

ARTÍCULO ORIGINAL

Modelo de elemento finito para el corte de la fibra de *Agave tequilana* Weber

Finite element model for cutting fiber Agave tequilana Weber

M.C. Alberto Saldaña Robles¹, M.C. Francisco Reveles Arredondo¹¹, Dr. Ryszard Jerzy Serwatowski Hlawinska¹, Dr. César Gutiérrez Vaca¹, Dr. Noé Saldaña Robles¹, Dr. Elías Ledesma Orozco¹¹, Dr. José Manuel Cabrera Sixto¹

¹Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, Departamento de Ingeniería Agrícola, Irapuato, Guanajuato, México.

¹¹Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca, Departamento de Ingeniería Mecánica, Salamanca, Guanajuato, México.

RESUMEN

En este trabajo, se desarrolla y valida un modelo 3D de elemento finito explícito. El modelo simula la interacción cuchilla-fibra durante el proceso de corte de la fibra de *Agave tequilana* Weber. Para el estudio, se modela una cuchilla con características geométricas con borde liso y ángulo de ataque de 30°. La cuchilla se considera como cuerpo rígido con propiedades mecánicas de un acero convencional. El material de la fibra sigue un modelo elastoplástico bilineal utilizando las propiedades mecánicas de la fibra de agave. El modelo permite estudiar la distribución de los esfuerzos, las deformaciones plásticas, la energía unitaria y la fuerza; que se presentan durante el corte de la fibra. El error de la energía unitaria obtenida por simulación (2,68 J cm⁻²) comparada con la experimental (2,77 J cm⁻²), es del 3,25%. La fuerza máxima que requiere la cuchilla para cortar una sección transversal de 1,0 cm² de agave es 238 N, y la fuerza de corte presenta un comportamiento similar al encontrado en otros estudios. El modelo es una herramienta útil para analizar el proceso de corte, y los parámetros obtenidos pueden utilizarse para mecanizar la cosecha.

Palabras clave: Fuerza de corte, energía unitaria, elemento finito explícito, cosechadora de agave.

ABSTRACT

In this work, a 3D model of explicit finite element is developed and validated. The model simulates the blade-fiber interaction during the cutting process of *Agave tequilana* Weber fiber. In this study, a blade is modeled with geometric characteristics, with smooth edge and angle of attack of 30°. The blade is considered as a rigid body with mechanical properties of a conventional steel. The fiber material follows a bilinear elastoplastic model using the mechanical properties of the fiber. The model allows to study the distribution of stresses, plastic strain, unitary energy and strength; that occurs during fiber cut. The error of unitary energy obtained by the simulation (2,68 J cm⁻²) compared to experimental energy (2,77 J cm⁻²) is 3,25%. The maximum force that is required on the blade to cut a cross section of 1,0 cm² of agave is 238 N, and the cutting force presents a similar behavior found by other studies. The model is a useful tool to analyze the cutting process, and the parameters obtained can be used to mechanize the harvest.

Keywords: Cutting force, unitary energy, explicit finite element, agave harvester.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe la necesidad de aprovechar fuentes de energía alternas a los combustibles fósiles (Saldaña *et al.*, 2012a). El bioetanol se ha convertido en una de las opciones de energía más importantes en el mundo (Saldaña *et al.* 2012b) y ha demostrado ser un excelente sustituto; siendo el maíz y la caña de azúcar la principal materia prima para su obtención (Sierra, 2011). Sin embargo estos cultivos son de carácter

alimenticio. Investigaciones demuestran la factibilidad de producir bioetanol a partir de la planta de *Agave tequilana* Weber (Madrigal 2009; González 2008), no siendo un cultivo de carácter alimenticio y con rendimientos superiores a los del maíz y la caña de azúcar. Sin embargo, los costos de producción aun no son competitivos (Gutiérrez *et al.*, 2013) y se debe principalmente al elevado costo de la cosecha, la cual se realiza de forma manual y representa el 75% de la producción

del agave (Saldaña *et al.* 2012b). La mecanización de la cosecha permitiría abatir el costo de la producción de bioetanol (Holtum *et al.*, 2011; Núñez *et al.*, 2011), además Sarah (2011) citado por Gutiérrez (2013) manifiesta que se cuentan con 600 mil hectáreas a nivel internacional para el desarrollo de esta variedad de agave. Se han realizado algunos intentos para la mecanización de la cosecha (Ortiz y Rössel, 2004; Castillo *et al.*, 2001), y actualmente investigadores de la Universidad de Guanajuato (UG) trabajan en el desarrollo de un prototipo de máquina cosechadora de agave, que sea capaz de conseguir el troceado de la planta completa de agave con las características adecuadas para la producción de bioetanol. El desarrollo de un prototipo involucra diversas disciplinas y herramientas, como el método de elemento finito (MEF) que es una herramienta de gran importancia en la solución de problemas en distintos campos de la ingeniería, entre ellos la ingeniería agrícola. En el presente trabajo se desarrolló un modelo de elemento finito explícito para la simulación del corte de la fibra de Agave tequilana Weber. El modelo desarrollado cumple con los parámetros geométricos, físicos y mecánicos de la pruebas experimentales realizadas por Saldaña *et al.* (2012c) para el corte de la hoja de agave de esta variedad. Se modeló la geometría de la cuchilla empleada en el estudio anterior, así como la fibra de la planta de agave. Lo anterior se realizó en los paquetes de elemento finito ANSYS® y LS-DYNA®. Los resultados del modelo permitieron conocer la distribución de los esfuerzos, las deformaciones plásticas, la energía unitaria y la fuerza; que se presentan durante en el corte. El modelo se validó con resultados obtenidos de la literatura. De esta manera se tiene una herramienta útil para analizar el proceso de corte y obtener los parámetros necesarios para la fase de diseño requeridos en la mecanización de la cosecha de este cultivo.

MÉTODOS

Resultados experimentales por Saldaña *et al.* (2012). El modelo tridimensional de elemento finito fue desarrollado en el software comercial ANSYS® y LS-DYNA®, y recrea el estudio experimental realizado por Saldaña *et al.* (2012c), cumpliendo con los parámetros geométricos, físicos y mecánicos de la pruebas experimentales realizadas para el corte de la hoja de *Agave tequilana* Weber. Los autores estudiaron la relación área-energía que se presenta durante el corte de la hoja promedio de esta variedad de agave mediante la evaluación de dos parámetros. El primer parámetro fue la energía que requiere el corte de la hoja de agave, esta energía se evaluó en diez posiciones a lo largo de la hoja de alrededor de un 1,0 m, para su estudio se empleó un dispositivo que utiliza caída libre (Figura 1a) para transformar la energía potencial a cinética, la cual se transfiera a la cuchilla para efectuar el corte. El segundo parámetro fue el área de la sección transversal en las mismas posiciones de la hoja, para lo cual se utilizó visión artificial. Los autores emplearon los resultados para obtener una expresión (1) con $R^2 = 0,9789$, que permite determinar la energía de corte en función del área de la sección transversal de la hoja. Para el estudio se utilizó una cuchilla tipo “Y” con sección transversal de 1,5 plg x 0,25 plg con borde liso y ángulo de ataque de 30° (Figura 1b), valores que precisan la menor fuerza para realizar el corte de la piña de agave asegurando resistencia y rigidez del filo de la cuchilla (Gutiérrez *et al.*, 2013).

$$E = -0,0903A^2 + 3,4185A - 0,5566 \quad (1)$$

Dónde: E es la energía necesaria para el corte (J) y A es el área transversal de la hoja (cm²). Si se considera un área de sección transversal unitaria de 1,0 cm² en la expresión anterior, el valor de energía unitaria para el corte de la hoja de agave de esta variedad tiene un valor de 2,77 J cm⁻².

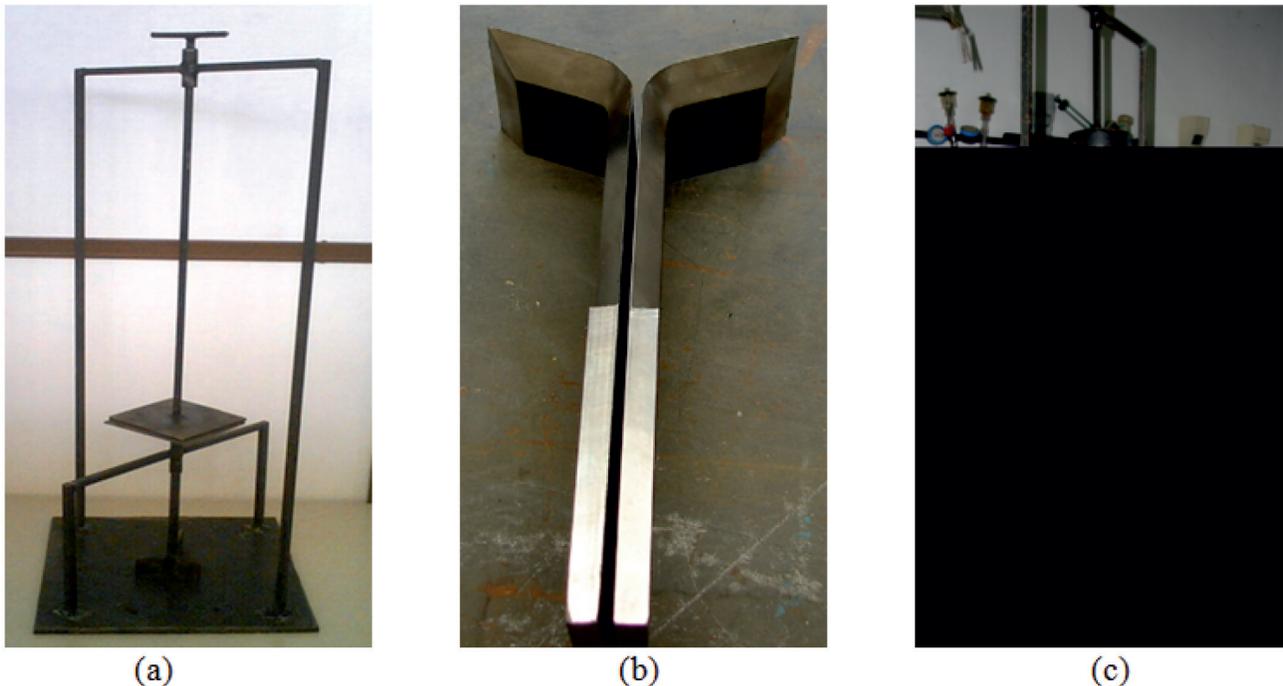


FIGURA 1. (a) Dispositivo de prueba; (b) detalle de la cuchilla (c) ensayo a 0,1 m (Saldaña *et al.*, 2012).

Modelo de elemento finito para el corte de la hoja. En el presente estudio, se realizó el modelo 3D en Autodesk Inventor de la cuchilla empleada por Saldaña *et al.* (2012c), así como de la fibra de la planta de agave, para posteriormente exportarlos al Software de elemento finito (Figura 2a) donde se realizó el mallado con la opción de elemento tipo ladrillo (brick). La cuchilla se malló con 1 616 elementos y 2 311 nodos; la fibra con 7 704 elementos y 8 771 nodos, la densidad de la malla en la fibra fue más fina en la sección donde se lleva a cabo el corte (interacción cuchilla-fibra). Además se realizaron las siguientes consideraciones para el modelo: (1) la fibra se modeló con un área de sección transversal de 1,0 cm²; (2) el desplazamiento de la cuchilla se

realiza en la dirección negativa z; (3) en la fase experimental, la cuchilla parte del reposo y avanza en caída libre desde una altura de 303 mm, con esto, la cuchilla corta la hoja de agave con una velocidad de 2,44 m/s (Saldaña *et al.*, 2012c); ésta es la velocidad inicial en la simulación; (4) el elemento seleccionado para mallar la cuchilla y la fibra fue el SOLID164; (5) El material de la fibra sigue un modelo elastoplástico bilineal; (6) se restringieron los desplazamientos de los extremos de la fibra en todas direcciones; y (7) la cuchilla se modeló como un cuerpo rígido, y se determinó la densidad necesaria para que la cuchilla lleve una energía potencial de 5, 10 y 15 J, lo que permitió evaluar la energía absorbida por la fibra durante el corte.

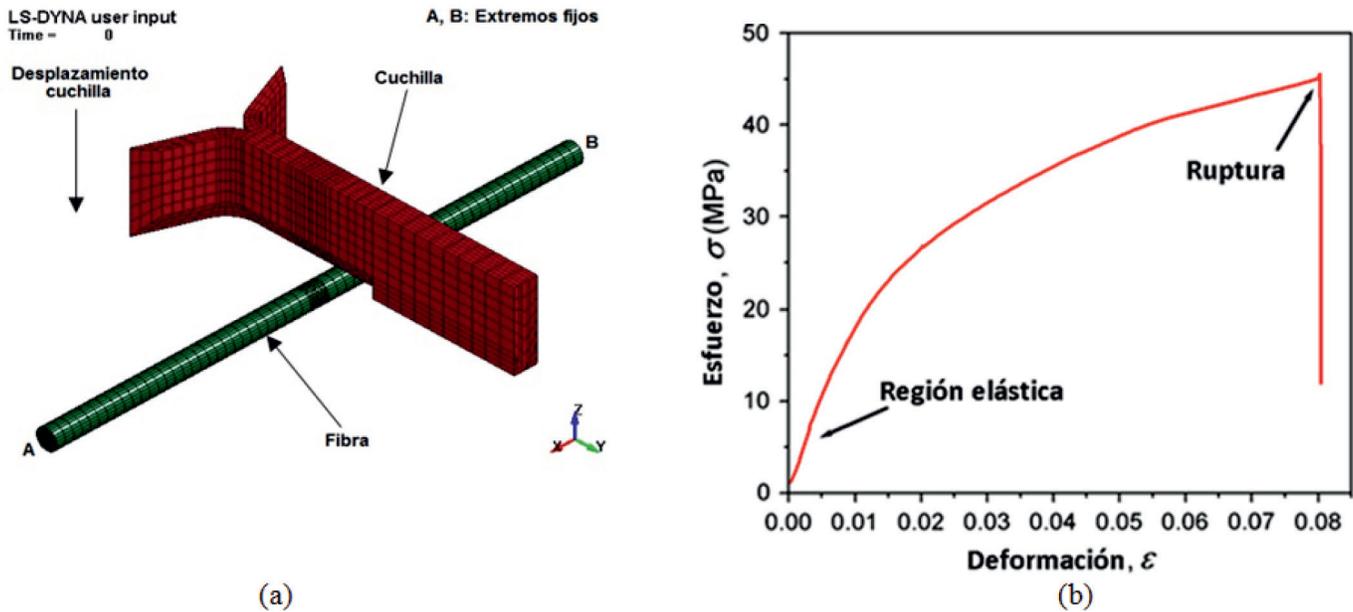


FIGURA 2. (a) Modelo de elemento finito, cuchilla-fibra; (b) curva esfuerzo-deformación típica para la fibra de *Agave tequilana* Weber (Kestur *et al.*, 2012).

Modelos de material. Se utilizaron dos modelos de material para la simulación. La cuchilla se modeló como cuerpo rígido, restringiendo los desplazamientos en *x* y *y*, además de todas las rotaciones; se emplearon las propiedades del acero convencional, tales como: módulo de Young (*E* = 207 GPa) y razón de Poisson (*v* = 0.3). La fibra se modeló con un modelo elastoplástico bilineal, con la opción de endurecimiento cinemático. Diversos autores han estudiado las propiedades mecánicas a tensión de fibras vegetales (Silvia-Santos *et al.*, 2009; Cortes, 2008), las cuales se requieren para alimentar un modelo numérico. En el 2012, Kestur *et al.*, realizaron la caracterización mecánica de la fibra del *Agave tequilana* Weber, en la Figura 2b se muestra la curva esfuerzo-deformación típica para la fibra de agave, de la cual se obtuvieron las propiedades mecánicas para alimentar el modelo: densidad ($\rho = 800 \text{ kg/m}^3$), módulo de Young (*E* = 2,7 GPa), razón de Poisson (*v* = 0,15), esfuerzo de cedencia ($\sigma_y = 10 \text{ MPa}$), módulo tangente ($E_t = 250 \text{ MPa}$) y la deformación en la ruptura ($\epsilon_u = 0,08$). El esfuerzo de cedencia para el modelo elastoplástico bilineal está dado por la expresión (2). Dónde: σ_y es el esfuerzo de cedencia; ϵ es la rapidez de deformación; C_p y *p* son los símbolos de Cowper y Symonds; σ_0 es el esfuerzo inicial de cedencia; $\beta = 0$ para endurecimien-

to cinemático y 1 para endurecimiento isotrópico y ϵ_{eff}^p es la deformación plástica efectiva. Para el modelo se desprecia el efecto de endurecimiento por la rapidez de deformación, lo cual es la aproximación más simple de un modelo elastoplástico y es una aproximación más real al material. Por lo que, la expresión (2) resulta en $\sigma_y = \sigma_0$.

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C_p} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \left(\sigma_0 + \beta \epsilon_{eff}^p \frac{E_t E}{E - E_t} \right) \quad (2)$$

Solución del modelo. Se aplicaron las cargas al modelo y se determinó la densidad necesaria para que la cuchilla llevara antes del corte una energía cinética (E_k) de 5, 10 y 15 J, la pérdida de la energía en la cuchilla después del corte permitió evaluar la energía absorbida por la fibra. Si se sustituye la masa (*m*) de la expresión de energía cinética (3), por densidad (ρ) por volumen (*V*), y se despeja la densidad, obtenemos la expresión (4), donde se consideró: una velocidad inicial (v_{ci}) de 2,24 m/s (Saldaña *et al.*, 2012c), un volumen de 99,51 cm³ que se determinó a partir del modelo 3D y las energías antes mencionadas. Por último se estableció un tiempo de solución 0,02 s, suficiente para que la cuchilla realice el corte de la fibra.

$$E_k = \frac{1}{2} m v_{el}^2 \quad (3)$$

$$\rho = \frac{2E_k}{V v_{el}^2} \quad (4)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el postproceso de los resultados se utilizó el programa de LS-DYNA LS-Prepost®. En la Figura 3 se muestra con isosuperficies la distribución de los esfuerzos de Von Mises para diferentes tiempos, y en la Figura 4 se muestra la deformación plástica de la fibra en los mismos tiempos. Del

análisis de las figuras anteriores se observa que la falla se presenta por compresión en un inicio, y después se debe a una combinación de compresión a los lados de la navaja y en la parte frontal de la misma, así como tensión en el lado opuesto al corte, donde finalmente se produce la falla por tensión. Lo anterior es similar a lo expuesto por Pearson (1987) y Ledesma *et al.* (2009). Los autores manifiestan que el proceso de corte en todos los casos se inicia cuando el filo de la cuchilla hace contacto con el material. Durante el movimiento continuo del cuchillo las fuerzas y esfuerzos de contacto incrementan y un patrón de esfuerzo se construye en el interior del material, hasta que se alcancen las condiciones de falla, ya sea por la sección completa al mismo tiempo o gradualmente, comenzando en un punto de la sección y continuando hasta que la separación se completa.

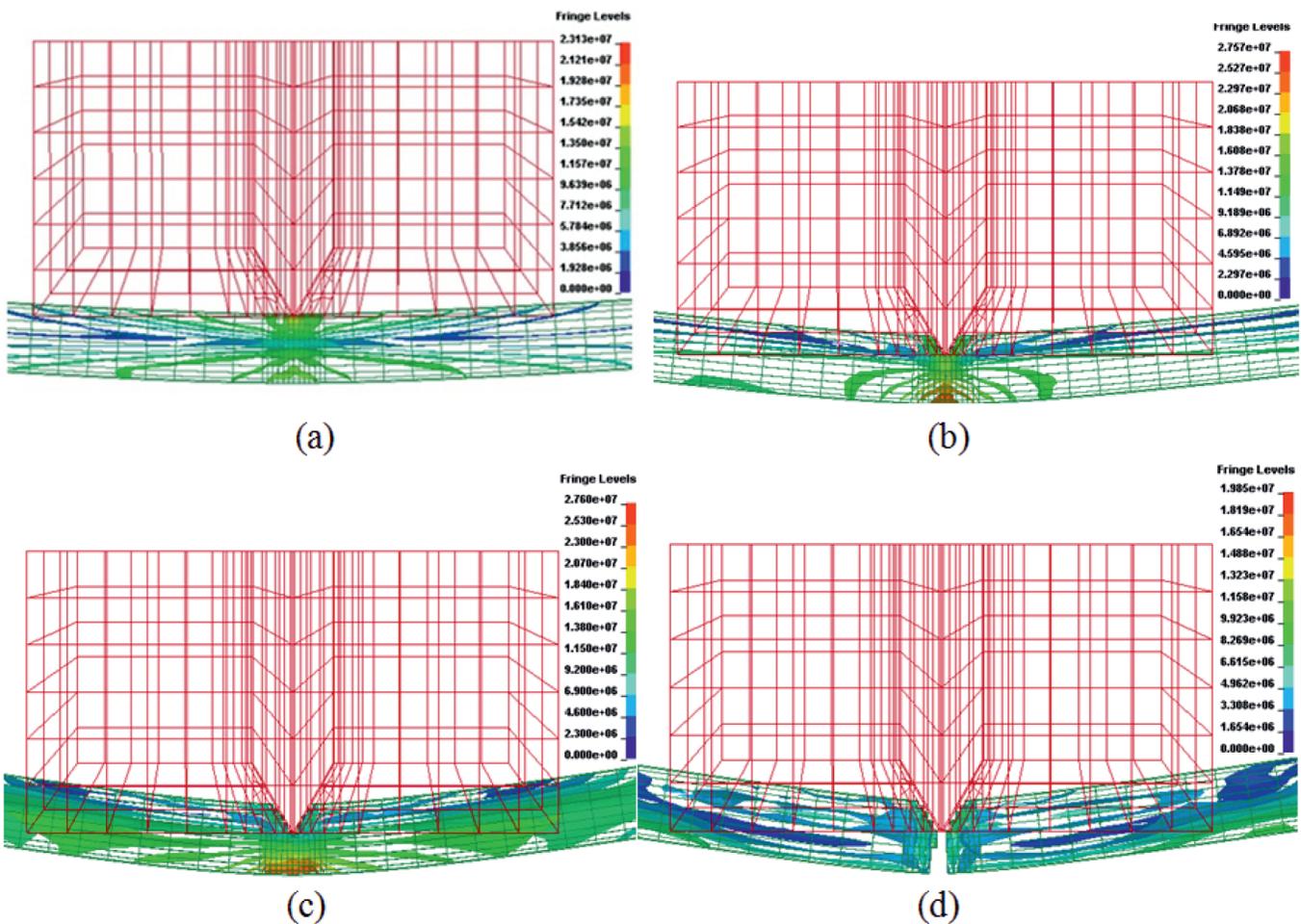


FIGURA 3. Esfuerzos de Von Mises (isosuperficies) durante el corte de la fibra de agave a; (a) 0,0097 s; (b) 0,0139 s; (c) 0,0157 s; (d) 0,0160.

En la Figura 5 se muestran 2 de las 3 gráficas de energía cinética obtenidas en función del tiempo de corte; estos valores de energía fueron los suministrados a la cuchilla. En las gráficas se puede observar un comportamiento similar, en el que la curva se mantiene constante (aún no hay contacto cuchilla-fibra), posteriormente en un tiempo t_1 cuando la cuchilla entra en contacto con la fibra comienza una disminución de la energía hasta un tiempo t_2 (esta disminución es la energía que requiere la fibra para el corte) donde la energía se mantiene constante nuevamente (energía que lleva la cuchilla después del corte). Para cada caso (5, 10 y 15 J) la energía unitaria requerida para el corte de la fibra fue: 2,64, 2,81 y 2,60 J cm⁻². La energía unitaria media fue 2,68 J cm⁻², comparada con el valor experimental (2,77 J cm⁻²) obtenido por Saldaña *et al.* (2012), el error numérico-experimental es 3,25%.

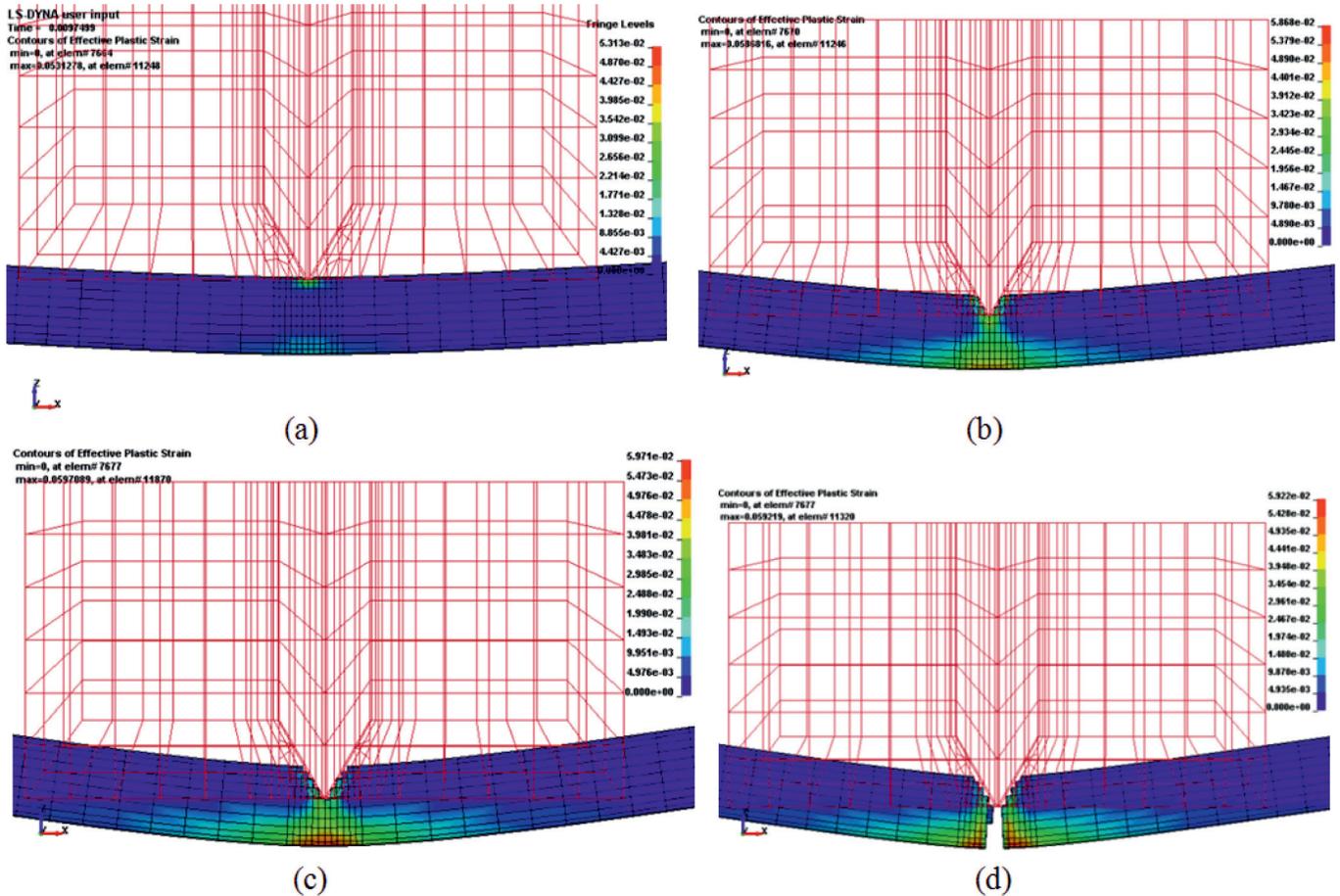


FIGURA 4. Deformación plástica durante el corte de la fibra de agave a; (a) 0,0097 s; (b) 0,0139 s; (c) 0,0157 s; (d) 0,0160.

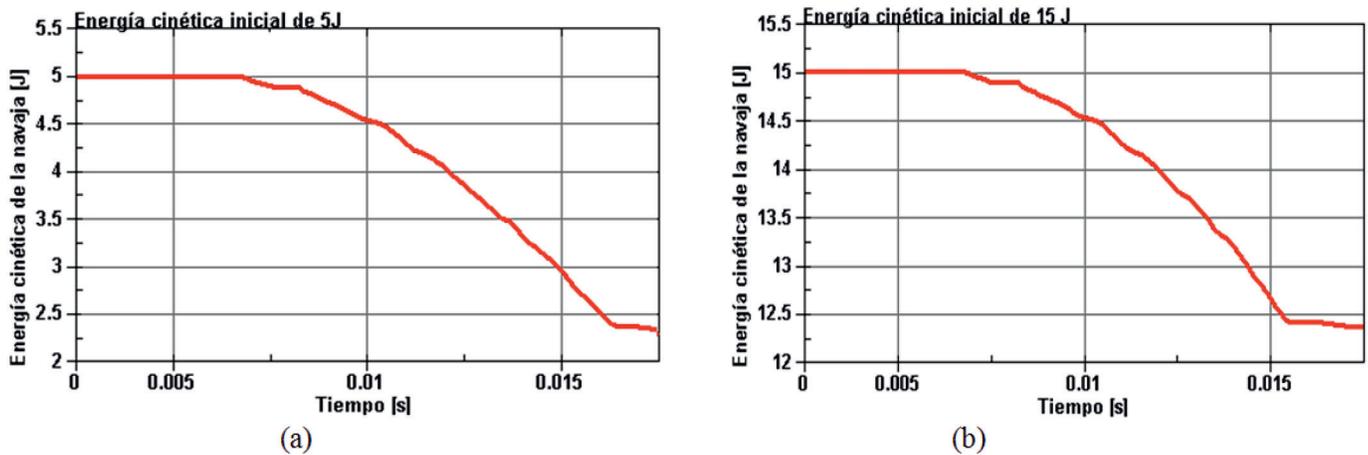


FIGURA 5. Energía cinética de la navaja durante el proceso de corte; (a) 5J; (b) 15 J

Por último se determinó la gráfica de fuerza contra desplazamiento de la cuchilla (Figura 6b), la cual muestra un comportamiento similar al mencionado por Srivastaya (1993) citado por Ledesma *et al.* (2009), ver Figura 6a. La cuchilla parte de una fuerza cero y esta comienza a incrementar al hacer contacto con la fibra y comenzar a comprimirla (región A), posteriormente se presenta un disminución en la fuerza debido a la penetración inicial de la cuchilla sobre el material vegetal, sin embargo esta fuerza nuevamente incrementa para continuar con el corte, aquí se presenta (región B) compresión y corte, hasta que finalmente se alcanza la falla y la fuerza comienza a disminuir (región C). La fuerza máxima que requiere la cuchilla tipo “Y” para cortar una sección transversal de 1,0 cm² de *Agave tequilana* es 238 N.

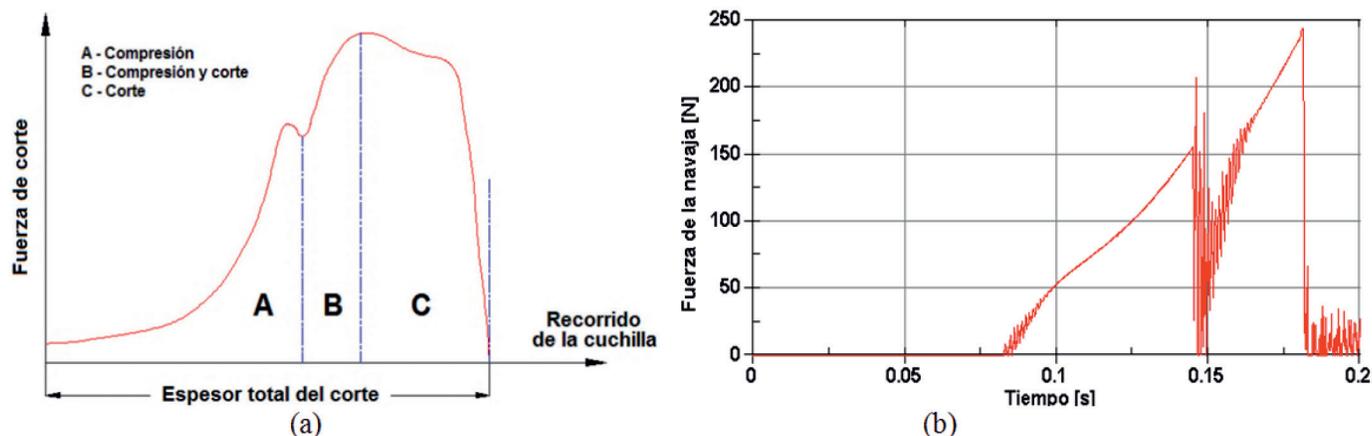


FIGURA 6. Fuerza de corte a lo largo del espesor de la fibra; (a) Srivastava (1993) citado por Ledesma et al. (2009); (b) Simulación.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló y validó un modelo de elemento finito explícito para el corte de la hoja de Agave tequilana Weber, el cual permitió estudiar la distribución de los esfuerzos, las deformaciones plásticas, la energía unitaria y la fuerza, durante el corte de la fibra agave. Se emplearon las características de la cuchilla recomendadas por Gutiérrez *et al.* (2013) y utilizadas por Saldaña *et al.* (2012b) en pruebas experimentales; así como la curva esfuerzo-deformación típica para la fibra de Agave tequilana (Kestur *et al.*, 2012). El modelo desarrollado es una herramienta útil para analizar el proceso de corte, y se validó con resultados experimentales de otros autores; presentando un error numérico-experimental del 3,25% para la energía unitaria, así como un comportamiento

similar al reportado en la literatura, de la fuerza de corte a lo largo del espesor de la fibra; con un valor máximo de 238 N. Los parámetros determinados pueden ser utilizados para la mecanización de la cosecha.

AGRADECIMIENTOS

- Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCYTEG) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo financiero y administrativo recibido para la realización del proyecto “Diseño y Construcción de una Cosechadora-Trituradora de Agave”, (GTO-2009-02-118718) del cual emerge el presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CASTILLO, O. R.; J. DE ANDA; E. RODRÍGUEZ; O. FERNÁNDEZ; F. PÉRE; H.E. GEORG: *Cosechadora y Jimadora de Agave*. Patente: JL/a/2001/000029. CIATEJ. Guadalajara, México, noviembre, 2001.
2. CORTEZ, M. C. I.: *Propiedades mecánicas a tensión de las fibras del bagazo del Agave angustifolia Haw, residuo proveniente de la producción artesanal del mezcal*, Tesis (en opción al título de Master en Ciencias), Instituto Politécnico Nacional, Unidad Oaxaca, México, 2009
3. GONZÁLEZ, P. G.: *Producción potencial de bioetanol a partir de diferentes especies de agave en el estado de Guanajuato*. Tesis (en opción al título de Ingeniero en Ambiental), Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Guanajuato, México, 2008.
4. GUTIÉRREZ VACA, C.; R. SERWATOWSKI; A. MARTÍNEZ; J.M. CABRERA; N. SALDAÑA; O.A. FLORES: “Determinación de las características de las cuchillas de corte para mecanizar la cosecha de agave”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4(1): 159-166, México, 2013.
5. HOLTUM, J. A. M.; D. CHAMBERS; T. MORGAN & D. K. T. TAN: “Agave as a biofuel feedstock in Australia”, *GCB Bioenergy*, 3(1): 58-67, 2011.
6. KESTUR, S. G.; H. FLORES-SAHAGUN; P. DOS SANTOS; J. DOS SANTOS; I. MAZZARO, I., & A. MIKOWSKI: “Characterization of blue agave bagasse fibers of Mexico”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 45(1): 153-161, 2012.
7. LEDESMA, E; E. AGUILERA: Modelo del corte de un tallo por una navaja. En: **Memorias del XV Congreso Internacional Anual de la SOMIM**. 23 al 25 de Septiembre. Obregón, Sonora, México, 2009.
8. MADRIGAL LUGO, R.: Agaves para producir bioetanol. En: **Seminario, “México después del petróleo ¿Serán los biocombustibles y geotermia una alternativa?”**, septiembre 21, México, D. F., 2009.
9. NÚÑEZ, H. M.; F. RODRÍGUEZ & M. KHANNA: “Agave for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities”. *GCB Bioenergy*, 3(1):43-57, 2011.
10. ORTIZ, L. H.; K. E. D. RÖSSEL: *Cosechadora mecánica de Maguey*, Patente: PA/u/2004/000007. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México, 2004.
11. SALDAÑA, R. A.; C. GUTIÉRREZ; R. SERWATOWSKI H; N. SALDAÑA; J.M. CABRERA: “Estudio de la eficiencia de troceado de Agave tequilana Weber empleando un molino con cuchillas articuladas”. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(1): 12-18, 2012a.

12. SALDAÑA, R. A.; R. SERWATOWSKI; N. SALDAÑA; C. GUTIÉRREZ; J.M. CABRERA; B.S. GARCÍA: “Determinación de algunas propiedades físicas de Agave tequilana Weber para mecanizar la cosecha”. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(3): 451-465, 2012c.
13. SALDAÑA, R. N.; C. GUTIÉRREZ; R. SERWATOWSKI; A. SALDAÑA; A. FLORES; R. QUIROZ: “Propuesta de una cosechadora-desmenzadora de Agave tequilana Weber para la producción de bioetanol y revisión de los procedimientos existentes”, *Acta Universitaria*, 22(2): 9-18, 2012b.
14. SARAH, C.; L. DAVIS; F. DOHLEMAN & P. STEPHEN: “The global potential for Agave as a biofuel feedstock”, *GCB Bioenergy*, 3(1): 68-78, 2011.
15. SIERRA, S. L. A.: *Estudio y diseño del mecanismo desfibrador de una cosechadora- trituradora de agave. Tesis (en opción para obtener el título de Ingeniero Mecánico Agrícola)*. División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato, México, 2011.
16. SILVA, S. L.; H. HERNÁNDEZ; M. CABALLERO & H. LÓPEZ: “Tensile Strength of Fibers Extracted from the Leaves of the angustifolia Haw Agave in Function of their Length”, *Applied Mechanics and Materials*, 15: 103-108, 2009.

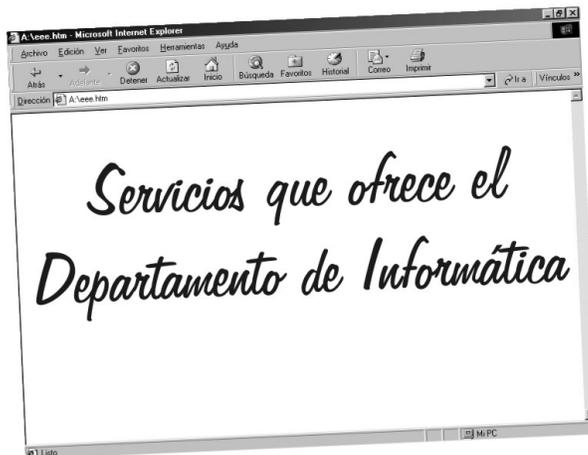
Recibido: 21 de julio de 2013.

Aprobado: 10 de septiembre de 2013.

Alberto Saldaña Robles, Prof., Departamento de Ingeniería Agrícola. Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Ex-Hacienda “El Copal”. Carretera Irapuato-Silao, km 9. Irapuato, Guanajuato, México. C.P. 36820. Tel: 52 462 6245215, Correo electrónico: a.saldana.robles@ugto.mx.

Nota: La mención de marcas comerciales es solo de carácter informativo sobre el software utilizado, no significa recomendación alguna por los autores o la Universidad, ni por el editor.

Universidad Agraria de La Habana



Diseño y montaje de Proyectos de Redes

Diseño y montaje de Proyectos de Informática Educativa

Cursos

- Diseño de Páginas WEB
- Programación bajo ambiente WEB
- Programación bajo ambiente Windows
- Sistema de información geográfica
- Diseño de multimedia
- Teleclases

Para mayor información: E-mail: dmedina@isch.edu.cu