

## **Análisis numérico-experimental del comportamiento mecánico de tutores producidos con PET**

Rodolfo Ponce, Víctor Santana, Armando Vázquez, Alfonso Toledo y Arturo Flores

R. Ponce, V. Santana, A. Vázquez, A. Toledo y A. Flores  
Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero, C.P. 40030  
mecanica@utrng.edu.mx

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

## Abstract

This work details the analysis of the mechanical behaviour of tutors produced with PET (modified polyethylene), in a plastic injection machine located at the Technological University of the Northern Region of Guerrero. Instead of traditional wood sticks, plastic tutors are employed in crops of tomatoes.

Specifically, tensile and bending loads were applied to a tutor in a universal testing machine, to determine its mechanical properties such as yielding stress and elasticity modulus (Young modulus). On the other hand, numerical simulations were carried out by means of the Finite Element Method (FEM) using ANSYS Workbench® software, in order to know deeply the tutor's mechanical behaviour in load conditions.

## 26 Introducción

En el presente existen muchos problemas ambientales que aquejan a la humanidad, como la contaminación y la deforestación, y México no se encuentra exento de esta situación, debiendo mencionar que ya se empiezan a realizar acciones para combatir esta problemática.

Anteriormente estos contaminantes eran de carácter orgánico, pero con la industrialización de los procesos, se desechan materiales difíciles de degradar. Uno de estos materiales es el plástico, los cuales son polímeros que proceden del petróleo, gas natural, carbón y la sal común.

Actualmente los residuos sólidos se están reinsertando en el sector productivo como recurso, abatiendo de cierta manera la contaminación.

La deforestación generalmente es provocada por el hombre, debido a la tala en la industria maderera, agricultura, minería y la ganadería. Específicamente, para el cultivo de jitomate es necesario la utilización de varas que servirán de sostén para las plantas herbácea bienal, erecta o decumbente, y de tamaño variable.

Esto significa la utilización de arbustos denominado otates, los cuales suelen medir aproximadamente 2.5 metros de altura y se colocan a una distancia de 3 metros lineales, por lo que se requieren unas 3,000 varas (conocidos como tutores) por hectárea.

En el estado de Guerrero se siembran aproximadamente 664 hectáreas de jitomate, lo que equivaldría a cortar en un solo ciclo (2 ciclos/año) 1,992,000 arbustos de otate.

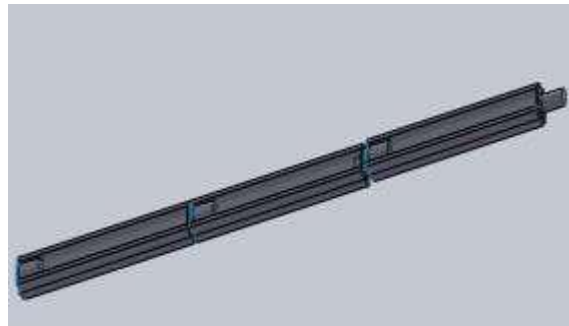
En la República Mexicana se siembra un promedio de 51,579 hectáreas, lo que equivaldría a cortar 154,737,000 arbustos de otate.

**Figura 26** Cultivo de jitomate empleando tutores



Para combatir estos problemas, la Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero, diseña y crea un tutor de plástico para el cultivo de jitomate, utilizando maquinaria y equipo para tal fin. Además, se fomenta una conciencia ecológica en la comunidad universitaria. Se recolectan las botellas de plástico que se consumen en las diferentes escuelas de los niveles de preescolar, primarias, secundarias y bachillerato. Una vez recolectadas estas botellas de plástico de Polietilentereftalato (PET), se clasifican y se procede a triturar en molinos, creando una hojuela de plástico de alrededor de 5 cm de diámetro, para posteriormente realizar una mezcla del PET con material virgen de plástico de polipropileno (PP) y producir así el tutor de plástico, utilizando una inyectora de plástico.

**Figura 26.1** Tutores de PET producidos en la máquina de inyección de plástico



Al tener un material nuevo, es necesario conocer las propiedades físicas y mecánicas del tutor de plástico, por lo cual es necesario desarrollar la metodología para la determinación de dichas propiedades para garantizar su uso, factibilidad y aplicación en los cultivos de jitomate. Debido a ello, se hace necesario entonces realizar pruebas mecánicas y análisis numéricos para determinar cuál será el comportamiento de los tutores de plástico propuestos, una vez que sean sometidos a la carga y a las condiciones de trabajo de su entorno real. Por medio de la simulaciones numéricas se pueden ensayar los modelos tridimensionales de piezas y ensamblajes al mismo tiempo que se definen conceptualmente la geometría de los mismos.

Asimismo, se puede validar el diseño sin necesidad de fabricar un prototipo físico y tener conocimiento exhaustivo del mismo antes de su existencia. Se puede acortar el tiempo de definición de un producto con la certeza de que el diseño es el adecuado y que soportará las condiciones de uso a las que estará expuesto durante su uso (Gómez, 2010).

## 26.1 Metodología empleada

La metodología que se siguió en la realización de este trabajo, fue efectuar pruebas experimentales en una máquina con probetas de plásticos (tutor), y por otro lado, simulaciones numéricas en el software ANSYS Workbench®, con base en el Método del Elemento Finito. La finalidad es obtener un conocimiento más claro sobre las propiedades mecánicas del nuevo plástico obtenido.

### Método experimental

Con la finalidad de registrar y conocer las propiedades mecánicas del polietileno modificado a partir del PET, se realizaron pruebas con especímenes del tutor en la máquina de ensayos universal de la Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero. Esta máquina permite obtener datos del material de la probeta que esta siendo ensayada. En este artículo se reportan los resultados obtenidos como producto de diferentes combinaciones de polietileno con otros injertos de plástico, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del nuevo plástico obtenido, como por ejemplo, elevar el esfuerzo de ruptura. La siguiente figura muestra la máquina empleada para tal fin.

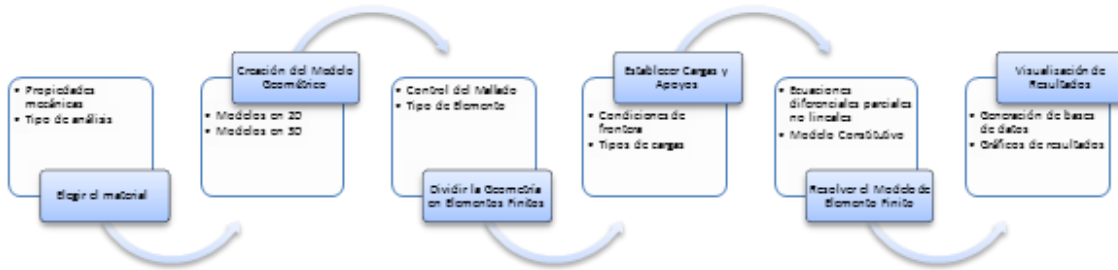
**Figura 26.2** Máquina universal de ensayos, marca Shimadzu modelo UH-300 kNI, con capacidad de carga de 300 kN



### Método numérico

El software ANSYS Workbench® es una implementación de las simulaciones de elementos finitos. Sus funcionalidades incluyen análisis estructurales, dinámica de fluidos, electromagnetismo, térmicos, etc. (Lee, 2010). La metodología de Elemento Finito consiste en varias etapas, como a continuación se describe en el esquema.

**Figura 26.3** Metodología del Elemento Finito



**26. 2 Resultados obtenidos**

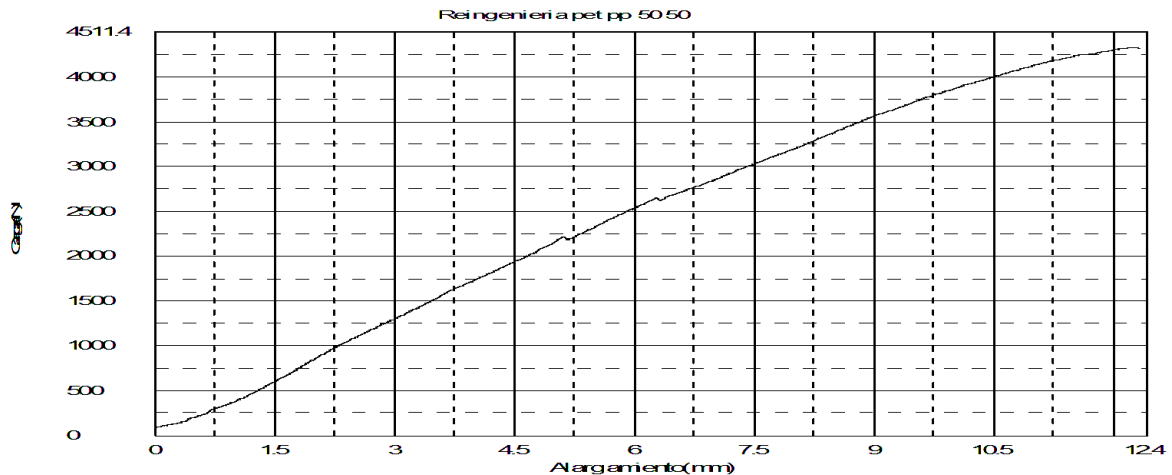
Las siguientes tablas y figuras presentan los resultados obtenidos al variar las proporciones de polipropileno con mezclas de otros plásticos. Se demuestra claramente el cambio en las propiedades mecánicas al realizar tal variación de componentes.

Resultados experimentales

**Tabla 26** Resultados experimentales de los especímenes del tutor

Max._Carga	Max._Despl	Max._Esfuerzo	Max._Deformacion	Rotura_Carga	Rotura_Despl	Rotura_Esfuerzo	Rotura_Deformacion
N	mm	N/mm2	%	N	mm	N/mm2	%
4338.00	12.2680	7.88727	4.90720	4328.06	12.3180	7.86920	4.92720

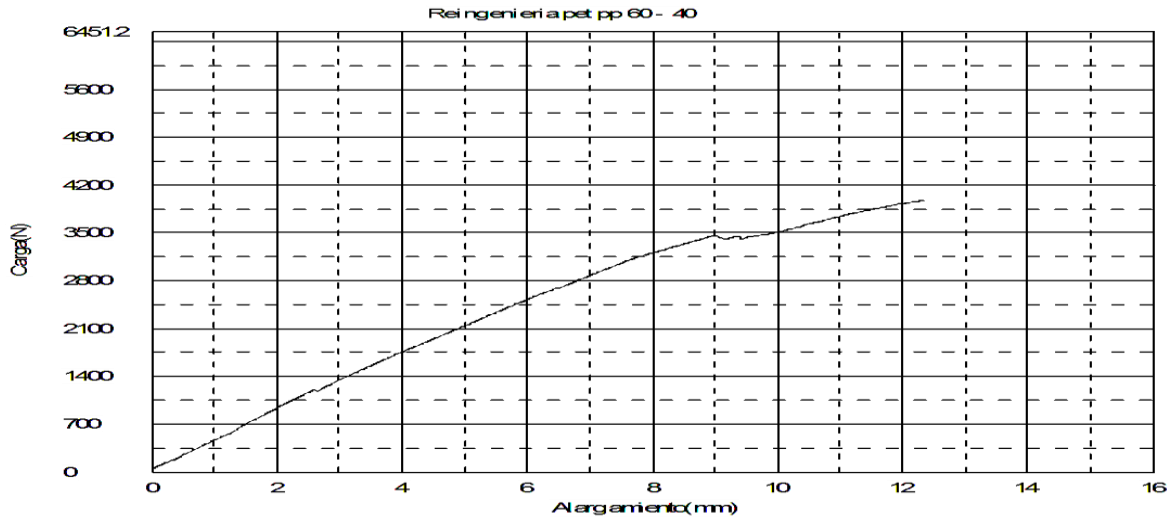
**Grafico 26** Prueba de Tensión a la Mezcla PET PP (polipropileno) 50-50



**Tabla 26.1** Resultados experimentales de los especímenes del tutor

Max._Carga	Max._Despl	Max._Esfuerzo	Max._Deformacion	Rotura_Carga	Rotura_Despl	Rotura_Esfuerzo	Rotura_Deformacion
N	mm	N/mm2	%	N	mm	N/mm2	%
3988.31	12.3560	7.25148	4.94240	3988.31	12.3560	7.25148	4.94240

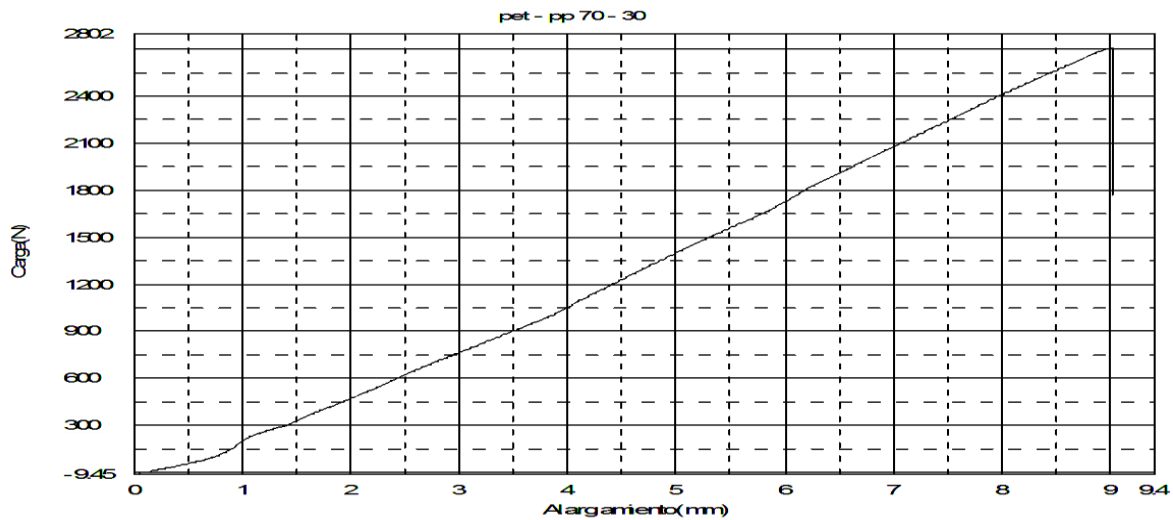
**Grafico 26.1** Prueba de Tensión a la Mezcla PET PP 60-40



**Tabla 26.2** Resultados experimentales de los especímenes del tutor

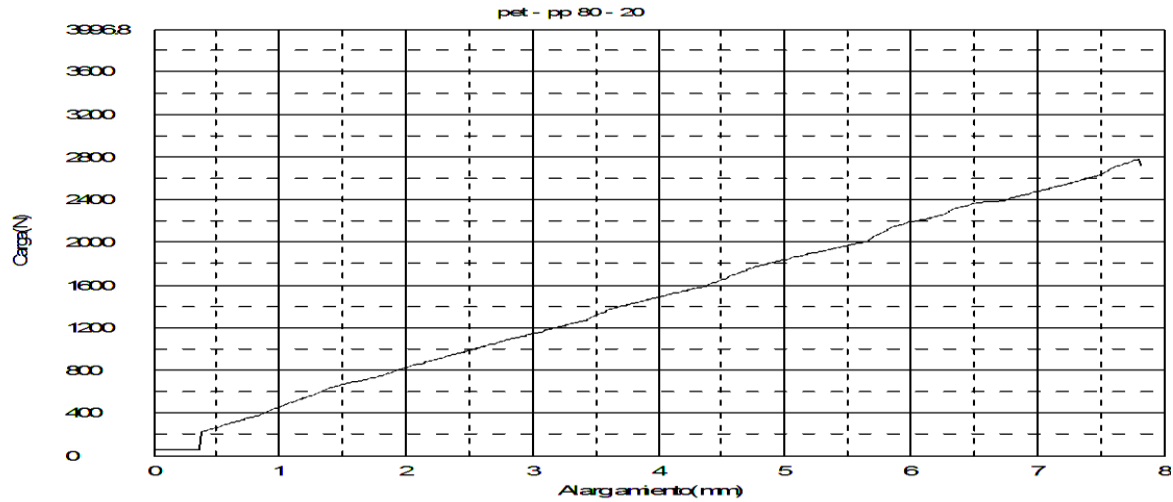
Max_Carga	Max_Despl	Max_Esfuerzo	Max_Deformacion	Rotura_Carga	Rotura_Despl	Rotura_Esfuerzo	Rotura_Deformacion
N	mm	N/mm2	%	N	mm	N/mm2	%
2713.13	9.01600	4.71848	3.60640	1780.31	9.02600	3.09620	3.61040

**Grafico 26.2** Prueba de Tensión a la Mezcla PET PP 70-30



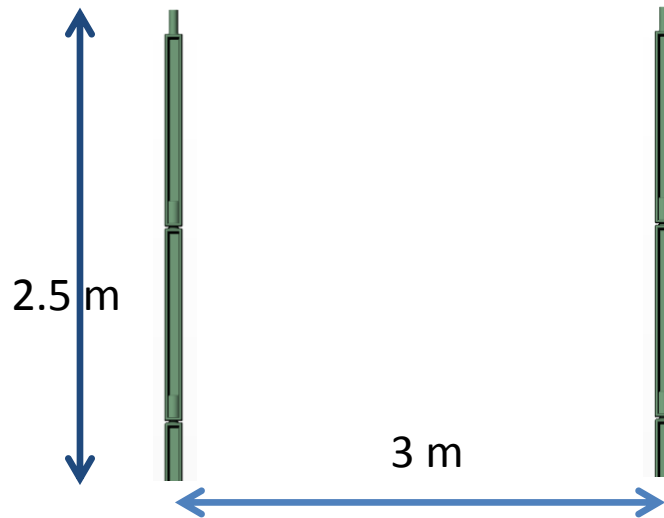
**Tabla 26.3** Resultados experimentales de los especímenes del tutor

Max_Carga	Max_Despl	Max_Esfuerzo	Max_Deformacion	Rotura_Carga	Rotura_Despl	Rotura_Esfuerzo	Rotura_Deformacion
N	mm	N/mm2	%	N	mm	N/mm2	%
2786.06	7.80600	4.84533	3.12240	2734.13	7.82800	4.75500	3.13120

**Gráfico 26.3** Prueba de Tensión a la Mezcla PET PP 80-20

Resultados numéricos

La siguiente figura presenta la colocación de los tutores tal y como se haría con varas de ocote en el cultivo de jitomates.

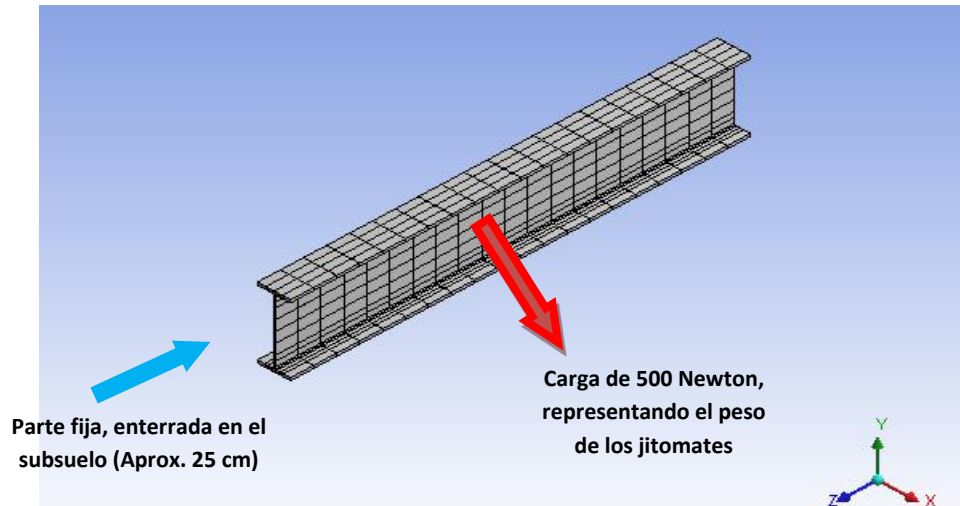
**Figura 26.4** Colocación y altura de los Tutores de PET empleados en sustitución de otate

Análisis del eslabonamiento de tutores

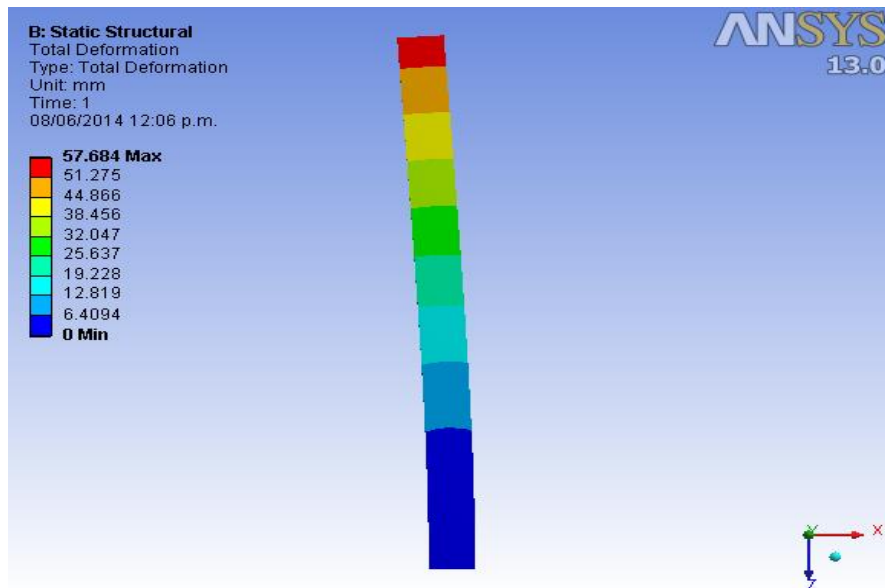
La unión de los 5 tutores (2.5 metros) será aproximada para su análisis mediante una viga en cantiliver vertical con sección transversal en I, que está sometida a un esfuerzo flexionante ocasionado por la carga uniformemente distribuida ejercida del peso de los tomates. La figura 10 representa el modelo de la viga una vez que ha sido generada la malla de elementos finitos. Asimismo, se representa la carga aplicada de 500 N (51 kg aprox.) y la parte de la viga que se denomina soporte fijo.

La figura ilustra el resultado obtenido en cuanto a deformación total producida por la carga de flexión, siendo el valor máximo de 57.684 mm y localizándose en la parte extrema superior. Por otro lado, la figura 12 muestra claramente que el valor máximo de esfuerzo resultante (Esfuerzo combinado de Von Misses) se encuentra en la parte inferior del tutor (viga) y cuyo valor es de 3.4792 MPa.

**Figura 26.5** Colocación y altura de los Tutores

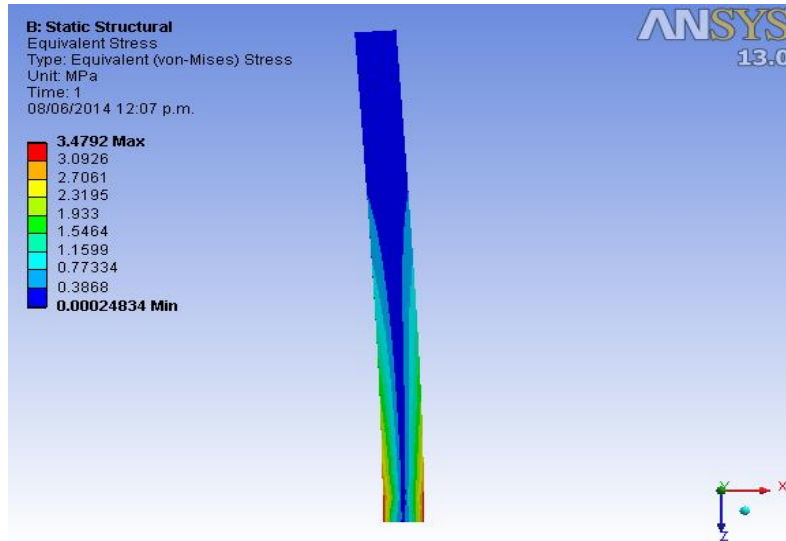


**Figura 26.6** Deformación total de la viga sometida a flexión pura





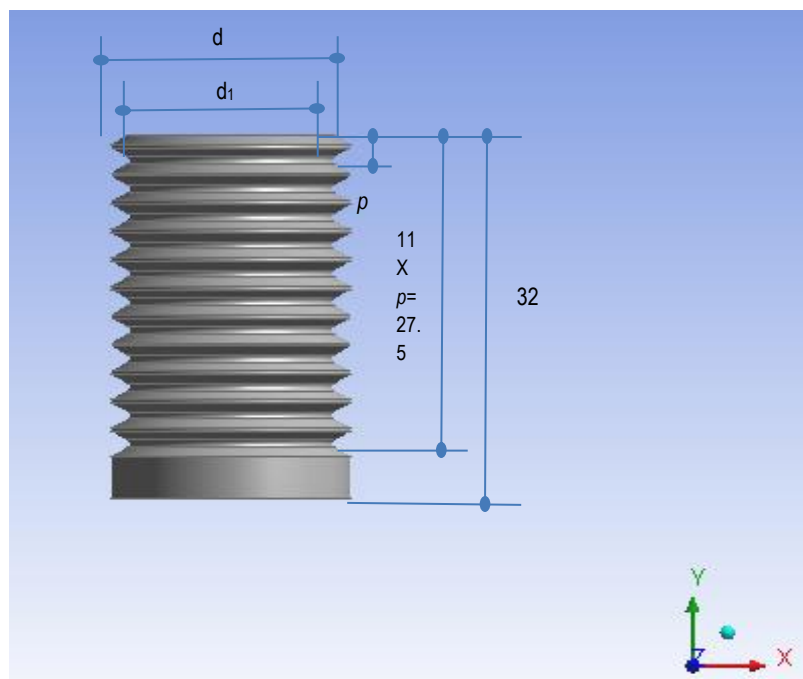
**Figura 26.7** Esfuerzo resultante de Von Mises en la viga sometida a flexión pura



#### Análisis de contacto entre dos tutores

El contacto que existe entre el extremo macho de un tutor y el correspondiente hembra del tutor adyacente, será aproximado para su análisis estructural por medio de un par roscado tornillo-tuerca, lo cual simplificará bastante la simulación y análisis de esta unión de dos tutores adyacentes. La figura 13 ilustra a detalle la nomenclatura empleada para describir el tornillo empleado en el análisis numérico, en función de sus diferentes parámetros.

**Figura 26.8** Nomenclatura de la cuerda del tornillo empleado para la simulación



Siendo,  $p = 2.5 \text{ mm}$  (Paso de la cuerda);  $d = 20 \text{ mm}$  (Diámetro nominal); y calculando la holgura de contacto entre el tornillo y la tuerca por medio de la expresión:

$$H = \left( \sqrt{\frac{3}{2}} \right) p = 2.165 \text{ mm}$$

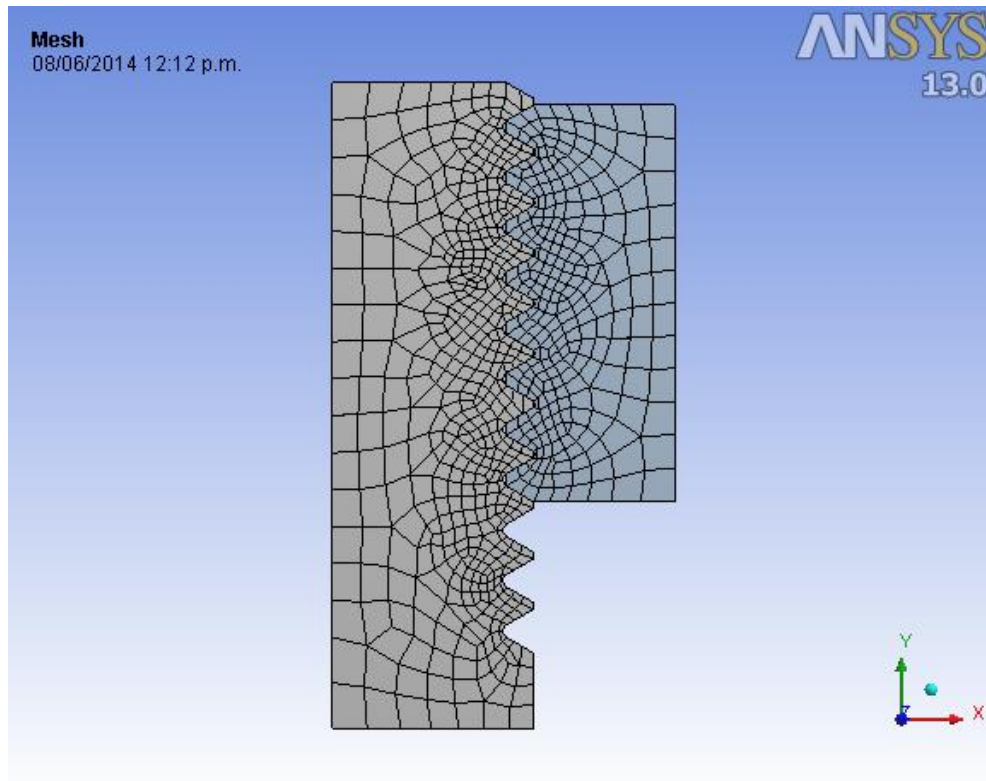
Y finalmente se determina el diámetro menor de la rosca interna a través de:

$$d_1 = d - (5/8)H \times 2 = 17.294 \text{ mm}$$

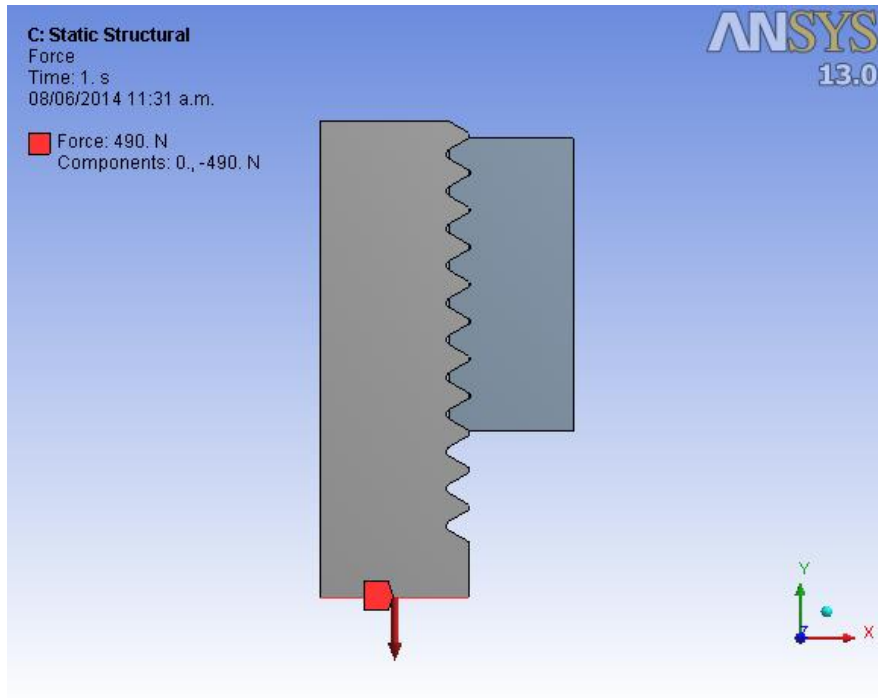
En esta simulación en 2D, se harán algunas simplificaciones. Se analizará el modelo bidimensional que representa el contacto entre dos tutores por medio de un tornillo y una tuerca. En este caso se requiere conocer cuál es el esfuerzo cortante en las roscas que están en contacto, al momento de aplicar la fuerza ejercida al ser cargado el tutor con el peso de los tomates, la cual se estima en un valor de 500 N.

Se asume que el coeficiente de fricción entre el tornillo y la tuerca es de 0.3. La figura 14 presenta la forma en que es colocada la malla en el par tornillo-tuerca, siendo más densa precisamente en la parte que está en contacto en ambas cuerdas. El valor de la carga aplicada, así como su ubicación se detalla en la figura 15.

**Figura 26.9** Mallado del contacto mecánico entre el tornillo y la tuerca

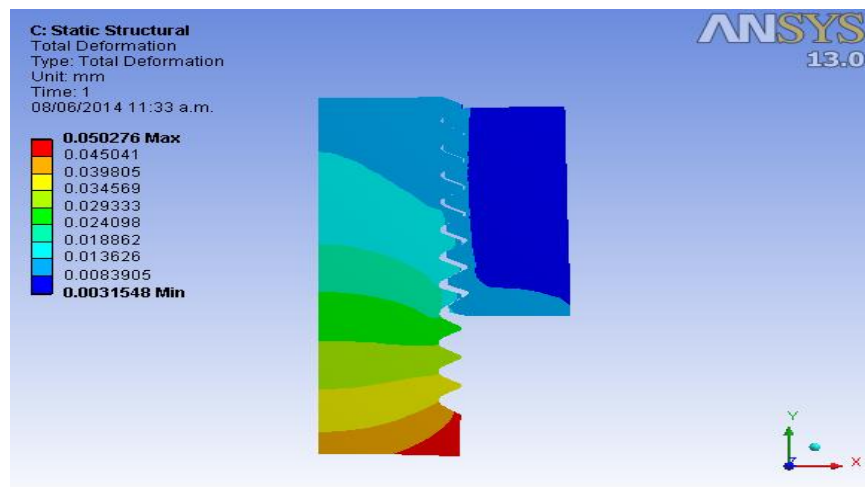


**Figura 26.10** Aplicación de la carga sobre el tornillo



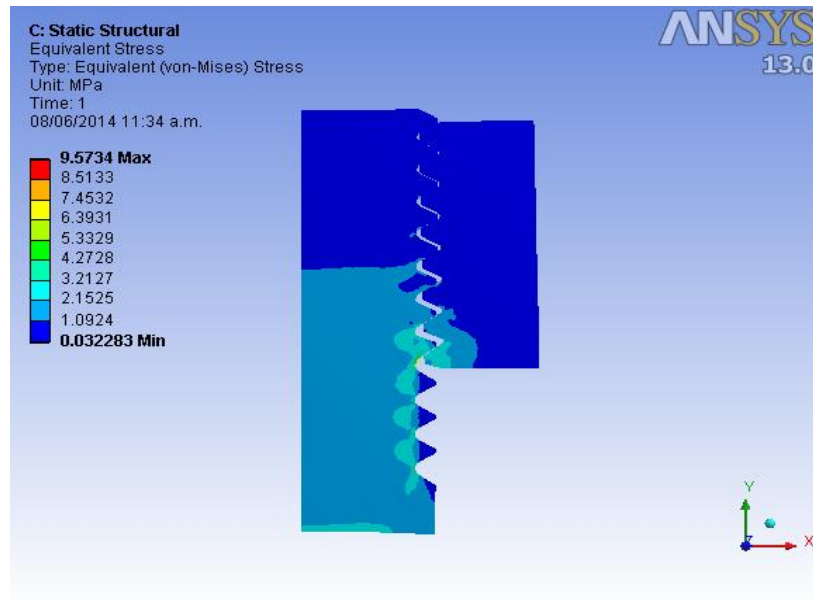
Como se puede apreciar en la figura 16, el valor de la deformación sufrida es de 0.0502 mm, lo cual es una cantidad pequeña. Teóricamente, esto representaría una condición de que el diseño es seguro y no fallaría, al menos con este valor de carga aplicada. Sin embargo, debe hacerse hincapié de que esta simulación asumió muchas simplificaciones, y es solamente una aproximación al modelo real de unión entre dos tutores conectados.

**Figura 26.11** Deformación sufrida por la carga aplicada en el contacto tornillo-tuerca.

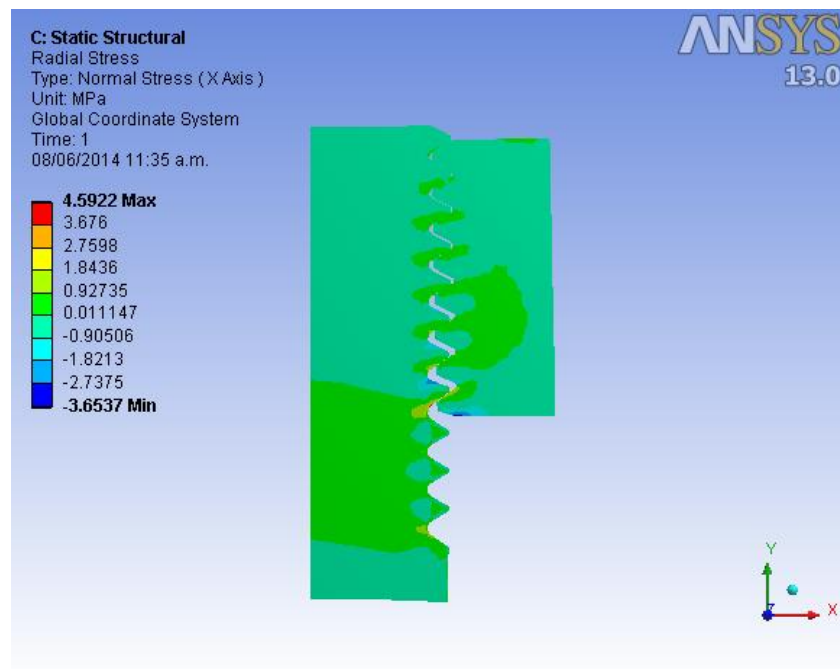


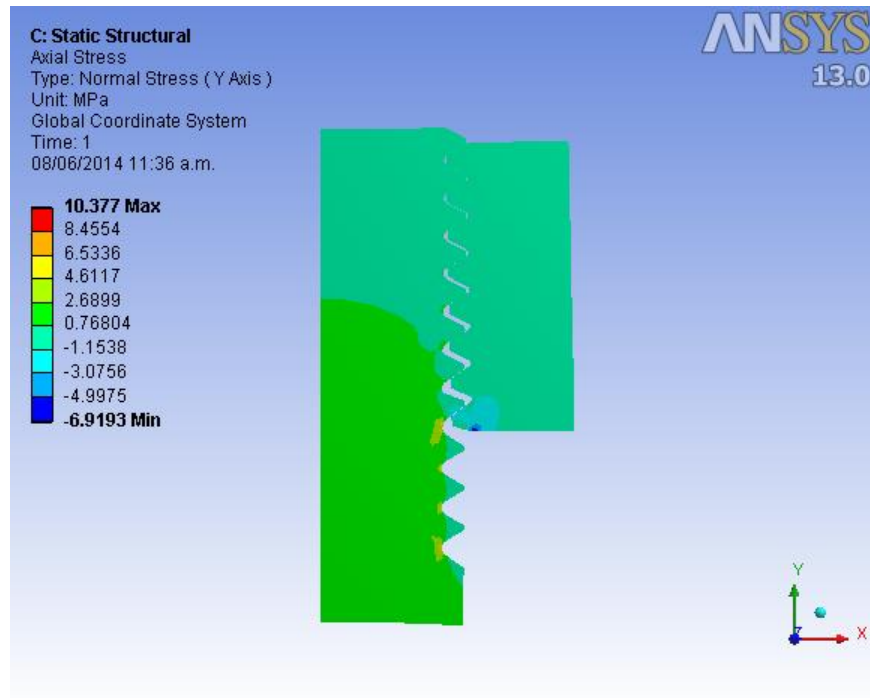
Finalmente, las figuras 17, 18 y 19 presentan el resultado obtenido en cuanto a esfuerzos se refiere. El esfuerzo máximo equivalente de Von Mises, el esfuerzo normal y el esfuerzo axial son, respectivamente, 9.5734 MPa, 4.5922 MPa y 10.377 MPa.

**Figura 26.12** Esfuerzo equivalente de Von Mises



**Figura 26.13** Esfuerzo normal (Eje x)



**Figura 26.14** Esfuerzo normal (Eje y)

### 26.3 Conclusiones

Como resultado de las simulaciones obtenidas en el software ANSYS Workbench®, se puede apreciar que simplemente demuestran ser, para estos casos de análisis, una aproximación a los modelos reales del tutor de plástico utilizado en los cultivos de jitomate, y que por lo tanto, son simplificaciones que reducen considerablemente el tiempo y complejidad de cálculo en el análisis por elemento finito. Sin embargo, tal metodología de elemento finito representa un enfoque útil cuando se tiene una geometría compleja o condiciones de carga que no pueden ser determinadas fácilmente por métodos analíticos. Es por ello, que los resultados mostrados en la sección anterior son sencillamente una aproximación de solución al problema planteado, debiendo indagar aun mas y mejor en el modelo, propiedades mecánicas del plástico, condiciones de carga reales y ensamble real de los tutores.

Por otro lado, las pruebas realizadas experimentalmente a los tutores en la máquina de ensayos universal, proporciono información muy útil al ir variando el contenido de aleación con otro injerto de plástico al polipropileno, con la finalidad de conocer cómo cambian las propiedades mecánicas con estas alteraciones a la composición química del material. Esta información del nuevo plástico obtenido fue a su vez empleada en las simulaciones numéricas, teniendo de este modo una aproximación más exacta en el análisis por medio del método del elemento finito.

El presente trabajo de investigación establece las bases para poder iniciar un análisis exhaustivo y profundo acerca del comportamiento mecánico de los tutores de plástico, el cual debería incluir un análisis de fatiga (envejecimiento del material) y de efectos de la temperatura (térmico). Sería recomendable incluso la posibilidad de considerar la vibración producida por el tendido de cables los cuales sujetan a los jitomates, es decir, realizar un análisis modal.

## **26.4 Agradecimientos**

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de la Región Norte de Guerrero, por el apoyo y recursos otorgados para la realización del trabajo reportado en el presente artículo.

## **26.5 Referencias**

Lee, H. (2010). Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 12. Schroff Development Corporation Publications, USA.

Gómez, S. (2010). SolidWorks Simulation®. Alfaomega Grupo Editor. México.