compactados;
2. Los modelos de Godwing y Spoor y McKyes y Ali, muestran una gran semejanza en los valores predichos de los esfuerzos horizontales;
3. La inexactitud exhibida por estos modelos se debe en gran medida a los elevados valores de cohesión del suelo objeto de estudio;
4. Los modelos analizados excluyen la adhesión, propiedad que está presente en la mayoría de los suelos arcillosos cubanos

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Determinar los valores que deben poseer los coeficientes adimensionales N , en función de adecuar los modelos investigados para la predicción de esfuerzos en suelos altamente cohesivos;
2. Incluir la adhesión en la formulación de los modelos investigados;
3. Extender las investigaciones a otros tipos de suelos arcillosos cubanos.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Afifi, M., *et al.* *Effect of combined disc angles on soil forces of coulter discs*. En *ASAE Paper No. 01-1059*. 2001.
2. Abu Hamed, N. H. y Reeder, R. C. A non linear 3d finite element analysis of the soil forces acting on a disk plow. *Soil Till. Res*, 2003, vol. 74, n° p. 115-124.
3. Andrade, P., *et al.* *Evaluation of the uc davis compaction profile sensor*. En *2002 ASAE Annual International Meeting / CIGR XVth World Congress*. Chicago, Illinois, USA. July 28-July 31.2002.
4. Camacho, J. y Magalhães, P. . Estudio de parámetros operacionales de discos dobles y cinceles parabólicos para prácticas culturales en áreas con residuos vegetales. *Agricultura Técnica*, 2002, vol. 64, n° p. 58-65. .
5. Chen, S. *Modeling soil failure caused by prismatic and conical tools*. En *ASAE Paper No. 030102*. 2003
6. Chandron, K. y Kushawaha, R. Soil forces and vibration on deep tillage. *ASAE Paper*, 2002, vol. 01086, n° p. 14p.
7. Chi, L. Finite element analysis of soil forces on two tillage tools. *Canadian Agric*, 1990, vol. 33: , n° p. 39-45.
8. Chi, L. y Kushawaha, R. L. Finite element analysis of forces on a plane soil blade. . *Canadian Agric*, 1989, vol. 31, n° p. 1. 135-140.
9. ---. A non-linear 3d finite element analysis of soil failure with tillage tools. 1990, vol. 27, n° p. 343-366.
10. ---. A non-linear three dimensional finite element analysis of soil failure with curved tillage tools. *Canadian Agric.*, 1998, vol. 41 n° p. 15-22.
11. Chi, L. Y. K. R. L. Three dimensional finite element interactions between soil and a simple tillage tool. . *TRANSACTIONS of the ASAE*, 1991, vol. 34, n° p. 3623-3366.
12. Fao. 1988.*Fao-unesco. Soil map of the world, reviewed legend*. Report 80.
13. Goriachkin, V. P. *Teoría del arado*. Editado por: Promizdat, E. Moscú: 1927. 323 p.
14. Goriachkin, V. P. *Kolesa zhatvennih mashin*. Editado por: Soch, S. Moscú: 1937. vol. II y IV, 317 p.
15. Hall, H. y Raper, R. Development and concept evaluation of on on-the-go soil strength measurement system *TRANSACTIONS of the ASAE*, 2005, vol. 48, n° 2, p. 468-469.
16. Ibarra, S., *et al.* A model of stress distribution and cracking in cohesive soils produced by simple tillage implements. *J. Terramech.*, 2005, vol. 42, n° p. 115-139.

BIBLIOGRAFÍA

17. Karmakar, S. y Kushawaha, R. L. Dynamic analysis of soil-tool interaction a computational fluid dynamics approach. *ASAE Paper*, 2003, n° p. 14.
18. Karmakar, S. y Kushawaha, R. L. Propagation of soil failure front associated with various agricultural tillage tools. En 2003. p. 12.
19. Karmakar, S. K., R. L. Y Stilling. D. S. D. . Soil failure associated with crack propagation for an agricultural tillage tool. *Soil Till. Res*, 2005, vol. 84, n° p. 119-126.
20. Karmakar, S. Y. K., R. L. . *Simulation of soil deformation around a tillage tool using computational fluid dynamics*. En *ASAE Paper No. 041014*. 2004.
21. Kheirallos, A. Y. C. Modeling power and energy requirements for tillage implements operating in serdang sandy clay loam, malaysia. *Soil Till. Res.*, 2004, vol. 78, n° p. 1. 21-34.
22. Liu, J. C., Y Y Loob, D. *Experimental study of tillage tool-soil-staw interaction*. En *ASAE Paper No. 04-1019*. 2004.
23. Manor, G. Y. C., R. . *Development of on instrumented subsloiler to map soil hard-pans and real tine control of subsoiler depth*. . En *ASAE Paper No. 0011022*. 2001.
24. Nichols, M. L. y Read, I. F. Soil dynamics vi: Physical reactions of soils to mouldboard surfaces. . *Agric. Eng.*, 1934, vol. 15, n° p. I87.
25. Pezzi, F. Traditional and new deep soil tillage techniques in italy. *TRANSACTIONS of the ASAE*, vol. 48, n° p. 13-17.
26. Isc. 1999. Clasificación genética de los suelos de cuba. La Habana. Instituto de Suelos.
27. 58:2000. Geotécnia. Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelo. Vig. Septiembre 2000.
28. Fenyvesi, L. y Jóri, I. Reduction of the energy requirement by new soil cultivation tools 2002, n° p. 9.
29. Fielke Milton, J. Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements wet soil. *J. Agric. Eng. Res*, 1999, vol. 74, n° p. 1. 91-101.
30. Fielke, M. J. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil. . *Adelaide. 100h.*, 1994, n°
31. García De La Figal Y Costales, A. E. *Máquinas agrícolas ii* Editado por: Ipsjae, E. La Habana 1977, 200 p.
32. Ibarra, S., *et al*. A model of stress distribution and cracking in cohesive soils produced by simple tillage implements. *J. Terramech.*, 2005, vol. 42, n° p. 115-139.

BIBLIOGRAFÍA

33. Kheirallos, A. Y. C. Modeling power and energy requirements for tillage implements operating in serdang sandy clay loam, malaysia. *Soil Till. Res.*, 2004, vol. 78, n° p. 1. 21-34.
34. Kushawaha, R. L. Y. S., J. . Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. . *TRANSACTIONS of the ASAE*, 1995, vol. 37, n° p. 1315-1319.
35. Lade, P. V. Localization effects in triaxial test on sand. . *Proc. Int. Union of Theoretical and Applied Mechanics*, 1982, n° p. 461-472.
36. Mckyes, E. *Agricultural engineering soil mechanics*. Amsterdam: Elsevier 1989, 292 p.
37. ---. *Soil cutting and tillage*. Amsterdam: Elsevier, 1985, 217 p.
38. Mckyes, E. y Ali, O. S. The cutting of soil by narrow blades. *J. Terramech.*, 1977, vol. 14, n° p. 43-58.
39. Mouazem Mounem, A. y Nemenyi, M. Tillage tool design by finite element method: Part 1. *Finite element modeling of soil plastic behavior.*, 1999, vol. 72, n° p. 37-51.
40. Mouazem Mounem, A. y Ramon, H. A numerical statistical hybrid scheme for evaluation of draught requirements of subsoiler cutting a sandy loam soil as affected by moisture content, bulk density and depth. *Soil. Till. Res.*, 2002, vol. 63, n° p. 155-165.
41. Mounem Mouazem, A. y Nemenyi, M. Finite element of subsoiler cutting in non homogeneous sandy loam soil. *Soil & Till. Res.*, 1999, vol. 51, n° p. 1-15.
42. Norton Dosou, C. *Determinación de los parámetros óptimos para los órganos empleados en el escarificado profundo en las condiciones de suelos de cuba*. 1. Tesis (en opción por el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas)--CEMA. 1987.
43. Pérez Sendín, A. *Perfeccionamiento del tapador de huellas de la máquina de riego fregat*. Tesis (en opción al grado de Master en Mecanización Agrícola). Universidad Agraria de La Habana., 1997.
44. Perumpral, J. R., *et al*. A soil tool model based on limit equilibrium analysis. *TRANSACTIONS of the ASAE*, 1983, vol. 26, n° p. 991-995.
45. Plouffe, C. y Col. *Moldboard plows performance in clay soil simulations and experiments*. En *ASAE Paper*. 1998a.
46. ---. *Validations of moldboard plow simulations with fem an a heavy clay soil*. En 1998b.
47. Rahman, S., *et al*. *Movement of soil by sweep injection tools*. En *ASAE Paper*. 2002.

BIBLIOGRAFÍA

48. Raper, R. *Force requirements and soil disruption of straight and bentleg subsoiler for conservation tillage systems*. En 2002.
49. Rosa Aparecido, U. *Performance of narrow tillage tools with inertial and strain rate effects*. Tesis (en opción al grado de Doctor en Ciencias). Universidad de Saskatchewan, 1997.
50. Sánchez, A. y Col. *Variability in draft data observed during tillage*. En *ASAE Paper*. 2003.
51. Taniguchi, T. y Col. *Draft on soil manipulation by a moldboard plow under different forward speed and body attachments*. En *TRANSACTIONS of the ASAE*. 1999.
52. Young, R. N. y Hanna, A. W. Finite element analysis of plane soil cutting. *J. Terramech*, 1977, vol. 14, nº p. 103-125.
53. Zhao, X. *Research on moldboard plow by using triz and robust design*. En *ASAE Paper*. 2004.