

Evaluación numérico-experimental de los esfuerzos principales en la corteza del fruto de la guayaba (*psidium guajava L*) variedad enana roja

*Experimental-numerical evaluation of the principal stresses in the crust of the fruit of the guava (*psidium guajava L*) red dwarf variety*

Ing. Dayvis Fernández Valdés^I, Dr.C. Luis Héctor Hernández^{II}, Dr.C. Juan Alfonso Beltrán^{II},
Ing. Arturo Ocampo Ramírez^{II}, Ing. Daybelis Fernández Valdés^I

^IUniversidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{II}Instituto Politécnico Nacional, Unidad Zacatenco, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Ciudad de México, México.

RESUMEN: Los daños mecánicos por cargas estáticas son uno de los principales factores que conllevan al deterioro poscosecha de las frutas, tal es el caso de la guayaba ya que su manejo poscosecha se hace sin protección al fruto. Para realizar un estudio de como se comporta la guayaba debido a la aplicación de dichas cargas de compresión se realizan pruebas experimentales mediante la técnica de Fotoelasticidad Reflectiva y se emplea el método numérico mediante el Método del Elemento Finito con el objetivo de conocer como se genera el campo de esfuerzos principales además de la determinación de los mismos a través de ambos métodos. Entre los principales resultados, se obtiene la distribución del campo de esfuerzos de acuerdo a la carga de compresión aplicada para cada fruto de guayaba, además del valor de esfuerzo principal que esta actuando en la zona analizada, mostrando similitud entre los dos métodos empleados.

Palabras clave: cargas estáticas, Fotoelasticidad Reflectiva, Elemento Finito, guayaba.

ABSTRACT: Mechanical damages by static charges are major factors leading to fruits postharvest deterioration, as in the case of guava, as postharvest handling is done without fruit protection. To conduct a study of how guava behaves due to the application of compressive loads, experimental tests are performed using the Reflective Photo elasticity technique and the numerical method, through the Finite Element Method, in order to know how to build the principal stress field along with their determination. Among the results, we obtain the distribution of stress field. According to the compressive load applied to each guava fruit, and the value of principal stress that is acting in the area studied, showing similarity between the two methods.

Keywords: Static loads, Reflective Photoelasticity, Finite Element, guava.

INTRODUCCIÓN

Resulta imprescindible para la salud humana el consumo de frutas con la calidad requerida, debido a que en su producción es donde se encuentra la mayor riqueza agrícola (Hernández *et al.*, 2004). La elevada demanda de frutas y hortalizas frescas con óptima calidad obliga a los profesionales de la industria y a los investigadores a realizar ensayos de laboratorio para determinarla objetivamente (Hernández, 2005; Martínez, 2003).

La guayaba es un fruto que en la mayoría de los casos al igual que otros productos agrícolas sufre daños provocados por cargas estáticas de compresión, debido a que su manejo poscosecha se hace sin ninguna protección al fruto; para el caso de transporte se hace a granel, en cajas, hasta llenar los camiones, además de que a la hora del empaque se debe tener en cuenta que carga de compresión pueden admitir las mismas sin sufrir daño (Hernández y García, 2002; Fernández *et al.*, 2012).

Las técnicas fotoelásticas se caracterizan por ser simples y brindar información en forma rápida de la distribución del campo de esfuerzos. Además, permite determinar los niveles y las magnitudes de las mismas con gran aproximación (Beltrán *et al.*, 2004). El notable avance en los paquetes de cómputo de las últimas generaciones, ha traído como consecuencia que los análisis numéricos, y en particular el Método del Elemento Finito tengan un gran desarrollo; tal es el caso del Ansys. Esto es de gran importancia para aplicaciones en la industria (Jamal *et al.*, 2005; Villaseñor, 2005; Urriolagoitia *et al.*, 1997; Medina *et al.*, 1997).

El Método del Elemento Finito (MEF) constituye una herramienta de análisis poderosa para obtener soluciones aproximadas a una amplia variedad de problemas de mecánica (Silvestre, 1998).

El objetivo de este estudio se centra en conocer como se comporta la guayaba debido a la aplicación de cargas de compresión y como se genera el campo de esfuerzos principales, además de la determinación de los mismos mediante el método experimental a través de la técnica de Fotoelasticidad Reflectiva y el método numérico con la ayuda del Método del Elemento Finito.

MÉTODOS

Metodología para el análisis experimental de esfuerzos

Las pruebas fotoelásticas se realizaron en el laboratorio de análisis experimental de esfuerzos de la SEPI-ESIME-ZACATENCO, IPN, México, donde se encuentra el equipo para los ensayos.

Equipo utilizado para la prueba

El dispositivo empleado para la realización de las pruebas es un polariscopio circular modelo SSM-AJ de la serie 060, el cual posee una capacidad de carga de 2500N y pertenece a la marca Interface. (Figura 1)

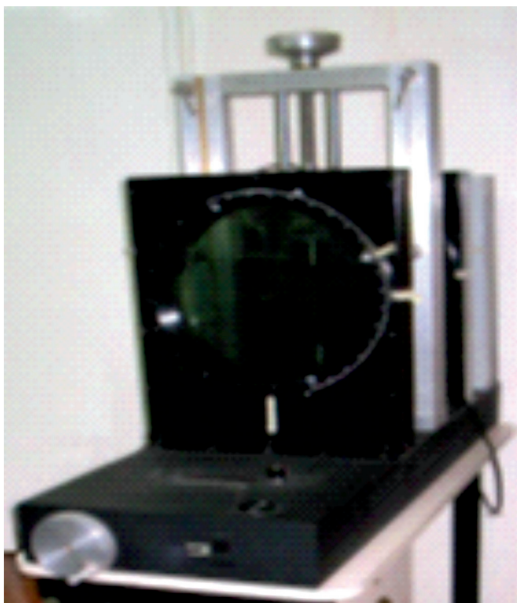


FIGURA 1. Polariscopio circular.

El polariscopio cuenta principalmente con los siguientes componentes (Figura 2):

- 1 Fuente de luz
- 1 Polarizador
- 1 Analizador
- 2 Placas de cuarto de onda
- 1 Marco de carga
- 1 Celda de carga
- 1 Indicador de carga
- 1 manivela para la rotación de los discos
- 1 botón seleccionador del tipo de luz



FIGURA 2. Componentes del polariscopio modelo SSM-AJ.

Metodología para la aplicación de la técnica de Fotoelasticidad Reflectiva

Ante la importancia de conocer el comportamiento mecánico visual de la guayaba a efecto de inferir ciertas tendencias en zonas de posible ruptura o falla, se hace necesario la aplicación de una de las técnicas del análisis experimental de esfuerzos indirecta, como lo es: el ensayo de fotoelasticidad reflectiva.

Por esto la finalidad de esta prueba consiste en conocer el comportamiento de la guayaba al aplicarle diferentes cargas de compresión, considerando como límite cuando se produzca la falla o destrucción del fruto, para de esta forma, obtener la distribución de esfuerzos en las zonas más propensas a la ruptura del mismo.

1. Para el desarrollo de esta prueba el procedimiento a seguir es el siguiente:

- a. Cálculo de la cantidad de material a usar, de acuerdo al área de la resina por cubrir, (ecuación 1)

$$A = a \times b \text{ pulg}^2 \quad [1]$$

$$A = 9 \times 9 = 81 \text{ pulg}^2$$

Se usa un espesor pequeño de 0,3 mm con el objetivo de que de acuerdo a las propiedades de la guayaba los esfuerzos lleguen a ser transmitidos hasta la resina para su posterior observación.

- b. Cálculo del peso total, (ecuación 2),

donde: A corresponde al área de la película en pulgadas²;

t, se refiere al espesor de la película en pulgadas y 18,5 es una

constante del peso de la película y sus unidades son gramos/pulgadas³.

$$W_T = 18,5 \times A \times t = g \quad [2]$$

$$W_T = (18,5) (81) (0,012) = 17,69 \text{ g}$$

c. Cálculo del peso de la resina (PL-I), (ecuación 3)

$$W_{PL-I} = \frac{W_T \times 100}{120} \text{ g} \quad [3]$$

$$W_{PL-I} = 17,69 \times 100/120 = 14,74 \text{ g}$$

d. Cálculo del peso del catalizador (PLH-I), (ecuación 4)

$$W_{PLH-I} = \frac{W_T \times 20}{120} \text{ g} \quad [4]$$

$$W_{PLH-I} = 17,69 \times 20/120 = 2,94 \text{ g}$$

Luego para el cálculo del peso de la mezcla en el vaso, se determina el peso del vaso de plástico $W_v = 4,22 \text{ g}$, por lo que

e. Peso de la resina y vaso,

$$W_{RV} = 14,74 + 4,22 = 18,96 \text{ g}$$

f. Peso del catalizador y vaso,

$$W_{cv} = 2,94 + 4,22 = 7,16 \text{ g}$$

Se coloca con cuidado la mesa de trabajo y se nivela ajustando cada uno de los tornillos que se encuentran en los extremos de la misma (Figura 3).

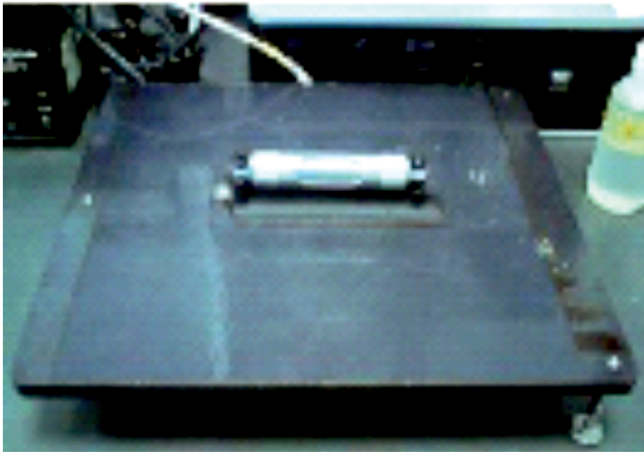


FIGURA 3. Calibración de la mesa de trabajo.

2. Se conecta la mesa de trabajo a un controlador de temperatura, el cual evaluó este factor a 52 °C. Se colocan sobre la mesa cuatro reglas de goma que al unir las forman un cuadrado que sirve para delimitar el área para la conformación de la resina (Figura 4).
3. El proceso para preparar la resina consiste en verter en un vaso de plástico la cantidad calculada de resina y catalizador. Una vez lograda la reacción química después de mezclar dichas sustancias, se vierte sobre la mesa de trabajo y se extiende (Figura 5) hasta lograr cubrir toda el área en cues-

tión y se deja en reposo durante unos 45 minutos para que el proceso de polimerización surta efecto.



FIGURA 4. Reglas de goma para delimitar el área a emplear.

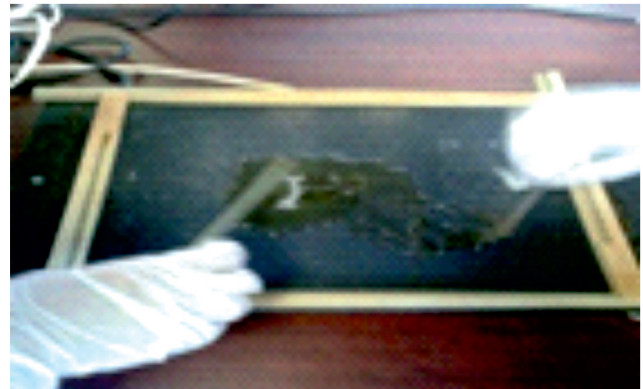


FIGURA 5. Aplicación de la resina sobre la mesa.

Transcurrido dicho tiempo, se obtiene una resina maleable, como se muestra en la Figura 6, la cual requiere que se recorten los límites excedentes con tijeras.



FIGURA 6. Resina obtenida.

Posteriormente la resina se conforma a la geometría de la guayaba como se observa en la Figura 7, y se deja polimerizar por completo hasta el endurecimiento total, por un tiempo de 24 h, de esta forma la resina adquiere la forma de la guayaba.



FIGURA 7. Aplicación de la resina al fruto de la guayaba.

Una vez logrado esto se retira la resina fotoelástica para poder adherir una película fina de esmalte como se describe a continuación:

4. Se aplica esmalte primario (opaco) al fruto y después de 1h para dejar secar la misma se aplica esmalte acrílico (brillante) como se observa en la Figura 8, con el objetivo de reflejar la luz, que llegue a la película y se logre el efecto óptico, para poder observar cómo se comporta la distribución de esfuerzos.



FIGURA 8. Aplicación de esmaltes al fruto de la guayaba variedad Calvillo.

5. Alternativamente se mezcló en un envase plástico el adherente, el cual sirve tanto para fijar el recubrimiento fotoelástico a la guayaba como para reflejar la luz del experimento. El

mismo se aplica al fruto en una cantidad razonable, tratando de evitar siempre burbujas entre la película fotoelástica y el adherente.

Después de transcurrido 24 h de reposo, la guayaba y la resina están completamente unidas (Figura 9).



FIGURA 9. Resina adherida a la guayaba.

Lograda la unión, se procede a la realización del ensayo de fotoelasticidad reflectiva para el cual se utilizó un polariscopio constituido por un par de lentes polarizadas y una fuente de luz.

6. Se coloca la guayaba en el polariscopio, se le aplican cargas de compresión y se gradúa la escala de una de las lentes del polariscopio como se muestra en la Figura 10, para enfocar de una mejor manera las coloraciones en la superficie del fruto y obtener así la distribución de esfuerzos.



FIGURA 10. Graduación de las lentes del polariscopio.

Metodología para la simulación del comportamiento del fruto de la guayaba ante cargas estáticas mediante el método de los elementos finitos

Se hace necesario contar con un modelo digitalizado, el cual se realiza empleando herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD). Para representar digitalmente el fruto de la guayaba se modela solo el casco ya que esta es la región con mayor resistencia y en donde las fibras están más castigadas.

Una vez confeccionada la geometría en herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD), la misma fue importada al programa Ansys v.13, como se muestra en la Figura 11, a fin de proceder al mallado computacional y posterior modelado.

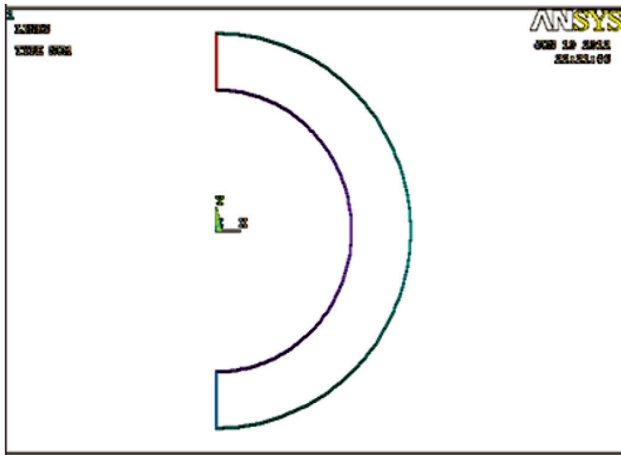


FIGURA 11. Modelo a simular en Ansys.

La generación de una malla lo suficientemente pequeña para obtener resultados confiables es uno de los pasos más importantes en la simulación, ya que la misma debe ser capaz de resolver el problema en estudio con una alta precisión y depende de un análisis de convergencia. En la Figura 12 se muestra la malla obtenida.

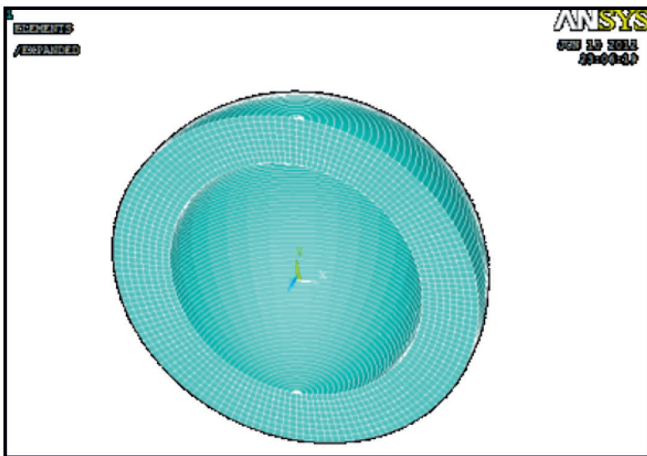


FIGURA 12. Mallado obtenido.

Posteriormente se aplican las condiciones de fronteras adecuadas y seguidamente se procede a la obtención las deformaciones y esfuerzos máximos (Figura 13).

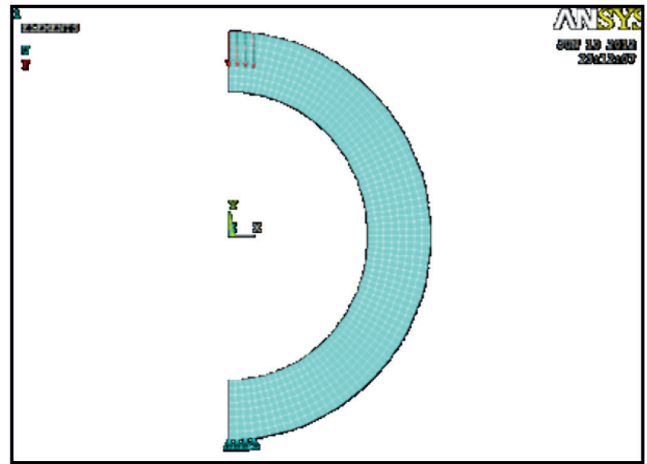


FIGURA 13. Condiciones de fronteras aplicadas.

Resultados de la aplicación de la técnica de Fotoelasticidad Reflectiva

Determinación de los esfuerzos principales

Después de someter el fruto de la guayaba con el material de prueba fotoelástico a cargas de compresión, el resultado de los esfuerzos inducidos aparece a lo largo de toda su superficie. Las cargas aplicadas al material producen efectos ópticos proporcionales que aparecen como franjas isocromáticas, las cuales unen los puntos que tienen la misma diferencia de tensiones principales. Los valores de esfuerzo se obtienen mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf}{e}$$

donde:

σ_1, σ_2 -Esfuerzos del estado plano, MPa;

e -Espesor, mm;

f -Valor fotoelástico del material, N/mm;

n -Número asociado a cada color, orden de franja.

Una vez determinada f según la ecuación 6, con todos los valores de carga aplicada, se obtiene el valor a emplear para la determinación de los esfuerzos principales.

$$f = \frac{F}{S} \times e$$

donde:

F -carga aplicada;

A - área del fruto de la guayaba.

Por lo que se obtiene $f = 0,00461$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación del comportamiento del fruto de la guayaba ante cargas estáticas mediante el método de los elementos finitos

El análisis numérico se hizo con la ayuda del software Ansys vs 13, con el objetivo de conocer el comportamiento del

fruto de la guayaba variedad enana roja, de acuerdo a las cargas de compresión aplicadas durante el experimento realizado en laboratorio de análisis experimental de esfuerzos de la SEPI-ESIME-ZACATENCO, teniendo en cuenta que es un análisis mecánico con propiedades promedio y por consiguiente se obtienen resultados promedio.

La simulación se hizo mediante un modelo *homogéneo-continuo-isotrópico-lineal-elástico*, para los cuatro estados de maduración con las dimensiones y propiedades que se muestran en la Tabla 1 y de esta forma poder observar como se va deformando el fruto de la guayaba variedad enana roja a medida que se va aumentando la carga de compresión.

TABLA 1. Dimensiones y propiedades mecánicas

| EM-I | $F_{m\acute{a}x}$ (N) | Diámetro Polar (mm) | Diámetro Ecuatorial (mm) | Espesor (mm) | Módulo de Young (MPa) | Relación de Poisson |
|--------|-----------------------|---------------------|--------------------------|--------------|-----------------------|---------------------|
| 1 | 16,954 | 73,65 | 69,15 | 10,5 | 3,55 | 0,11 |
| 4 | 88,2 | 75,25 | 73,5 | 10,9 | 3,47 | 0,10 |
| EM-II | $F_{m\acute{a}x}$ (N) | polar (mm) | ecuatorial (mm) | Espesor (mm) | Módulo de Young (MPa) | Relación de Poisson |
| 5 | 10,78 | 69,25 | 67 | 9,8 | 1,63 | 0,14 |
| 8 | 68,6 | 68,25 | 66,7 | 9,7 | 1,50 | 0,13 |
| EM-III | $F_{m\acute{a}x}$ (N) | polar (mm) | ecuatorial (mm) | Espesor (mm) | Módulo de Young (MPa) | Relación de Poisson |
| 9 | 11,27 | 65,5 | 63,9 | 9,2 | 1,00 | 0,13 |
| 12 | 58,8 | 72,25 | 70 | 10,4 | 1,43 | 0,14 |
| EM-IV | $F_{m\acute{a}x}$ (N) | polar (mm) | ecuatorial (mm) | Espesor (mm) | Módulo de Young (MPa) | Relación de Poisson |
| 13 | 16,66 | 69 | 68 | 9,8 | 0,98 | 0,12 |
| 16 | 49 | 73 | 72 | 10,4 | 0,83 | 0,14 |

Resultados del Método del Elemento Finito y el Análisis experimental de Esfuerzos

Es importante destacar que en el análisis experimental puede verse el patrón de franja de la distribución de esfuerzos; pero una vez comprobado que tanto experimental como numéricamente, la distribución de esfuerzos es la misma, es posible determinarla solo utilizando métodos numéricos.

La Figura 14 muestra los resultados obtenidos en cuanto a la distribución de esfuerzos para ambos métodos de acuerdo a las cargas de compresión aplicadas.

La comparación realizada en la Figura 14, muestra que de acuerdo a la dirección obtenida de los esfuerzos principales se puede conocer las zonas de mayor peligro a la ruptura en el fruto de la guayaba, además de que en ambos métodos existe

relación en cuanto a la ubicación de las zonas de peligro de ruptura y los valores de esfuerzos principales, lo que implica que el modelo empleado para la simulación a pesar de ofrecer resultados promedios resulta en cierta medida válido.

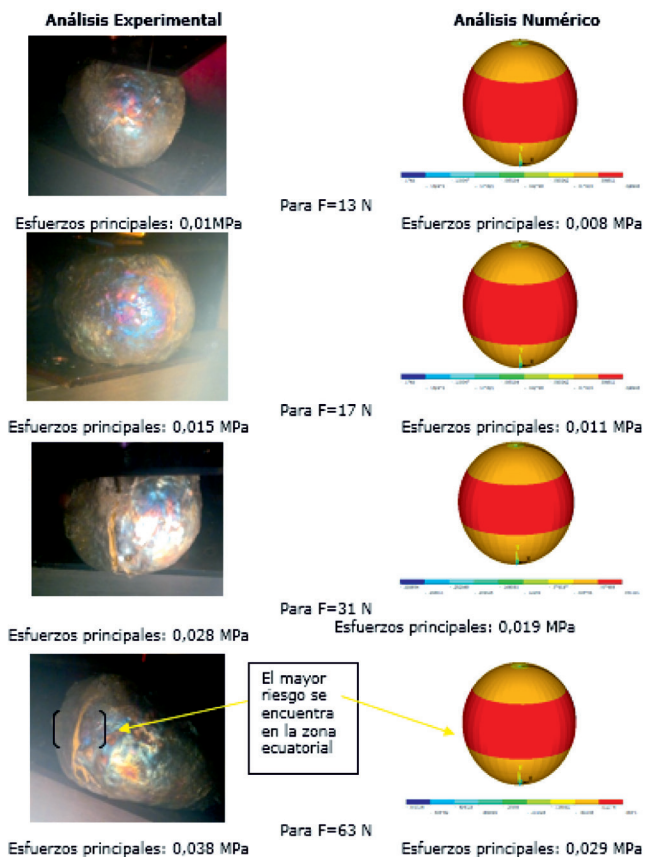


FIGURA 14. Esfuerzos principales obtenidos para el análisis experimental y el análisis numérico.

A través de los resultados se logra conocer cuál es el mecanismo de falla del fruto de la guayaba ya que se obtienen las zonas de concentración de esfuerzos para las diferentes cargas de compresión aplicadas y para todos los casos coinciden las zonas de peligro, demostrándose de esta forma que es en dichas zonas donde se produce la falla del fruto.

Resultados estadísticos

En la Figura 15 se puede observar el comportamiento del desplazamiento obtenido mediante ambos métodos por cada estado de maduración de acuerdo a las cargas de compresión aplicadas, donde los gráficos muestran la semejanza entre dichos valores y exponen además la alta dependencia entre el desplazamiento y la fuerza de compresión aplicada de acuerdo a que el aumento del desplazamiento se explica en un 84% del aumento de la carga obteniéndose el mayor valor de R^2 de 95% para el EM-I.

En todos los casos los valores de R^2 para evaluar la dependencia entre las variables analizadas son mayores de 0,847 y teniendo en cuenta además el análisis de correlación realizado, donde se obtienen valores superiores a 0,928, los resultados muestran una alta dependencia entre la fuerza de compresión

aplicada y los desplazamientos por ambos métodos en todos los casos, además existe una fuerte y directa relación entre los desplazamientos predichos y medidos por lo que resulta válida la aplicación del método numérico para la predicción de la respuesta del fruto de la guayaba variedad Enana Roja ante la acción de cargas estáticas de compresión siendo coincidentes estos resultados con Jamalet *al.* (2005), quien realizó un estudio similar en melón.

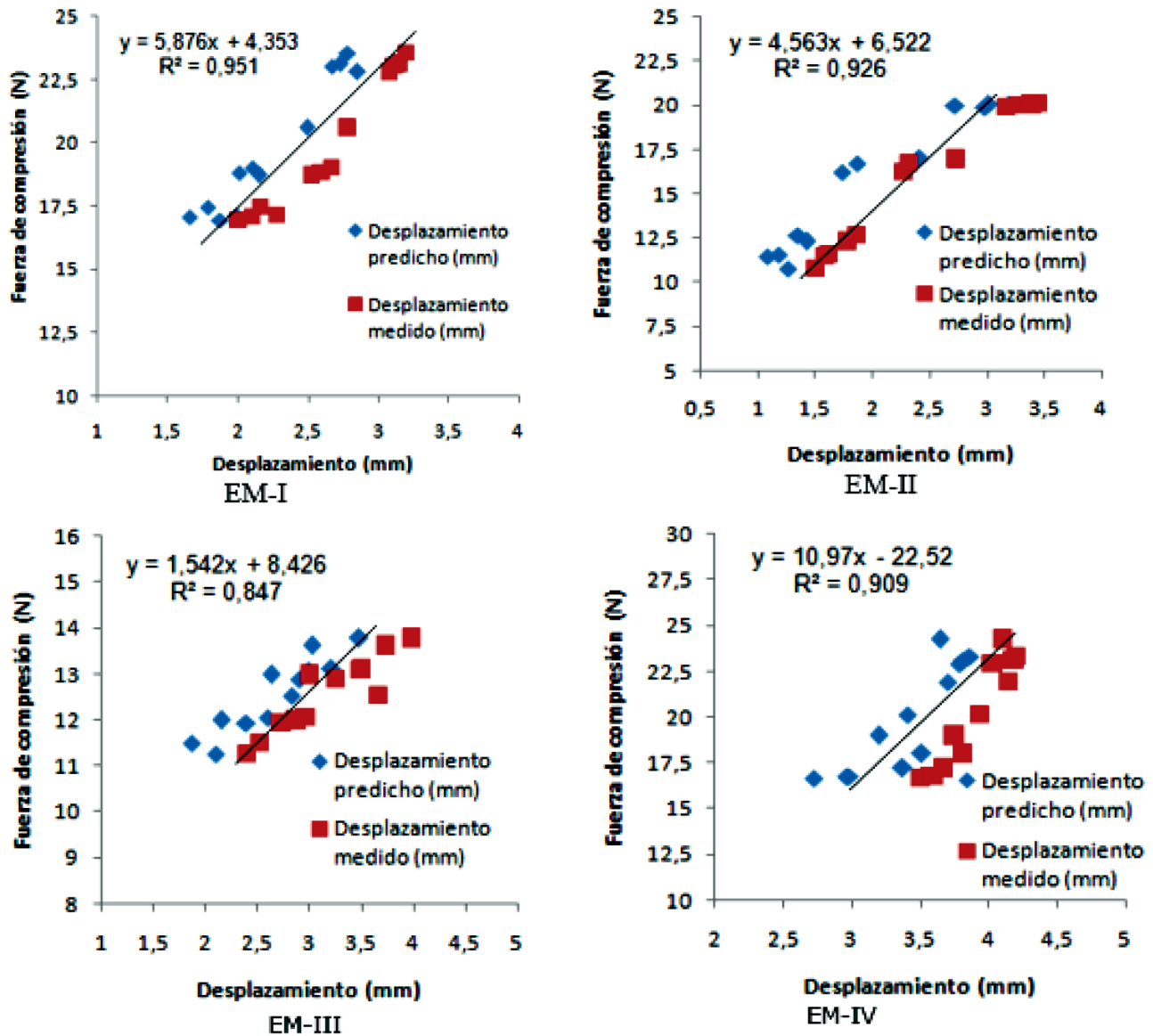


FIGURA 15. Relación entre el desplazamiento obtenido mediante el método numérico y el método experimental y la fuerza de compresión aplicada.

CONCLUSIONES

- Se obtiene un modelo digital *homogéneo-continuo-isotrópico-lineal-elástico*, para los cuatro estados de maduración, el cual resultó válido para la aplicación del Método del Elemento Finito.
- Se obtiene la distribución del campo de esfuerzos para cada fruto de guayaba de acuerdo a la carga estática de compresión aplicada.
- Se obtiene el valor de los esfuerzos principales a través de cada método empleado, mostrando similitud para ambos casos en los resultados obtenidos.

- Los resultados obtenidos por el método experimental y numérico muestran que el mayor riesgo de rotura se encuentra en la zona media de la guayaba, donde el fruto se encuentra más castigado y en donde se localizan los mayores esfuerzos.
- El análisis de regresión simple muestra en todos los casos relación estadísticamente significativa entre el desplazamiento medido y el predicho arrojando coeficientes de correlación mayores de 0,92861, el crecimiento de dichos desplazamientos se explica en valores de R² superiores a un 84% del aumento de la carga de compresión aplicada existiendo una fuerte y directa relación entre ambas variables.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BELTRÁN, J. A., L. HERNÁNDEZ, G. URRIOLAGOITIA, G. VILLA, R.G. RODRÍGUEZ, M. MENDOZA: "Análisis numérico-experimental de la Mecánica de la Fractura en materiales polímeros", *Científica*, 8(4):185-192, 2004.
2. FERNÁNDEZ, D., A. GARCÍA, A. HERNÁNDEZ, L.L. MONZÓN: "Evaluación del daño mecánico producido por cargas de compresión estáticas en guayaba (*psidiumguajaba l.*) variedad enana roja EEA-123", *Científica*, 15(2), 2012.
3. HERNÁNDEZ, A., A. GARCÍA: "A review about non destructive technologies for fruit quality evaluation". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 11(3): 31-38, 2002.
4. HERNÁNDEZ, A.: *Study of three Non-Destructive Techniques Potential for Mandarin and Tomato Fruit Quality Assessment*, Hangzhou, P. R. pp. 6-49, China: Zhejiang University. College of Biosystems Engineering and Food Science, 2005.
5. HERNÁNDEZ, L. H., I. SAUCEDA, G. M. URRIOLAGOITIA, A. S. BALANKIN, O. SUSARREY: "Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, No. 42: 53-61, 2004.
6. JAMAL, N., Y. YING, J. WANG, X. RAO, Ch. YU: "Firmness evaluation of melon using its vibration characteristic and finite element analysis", *Journal of Zhejiang University Science*, 6(6): 483-490, 2005.
7. MARTÍNEZ, C. M.: *Fundamentos del manejo y tratamiento postcosecha de productos agrícolas*, 257pp., Ed. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2003.
8. MEDINA, J. L., L. H. HERNÁNDEZ, G. URRIOLAGOITIA, G. VILLA, H. H. VÁZQUEZ, G. M. URRIOLAGOITIA: "Análisis tri-dimensional de transferencia de calor en componentes mecánicos de reactores nucleares por el Método del Elemento Finito". *Científica*, 1(3): 33-40, 1997.
9. SILVESTRE, P.P.: *Elemento finito para ingeniería eléctrica*, 236pp., Edit. Noriega, Ed. primera, México, 1998.
10. URRIOLAGOITIA, G. M., L.H. HERNÁNDEZ, G. VILLA, J.L. MEDINA, H. VÁZQUEZ: "Aplicación de los Elementos Finitos al diseño de engranes y algunos aspectos fundamentales relativos a la mecánica de fractura". *Científica*, 1(4): 1-7, 1997.
11. VILLASEÑOR, P. C.A.: *Análisis físico y mecánico de frutos de melón*, Tesis (en opción al título de Master en Ciencias), Colegio de posgraduados, México, 2005.

Recibido: 22 de mayo de 2012.

Aprobado: 5 de septiembre de 2013.

Dayvis Fernández Valdés, Prof. Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. Correo electrónico: dayvis86@hotmail.com

Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.

**CRECIMIENTO
SOSTENIBLE
EN LA AGRICULTURA
Y LA GANADERÍA**

**UNIVERSIDAD
AGRARIA
DE LA HABANA**

- *Mecanización en la agricultura ecológica
- *Biotecnología vegetal
- *Biofertilizantes
- *Biorreguladores de crecimiento vegetal
- *Control de plagas
- *Laboratorios de análisis químico
- *Alimentación animal no convencional
- *Mejoramiento animal
- *Sistemas silvopastoriles