



ARTÍCULO ORIGINAL

Análisis resistivo de un nuevo arado de tracción animal mediante el Método de Elementos Finitos (MEF)

Resistive analysis of a new animal traction plow through Finite Element Method (FEM)

Fidel Diego Nava¹, Miguel Herrera Suárez², Armando Eloy García de la Figal Costales³ y Jaime Ruiz Vega⁴

RESUMEN. La tracción animal como fuente energética tiene una amplia utilización en la agricultura de Oaxaca, México. Por tal razón se desarrolló un nuevo arado de tracción animal para realizar las distintas operaciones que se requieren durante la labranza. Con fines de la optimización se hizo necesario analizar la resistencia de los elementos estructurales de dicho arado mediante el método de elementos finitos. Como primer paso se desarrolló el modelo geométrico con la herramienta computacional Cosmos DesingStar 2008, y la definición de las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción del arado, así como la definición de las condiciones de borde y cargas. Los resultados mostraron que la estructura resiste las cargas aplicadas durante el trabajo con un coeficiente de seguridad de 2,46, la magnitud de las deformaciones resultantes se limitaron a 0,0005 m. Se evidencia que los materiales empleados en la construcción del arado garantizan la resistencia y rigidez requerida para el trabajo sin fallos de sus elementos y órganos de trabajo.

Palabras clave: simulación, apero, labranza, propiedades mecánicas del suelo.

ABSTRACT. Animal traction as an energy source has a wide use in agriculture in Oaxaca, Mexico. For this reason we developed a new animal-drawn plough to perform various operations required for tillage. For optimization purposes it was necessary to analyze the strength of the structural elements of this plough through the finite element method. As a first step the geometric model was developed with the software Cosmos DesingStar 2008, and the definition of the mechanical properties of materials used in the construction of the plough and the definition of boundary conditions and loads. The results showed that the structure resists the loads applied during operation with a safety factor of 2,46, the magnitude of the resulting deformations was limited to 0,0005 m. Showing that the materials used in the construction of the plow ensure the strength and stiffness required to work without fault of its elements and working bodies.

Keywords: simulation, implement, tillage, mechanical soil properties.

INTRODUCCIÓN

La tracción animal está muy difundida en la agricultura mexicana, alcanzando un 32,1 % de utilización de la superficie cultivada, (Cruz *et al.*, 2004). En el Estado de Oaxaca solo el 6,3 % de las unidades de producción agrícola los campesinos emplean los tractores como fuente energética y en el resto se recurre a los animales de tiro y la fuerza del hombre, utilizando arados de madera para el trabajo con la tracción animal en el cultivo del maíz en asociación con otros cultivos fundamentalmente.

La tendencia mundial en este sentido es impulsar el uso de aperos que aprovechen racionalmente la fuerza de tiro de los animales de tracción, en función de disminuir el consumo energético garantizando la calidad de la labor (Singh, 1999; Gebregziabher *et al.*, 2006; Bobobee *et al.*, 2007).

El arado de madera que se emplea tradicionalmente en los campos oaxaqueños tiene una baja durabilidad y se emplea solamente en las labores de surcado, debido a que su configuración solamente permite el montaje de cuñas planas rectangulares de metal. Su grado de aceptación radica en que pueden ser fabricados localmente y son los únicos disponibles en el mercado regional (Stresser-Pean, 1988).

Recibido 25/09/10, **aprobado** 10/12/11, **trabajo** 12/12, **artículo original**.

¹ M.I. Profesor, CHIDIR, Unidad Oaxaca del IPN, México, E-✉: fdiego1954@yahoo.com

² Dr. C., Prof. Titular, Universidad Central de Las Villas. Dpto. Mecanización Agropecuaria, Villa Clara, Cuba, CP 54830.

³ Dr. C., Prof. Titular, Universidad Agraria de La Habana-FCT, Mayabeque, Cuba. CP: 32700.

⁴ Ing., Profesor, CHIDIR, Unidad Oaxaca del IPN, México.

Actualmente no se fabrican arados metálicos de tracción animal en México y los que quedan han sido reparados y modificados de tal manera que ya no cumplen con las especificaciones originales, por lo que su desempeño es muy deficiente. Estos tienen mayor vida útil que los arados de madera pero son más pesados, lo cual repercute en el cansancio excesivo del labrador y de los animales de tiro. Otros problemas que presentan de estos son su elevado costo e inestabilidad durante el trabajo. En ambos casos no existe la posibilidad de cambiar las herramientas de labranza de acuerdo a la labor que se necesite, lo cual resulta en detrimento de la calidad del trabajo y la eficiencia del sistema compuesto por el conjunto animal-apero. Por otra parte, ambos arados compactan el suelo y tienen problemas severos de desgaste que inciden negativamente tanto en la calidad del trabajo realizado, como en la durabilidad del apero, así como en el aumento de la demanda tractiva (Diego *et al.*, 2002).

En el ámbito internacional se han desarrollado varias investigaciones con el objetivo de mejorar los parámetros de diseño y la durabilidad de los aperos de tracción animal que tradicionalmente se emplean en la labranza de suelos (Gebresenbet *et al.*, 1997; Singh, 1999; Gebregziabher *et al.*, 2006; Bobobee y Gebresenbet., 2007; Bobobee *et al.*, 2007; Gebregziabhera *et al.*, 2007; Mouazen *et al.*, 2007), pero han sido diseñados en función de condiciones específicas de suelos, geometría de la herramienta de labranza, y variedades vegetales, muy diferentes a las encontradas en las milpas mexicanas, y en particular a las de Oaxaca.

Por tal razón se desarrolló un nuevo arado de tracción animal para realizar las distintas operaciones que se requieren durante las labores de preparación y acondicionamiento de

suelos, a partir de la utilización de un bastidor metálico capaz de portar las diferentes herramientas utilizadas en cada una de estas operaciones, garantizando los requisitos de la calidad de la labor, consumo energético, durabilidad y ergonomía, tanto del labrador como de los animales de tiro, según las condiciones de trabajo imperantes en las milpas de los Valles Centrales de Oaxaca (Diego *et al.*, 2002). No obstante y a pesar de las ventajas mostradas por el referido arado de tracción animal, es necesario determinar la resistencia de sus elementos estructurales que garantice su trabajo estable, mediante el método de elementos finitos.

MÉTODOS

Implementación de los modelos en la herramienta computacional. El análisis de resistencia comprendió, en su fase inicial, la implementación de los modelos en el software Cosmos DesingStar 2008, empleado como herramienta computacional para la realización de los referidos análisis. En dicha fase se describe el problema a simular, se define el modelo geométrico que representa en forma exacta al referido arado de tracción animal, se declaran las propiedades de los materiales que conforman la estructura del mismo, se establecen las condiciones de fronteras, se imponen las cargas y se crean las mallas de elementos finitos.

Descripción del problema objeto de modelación. Como objeto de modelación se toma el arado de tracción animal desarrollado para la labranza de suelos en las condiciones de las milpas de los Valles Centrales de Oaxaca, (Figura 1).



FIGURA 1. Arado de tracción animal desarrollado en CIIDIR, Oaxaca, México.

Dicho arado es sometido a una fuerza de tracción debido a la fuerza de tiro que ejercen los bueyes, la cual actúa con cierto grado de inclinación con respecto a la horizontal mediante la plancha de fijación y regulación de la estructura del apero (1) y de la fuerza que imprime el labrador perpendicularmente sobre el timón del arado (2), cuando trata de estabilizarlo y mantener constante la profundidad de trabajo. De igual forma, el suelo al ser cortado ejerce una reacción sobre la superficie del órgano de trabajo (3) que causa su flexión. Estas fuerzas de reacción se equilibran con el resto de las fuerzas actuantes en el sistema.

Definición del modelo geométrico. El modelo definido comprende una representación detallada en tres dimensiones (3D) del arado. El mismo fue desarrollado con el software Solid Works 2008, (Figura 2), a escala real (1:1), con la inclusión de todos los detalles constructivos del mismo.



FIGURA 2. Modelo físico del arado FDN.

Mallado. El modelo fue mallado con un total de 113 663 elementos tetraédricos lineales con una dimensión de 6,105 mm; se requirió un total de 209 329 nodos (Figura 3). En los agujeros pertenecientes a las uniones atornilladas se hizo necesario hacer un refinamiento de la malla con elementos de dimensiones de 4,105 mm.

Cargas y condiciones de fronteras. Comprendió la aplicación de una fuerza de tracción equivalente a la fuerza de tiro de los animales de tracción (bueyes), la cual actúa directamente en la placa de fijación y regulación del arado, para el análisis se tomó una inclinación de 18° y una magnitud de 1 336 N , según los resultados experimentales obtenidos en las Milpas de Oaxaca, para las condiciones más difíciles de trabajo de dicho apero: suelo seco y compacto (Diego, 2010). Coincidiendo con

los datos experimentales obtenidos por Kemp (1988) y Temesgen *et al.* (2009).

Se incluyó una fuerza que actúa directamente en el timón del apero, representando la fuerza que ejerce el yuntero cuando intenta estabilizar el arado para mantener la profundidad de trabajo constante, de magnitud 150 N, según los resultados experimentales obtenidos por Diego (2010). A la reja se le limitó el movimiento y la rotación en los tres ejes de coordenadas.

Materiales del apero. Los elementos estructurales del apero fueron construidos de acero AISI 1020, a excepción de la reja que se construyó de acero aleado. En la Tabla 1, se listan las propiedades mecánicas de estos materiales.



FIGURA 3. Mallado paramétrico arado FDN.

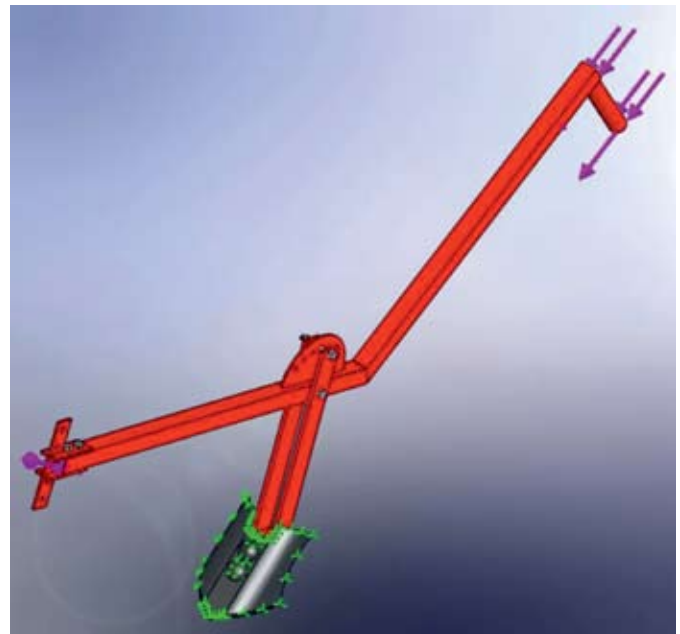


FIGURA 4. Condiciones de Frontera.

TABLA 1. Propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción del apero

Material	Módulo Elasticidad, MPa	Coefficiente Poisson	Tensión de fluencia, MPa
AISI 1020	2,0x10 ¹¹	0,29	351 x10 ⁶
Acero Aleado	2,1x10 ¹¹	0,28	620 x10 ⁶

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de resistencia muestran que la fuerza máxima de tracción ejercida por los bueyes, de 1 336 N, genera tensiones sobre la estructura y órganos de trabajo del arado, según el criterio de von Mises, que oscilan entre los 0,0782 a $1,285 \times 10^8$ MPa (Figura 5). Las tensiones máximas se ejercen sobre la viga central del bastidor, producto de la flexión causada por la fuerza de tiro, que actúa con una inclinación de 18° sobre la placa de tracción, siendo el punto más crítico la zona de unión de la placa que regula el ángulo de ataque del órgano de trabajo con la viga central del bastidor, mientras que las tensiones mínimas se alcanzaron en la zona de la reja del arado.

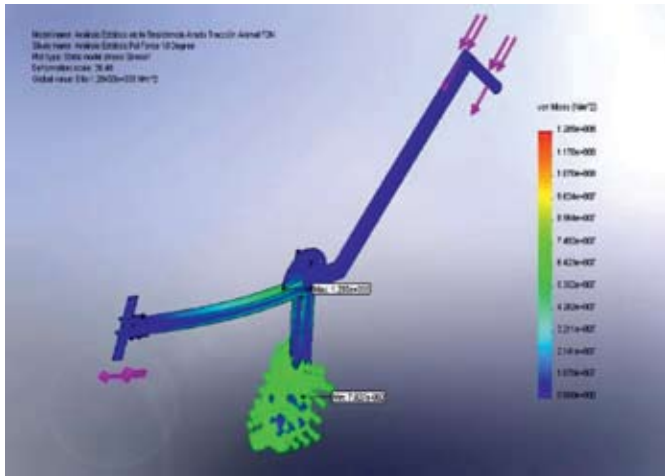


FIGURA 5. Distribución de Tensiones (Von Mises).

El análisis de las deformaciones de los elementos estructurales del arado mostró que las máximas deformaciones resultantes producto de la flexión causada por la fuerza de tiro no sobrepasan los 0,0005 m, lo cual garantiza la rigidez necesaria de la estructura. Estos valores se ubican en la zona de la plancha de tracción, zona donde se aplica directamente la fuerza de tracción ejercida por los animales de tiro.

La revisión del diseño en función de determinar la distribución del factor de seguridad a partir del criterio de von Mises (Cosmosdesingstar, 2008), mostró que la estructura del arado

es capaz de resistir los esfuerzos actuantes sobre el mismo, ya que el valor mínimo del factor de seguridad es de 2,14, lo cual evidencia que la estructura posee una reserva de resistencia, que hace adecuado el empleo de este arado para el trabajo en las condiciones de las milpas de Oaxaca (Figura 6).

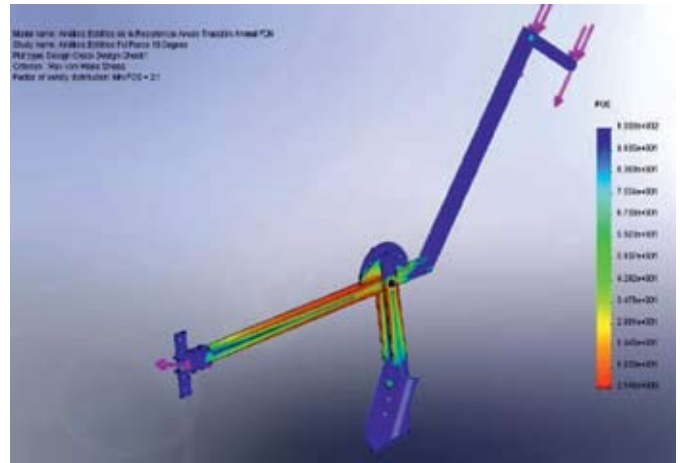


FIGURA 6. Distribución del Factor de seguridad.

Las zonas con menor coeficiente de seguridad se ubicaron en la viga central del bastidor y los brazos o soportes del órgano de trabajo. El timón y la barra porta timón son capaces de resistir la fuerza ejercida por el boyero durante la aradura.

CONCLUSIONES

- La estructura y órganos de trabajo del nuevo arado de tracción animal FDN son capaces de resistir las tensiones y deformaciones que surgen bajo la acción de la fuerza de tracción de los animales de tiro, en las condiciones de campo.
- El mínimo factor de seguridad calculado (2,14) y la magnitud de las máximas deformaciones (0,0005 m) evidencian que el arado posee reservas en cuanto a la resistencia mecánica de su estructura y órganos de trabajo.
- Los materiales empleados en la construcción del arado garantizan la resistencia y rigidez requerida para el trabajo sin fallos de sus elementos y órganos de trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOBOBEE, E. Y. H. & GEBRESENBET: "Effect of cutting edge thickness and state of wear of ploughshare on draught force and heart rates of Sanga oxen in Ghana", *Soil & Tillage Research*, 93: 2007.
- BOBOBEE, E. Y. H.; K. SRAKU-LARTEY; S. C. FIALOR; E. A. CANACOO & S. K. AGODZO; A. YAWSON y G. GEBRESENBET: "Wear rate of animal-drawn ploughshares in selected Ghanaian soils", *Soil & Tillage Research*, 93: 299-308, 2007.
- COSMOSDESINGSTAR: 2008. User's Guide. Ver 2008.
- CRUZ, A.; A. MARTÍNEZ y J. M. OMAÑA: "Fuentes de fuerza, diversidad biológica y rentabilidad de la producción de maíz en México", *Ciencia Ergo Sum*, 11(003): 275-273, 2004.
- DIEGO, F.: *Determinación experimental de la demanda tractiva del arado FDN*, 35pp., Oaxaca, CIIDIR, IPN, (Informe de Investigación), Oaxaca, México, 2010.
- DIEGO, F.; O. MARTÍNEZ y J. MARTÍNEZ: Método de labranza en Cuilapam, Valles Centrales, Oaxaca, México Proceedings of the V Conferencia Científica Internacional, 2002, pp. 15, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba, 2002.
- GEBREGZIABHER, S.; A. M. MOUAZEN; H. VAN BRUSSEL; H. RAMON; J. NYSSSEN; H. VERPLANCKE; M. BEHAILU; J. DECKERS & J. DE BAERDEMAEKER: "Animal drawn tillage, the Ethiopian ard plough, maresha: A review", *Soil & Tillage Research*, 89: 129-143, 2006.

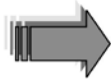
- GEBREGZIABHERA, S.; A. MOUAZEN; H. VAN BRUSSEL; H. RAMON; F. MERESAC; H. VERPLANCKEE; J. NYSSSENF; M. BEHAILUF; J. DECKERSG & J. DE BAERDEMAEKER: "Design of the Ethiopian ard plough using structural analysis validated with finite element analysis", *Biosystems Engineering*, 97: 27-39, 2007.
- GEBRESENBET, G.; E. ZERBINI; A. ASTATKE & P. KAUMBUTHO: "Optimization of animal drawn tillage implement systems: Part 2, Development of reversible plough and a ridger", *J. agric. Engng Res.*, 67: 299-310, 1997.
- KEMP, D.C.: Workload constraints: the measurement and interpretation of mechanical factors. Animal traction for agricultural development, In: **Workshop of the West Africa Animal Traction Network**, West Africa, 1988.
- MOUAZEN, A. M.; S. SMOLDERS; F. MERESA; S. GEBREGZIABHER; J. NYSSSEN; H. VERPLANCKE; J. DECKERS; H. RAMON & J. DE BAERDEMAEKER: "Improving animal drawn tillage system in Ethiopian highlands", *Soil & Tillage Research*, 95: 218-230, 2007.
- SINGH, G.: Draught animal energy research in India. Empowering farmers with animal traction. In: **Workshop of the Animal Traction Network for Eastern and Southern Africa (ATNESA)**, 20-24 september 1999, Mpumalanga, South Africa, 1999.
- STRESSER-PEAN, G.: *El arado criollo en México y América Central*. Coedición del Centre & Etudes Mexicaines et Centraméricaines (CEMCA), México, del Institut Français d'Amérique Latine (IFAL), México y del Institut Français de la Recherche Scientifique pour le Développement et la Coopération (ORSTOM), México, 1988.
- TEMESGEN, M. W.B.; W.B. HOOGMOED; J. ROCKSTROM & H.H.G. SAVENIJE: "Conservation tillage implements and systems for smallholder farmers in semi-arid Ethiopia", *Soil & Tillage Research*, 104: 185-191, 2009.



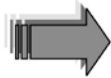
Universidad Agraria de La Habana

CENTRO DE MECANIZACIÓN AGROPECUARIA

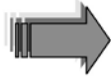
El Centro Rector de la Ingeniería Agrícola en Cuba



Investigación de la Mecanización Agrícola, utilizando Sistemas Conservacionistas y Sustentables.



Cursos y Entrenamientos de Posgrado, Maestrías y Doctorados en Ingeniería Agrícola;



Editor de la Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, publicación trimestral en idioma español;



Servicios Científico-Técnicos:



Solicitudes de ofertas a:
M.Sc. Héctor de las Cuevas Milán
Centro de Mecanización Agropecuaria
Autopista Nacional y Carretera de Tapaste, km 23, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Apdo. 18-19
Tel.: (53)(47) 864346
E_mail: hector@isch.edu.cu

Maquinaria Agrícola & Instrumentos de Medición:

- **Balanza Electrónica para el Pesaje de Ganado;**
 - **Balanzas para Cerdos y Ovinos.**
- ### **Laboratorio de Oleohidráulica:**
- **Descontaminación de Aceites;**
 - **Fabricación de Equipos Portátiles de Filtraje de Aceites;**
 - **Recuperación (Emboquillado) & Fabricación de Mangueras;**
 - **Diagnóstico y Evaluación de Circuitos Oleohidráulicos y sus Componentes;**
 - **Cursos y Entrenamientos de Capacitación en Olehidráulica.**