

Comportamiento físico-mecánico de un biomaterial sometido a bajas cargas

Arsenio Miguel Iznaga-Benítez, Oscar Antonio Braunbeck-García

Recibido el 30 de octubre de 2010; aceptado el 4 de diciembre de 2010

Resumen

La simulación de sistemas de alimentación, manejo y ordenamientos de tallos de cañas de azúcar requiere de un modelo de comportamiento que prediga cual es el esfuerzo máximo que se puede aplicar sobre un tallo sin que se rompa la estructura interna del vegetal, logrando así una mayor capacidad productiva. Para este proceso de simulación se hace necesario obtener un modelo matemático que describa el fenómeno.

Se obtiene un modelo geométrico a partir del análisis morfológico de la caña de azúcar y la aplicación de la teoría estructural, llegándose a la conclusión de que es posible estudiar varias situaciones de carga si a un modelo estructural poligonal de 12 barras se le impone la multielasticidad a las propiedades del material.

La determinación de la carga que provoca el esfuerzo máximo sin que se rompa la estructura interna del tallo cargado transversalmente fue obtenida a través de ensayos de laboratorio donde se controló la carga, el desplazamiento y la rotura de las paredes celulares.

La comprobación del modelo se realizó comparando datos obtenidos en una simulación con los de un ensayo de laboratorio, obteniéndose el comportamiento mecánico de la barras del modelo geométrico capaz de reproducir el comportamiento físico de las variedades analizadas con un nivel de confianza del 95 %.

Palabras claves: biomaterial, caña de azúcar, simulación, modelo, multi-elasticidad, MEF.

Physical-mechanical behavior of a subjected biomaterial to low loads

Abstract

The simulation of feeding systems, handling and classifications of shafts of canes of sugar require of a behavior model that predicts which it is the maximum effort that you can apply on a shaft without it breaks the internal structure of the vegetable, achieving this way a bigger productive capacity. For this simulation process it becomes necessary to obtain a mathematical model that describes the phenomenon.

The geometric pattern is obtained starting from the morphological analysis of the cane of sugar and the application of the structural theory, being reached the conclusion that a polygonal structural model of 12 bars if they are imposed to the properties of the material the multi-elasticity several load situations they can be studied.

The determination of the load that causes the maximum effort without it breaks the internal structure of the shaft loaded transversely it was obtained through laboratory rehearsals where load, displacement was controlled and it plows of the cellular walls.

The confirmation of the pattern was carried out comparing data obtained in a simulation with those of a laboratory rehearsal being obtained the mechanical behavior of the bars of the geometric pattern able to reproduce the physical behavior of the varieties analyzed with a level of trust of 95%.

Key words: biomaterial, sugar cane, simulation, model, multi-elasticity, FEA.

Introducción.

El diseño de equipos dedicados al manejo y ordenamiento de productos constituidos por materiales biológicos, enfrenta en algunas de sus etapas la tarea de proponer sistemas de alimentación de los productos sin que se sufran daños físicos mecánicos en las partes que lo constituyen, ejemplo de ello es el diseño de embalajes para transportarlos. [5]

Durante la etapa de diseño se utilizan diferentes técnicas que abarcan desde los conceptos de mantenimiento y cuidado ambiental hasta la simulación de los sistemas. [8]. La simulación de sistemas de alimentación, manejo y ordenamientos de tallos de cañas de azúcar requiere de un modelo de comportamiento que prediga cual es el esfuerzo máximo que se puede aplicar sobre un tallo sin que se rompa la estructura interna del vegetal, logrando así una mayor capacidad productiva. Los diseñadores establecen la simulación en relación a movimientos e interacciones que se producen, tal es el caso de Amalia S. Romano que determina rendimientos después del daño que sufren semillas al ser enviadas al surco.[4]

Los dispositivos, mecánicos, hidráulicos, o neumáticos interactúan con los materiales biológicos en su movimiento, surgiendo un sistema de carga entre los elementos del dispositivo y los materiales biológicos y entre ellos, por lo tanto se hace necesario obtener un modelo matemático del comportamiento físico - mecánico que describa el fenómeno. En el proceso de diseño de los mecanismos y dispositivos se podrá predecir cuál es la deformación que se genera en los materiales biológicos a partir del control de las cargas que generan. Existen estudios que establecen esta relación en los materiales con comportamiento rígidos.[3, 10, 9].

El comportamiento de los materiales biológicos depende de la actividad que realizan sus células en función del tiempo. [7, 6] Por tanto, para cada tipo de dispositivo o mecanismo se podrá establecer un sistema de cargas interactuante que responda a los requerimientos deseados expresado a través de un modelo geométrico.

El desarrollo alcanzado en las tecnología informáticas permiten que la simulación de los proceso se pueda llevar a cabo utilizando modelos geométricos y matemáticos. En este artículo se explicará como utilizando los procesos de optimización permiten encontrar un modelo matemático que describa su comportamiento físico mecánico de un tallo de caña de azúcar.

Establecimiento del modelo geométrico.

El diseño de un sistema de ordenamiento de estacas, de caña de azúcar, dedicadas a la siembra genera una situación de carga radial sobre los tallos que provocan deformaciones en las yemas de geminación disminuyendo la capacidad productiva de los campos. Los pasos dados para establecer el modelo son:

- Análisis de la cinemática de los mecanismos.
- Estudio de los patrones morfológicos.
- Determinar las restricciones del modelo

El movimiento de las estacas ordenadas en la proximidad de la boca de descarga de una tolva genera cargas de interacción que pueden provocar daños mecánicos y dificultar la continuidad del flujo hasta un mecanismo dosificador, dependiendo de la magnitud de las cargas de interacción entre las estacas; [17]. El abordaje convencional del deslizamiento de materiales a granel no contempla el cálculo de las fuerzas puntuales entre los elementos de material granulado [13, 14].

Las estacas almacenadas dentro de la tolva transfieren sus cargas de peso propio a las estacas vecinas a través de los puntos de apoyo en el contorno. Esto genera un comportamiento mecánico que puede ser modelado por la teoría matricial clásica de estructuras reticulares en condiciones estáticas, sin deslizamiento relativo entre las estacas [15]. En el caso de la caña de azúcar, el material presenta un comportamiento visco-elástico y anisótropo no suficientemente conocido para poder efectuar un modelo convencional por la teoría de contacto.

El modelo por el análisis estructural es válido hasta el límite de deslizamiento, o sea, para condiciones en que las cargas de cizallamiento en los puntos de contacto no sobre pasen el valor de las fuerzas de fricción estática. Por consiguiente, el análisis del acomodo en la boca de descarga será estático, no obstante existir, en el conjunto ordenador propuesto movimiento en los laterales.

El proceso de generación del modelo es compuesto por tres etapas: creación, comprobación y análisis [1]. La creación del modelo estructural se fundamenta en la forma geométrica de la sección transversal de la caña de azúcar y en los puntos de contacto que puedan existir en los arreglos formados por las estacas en la boca de

descarga. Por tanto, se propone una estructura poliédrica cilíndrica. Estudios de comportamiento de conductos sometidos a presión externa han determinado la viabilidad de este tipo de estructura para conocer las tensiones internas que surgen. [2]

La estructura, constituida por barras sometidas a tensión - deformación necesitan de propiedades mecánicas. Estas propiedades deben ser tales que, para cualquier sistema de cargas dentro del arreglo, el comportamiento del modelo sea semejante al comportamiento de la caña de azúcar. Por tanto, el comportamiento mecánico transversal de la caña de azúcar será obtenido ensayando una estaca diametralmente.

Los datos obtenidos de estos ensayos permiten construir curvas de fuerza contra desplazamiento del nodo donde se aplica la fuerza. Como el material de la caña de azúcar es visco-elástico, será difícil obtener las propiedades directamente de su comportamiento mecánico. La comprobación del modelo matemático que describe el comportamiento mecánico se hace reproduciendo en un programa computacional, un ensayo y comparando sus resultados con los obtenidos experimentalmente.

Luego, la metodología para obtener el modelo estructural de la sección transversal de la estaca de caña de azúcar es la siguiente:

- Seleccionar los tallos de caña con maduración suficiente para ser sembradas
- Realización de los ensayos y construcción de las curvas fuerzas – desplazamiento
- Obtención de las propiedades mecánicas de la estructura utilizando los datos del primer y segundo ensayo
- Comprobación del modelo utilizando los datos el tercer ensayo a través de la simulación
- Análisis y discusión de los resultados del proceso de simulación

El modelo geométrico de la sección transversal de la caña de azúcar se obtiene a través del método científico empírico de la observación. El cañuto observado en dirección axial presenta una definición de dos partes, una estructura más compacta y cerrada hacia el exterior formando la corteza y otra más suave en el centro, según se puede ver en la figura 1.

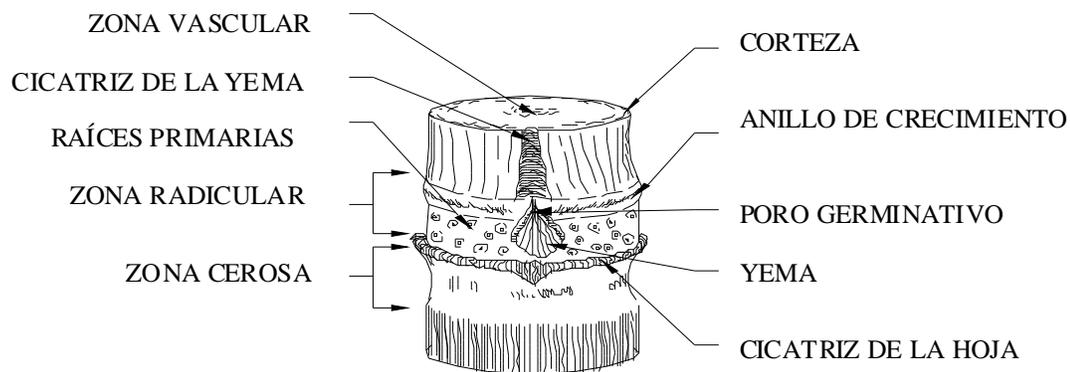


Figura 1. Morfología del nudo y cañuto de la caña de azúcar

La estructura del tallo de la caña de azúcar está compuesta por nudos y cañutos. La zona correspondiente al nudo presenta mayor rigidez que la zona de los cañutos. Por consiguiente, ante una carga de igual valor aplicada en ambas zonas, los cañutos se deformarán más que el nudo.

Para establecer el modelo geométrico es necesario plantear la siguiente condición: la sección transversal es circular de radio uniforme. A partir de aquí, se pueden considerar dos formas: una que el modelo sea macizo o que sea un anillo. Si se considera el modelo macizo se está eliminando las diferencias que presenta la estructura de la sección transversal. Si se considera un anillo se debe tener en cuenta la aplicación del teorema de *Castigliano*. Se conoce que este teorema cumple con la Ley de *Hooke* lo cual, no es compatible con el comportamiento de los materiales biológicos como es el caso de la caña de azúcar.

El modelo de la sección transversal debe servir para el análisis de los arreglos romboédricos bidimensionales para posición en 30 y 60 grados respectivamente, como se explicó en el capítulo anterior. En función del número de contactos al que puede estar sometido el modelo de la sección transversal de la caña de azúcar dentro del arreglo, tratando de que exista un nodo de unión de las barras en estos puntos de contacto. Esto determina que el modelo estructural posea 12 nudos para el análisis de las cargas, reacciones y desplazamientos de la estructura.

Por tal motivo, el modelo puede ser simulado por un anillo formado por barras dispuestas en la periferia de un cilindro donde cada barra cumpla con una ley de comportamiento, o sea, la estructura de barra tendrá un comportamiento conocido como resultado de los ensayos, pero las barras pueden presentar un comportamiento no conocido que se corresponda con un material de simulación. Lo anterior constituye una hipótesis, o sea, se plantea que las barras presentaran un comportamiento mecánico que puede ser obtenido conociendo el comportamiento de la estructura mediante ensayos. Esta hipótesis será comprobada al analizar los resultados de la experimentación.

Lo anterior permite proponer un modelo de anillo de 12 barras iguales dispuestas en la periferia, según se muestra en la figura 2.

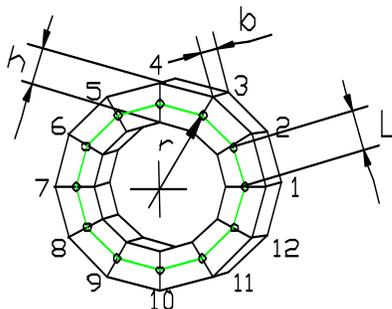


Figura 2. Modelo geométrico de la sección transversal

Donde:

r : distancia del centro del anillo al punto de unión de cada barra. Radio del canuto

L : longitud de la barra

h : ancho de la barra

b : espesor de la barra

El modelo geométrico propuesto constituye un modelo teórico ya que se simboliza la estructura de la caña como barras dispuestas periféricamente. Para que este modelo geométrico pueda tener un comportamiento mecánico igual al de la caña es necesario determinar las propiedades mecánicas de las barras que lo componen. Las características dimensionales de las barras como son: su longitud, estará determinada por el valor del radio del cañuto; su ancho y espesor, serán discutidos posteriormente.

Ensayos

Los tallos de caña de azúcar utilizados como muestras para la realización de los ensayos fueron seleccionados de 2 variedades brasileras (SP 79 2233 y SP 80 3530) y 5 variedades cubanas (My 5514, C 1051-73, B 63 118, C 294-70 y C 111-79) que son actualmente utilizadas en los respectivos países y estudiadas con diferentes propósitos [11]. La característica que determinó la selección de estas variedades fue el tamaño de las yemas y la relación en altura que existe entre estas y el anillo de crecimiento con el objetivo de garantizar la protección de la yema.

Durante el proceso de preparación de las muestras se pudo determinar el valor de densidad de las variedades seleccionadas como: $1059 \pm 2 \text{ Kg} / \text{m}^3$ con un intervalo de confianza del 98%. Con este valor, se determinó una densidad equivalente para compensar el núcleo hueco del modelo geométrico ofreciéndole el peso real de la caña de azúcar.

Determinación del rango de valores

Antes de comenzar la realización de los ensayos es necesario establecer cual será el valor a controlar en los mismos, si la carga máxima a aplicar o el desplazamiento que provoca sobre la muestra la carga aplicada. En la realización de ensayos, con carga diametral actuando en la sección transversal de cuerpos cilíndricos, se va aplicando carga hasta un valor máximo midiendo el desplazamiento que impone la carga sobre el material [12]. Por consiguiente, el próximo paso es encontrar un criterio para determinar la carga máxima.

La acción de fuerzas externas provoca que exista un aumento de la presión interna de las células hasta llegar a romper sus paredes celulares. El rompimiento de la pared provoca el derramamiento del líquido celular y la separación de paredes de células adyacentes. Todo esto hace que surjan grietas, lo que lleva a afirmar que

las fuerzas externas provocan daños internos que no se reflejan en la corteza. Las grietas pueden surgir además, por la deshidratación de las células expuestas al medio ambiente, por esta razón serán observadas durante un período de tiempo.

Al analizar los ensayos preliminares realizados se pudo apreciar que cuando se aplica una carga igual en los tres tipos ensayos, en el que mayor deformación se obtiene es en el diametral, lo cual determina la condición más desfavorable, por eso, este ensayo se toma para aplicar el criterio de la carga máxima.

De lo anterior se obtuvo que las muestras que habían sufrido cargas superiores a 30 N pasadas las 24 horas de realizado el ensayo aparecían grietas muy grandes en comparación con muestra testigo que no había sido ensayada. A estos valores de carga le correspondía como promedio una deformación de 0.3 mm en el sentido diametral. La carga máxima se aplicará por etapas para estudiar el comportamiento de las muestras durante el proceso, para los ensayos se dividieron de la siguiente forma: 2, 3.6, 8, 20 y 30 N.

Las cargas se aplicaran colocando los pesos y realizando lecturas del desplazamiento que estas provocan en un indicador de carátula. Cuando se retiran los pesos en forma inversa también se realizarán las lecturas, esto permite analizar si existe el fenómeno de la histéresis para estas cargas.

En el gráfico 1, se muestran sólo los valores de desplazamiento contra el incremento de la carga. Se pueden apreciar diferencias entre las curvas cuando es cargada y descarga la muestra, no obstante según un análisis estadístico de comparación de las medias, se demuestra que no existe una diferencia estadística con un nivel de confianza del 95 %. Para apreciar este análisis se han colocado los resultados de prueba de hipótesis de comparación para las medias más diferentes.

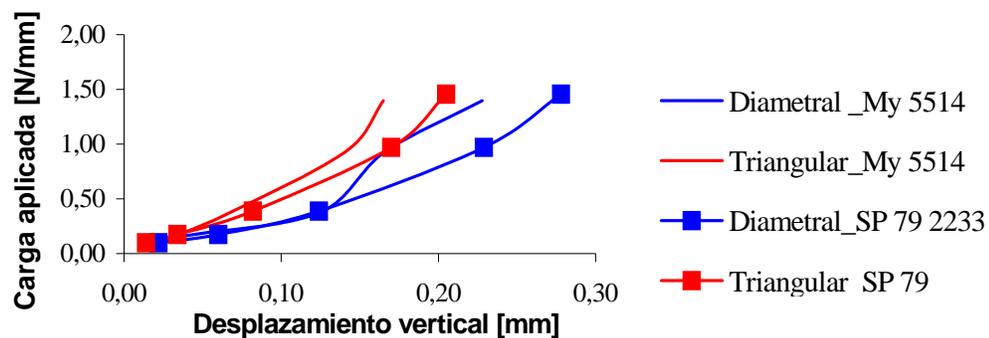


Gráfico 1. Comportamiento mecánico del cañuto cargado radialmente en el nudo 4 para los ensayos diametral y triangular -30°

De la observación del comportamiento mecánico de las muestras se puede comentar que para pequeños valores de carga no existe diferencia entre los desplazamientos del nodo 4 para los dos tipos de ensayos. Esto puede ser producto de que en la superficie de la muestra existen irregularidades o diferencias en la cantidad de cera acumulada. Además para cargas superiores a 0.4 N/mm el ensayo diametral presenta mayores deformaciones que el triangular -30° , o sea, el mayor número de puntos de apoyos de la estructura provocó, como se esperaba, un aumento de la rigidez.

Comportamiento del biomaterial

El comportamiento de materiales viscoelásticos varían en una gama grande, estos materiales representan la unidad del comportamiento elástico, expresado por la ley de *Hooke*, y los fluidos viscosos, que se expresan por la ley de *Newton* [15]. Los modelos simples de materiales viscoelásticos fueron descritos por *Maxwell* y *Kelvin*. Los mismos, combinan el comportamiento lineal de los resortes con amortiguadores.

Los ensayos Diametral y Triangular -30° demuestran que se debe buscar una solución para reproducir dos comportamientos, si se intenta modelar utilizando, la teoría de los materiales viscoelásticos, se tendría que encontrar un modelo para cada tipo de ensayo lo cual entraría en contradicción con el objetivo que se persigue de determinar un comportamiento capaz de simular diferentes sistemas de carga como el tercer ensayo (Triangular -60°). Por consiguiente, el modelo de comportamiento mecánico manifestado a través del modulo de elasticidad deberá tener parámetros que le confieran flexibilidad suficiente para reproducir el comportamiento de las curvas experimentales obtenidas. Se puede pensar que este será multielástico, o sea, cada barra se encontrará en un estado tensional definido.

Los materiales con comportamiento no lineal, pueden ser expresados por la variación de cuales quiera de sus propiedades mecánicas. El coeficiente de Poisson que caracteriza la capacidad del material de adquirir deformaciones transversales oscila para todos los materiales entre 0 y 0,5 ya que para valores mayores el material es prácticamente incompresible. Para la mayoría de los materiales varía entre 0,25 y 0,35. Por este motivo, se escoge como valor para el coeficiente de Poisson 0,3. Por consiguiente, sólo se realizará la variación del modulo de elasticidad aplicada a la teoría estructural de barras.

Cuando se aplica esta teoría estructural al modelo geométrico, se obtiene un sistema de 36 ecuaciones con 36 incógnitas pero se desconoce la dependencia entre las mismas, la cual no es fácil de determinar [16]. En las 36 incógnitas se encuentran: los desplazamientos (vertical y horizontal) y rotaciones en los extremos de barra, además el estado tensional que posee cada barra.

La determinación de las incógnitas es un proceso matemático complejo. El estado tensional debe corresponder con la propiedad multielástica que posee el material de la barra. Por esta razón, se empleo el software profesional ANSYS versión 5.4, que permite a través de recursos de optimización determinar los valores de parámetros desconocidos. Después de comparar los valores promedios de los ensayos para cada variedad con la respuesta del software se obtuvo el comportamiento que muestra la figura 3.

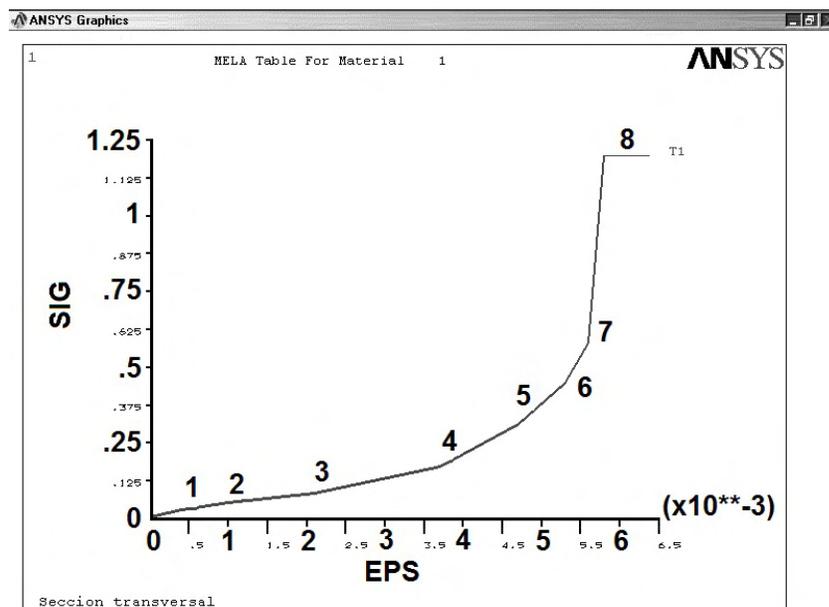


Figura 3. Comportamiento mecánico de las barras del modelo geométrico de 12 barras dispuestas periféricamente

La propiedad del material obtenido se caracteriza porque para pequeños valores de esfuerzos (entre 0 y 0.375 N/mm²) se producen grandes deformaciones comparadas con las que se obtienen cuando se va incrementando su valor. Para valores por encima de 0.625 [N/mm²] comienza a deformarse el material muy poco aún con un gran aumento de la carga.

A partir de esta observación, se puede plantear una hipótesis para comparar el comportamiento multielástico encontrado con la situación que ocurre a nivel celular. Cuando se aplica una carga pequeña a la sección transversal de la caña, las células se acomodan según les permita la elasticidad de las paredes celulares (período de desplazamientos grandes). Para mayores valores de carga existe un aumento de la presión interna de las células que provoca el acercamiento al límite elástico de las paredes celulares (períodos de desplazamientos pequeños). Estas etapas son las observadas y se puede predecir que para un aumento continuo de carga las presiones internas son tan grandes que se rompen las paredes celulares derramando su líquido y provocando deformaciones permanentes en el material biológico.

Por todo lo anterior, las cargas aplicadas en los ensayos nunca provocaron que se sobrepasara el valor del desplazamiento promedio de 0.3 mm que era la deformación máxima donde no aparecían grietas.

Hasta el momento se puede afirmar que existe un comportamiento multielástico que es capaz de reproducir el comportamiento viscoelástico de la sección transversal de la caña de azúcar cuando se le aplican cargas distribuidas que no sobrepasan los 1.5 N/mm de longitud de la muestra.

Comprobación del modelo de comportamiento

Se ha encontrado un modelo que puede simular el comportamiento de la estructura para dos condiciones de apoyo. Es oportuno recordar, que el modelo debe ser capaz de reproducir cualquier otra situación de carga, impuesta sobre la sección transversal de la caña de azúcar. En tal sentido, el proceso de comprobación del modelo obtenido se fundamenta en la comparación de los resultados de los desplazamientos del nodo 4 obtenidos en la simulación del modelo estructural del ensayo triangular-60° con los desplazamientos medidos en el ensayo experimental.

El comportamiento de los ensayos Triangular-60°, coincide con las conclusiones arribadas en los ensayos Diametral y Triangular-30°. No obstante, para establecer una buena comparación entre el modelo y el ensayo, se reprodujo cada uno obteniéndose para cada muestra dos resultados, uno establecido por la práctica y otro por la simulación; realizándose una comparación estadística entre ambos con el objetivo de establecer una diferencia. El estudio estadístico, permite concluir que no existe diferencia significativa, con un nivel de confianza del 95 %, entre los resultados del ensayo y el resultado de la simulación.

A modo de ejemplo se expone el gráfico 2, que refleja el comportamiento promedio de la estructura para las variedades expuestas.

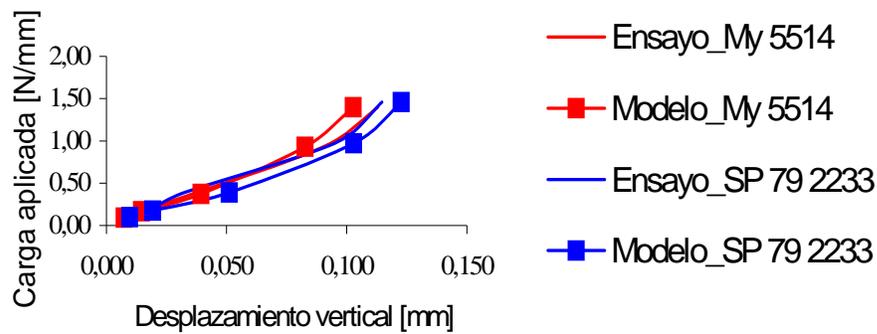


Gráfico 2. Comparación del modelo con los resultados del ensayo triangular-60°

Lo anterior comprueba la hipótesis que se había planteado para la solución del modelo, o sea, el comportamiento multielástico de las barras permite en intervalos conocidos la aplicación de la Ley de Hooke, a pesar de que la estructura no cumpla con la misma.

El modelo de la sección transversal del tallo puede ser modelado a partir de 12 barras dispuestas simétricamente en la periferia de una circunferencia proporcionándole al material de la barra la propiedad multielástica determinada en la realización de estos ensayos. Esta propiedad permite obtener comportamientos estructurales diferentes en función de la cantidad de apoyo y la posición que tengan los mismos. El gráfico 3 muestra los resultados del modelo de simulación para una muestra que posea de diámetro 30 mm y de longitud 50 cuando se le aplica carga de 5 a 75 N.

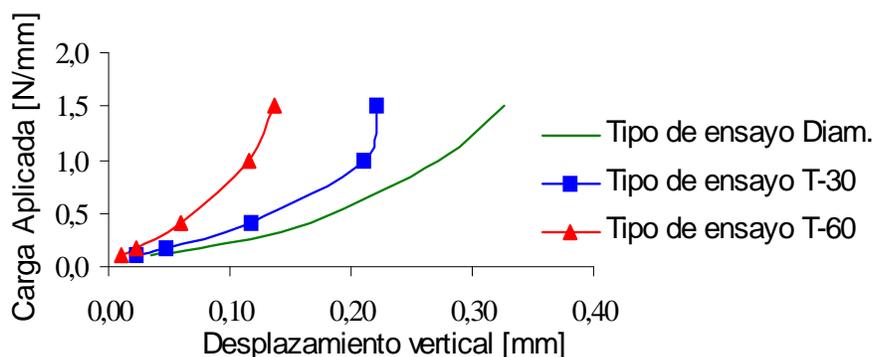


Gráfico 3. Comportamiento que se obtiene al simular una muestra ideal

Conclusiones

1. El modelo multielástico obtenido permite el estudio de varias situaciones de carga aspecto que no considera la teoría de la viscoelasticidad.
2. El comportamiento mecánico de la sección transversal de los tallos de caña de azúcar para las variedades cubanas y brasileras analizadas, cargadas radialmente, puede ser simulado a través de un modelo estructural poligonal de doce barras si le son impuestas a las propiedades del material la multielasticidad. Esto permite el estudio de varias situaciones de carga aspecto que no considera la teoría de la viscoelasticidad.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Fundação de Amparo Pesquisa do Estado de São Paulo, el apoyo ofrecido para la viabilidad de los resultados de la investigación

Referencias

1. MORTENSON, M. E. *Geometric Modeling*. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1985. 763 p. ISBN 0-471-88279-8.
2. GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, V. "Estudio de la influencia de parámetros geométricos en la resistencia de superficies de revolución sometidas a presión externa". *Ingeniería Mecánica*. 2001, vol. 4, n°. 3, p. 11 -17. Disponible en: http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Revistas/Mecanica/Vol-4/3-2001/_05_RIM010302Estudio-Vladimir%20_pag11-17_.pdf. ISSN 1815 - 5944.
3. WIENDAHL, H.-P. y LORENZ, B. "Aerodynamic Part Feeding: Development of Aerodynamic Orienting Devices". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 1999, vol. 15, p. 417-424. Disponible en: <http://springerlink.com/content/1fc0chy56v76kvm4/>.
4. ROMANO, A. S.; TEVES, I., *et al.* "Incidencia del daño mecánico en semillas de Poroto (*Phaseolus Vulgaris* L.) sobre el desarrollo y el rendimiento de plantas normales y anormales". *Idesia (Arica)*. 2010, vol. 28, n°. 2, p. 67-74. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292010000200008&nrm=iso. ISSN 0718-3429.
5. CAPURRO, J. A.; CUENCA, I., *et al.* "Daño mecánico en cuatro cultivares de papa (*Solanum tuberosum*) a tres temperaturas de conservación". *RIA*. 2004, vol. 33 n°. 3, p. 41-53. Disponible en: http://www.inta.gov.ar/ediciones/ria/33_3/04.pdf. ISSN 1669-2314.
6. KRETZSCHMAR, F. S.; *et al.* "Differential sugar uptake by cell suspension cultures of *Rudgea jasminoides*, a tropical woody Rubiaceae". *PHYSIOLOGY*. 2007, vol. 43, p. 71-78. Disponible en: <http://springerlink.com/content/c77060q163815122/>.
7. KRIVTISOV, V.; BELLINGER, E., *et al.* "Incorporation of the intracellular elemental correlation pattern into simulation models of phytoplankton uptake and population dynamics". *Journal of Applied Phycology*. 2000, vol. 12, p. 453-459. Disponible en: <http://springerlink.com/content/kjm687255718h552/>.
8. CERDEIRA, A. L.; DORNELAS-DESOUZA, M., *et al.* "Effects of Sugar Cane Mechanical Harvesting Followed by No-Tillage Crop Systems on Leaching of Triazine Herbicides in Brazil". *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology*. 2005, vol. 75, p. 805-812. Disponible en: <http://springerlink.com/content/76450085k0205422/>.
9. LOY, M. y REINHART, G. "A new modular feeding system and its economic scope of application". *Prod. Eng. Res. Devel. ASSEMBLY*. 2010, vol. 4, n°. 4, p. 357-362. Disponible en: <http://springerlink.com/content/k43177531k2886w3/>.
10. CASU, R. E.; GROF, C. P. L., *et al.* "Identification of a novel sugar transporter homologue strongly expressed in maturing stem vascular tissues of sugarcane by expressed sequence tag and microarray analysis". *Plant Molecular Biology*. 2003, vol. 52, n°. 2, p. 371-386. Disponible en: <http://springerlink.com/content/x176375573361221/>.
11. MOLINA, D. E. V.; SANTOS, A. D. L., *et al.* "Sugar cane buds as an efficient explant for plantlet regeneration". *BIOLOGIA PLANTARUM*. 2005, vol. 49, n°. 4, p. 481-485. Disponible en: <http://springerlink.com/content/l165h14730u55466/>.

12. BOGOMOLOV, A. R.; PETRIK, P. T., *et al.* "Condensation of steam on a vertical tube in a granulated material ". *Microgravity Science and Technology*. 2007, vol. 19, n°. 3-4, p. 93-95.
Disponible en: <http://springerlink.com/content/k63423ur18t14112/>.
13. RUDOBASHTA, S. P. "Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods ". *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2010, vol. 83, n°. 4, p. 753-763.
Disponible en: <http://springerlink.com/content/wj8715278r6v59m9/>.
14. PAPP, M. K.; PUJARA, C. P., *et al.* "Monitoring of High-shear Granulation using Acoustic Emission: Predicting Granule Properties". *Journal of Pharmaceutical Innovation*. 2008, vol. 3, n°. 2, p. 113-122.
Disponible en: <http://springerlink.com/content/e7206642427t8022/>.
15. MASE, G. E. *Theory and problems of Continuum Mechanics*. USA: McGraw-Hill Brook Company, 1970. p 221. Schaum's Outline ISBN 07-040663-4.
16. IZNAGA BENITEZ, A. M. "Algoritmo para la obtención de los parámetros de una ecuación de comportamiento mecánico". En: *INFOMADI 98*. La Habana. Cuba. 1998.
17. IZNAGA BENÍTEZ, A. M. Ordenamento para a dosagem de toletes para o plantío mecanizado de cana-de-açúcar. En: *II WorkShop de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Agrícola*. SP, Brasil. 1997.

Arsenio Miguel Iznaga-Benítez^I, Oscar Antonio-Braunbeck^{II}.

I. Departamento Gráfica de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Calle 114 #11901 e/119 y 127. Marianao. La Habana. CP 19390. Cuba.

Email: icznaga@mecanica.cujae.edu.cu

II. Departamento Máquinas Agrícolas. FEAGRI, UNICAMP, Sao Paulo, Brasil