

ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO DE LA FALLA DE UN ENGANCHE AGRÍCOLA

Gómez-Cadena, Jéssica Paola (1), Saldaña-Robles, Alberto (2)

1 [Ingeniería Mecánica, Universidad ECCI] | [jessicap.gomezc@ecci.edu.com]

2 [Departamento de Ingeniería Agrícola, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [alberto.saldana@ugto.mx]

Resumen

En México existen pocas empresas dedicadas al desarrollo de maquinaria agrícola, por lo que existe la necesidad de diseñar maquinaria que se adapte a las necesidades propias de los sistemas de producción del país, además de impulsar el desarrollo de empresas mexicanas dedicadas a este sector con tecnología nacional. En este trabajo, se presentan los análisis por el Método de Elemento Finito (MEF) de una arado de vertederas comercializado por una empresa mexicana, el cual presenta una falla en el eje de giro en condiciones de trabajo. Se digitalizó un modelo 3D del arado de vertedera en el programa Autodesk Inventor®. Una serie de simulaciones se realizaron en el programa ANSYS® Workbench variando la carga de tracción en las vertederas, con el objetivo simular la falla en el arado así como estimar la carga de falla. Se proponen dos alternativas cambiando la geometría del eje y sus elementos de contacto, con la finalidad de reforzar la zona e incrementar el factor de seguridad. Se logró reducir el esfuerzo de 319 MPa a 142 MPa a una carga de tracción en las vertederas de 600 kg, con un factor de seguridad de 2.2.

Abstract

In Mexico there are few companies dedicated to the development of agricultural machinery, so there is a need of machinery design that matches the needs of the production systems of this country, also to promoting the development of Mexican companies dedicated to this sector with national developed technology. This work shows the analysis by Finite Element Method of a plow moldboard which is commercialized by Mexican company, this plow moldboard presents a failure in the axis of rotation in working conditions. A 3D model of plow moldboard was digitized in the Autodesk Inventor® software. Various simulations were made in the ANSYS® Workbench software, varying the traction load in the moldboards, with the objective of simulating plow failure as well as estimating the failure load. Two alternatives are proposed by changing the axis geometry and its contact elements, in order to reinforce the area and increase the safety factor. The stress was reduced from 319 MPa to 142 MPa, with a load in the mouldboards of 600 kg and a safety factor of 2.2.

Palabras Clave

Arado, vertederas, simulación, esfuerzo, análisis estructural.

INTRODUCCIÓN

Diseño de maquinaria agrícola por el método de elemento finito

La maquinaria y los implementos son herramientas fundamentales para la preparación del suelo agrícola, los cuales son de gran utilidad para pequeños y grandes agricultores facilitando significativamente el trabajo de preparación de suelos para la posterior siembra [1]. El arado de vertedera está sometido a diversas condiciones de trabajo en terrenos con diferentes características, capaces de exponer el implemento a daños progresivos y/o daños súbitos, provocados por las cargas estáticas, cargas de impacto y cargas dinámicas [2]. Donde no está excluida a inconvenientes por la falta de investigación para el desarrollo de ésta, así que los diseños son susceptibles a mejoras según las necesidades requeridas, puesto que pocas veces se diseña bajo criterios analíticos y/o computacionales para suplir necesidades específicas.

En la actualidad, la aplicación del análisis por medio del Método de Elemento Finito (MEF) es una herramienta útil para la solución de problemáticas en cuanto a fallas y predicción de las mismas que se puedan generar entorno a la maquinaria agrícola, obteniendo propuestas de optimizaciones y ejecución de cambios, mostrando como resultado mejoras en cuanto al diseño de elementos de mecánicos y maquinaria agrícola [2]. En la literatura, diversos investigadores han utilizado el MEF para resolver problemas de ingeniería agrícola, por mencionar: Sahu *et al.* [3] realizaron un análisis por MEF del mecanismo de inclinación manual de un arado de tres surcos reversible. En el estudio se optimizó el mecanismo de inclinación, se realizó el modelo CAD en el programa Pro/ENGINEER®. Otros autores como Morales y Gómez [4] siguieron una metodología similar a Sahu *et al.*, los investigadores determinaron la distribución de esfuerzos de un implemento de trabajo multi-arado, efectuaron un estudio de optimización con el propósito de reducir los efectos del peso del implemento sobre la compactación de los suelos. En 2016 González *et al.*, [5] realizaron un análisis estático de un arado de tracción animal utilizando MEF para determinar los esfuerzos y las deformaciones a las que está sometido durante el trabajo de labranza en diferentes tipos de suelo.

El programa ANSYS® Workbench es una herramienta importante, cuyo fin es realizar un análisis por medio de MEF ejecutando un modelo numérico o matemático con elementos finitos bajo un lenguaje de programación computacional que permite obtener resultados de precisión, esto hace que la labor de predicción y análisis de fallas sean en su mayoría económicas puesto que evita realizar determinaciones de falla de forma experimental, adicional a esto es un gran complemento para el diseño de un equipo puesto que las mayoría de las ocasiones los procedimientos teóricos son limitados y los métodos experimentales son costosos.

La empresa de maquinaria agrícola Fábrica de Máquina y Herramienta S. A. de C. V. (FAMAQ) cuenta con un arado de vertederas modelo AH400, el cual ha presentado falla en el eje de giro (Imagen 1), que se encuentra en la sección del enganche. Por lo anterior, en el presente trabajo se realizó un análisis por MEF para detectar la falla, la carga de falla y proponer una alternativa de mejora. En el estudio se utilizaron herramientas modernas de Diseño Asistido por Computadora (Inventor® 2018) e Ingeniería Asistida por Computadora (ANSYS® Workbench). En los siguientes apartados se describe a detalle el desarrollo del estudio.



IMAGEN 1. Falla del eje de giro del arado de vertederas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estudio de la zona de falla de un enganche agrícola

Para determinar mediante simulación con el programa ANSYS® Workbench la zona de falla del arado de vertederas, la carga de falla estimada y proponer una mejora en la zona de falla, se aplicaron los siguientes procedimientos:

Modelado 3D del arado de vertederas

Se realizó un ensamble del arado de vertedera mediante el programa Autodesk® Inventor donde se buscó que cumpliera con las condiciones de ensamble tales como, correctas relaciones evitando que hayan intersecciones inadecuadas entre componentes del arado, geometrías o superficies que no son parte de éste, como resultado se obtiene un ensamble de 269 elementos (Imagen 2) de los cuales se realiza una supresión de los cuatro conjuntos de vertederas de la parte superior (Imagen 3) para simplificar la simulación en el programa ANSYS®, teniendo en cuenta únicamente la masa de las mismas como carga vertical.



IMAGEN 2. Modelo 3D del arado.



IMAGEN 3. Modelo 3D simplificado del arado.

Materiales del arado de vertederas

El modelo del arado de vertederas se encuentra compuesto por diferentes materias primas, tales como placas en acero al carbón, perfil cuadrado estructural, lámina en acero al carbón y elementos de sujeción (pernos), donde la especificación del tipo de materia prima es suministrada por la empresa FAMAQ, a continuación en la Tabla 1 se presenta la materia prima utilizada.

Tabla 1 Materia prima Arado de Vertedera.

CONJUNTO	MATERIA PRIMA		
Armadura (PTR)	Acero ASTM A500 grado A		
Reja de vertedera Enganche	Acero ASTM A36		
Eje de giro Pernos	Acero AISI 1045		

Importación del modelo

Posterior a la definición del modelo CAD y neto conocimiento de condiciones de trabajo del arado, se realiza la respectiva importación del modelo al programa ANSYS® Workbench, el cual permitirá realizar el análisis por medio de MEF del arado de vertederas aplicando las condiciones necesarias para ejecutar dicho análisis.

Materiales

Las propiedades mecánicas de la materia prima usada por la empresa FAMAQ para la fabricación del arado de vertedera se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2 Propiedades mecánicas de materia prima para el Arado de Vertedera [6].

	MODULO ESTASTICO (E) GPa	ESFUERZO DE CEDENCIA (Sy) MPa	ESFUERZO DE FRACTURA (Sf) MPa	RAZON DE POISSON (ν)
ACERO ASTM A500 GR A	200	320	430	0.30
ACERO ASTM A36	200	250	460	0.26
ACERO AISI 1045	206	310	565	0.29

Mallado

El modelo del arado de vertederas se malló con elementos hexaédricos-tetraédricos como se muestra en la Imagen 4, se realizó un mallado denso para aquellos componentes de tamaño y geometría compleja, como lo son pernos, el eje de giro y las vertederas. El modelo cuenta con 569,846 elementos y 141,727 nodos.

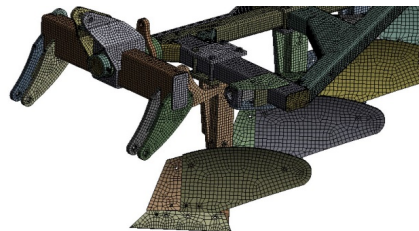


IMAGEN 4 Malla del modelo de elemento finito del arado.

Condiciones de carga

La carga crítica en el implemento se genera en situación de trabajo, durante la interacción entre el suelo y las vertederas, la carga de corte de suelo se presenta en posición normal a la cuchilla de la vertedera. Ingenieros de diseño de la empresa FAMAQ estimaron la carga de corte por vertedera en un valor estimado de 450 kg (4415 N). Adicionalmente, en el presente trabajo se estima la fuerza generada en la vertedera a partir de la ecuación de Nieto (2015) como se muestra a continuación. Las vertederas ejercen esfuerzos cortantes sobre el suelo para ocasionar su rotura, causando que se genere una fuerza de reacción sobre la vertedera, a la cual se le designará como fuerza de tracción. Para determinar la fuerza de tracción de una reja, se considera una velocidad de trabajo de 8 km/h (6-8 km/h), rango máximo de velocidad recomendada para éste tipo de implemento, la fuerza de tracción se determina mediante la siguiente ecuación (1). Donde: F, es la fuerza de reacción sobre la vertedera (N); μ , es la resistencia específica del terreno (N/cm²), 30-40 kPa para suelo de consistencia media de acuerdo a la ASAE, para este estudio se considera una resistencia específica promedio de 35 kPa y S, Sección de laboreo (cm²).

$$F = \mu \cdot S \quad (1)$$

A su vez la sección de laboreo se puede determinar mediante la ecuación (2). Donde: n, es el número de vertederas activas; a, es el ancho de trabajo y p, es la profundidad de corte.

$$S = n \cdot a \cdot p \quad (2)$$

En la presente investigación el ancho de trabajo multiplicado por la profundidad de corte proporcionan el área activa, la cual se determinó mediante el programa Inventor®, considerando que la vertedera entra a una profundidad de 30 cm, para lo cual el programa indica un área activa de 1,430 cm². Por lo anterior, la sección de trabajo para una sola vertedera es de 1,430 cm². La fuerza tracción necesaria entonces es:

$$F = (35,000 \text{ N/m}^2) \cdot (0.143 \text{ m}^2) \rightarrow 5,005 \text{ N (510 kg)} \quad (3)$$

Una vez estimada la carga en las vertederas, el primer modelo se evaluó con la carga de 450 kg para estimar los esfuerzos que se presentan en el arado en condiciones de trabajo normal, posterior a ello se realizaron varias simulaciones incrementando gradualmente la carga cada 50 kg en las vertederas, para determinar la carga de falla. Finalmente, se proponen dos opciones de rediseño, presentando resultados de una de ellas.

Tabla 3. Valores de condiciones de carga y restricciones.

	CARGA APLICADA	ROTULO
GRAVEDAD	9.81 m/s ²	J
FUERZA DE LABOREO	5,005 N	B, C, D, E
CARGA VERTEDERA	869 N	F, G, H, I
SOPORTE FIJO	N/A	A



IMAGEN 5. Condiciones de frontera para Arado de Vertedera.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinación de zona de falla de arado de vertedera

Se determinó el mapa de esfuerzo basado en el criterio de von Mises a los que se somete el arado de vertederas durante condiciones normales y máximas de operación como se muestra en la Tabla 5, donde dos de estas condiciones se analizaron según la carga de trabajo estimada por la empresa FAMAQ (450 kg) y la carga de trabajo calculada (510 kg) mediante la ecuación de Nieto (2015). Del análisis de resultados de la simulación del arado de vertederas, se muestra una acumulación de esfuerzos en la zona de giro del arado (Imagen 6), evidenciando que la acumulación máxima de esfuerzos se presentan en el cambio de sección circular a cuadrada del eje de giro (Imagen 7).

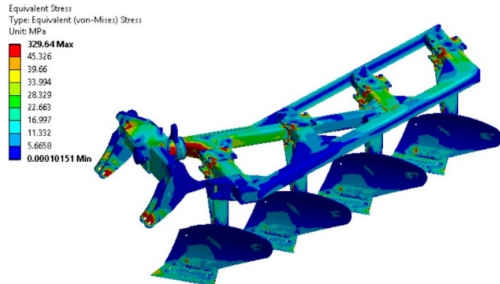


IMAGEN 6. Esfuerzo máximo de Von Mises para 510 kg.

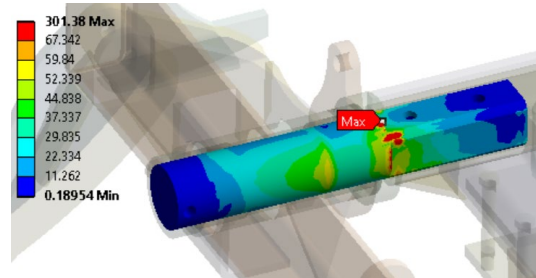


IMAGEN 7. Acumulación de esfuerzos en eje de giro con 510 kg.

La Tabla 5 y la Imagen 8 muestran el esfuerzo máximo de von Mises sobre el eje de giro a diferentes cargas de tracción sobre las vertederas.

Tabla 4. Esfuerzo máximo de von Mises a diversas cargas.

MASA (kg)	CARGA (N)	ESF. MÁX. VON MISES EJE DE GIRO (MPa)
450	4415	296
500	4905	300
510	5003	301
550	5396	308
600	5886	319

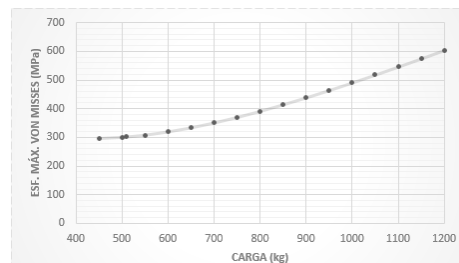


IMAGEN 8. Estado de esfuerzos para eje de giro.

La aplicación de la carga de 450 kg presenta un esfuerzo máximo de Von Mises de 296 MPa, mediante la iteración de cargas para determinar la carga de falla se obtiene que con la aplicación de 600 kg en las vertederas, el eje de giro supera el esfuerzo de cedencia del acero AISI 1045, experimentando un esfuerzo máximo de Von Mises de 319 MPa.

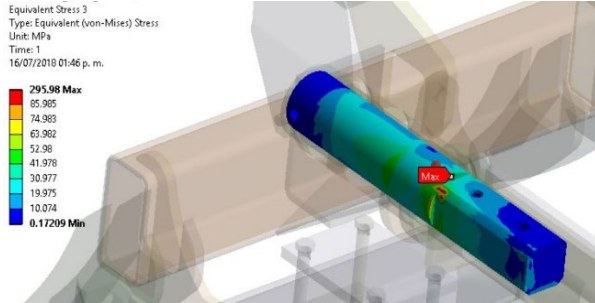


IMAGEN 9 Esfuerzo máx. con carga estimada por FAMAQ (450 kg).

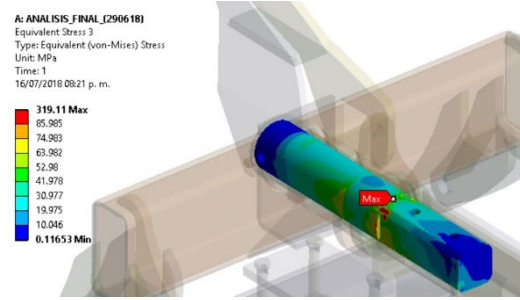


IMAGEN 10 Esfuerzo máx. con carga de fractura (600 kg).

La carga de 450 kg se presenta en el arado sin alterar la resistencia a la fluencia del material en una sola aplicación de carga y en condiciones de suelo ideales, pero es de evaluar la cercanía del esfuerzo máximo encontrado (296 MPa) respecto al esfuerzo de cedencia del acero 1045 (310 MPa). Se determina entonces que la falla del eje en la zona de acumulación de esfuerzos se puede dar por fatiga del elemento y/o condiciones de carga súbita las cuales se estiman a partir de los 600 kg presentando un esfuerzo máximo de 319 MPa superando el límite de cedencia del acero 1045 y 1150 kg presentando un esfuerzo máximo de 574 MPa superando el esfuerzo de fractura del acero 1045, estas cargas producirán la falla en el eje de estudio, por lo tanto se propone un rediseño de dicho eje para optimizar su resistencia y disminuir los esfuerzos.

Propuesta de rediseño

Para la propuesta de mejora se aconseja realizar la fabricación de un eje de giro el cual conste de un solo tipo de sección, es decir que sea netamente circular o cuadrado, en caso de ser necesario un cambio en tamaño de sección se aconseja que sea lo menor posible a su vez en su manufactura se realicen mecanizados de radio o chaflan evitando aristas vivas y cambios netamente perpendiculares, lo anterior se propone con el fin de evitar la acumulación de esfuerzos, en el eje de giro. Respecto a lo anterior descrito se realiza el cambio de geometría del eje de tal forma que esta sea en una sección netamente cuadrada sin cambios de dimensión a lo largo del elemento como se muestra en la Imagen 11, este rediseño conlleva a generar cambios de geometría en elementos influyentes tales como bujes y barra perforada tal como se muestra en la Imagen 10.

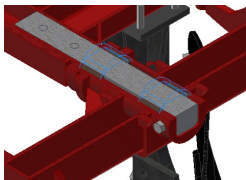


IMAGEN 11. Propuesta 1 de rediseño en zona de eje de giro.

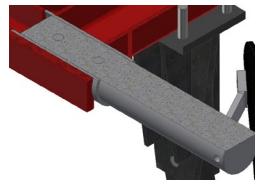
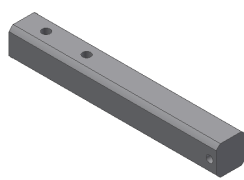


IMAGEN 12. Propuesta 1 de rediseño en zona de eje de giro.



Para ejecutar la simulación del rediseño de la zona de giro del arado de vertedera, se aplica la carga que determina la cedencia en el análisis inicial (Imagen 9) la cual consta de 600 kg. Como resultado de la propuesta 1 (Imagen 11), el esfuerzo máximo presente en el eje de giro es de 142 MPa (Imagen 13). Se evidencia una reducción del 44.5% del esfuerzo máximo experimentado por el diseño inicial (Imagen 9), este rediseño evita sobrepasar el límite de resistencia a la fluencia del material en el eje de giro rediseñado (Imagen 11), en condiciones máximas de trabajo. Adicionalmente se puede observar que el rediseño permite un factor de seguridad de alrededor de 2.2.

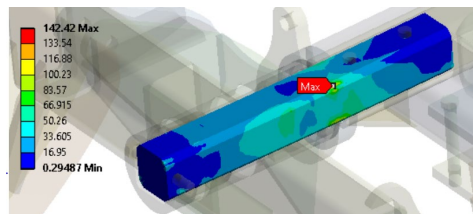


IMAGEN 13. Esfuerzo máximo en rediseño de eje de giro.

CONCLUSIONES

Se generó un modelo de elemento finito del arado de vertederas, el cual permitió detectar la zona de falla que se produce en condiciones críticas de trabajo. Las diversas simulaciones permitieron estimar la carga que produce la cedencia en el eje de giro, la cual se presenta alrededor de los 600 kg por vertedera. La propuesta de rediseño del eje de giro permitió disminuir el esfuerzo máximo de von Mises de 319 MPa del modelo original a 142 MPa, logrando un factor de seguridad de 2.2. Además modelos geométricos y de elemento finito del arado de vertederas se encuentran disponibles para futuras investigaciones. En estudio futuro, Una comparación entre las propuestas de diseño se llevará a cabo, así como un análisis del costo de la manufactura de las propuestas con respecto a la actual.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Guanajuato por el apoyo brindado para realizar mi estancia de investigación.
Al Dr. Alberto Saldaña Robles por la dedicación, tiempo y compromiso que tuvo a lo largo de mi investigación, por hacer parte de la profundización y orientación en temas enmarcados a la Ingeniería Mecánica.
A mi tutor académico de la Universidad ECCL, Dr. Orlando Giraldo Colmenares, quien con su recomendación y apoyo hizo posible la realización de este verano de investigación.
Al M. en I. Vladimir Silva Leal, por siempre estar pendiente de mi estancia de investigación y motivarme a adquirir la mejor experiencia tanto académica como personal.

REFERENCIAS

- [1] J. I. Fariña, «PREPARACIÓN DE SUELO,» de *Manual de Papa para La Araucanía: Manejo y Plantación*, Temuco, Chile, 2009, p. 114.
- [2] M. R. A. S. M. J. Flores Moreno Raudel, «Análisis por elementos finitos de cargas de impacto en elementos estructurales de maquinarias agrícolas,» *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. XVIII, nº 1, pp. 63-64, 2009.
- [3] A. J. S. & M. N. Saju, «FEM analysis of tilting mechanism of three furrows reversible plough,» *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. III, nº 1, pp. 3961-3971, 2011.
- [4] J. F. & G. M. V. Morales, «Análisis del comportamiento resistivo del implemento de trabajo del multiarado MAU-250,» *Acta Agronómica*, pp. 22-29, 2015.
- [5] F. Gonzalez, «Interacción de ANSYS con entornos de ventanas a medida: aplicación al campo de la mecánica agrícola,» *Tesis de grado, Universidad Carlos III de Madrid, España*, 2010.
- [6] MatWeb, «MatWeb Material property data,» MatWeb, LLC., 1 Enero 1996. [En línea]. Available: <http://www.matweb.com>. [Último acceso: 3 Julio 2018].
- [7] G. A. S. R. A. L. D. P. J. A. S. R. A. S. R. N. & D. A. C. E. Bustos, «Diseño de la pluma de una retroexcavadora agrícola por elemento finito,» de *Memorias del V Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas*, Chapingo, Estado de México., 2017.