

Análisis de esfuerzos en un apero de tracción animal, empleando métodos experimentales y numéricos

Antonio González López,^A Fidel Diego Nava,^B
Gabriel Villa y Rabasa,^A Alfonso Campos Vázquez^C

^A ESIME Zacatenco, IPN

^B CIIDIR Unidad Oaxaca, IPN

^C UPIITA, IPN

aglopez@ipn.mx, fdiego@ipn.mx



RESUMEN

En muchos sitios aún se realiza la labranza utilizando animales de tiro. En este trabajo se llevó a cabo el estudio estático de un apero de tracción animal utilizando análisis de elemento finito para determinar los esfuerzos y las deformaciones a las que está sometido durante la labranza. Se diseñó un sistema de soportes para poder simular la carga del apero durante el tiro y validar el análisis, el cual permite predecir la resistencia de la herramienta en diferentes tipos de suelo.

PALABRAS CLAVE

Apero, reja, esfuerzos, deformaciones, elementos finitos.

ABSTRACT

There are still many places where farming with pulling animals is employed. A static study of a plow, pulled by animals, by means of finite element analysis for determining stress and deformation in the plow during farming was carried out in this work. A supporting system was designed for simulating the load in the plow during pulling and validates the analysis, which allows predicting the resistance of such tool in different kinds of soil.

KEYWORDS

Plow, plowshare, stress, deformation, finite element.

INTRODUCCIÓN

Debido a la problemática que representa el uso de tractores en el estado de Oaxaca, particularmente en la región conocida como los Valles Centrales, se presenta un proyecto de construcción de un apero de tracción animal para el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, (CIIDIR) Unidad Oaxaca del Instituto Politécnico Nacional. Las tierras de cultivo de los campesinos que habitan en esas regiones no cuentan con una topografía

bien definida, los terrenos son irregulares, muy pequeños y la mayoría de ellos son parcelas de difícil acceso o se encuentran en pendientes elevadas. La forma en que los campesinos surcan sus terrenos, es con la ayuda de animales de labranza y un apero de madera. Este trabajo se propone desarrollar una herramienta que sea liviana para los animales y el campesino, además de resistente, utilizando métodos de elementos finitos, siguiendo la experiencia de otros trabajos.^{1,2}

Primero se toman medidas de una herramienta de labranza de tracción animal llamada surcadora y enseguida se digitaliza un modelo tridimensional del apero. Luego se introducen los datos de las propiedades mecánicas del elemento. Finalmente se establecen las condiciones de carga y frontera.³ Se realiza el análisis de esfuerzos y deformaciones sobre el modelo geométrico para determinar los puntos críticos y así hacerlo confiable. Se propone evaluar los esfuerzos y las deformaciones en el modelo mediante análisis estático basado en el Método del Elemento Finito utilizando paquetes de cómputo comerciales.⁴

Es importante introducir en los cálculos las propiedades mecánicas reales de los materiales que se utilicen, ya que de éstas depende en gran parte, la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Se le colocaron al prototipo desarrollado (figura 1) unas galgas extensométricas y se le aplicaron cargas mediante una prensa de 10 Ton, con un dispositivo acoplado para simular una carga repartida en la punta del prototipo. Al final los datos de ambos sistemas fueron comparados para corroborar resultados.

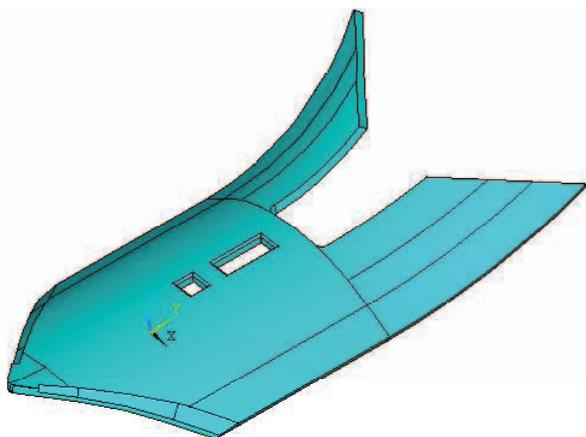


Fig. 1. Diseño de la herramienta de labranza con el software ANSYS.

El objetivo de este trabajo es el desarrollar una metodología para la evaluación de esfuerzos y deformaciones de la herramienta de labranza para fines de diseño.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El análisis de todo el sistema de labranza requeriría de gran capacidad de cómputo. Por lo tanto, se centró el análisis sólo a la parte de la herramienta que se encarga de hacer los surcos en la tierra, la reja, y las condiciones de frontera en la articulación simulan el efecto producido por todo el conjunto. El apero está formado por una placa sólida con una geometría compleja, cuyo espesor es de 7 mm.

Las propiedades mecánicas del material de la herramienta, son mostradas en la tabla I. También se considera que el material utilizado es isotrópico, continuo, lineal, elástico y homogéneo.⁵ La tabla II muestra el peso y la fuerza aplicado en la sección.

Para cualquier análisis que se lleve a cabo bajo la técnica mencionada anteriormente, el punto inicial debe ser un modelado óptimo de la estructura, para obtener los resultados que se apeguen más a la realidad.

Se debe considerar que al modelar sólo la herramienta, sin considerar la estructura en la cual se encuentra montado el apero se está omitiendo un elemento que afecta la rigidez.

Tabla I. Propiedades mecánicas del material del apero.

Material	AISI 1020
Módulo de elasticidad	2 x 10 ⁹ Pa
Módulo de rigidez	79.3 x 10 ⁹ Pa
Relación de Poisson	0.29
Resistencia de fluencia	350 MPa

Tabla II. Pesos y fuerzas en los componentes.

Masa	2.8 Kg
Fuerza aplicada	150 N aplicada uniformemente en la base de corte del modelo

En la figura 2 se muestra el mallado de la herramienta que quedó constituido por 6873 nodos con 6 grados de libertad, cada uno de los cuales genera 6875 elementos.

Se consideró que los puntos de apoyo se encuentran en las bases donde se monta la herramienta, esto se ilustra en la figura 3. En las bases se tienen solamente desplazamiento en el eje “X” y rotación en “Y”, esto representa el movimiento axial y rotacional existente en la herramienta. Por otra parte, en la articulación entre la herramienta y el bastón que sujeta dicha pieza, se tiene rotación respecto a los ejes “Y” y “Z” quedando restringidos los desplazamientos en todas las direcciones y la rotación sobre el eje “X”, simulando de esta manera el funcionamiento real de dicha articulación.



Fig. 2. Malla de elementos finitos de la herramienta de labranza.

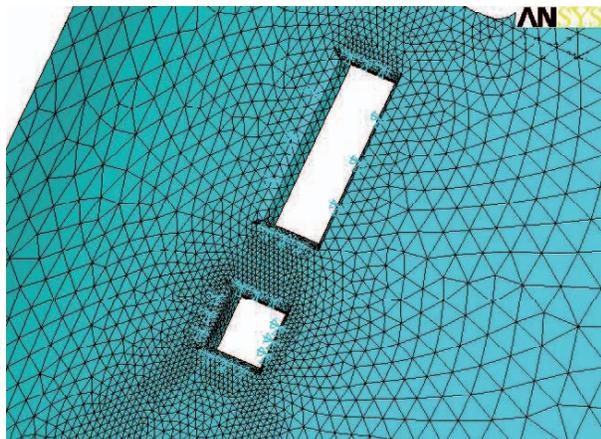


Fig. 3. Modelo de elementos finitos mostrando las condiciones de frontera.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO

Los desplazamientos bajo condiciones de carga estática, se muestran en la figura 4, siendo los máximos de 0.823 mm. Además bajo esta condición de carga se presentan corrimientos de menor escala ubicados en todo el elemento de la estructura de 0.379 mm.

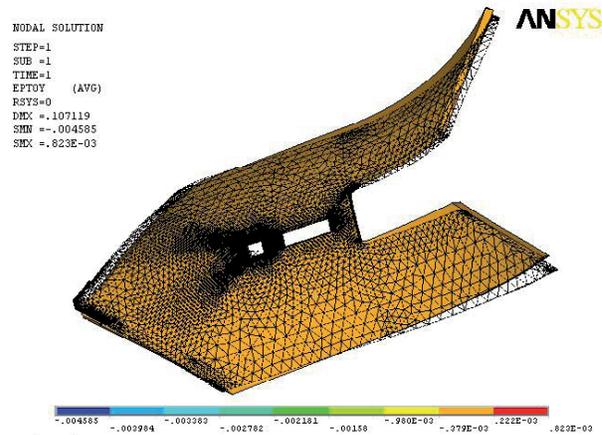


Fig. 4. Desplazamiento del apero en condiciones de carga estática.

Este patrón de deformación era el esperado, debido a que la herramienta de labranza entra en la tierra y el arrastre de los animales de trabajo se encuentra en la parte frontal, de ahí que la punta del apero sea una de las zonas más críticas o con mayor deformación.

Para evaluar la severidad de los esfuerzos, se empleó como posible criterio de falla el máximo esfuerzo principal.

Se considera este criterio, ya que se puede presentar una falla catastrófica cuando el material pierde su ductilidad (se fragiliza), siendo este parámetro un indicador de cuales son los puntos más propensos, donde pudiera generarse fallas y grietas.

Por otra parte, el mayor valor del máximo esfuerzo principal que se presenta sobre la herramienta, para este caso de estudio, es de 4511 Pa, localizado en la cara superior del apero, en la parte en la cual se inserta la varilla de sujeción, como se puede apreciar con más detalle en el acercamiento de la figura 5.

Bajo condiciones estáticas, y de acuerdo a los resultados obtenidos se puede decir que la estructura es segura.

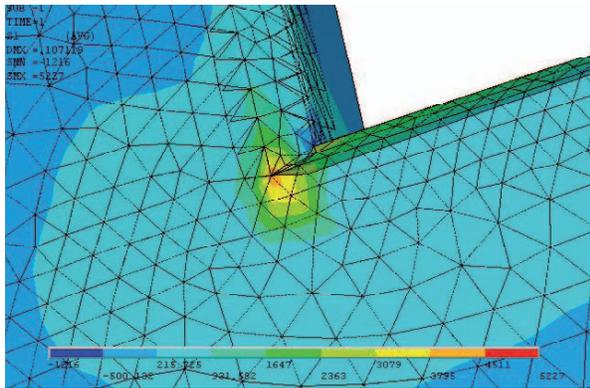


Fig. 5. Acercamiento de la zona de máximo esfuerzo principal en condiciones de carga estática.

PRUEBA DE COMPRESIÓN Y EXTENSOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA DE LABRANZA PARA ARADO

La prueba se realizó en una máquina universal de ensayos utilizando accesorios como mordazas y mesa plana para el montaje de la pieza de prueba (figura 6), con una capacidad de 10 Ton, y un software de adquisición de datos.

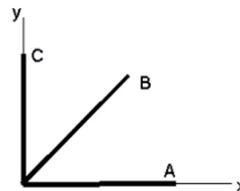
También se utilizó para la experimentación extensométrica una consola donde se conectaron las galgas de la roseta rectangular utilizada. El ensayo se realizó de acuerdo a los pasos que involucran los



Fig. 6. Vista de la máquina universal con la herramienta montada

aditamentos de sujeción, pegado de rosetas, prueba de compresión, prueba extensométrica y registro de la información indicada por los instrumentos de medición.⁶ De manera general, primeramente se diseñaron y fabricaron el apoyo y perno de sujeción para montar el apero en la máquina universal. Se realizó la calibración del indicador de deformación para iniciar la prueba y tomar lectura de las microdeformaciones indicadas por el equipo; las cuales se presenta ordenadas en la tabla III.

El siguiente paso consiste en calcular las deformaciones principales presentes en el apero con la carga correspondiente. Para definir el ángulo en el cual se encuentran las galgas es necesario definir su posición. Cuando el eje X del plano cartesiano coincide con el eje de referencia de la galga, el plano cartesiano de las deformaciones es el siguiente:



y se cumple que:

$$\epsilon_x = \epsilon_1$$

$$\epsilon_y = \epsilon_3$$

$$\tau_{xy} = 2\epsilon_2 - (\epsilon_1 + \epsilon_3)$$

CÁLCULO DE LA DIRECCIÓN DE LAS DEFORMACIONES PRINCIPALES

Las ecuaciones para el cálculo de las deformaciones principales del arreglo de tres rosetas están dadas por lo que se conoce como la relación de la “transformada de deformación”, la cual es empleada de una forma muy simple, que está dada por la relación de la deformación normal en cualquier dirección del plano de prueba en términos de dos deformaciones principales y el ángulo del eje principal en dirección de la deformación medida.⁷

Como puede observarse en el círculo de Mohr de la figura 7, la deformación normal en cualquier ángulo θ del eje principal es expresado por:

$$\epsilon_\theta = \frac{\epsilon_p + \epsilon_g}{2} + \frac{\epsilon_p - \epsilon_g}{2}$$

Tabla III. Microdeformaciones medidas con cada galga.

Roseta	Galga	Ángulo de referencia	Carga		Microdeformación		
			Nominal	Aplicada	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
1	A	45°	150 Kgf	152,2	-492	-485	7
			150 Kgf	151,4	-492	-485	7
			150 Kgf	151,2	-492	-485	7
			150 Kgf	152,1	-492	-485	7
	B	0°	150 Kgf	150,6	-492	-483	9
			150 Kgf	150,8	-492	-482	10
			150 Kgf	151,1	-492	-483	9
			150 Kgf	150,9	-492	-482	10
	C	90°	150 Kgf	151,8	-493	-482	11
			150 Kgf	151,2	-493	-482	11
			150 Kgf	152,3	-493	-483	10
			150 Kgf	150,3	-493	-482	11
Roseta	Galga	Ángulo de referencia	Carga		Microdeformación		
			Nominal	Aplicada	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
2	A	45°	150 Kgf	150,5	-492	-489	3
			150 Kgf	150,7	-492	-489	3
			150 Kgf	151,4	-492	-489	3
			150 Kgf	152	-492	-489	3
	B	0°	150 Kgf	151,8	-492	-491	1
			150 Kgf	150,6	-492	-490	2
			150 Kgf	150,4	-492	-491	1
			150 Kgf	151,5	-492	-491	1
	C	90°	150 Kgf	152,7	-493	-480	13
			150 Kgf	151,8	-493	-481	12
			150 Kgf	150,8	-493	-481	12
			150 Kgf	150,9	-493	-480	13

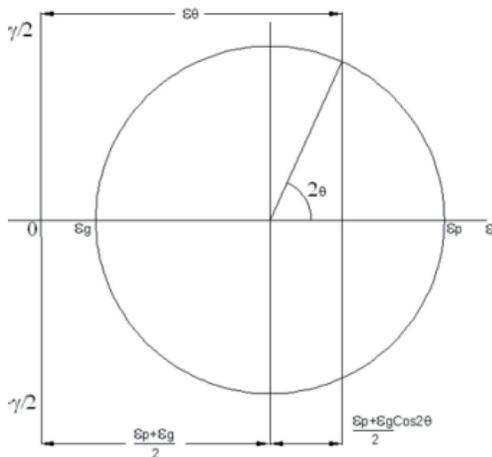


Fig. 7. Círculo de Mohr para el cálculo de deformaciones principales.

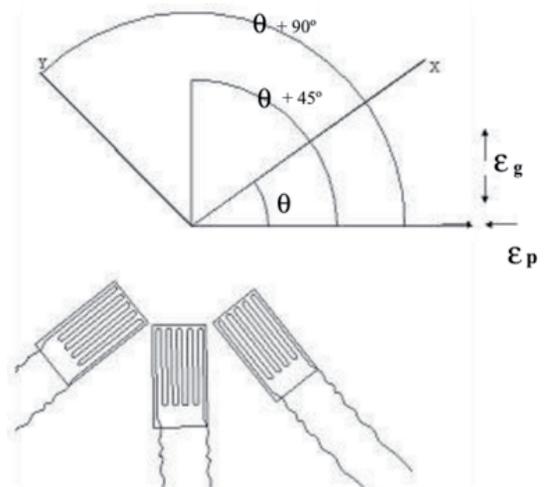


Fig. 8. Arreglo de las rosetas de referencia.

La figura 8, representa una pequeña área con las rosetas instaladas en la superficie de prueba y con la roseta de referencia (A) orientada a θ grados de ϵ_p , por lo que el círculo de Mohr, es construido como se muestra en la figura 9.

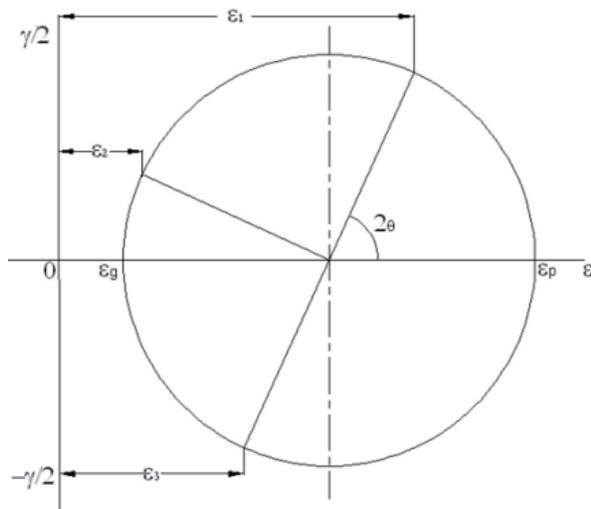


Fig. 9. Círculo de Mohr para obtener las deformaciones principales.

Con esto se pueden obtener las deformaciones principales, para el arreglo de las rosetas de deformación, utilizando las siguientes expresiones matemáticas:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_p + \epsilon_g}{2} + \frac{\epsilon_p - \epsilon_g}{2} \cos 2\theta$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_p + \epsilon_g}{2} + \frac{\epsilon_p - \epsilon_g}{2} \cos 2(\theta + 45)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_p + \epsilon_g}{2} + \frac{\epsilon_p - \epsilon_g}{2} \cos 2(\theta + 90)$$

De lo anterior se procede al cálculo de las deformaciones en el apero con auxilio del círculo de Mohr, obteniéndose los resultados mostrados en las figuras 10 y 11.

Una vez obtenidos estos valores, se procede al cálculo de los esfuerzos en el apero con ayuda de la ley de Hooke, obteniéndose:

$$\sigma_{max} = E\epsilon = 4474.4 \text{ Tensión}$$

$$\sigma_{min} = E\epsilon = -1513.6 \text{ Compresión}$$

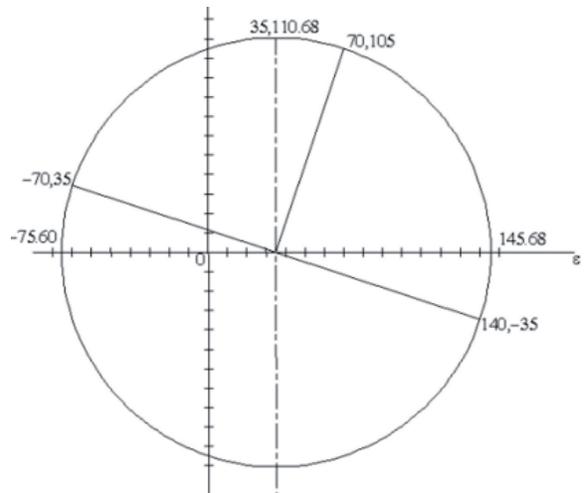


Fig. 10. Círculo de Mohr de la roseta 1, galga A con ángulo de referencia de 45°.

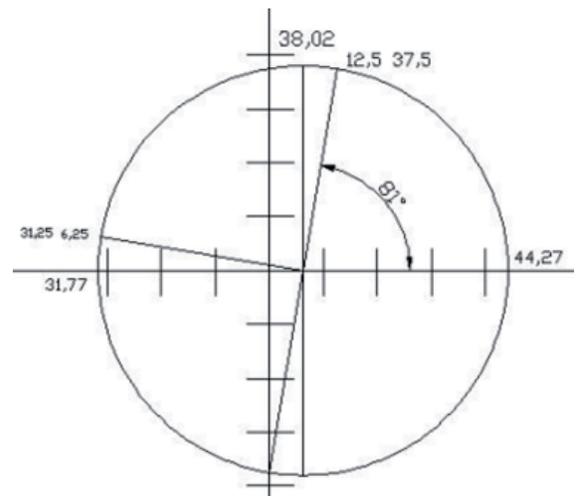


Fig. 11. Círculo de Mohr de la roseta 2, galga B con ángulo de referencia de 0°.

En la tabla IV se comparan los valores obtenidos de los análisis experimentales y numéricos:

Tabla IV. Comparación de los valores experimentales y calculados.

Método	σ tensión	σ compresión
Experimental	4474.4	-1513.6
Numérico	4511	-1216

Como se puede observar, los esfuerzos son similares. Si se toma como ideal el análisis numérico, el porcentaje de error entre ambos métodos es: $e=0.407\%$ para la tensión y $e=10.9\%$ para la compresión, lo que lleva a confiar en ambos métodos.

CONCLUSIONES

Se desarrolló una metodología de análisis con la cual se pueden calcular los esfuerzos estáticos en aperos de tracción animal utilizando el Método del Elemento Finito.

Como herramienta principal, para lograr este objetivo se utilizó una computadora y un software especializado debidamente validado para resolver problemas estructurales con geometrías simples o complejas. Sin embargo, no es suficiente tener un paquete de cómputo que se base en el Método del Elemento Finito para poder resolver este tipo de problemas, ya que existen múltiples dificultades asociadas a la solución de esta problemática, como pueden ser, la discretización adecuada del medio continuo, la introducción de los datos de las condiciones de frontera reales en el programa, tomando en cuenta las dimensiones del modelo así como su funcionamiento, para obtener resultados con un margen de error mínimo y así poder aprovechar la capacidad del equipo de cómputo.

Los resultados muestran que la estructura analizada es confiable bajo las condiciones de carga estática consideradas. Por otra parte cabe mencionar que las condiciones reales, son menos críticas que las tomadas para los casos de estudio.

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se concluye que los esfuerzos y deformaciones generados durante el trabajo de labranza no llevan a falla.

Pudiera asumirse que el desgaste por la abrasión entre el suelo y la herramienta de labranza es una de las causas de la falla puesto que al disminuir el espesor de la herramienta, se reduce la resistencia a la tracción y compresión de la pieza.

Además, cabe mencionar que existen otros factores no considerados que pueden disminuir la vida útil de ésta, como lo es la corrosión, o fisuras internas, así como el cambio de las propiedades mecánicas del material debido al endurecimiento por

fatiga del mismo, por impactos contra piedras y una gran variedad de condiciones de uso cotidiano.

En resumen, el análisis de esfuerzos mediante el método empleado en este trabajo permite predecir con bastante precisión la resistencia de una herramienta de labranza en cualquier tipo de suelo. Esto quiere decir que podemos disminuir las dimensiones del modelo hasta llegar a encontrar cuales son las dimensiones mínimas cuando todavía la herramienta puede resistir las cargas del suelo. Si se establece una tasa de desgaste, entonces se pueden establecer las horas de trabajo de la herramienta sin roturas. Así se pueden predecir la vida útil de la herramienta y evitar paros imprevistos de las labores de labranza.

REFERENCIAS

1. Diego, F. 2004. Interacción mecánica entre el apero y suelo para los Valles Centrales de Oaxaca. Reporte técnico de Investigación del proyecto CGPI 20040087. CIIDIR Unidad Oaxaca, IPN, Oaxaca, México.
2. Villa, Gabriel. 2002. Evaluación numérico-experimental de esfuerzos en elementos mecánicos y óseos. Reporte técnico de Investigación del proyecto CGPI 20021131. ESIME Zacatenco IPN, México, D.F.
3. Saeed Moaveni. Finite element analysis: Theory and application with ANSYS. Minnesota State University, Mankato. Prentice Hall. 1999.
4. ANSYS User's Manual. Swanson Analysis System, Inc., Vol. I and IV Theory and procedure. 1992.
5. Robert L. Mott. Diseño de elementos de máquinas (segunda edición), Ed. Prentice Hall. 1992.
6. James W. Ralby 2005. Experimental Stress Analysis, Mc Graw Hill, USA.
7. Riley, Sturges & Morris, Mecánica de Materiales, 1ª edición, Limusa Noriega, México, 2001, ISBN 968-18-5912-X.