Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

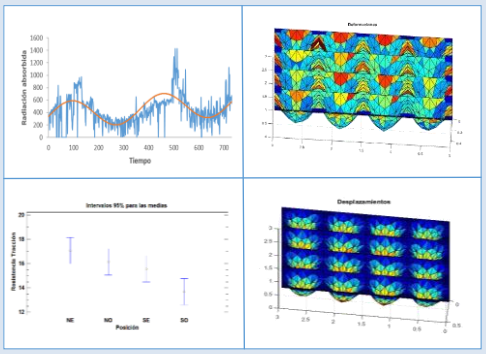
www.rlmm.org

MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO NATURAL DE UN MATERIAL POLIMÉRICO UTILIZABLE COMO CUBIERTA DE INVERNADEROS

E. Garzón[1], I. Ma. Ortiz[2], J. Castillo[3], A. Rojano[3], P. J. Sánchez-Soto[4]*

1: Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, La Cañada de San Urbano, 04120-Almería, Spain. 2: Departamento de Matemáticas, Universidad de Almería, La Cañada de San Urbano, 04120-Almería, Spain. 3: Universidad Autónoma de Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, México. 4: Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla (ICMS), Centro Mixto Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)-Universidad de Sevilla, c/ Américo Vespucio 49, Isla de la Cartuja, Parque Científico y Tecnológico Cartuja'93, 41092-Sevilla, Spain.

**email: egarzon@ual.es*



RESUMEN

Se presenta un procedimiento para la determinación del envejecimiento de un material polimérico utilizado como cubierta de invernaderos. Se llevó a cabo un seguimiento continuo de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y de la radiación global durante tres campañas. Igualmente, se tomaron muestras de diferentes zonas de la cubierta, que se han roto a tracción. Se deduce una vida útil del material polimérico de dos años, siendo radiación PAR media trasmitida del 37,44%. Sin embargo, la radiación global absorbida fue de 36,29%. Igualmente, se ha verificado que la elongación a la rotura está por encima del 500%. Este alto valor se debe a que el polímero está muy degradado. También se observó que la zona donde se ha tomado la muestra influye tanto en la resistencia a tracción como en la elongación en el punto de fluencia. Los ensayos han sido de utilidad para desarrollar un procedimiento de modelización basado en el método de mínimos cuadrados para el ajuste de los datos. El modelo propuesto presenta utilidad para el diseño de cubiertas para invernaderos y permite así predecir el grado de deterioro del material polimérico en un instante determinado, alertando también de la necesidad de renovación del mismo. De este modo, las simulaciones numéricas con elementos finitos pueden representar de forma adecuada el comportamiento mecánico de las cubiertas. Se comprobó que el comportamiento de la cubierta está en la zona plástica del material.

Palabras Clave: envejecimiento, radiométrico, mecánico, plástico.

MODELLIZATION OF THE PROCESS OF NATURAL AGING OF A POLYMER MATERIAL APPLIED FOR GREENHOUSE COVERS

ABSTRACT

It is presented a procedure to determine the aging of greenhouse cover materials constituted by a polymer material. For this purpose, it is performed a continued monitoring of the photosynthetically active radiation (PAR) and the global radiation during three campaigns. It has been studied in this research samples taken at different zones of the cover, after breakage using mechanical traction. It is deduced a useful life of the polymer of two years, being the average transmitted PAR of 37.44%. However, the absorbed global radiation is determined a value of 36.29%. Furthermore, the elongation to the breakage is above of 500%. This high value is associated to an intense degradation of the polymer material. At the same time, the zone where the sample was taken seems to influence both the strength of mechanical traction and the elongation at the fluence point. The designed tests have been useful to develop a modellization procedure based on the minimum squared method for the adjustment of the data. The proposed model can be used for the design of greenhouse covers and thus allows predict the degree of deterioration of the polymer material at every moment. It is also interesting to keep watch of the need of removing it. The numerical simulations using the finite elements method can represent adequately the mechanical behavior of the cover material. It is been also deduced in this research that the behavior of the covers is at the plastic zone of material.

Key words: aging, radiometric, mechanical, film.

Recibido: 06-06-2016 ; **Revisado:** 26-08-2016

Aceptado: 15-09-2016 ; **Publicado:** 21-10-2016

DOI: *10.5281/zenodo.8217956*

pISSN: 0255-6952 | eISSN: 2244-7113

Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2017; **37** (1): 60-82

1. INTRODUCCIÓN

Existe una dura competencia en los mercados internacionales que ha empujado, desde hace ya varias décadas, a una modernización en el sector agrícola. En este contexto surgió el invernadero, pieza fundamental de la agricultura protegida: una construcción agrícola que permite crear un entorno óptimo para el desarrollo de la planta. Su importancia radica en su capacidad de producción en zonas donde las condiciones climáticas externas o épocas del año no son favorables para los cultivos [1-4]. De las partes que integran al invernadero, la cubierta es esencial, ya que permite crear un microclima en el interior y, por ende, los resultados obtenidos en los cultivos dependerán de ella. Actualmente, tiene más uso el material polimérico polietileno de baja densidad (LDPE), empleado de manera muy amplia como material de cubierta en invernaderos, ya que posee varias características que lo hace adecuado para este fin: una buena transmisión de luz al ser transparente, buena resistencia mecánica, flexibilidad y, sobre todo, su bajo coste [5].

El problema que presenta este tipo de material polimérico es su corta vida útil, ya que se encuentra expuesto a factores ambientales (viento, radiación solar, humedad, temperatura) que degradan de manera progresiva sus propiedades mecánicas, ópticas y térmicas [6]. Por tal motivo, se realiza una constante investigación en las cubiertas con el fin de hacer un uso más eficiente y lograr una vida útil más larga con el desarrollo de metodologías para estudiar su comportamiento mecánico y los factores de degradación a los que está influenciada [5, 7]. Las características mecánicas de los materiales poliméricos y plásticos, en general, dependen tanto de los factores intrínsecos (tipo de materia prima) como de las condiciones de su transformación en lámina [8], siendo las propiedades más relevantes: resistencia a la tracción, al rasgado y al impacto [4, 9]. La primera valora la capacidad del polímero para soportar este tipo de esfuerzos, siendo importante durante su montaje en el invernadero y para resistir fuertes vientos. La segunda es relevante para evitar desgarros por cortes accidentales y, por último, la tercera es de vital importancia para resistir el granizo y el viento [10, 11].

Se entiende por duración de un polímero agrícola el tiempo de vida útil durante el que conserva, al menos, el 50 % de sus propiedades mecánicas iniciales [12]. Como se ha mencionado anteriormente, la exposición de los materiales de cubierta al medio ambiente hace que se degraden sus propiedades de forma acelerada. Muchos estudios previos se han centrado en la degradación de películas de LDPE [13, 14]. Se ha encontrado que el clima de la región, el diseño del invernadero, el microclima interior, el uso de agroquímicos y la contaminación ambiental de la zona pueden afectar severamente la vida útil del material. La combinación de varios de estos parámetros puede dar lugar a un aumento de las tasas de degradación [15]. Sin embargo, el mecanismo de degradación aún no está bien estudiado [3].

Los daños mecánicos producidos en los plásticos de invernaderos son, a menudo, causados por tormentas y grandes nevadas y estas cargas normalmente no son tenidas en cuenta [1]. Los factores de carga más importantes considerados en el cálculo de las acciones para invernaderos incluyen: viento y nieve, las debidas al granizo, debidas al cultivo y a los equipos, cargas de servicio y combinaciones de las mismas. Los materiales de cubierta se ven afectados de dos formas [4, 7]: la primera, en la cual las cargas son soportadas directamente por el material de cubierta, actuando como componente estructural de soporte de carga. La carga de granizo puede ser relacionada con la resistencia al impacto del material; las de nieve y viento pueden ser relacionadas con la curvatura, la cizalla, el desgarro, y las propiedades extensibles con el comportamiento dinámico del material. La segunda forma, indirectamente, en la cual las cargas son transferidas mediante el material de cubierta a la estructura a través del desarrollo de mecanismos de soporte de carga y redistribución. Las circunstancias de la instalación del material de cubierta pueden afectar significativamente a la carga, la cual es finalmente transferida al sistema de componentes estructurales del invernadero. El comportamiento mecánico de los materiales de cubierta para invernaderos, puede ser valorado mediante el conocimiento de métodos de ensayos convencionales y específicos para su uso [4, 7, 8].

A pesar de que existen diferencias funcionales importantes, los métodos de ensayo usados para plástico en general se usan también para cubiertas de invernadero. Los métodos estándar establecidos

©2017 Universidad Simón Bolívar

para la medida de las propiedades mecánicas tienen la intención de evaluar y conocer el comportamiento mecánico de los materiales durante largos y cortos periodos de tiempo. Para este fin, han sido propuestas pruebas cortas y largas [4, 7]. La mayoría de las normas disponibles hoy en día para la medida de las propiedades mecánicas de los materiales usados como cubierta de invernadero afectan a los correspondientes materiales genéricos sin ningún requerimiento específico. Esto incluye normas ASTM, ISO, BS y DIN. Asimismo, los invernaderos deben estar cubiertos con un material con capacidad de transmitir la luz que proporciona la energía esencial para el crecimiento vegetativo mediante la fotosíntesis [16]. Este proceso solo avanzará con luz visible o radiación fotosintéticamente activa (PAR) en la banda de frecuencias 400 a 700 µm. Por otra parte, en el desarrollo de la clorofila es imprescindible la radiación de 600 a 690 µm (rojo-naranja). La radiación de 430 a 500 µm (azul-violeta) actúa como medio desviador y las radiaciones infrarrojas superiores a 760 µm aportan el calor necesario [17, 18, 19]. Por tanto, un aumento en la degradación del polímero producirá una disminución de la radiación que llega al cultivo. Teniendo en cuenta que la productividad está íntimamente relacionada con la cantidad de luz que llega, una pequeña reducción de la luz disponible causa una disminución de la producción [20]. En consecuencia, la transmisión de la radiación solar del invernadero debe ser optimizada [1].

La transmisión de radiación a través de un material de recubrimiento se ve afectada por varios factores, incluyendo: tipo de material, deposición de polvo, cambios en el color por envejecimiento, ubicación y ángulo de incidencia de la radiación y otros, como la presencia de gotas de agua en la superficie interior de los materiales. Por ejemplo, la transmitancia de los materiales de cubierta puede ser muy reducida por la presencia de agua condensada [21-26]. El material de cubierta perfecto, además de tener buenas propiedades aislantes, debería permitir el 100% de la transmisibilidad en el rango PAR [27], lo que es inalcanzable. Las características de transmisibilidad a radiación PAR varía según el tipo de radiación, directa o difusa.

Asimismo, el comportamiento mecánico de láminas de polietileno de baja densidad (LDPE) en diversas combinaciones de tensión y presión uniformes se puede investigar experimental y numéricamente utilizando el método de elementos finitos. Las propiedades de los materiales utilizados en los modelos numéricos (módulo de elasticidad, límite de elasticidad) se basan en mediciones de las características mecánicas correspondientes de muestras de películas de LDPE, obtenidas en el laboratorio a través de métodos normalizados. Las comparaciones se llevan a cabo entre el análisis numérico y los resultados experimentales obtenidos mediante un procedimiento normalizado. En general, existe escasa información sobre el comportamiento mecánico del LDPE en condiciones de ser usado como cubierta de invernadero [28]. Se han realizado diversas investigaciones experimentales para medir parámetros importantes para caracterizar dicho comportamiento [29], pero para entender la falla o rotura se necesita forzosamente medir las deformaciones y esfuerzos del material y su localización dentro del mismo. Dicha tarea es muy complicada de realizar de forma experimental, ya que se necesitan construir maquetas del invernadero, gran cantidad de sensores y túneles de viento para generar las condiciones de carga apropiadas, lo cual lleva a grandes costes de experimentación. Ante esto se buscan alternativas a la obtención de los esfuerzos y deformaciones. Una de las alternativas más utilizadas es la de simulación numérica esfuerzo-deformación, ya que en las últimas décadas el uso de ordenadores ha creado un terreno fértil para el desarrollo de modelos matemáticos de simulación con diferentes métodos, tales como elementos finitos y otros [30-34]. El método de elementos finitos es el más usado, ya que presenta mejor versatilidad en este tipo de problemas.

La simulación numérica requiere de la caracterización de propiedades mecánicas del material. Estos datos son imprescindibles para la simulación, generalmente obtenidos en pruebas de laboratorio llevadas a cabo bajo ensayos estandarizados [8, 35]. La más común de ellas es la norma ASTM D882 [36] o su equivalente ISO 527-3 [37], adecuada para películas de menos de 0.25 mm de espesor y con probetas de anchura constante [38]. En este sentido, Wald et al. [39] realizaron simulaciones con elementos finitos para poder calcular el módulo de elasticidad de películas

©2017 Universidad Simón Bolívar

poliméricas de forma semi-analítica, donde combinaba la simulación numérica con pruebas experimentales. Por otra parte, otros autores [28, 29] llevaron a cabo simulaciones numéricas de cubiertas plásticas y las compararon con datos obtenidos experimentalmente, obteniendo resultados favorables.

En función de lo anteriormente expuesto, en el presente trabajo se ha considerado necesario tanto evaluar la transmisividad de un material polimérico a lo largo del tiempo como estudiar el ajuste a un modelo matemático de la transmisión de la radiación solar en función de dicho parámetro, además de evaluar cómo varían las propiedades mecánicas con la posición de la muestra en la estructura de un invernadero. De este modo, se consigue realizar una modelización del comportamiento mecánico mediante elementos finitos, en diferentes períodos de vida útil del polímero y se pueden realizar deducciones de interés aplicado en este tipo de estudios.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en un invernadero de cubierta plana de tres metros de altura, situado en el término municipal de Almería (España), con orientación de su eje longitudinal Este-Oeste y con soportes interiores y laterales de acero galvanizado de 3,25 cm de diámetro, con 3 m de separación entre sí. Las dimensiones de la nave son de 45 m de largo por 12 m de ancho, lo que supone una superficie total invernada de 540 m^2 (Fig. 1).

Se colocó una lámina de un material plástico de tipo LDPE obtenido por extrusión, de color blanco y de 880 galgas de espesor. Para simular la degradación del plástico en condiciones de campo se han aplicado tratamientos con sustancias químicas empleadas como pesticidas en cultivos de invernadero, como permitrina y metansodio, cada 15 días.

En el interior del invernadero se colocaron dos sensores de temperatura y uno de humedad distribuidos de forma simétrica, tal y como se muestra en la figura 1. Existe una estación meteorológica exterior con sensores de radiación PAR y global a diferentes alturas, de las que se han tomado las medidas para dos metros, que tiene aproximadamente la altura de los sensores en el interior del invernadero. Igualmente, en el interior y debajo de cada plástico se ha colocado un sensor de radiación PAR y un piranómetro para medir la radiación global. Los sensores se colocaron en la banda sur del invernadero debido a que recibe mayor radiación directa.

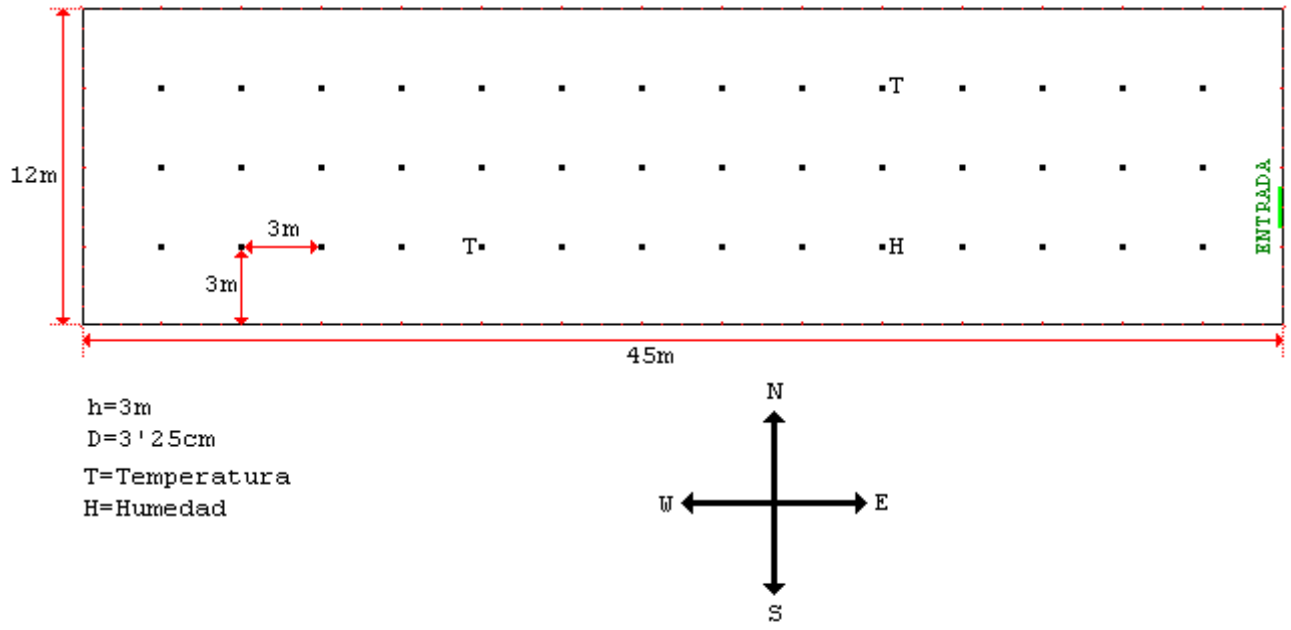


Figura 1. Esquema de la instalación y distribución de los sensores.

Todos los datos de los sensores son conducidos hasta una unidad central de recogida y proceso de datos donde se van almacenando en ordenador. Este está dotado de una tarjeta de adquisición de datos, que toma una medida cada diez segundos, teniendo una capacidad para almacenar datos durante diez días. Estos datos se recogen periódicamente y se filtran con un programa informático para eliminar posibles distorsiones en las medidas.

Debido a la gran cantidad de suciedad acumulada en la cubierta de los plásticos, durante el ensayo, se procedió a la limpieza el 1 de mayo. Los propios sensores se limpiaron el 2 de junio del mismo año.

Para analizar la pérdida de transmisividad del polímero comparamos los datos de la estación meteorológica exterior con los datos obtenidos en el interior del invernadero, obteniéndose así curvas que reflejan en tanto por ciento la pérdida de transmisividad. El análisis estadístico de este parámetro se hizo a través de un análisis de la varianza y las medias se compararon con el test de mínimas diferencias significativas (MDS).

2.1 Ajuste de la radiación PAR y Global absorbida a un modelo matemático. Modelo basado en el método de aproximación por mínimos cuadrados

Para el cálculo de este modelo se parte de dos hipótesis fundamentales. La primera es que la absorción de cualquier plástico aumenta con el tiempo como resultado de su envejecimiento, y la segunda, que esta absorción depende de la época del año concreta, dado que la radiación está íntimamente ligada con la posición del sol y el ángulo de incidencia de los rayos solares [19], tal y como se muestra en la figura 2. En la estación de verano los días son más largos y el sol está muy elevado; sin embargo en invierno, como la duración del día es más corta, las radiaciones llegan más inclinadas a la superficie terrestre.

De estas dos hipótesis de trabajo, y de entre la gran multitud de combinaciones posibles, se busca una función que sea combinación de una función de tipo lineal y otra de tipo sinusoidal. La parte lineal representa el aumento de la absorción del polímero con el tiempo; la parte sinusoidal representa la dependencia de la absorción respecto al ángulo de incidencia de los rayos solares, de modo que la absorción máxima se tendría en el solsticio de verano, y la mínima en el solsticio de invierno. Así, la función buscada debe ser de la siguiente forma:

$$f(t) = a \cdot t + b + c \cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \qquad t \in [0,730] \tag{1}$$

Dónde t es el tiempo expresado en días, que varía entre t=1 y t=730 (el primer día en que se tomaron datos, en concreto en este caso es el 21 de marzo).

Para el cálculo se toma el periodo de dos años exactamente, con el fin de simplificar la función sinusoidal y tomar una de periodo de 365 días, por lo que se comienza el 21 de marzo y se acaba el mismo día (dos años más tarde). Como se empieza en el equinocio de primavera esto implica unas condiciones tales que para el tiempo t=1 el seno del ángulo se anula en ese punto, y para el t=365 se anula de nuevo. Lo mismo ocurre para el 21 de septiembre t=186. Sin embargo, en el solsticio de verano y de invierno estos valores son máximos para el seno.

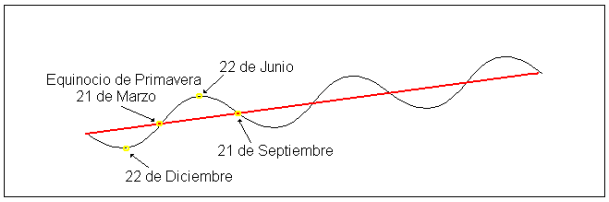


Figura 2. Esquema de la variación en la radiación absorbida por un polímero a lo largo del tiempo.

Si h(t) es la función que nos da los datos de la radiación absorbida en el día t, para cierto tipo de cubierta de invernadero, el método de los mínimos cuadrados, nos conduce al siguiente sistema (PAR o Global):

$$\begin{aligned} \langle h(t) - f(t)/1 \rangle &= 0 \\ \langle h(t) - f(t)/t \rangle &= 0 \\ \left\langle h(t) - f(t)/sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right) \right\rangle &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

Donde $\langle , \rangle$ representa el producto escalar discreto de las funciones definidas en los puntos t=1,2,.....,730. Si se realizan los productos escalares de la ecuación 2 se llega al siguiente producto:

$$\begin{aligned}
&\sum_{t=1}^{731}\left[h(t)-a\cdot t-b-c\cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)\right]\cdot 1=0\\
&\sum_{t=1}^{731}\left[h(t)-a\cdot t-b-c\cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)\right]\cdot t=0\\
&\sum_{t=1}^{731}\left[h(t)-a\cdot t-b-c\cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)\right]\cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)=0
\end{aligned} \qquad (3)$$

Este sistema lineal tiene una única solución (a, b, c) que nos proporciona la función f(t) que mejor se ajusta por mínimos cuadrados a los valores de la radiación absorbida de cada día. La f(t) se podrá utilizar para predecir el valor de la radiación según el material de cubierta de invernadero. Para medir la bondad del ajuste se utiliza el coeficiente de determinación R^2.

2.2 Ensayos mecánicos

Para la determinación de las propiedades a tracción del polímero experimental, se han extraído diferentes muestras del film 40 meses después de la instalación del mismo. Las muestras se han tomado tal y como se muestran en la Figura 3. De un ancho de banda de dos metros, se han recortado muestras de 40x40 cm para su posterior estudio en el laboratorio.

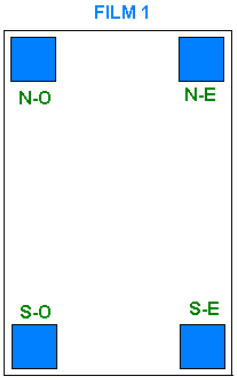


Figura 3. Esquema de la toma de muestras para el ensayo a tracción.

La estructura interna del polietileno varía en función de la orientación de las cadenas de etileno que lo componen, y al estar fabricado mediante el procedimiento de extrusión [20], posee diferentes propiedades mecánicas en su eje transversal y longitudinal. Por ello se deberían de haber anotado durante la toma de muestras la orientación de las mismas, pero al no haber sido tenido en cuenta esto, se procederá a un análisis individual de cada muestra mediante un análisis estadístico de la varianza y un test de mínimas diferencias significativas (MDS).

Para el estudio de la resistencia a tracción, tal y como se indica en UNE-EN ISO 527-1 [40], se deben elaborar 5 probetas para cada muestra de polímero en cada una de las direcciones significativas de la misma. En cada una de las muestras se ha considerado un eje de coordenadas cartesiano, y se han tomado 5 muestras en la dirección del eje de ordenadas y 5 probetas en la dirección del eje de abcisas.

A partir de ahora, para nombrar las muestras del ensayo se denominaran con la siguiente nomenclatura: (nº de film: 1)-(posición relativa de la muestra en el invernadero: NW, NE, SW ó SE)-(dirección de corte de la probeta en cada muestra: x ó y).

La preparación de las probetas según UNE-EN ISO 527-3 [41] se ha troquelado de forma que los bordes queden lisos y sin entallas; utilizando una lupa de pocos aumentos para la verificación de la ausencia de entallas. Para el corte se ha utilizado una cuchilla para cortar las probetas en la forma requerida, y proporcionar bordes rectos, limpios y sin imperfecciones visibles. Para recortar las probetas se han utilizado plantillas dibujadas según las dimensiones indicadas en el ensayo correspondiente.

El espesor de las probetas tal y como indica UNE-EN ISO 521-1 [40], se ha medido mediante un micrómetro con una precisión de 0,01 mm, y la anchura mediante un calibre con una precisión de 0,05. Se deben medir tanto la anchura *b*, con una aproximación de 0,1 mm, como el espesor *h*, con una aproximación de 0,02 mm, en el centro de cada probeta y a 5 mm por cada extremidad de la longitud de referencia. Se registran los valores máximos y mínimos para la anchura y el espesor de cada probeta, así como las medias aritméticas, que se deben utilizar en los cálculos.

La probeta se coloca en las mordazas, teniendo cuidado de alinear el eje longitudinal de cada probeta con el eje de la máquina de ensayo. Se aprietan las mordazas uniformente con el fin de evitar el menor deslizamiento de la probeta. La probeta no se debe someter a grandes preesfuerzos antes del ensayo. Tales preesfuerzos previos se

©2017 Universidad Simón Bolívar

generan durante el cintrado de la probeta o son provocados por la presión de apriete de las mordazas.

Con el fin de obtener un mayor número de datos, se han sometido a las muestras a dos ensayos diferentes: en el primer ensayo a tracción se han calculado el esfuerzo máximo a tracción, el esfuerzo en el punto de fluencia, la elongación en el punto de fluencia y las curvas de esfuerzo-deformación de cada una de ellas; en el segundo ensayo se ha obtenido la elongación máxima en el punto de rotura.

Los esfuerzos (σ) se calculan sobre la base del área de la sección transversal inicial de la probeta:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{4}$$

Donde F es la fuerza medida correspondiente medida en Newton, σ es el valor del esfuerzo en tracción correspondiente expresado en megapascales (MPa), y A es el área de la sección transversal inicial de la probeta, en milímetros cuadrados.

Las deformaciones (ε) se calculan sobre la base de la longitud de referencia de la probeta:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \qquad \varepsilon_{(\%)} = 100 \times \frac{\Delta L_0}{L_0} \tag{5}$$

Donde ε es el valor de la deformación unitaria correspondiente expresada como una relación sin dimensiones o en porcentaje; L_0 es la longitud de referencia de la probeta expresada en milímetros; ΔL_0 es el incremento de la longitud de la probeta entre las marcas de referencia, en milímetros.

Se calculan las medias aritméticas de los resultados de ensayo, las desviaciones típicas y los intervalos de confianza al 95% de los valores medios, según el procedimiento operatorio dado en la norma ISO 2602 [42].

Para determinar la variabilidad espacial de las propiedades mecánicas de los plásticos, los resultados obtenidos por ambos ensayos han sido sometidos a un análisis estadístico de la varianza y un test de mínimas diferencias significativas (MDS), considerando dos posibles factores que producen esta variabilidad en las propiedades mecánicas: el primero de ellos es la posición de la muestra dentro de invernadero (NW, NE, SW, SE), y el segundo factor, reseñado ya con anterioridad, es la orientación de las cadenas de etileno.

2.2.1 Ensayo de resistencia a tracción: curvas de esfuerzo-deformación, esfuerzo máximo, esfuerzo en el punto de fluencia y elongación en el punto de fluencia

Dado que la elongación del polietileno puede llegar hasta el 500% [4, 7] y que la carrera máxima de la máquina de ensayos disponible en la Universidad de Almería es reducida, en esta prueba no se ha calculado el esfuerzo en el punto de rotura ni la elongación en el punto de rotura.

La probeta utilizada es de tipo 2 tal y como indica UNE-EN ISO 527-3 [41], con una longitud total de 150 mm, una anchura de 25 mm, una distancia entre mordazas de 100 mm y una distancia entre marcas de 50 mm.

Las probetas han sido elaboradas según norma UNE-EN ISO 291 [43] en una atmósfera normalizada a “temperatura ambiente 25ºC”, con un tiempo de acondicionamiento de al menos 4 horas.

La máquina utilizada para el ensayo es una HOUNSFIELD SERIE S, modelo H5KS-S, con las siguientes características conforme con la norma ISO 5893 [44] con un Medidor de fuerza Máxima: 500 N, Fuerza mínima: 0,5 Kgf, Resolución en fuerza: 1/320.000, Precisión en fuerza: ±0.5%, Rango de muestreo de fuerza: 200Hz, Resolución en extensión: 0,001 mm, Precisión en extensión: ±0,01 mm, Precisión del sistema de velocidad: ±0,05%.

El sistema de medida de la extensión se realiza mediante un encoder de precisión. La máquina está equipada con un servomotor de 500 W para la medida de la velocidad. Para la obtención de la curva de esfuerzo-deformación, la máquina está conectada a un computador, que registra todos los datos de fuerza y elongación y los representa conjuntamente para las 5 probetas de cada material. La velocidad de ensayo se ha ajustado a 500 mm/min.

©2017 Universidad Simón Bolívar

2.2.2 Ensayo de elongación máxima en el punto de rotura

El siguiente ensayo se realizó en el Laboratorio de Control de Calidad de la Consejería de Transporte y Obras Públicas de la Junta de Andalucía.

Se ha utilizado una probeta en forma de altera dado que la elasticidad del material sobrepasa la capacidad de estiramiento de la máquina, la probeta utilizada según UNE-EN ISO 527-3 [41] es la tipo 5.

Se ha empleado una máquina electromecánica de 100 KN, marca IBERTEST, modelo ELIB-100/S. La máquina dispone de un equipo de medida y control digital de fuerza. La transmisión de la fuerza al equipo de medida se realiza mediante una célula de carga de 10 t. Para la escala más pequeña de funcionamiento (10 KN), la carga mínima es de 0,2 KN, y la resolución de la lectura de 0,01 KN.

Para medir la elongación, la máquina está provista de un dispositivo electrónico que mide la carrera total desde el momento del inicio del ensayo con un error de ± 1 mm. Las mordazas están dotadas de un sistema que ejerce mayor presión conforme aumenta la fuerza. La velocidad utilizada para la realización del ensayo es de 200 mm/min.

2.3 Simulación numérica del comportamiento mecánico

Para la simulación numérica se empleó el método del elemento finito que según Chapra and Canale [45] sigue una metodología general, independientemente del tipo de problema que se quiera resolver. En la figura 4 se muestra tal metodología.

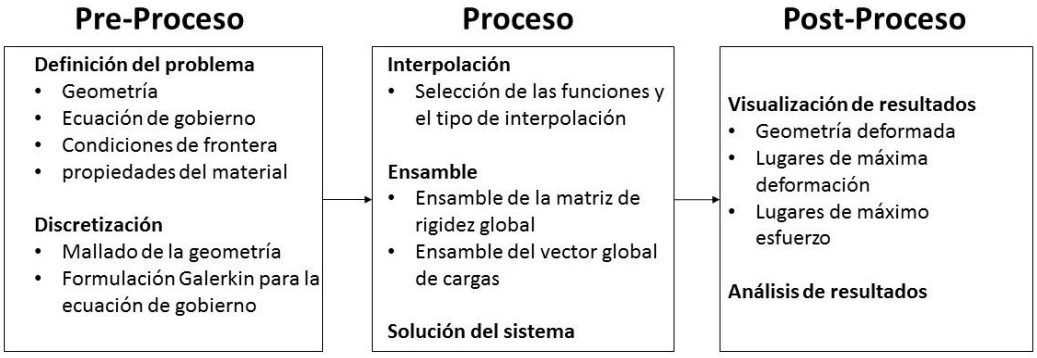


Figura 4. Metodología para la implementación del método del elemento finito.

2.3.1 Pre-Proceso

2.3.1.1 Geometría y discretización

Para los fines de simulación solo se tomó en cuenta una sección de la geometría total, debido al alto coste de computación que representaría simular el invernadero completo. Dicha sección se presenta en la figura 5. Se observan los perfiles de la estructura y alambres internos para protección contra el viento.

Se realizó el mallado de la geometría para su posterior análisis con el método del elemento finito. El mallado se presenta en la figura 6 y solo se representa la parte del plástico y en él se obtuvieron 3418 nodos usando 10814 elementos. Estos números se consideraron los óptimos en la relación: elementos-precisión.

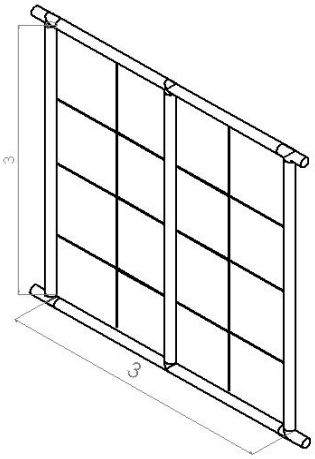


Figura 5. Sección del invernadero para el análisis.

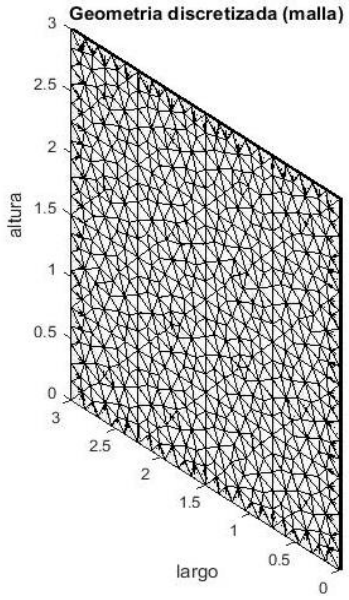


Figura 6. Geometría discretizada.

2.3.1.2 Ecuación de gobierno y discretización

En el análisis esfuerzo-deformación, el problema es determinar el desplazamiento que satisfaga las ecuaciones de equilibrio. Los esfuerzos están relacionados con las deformaciones que, a su vez, están relacionados con los desplazamientos, $\boldsymbol{\sigma(\varepsilon(u))}$. Esto conduce a resolver ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden. A la solución de tales ecuaciones se le conoce como solución exacta; tales soluciones exactas existen para geometrías y condiciones de carga extremadamente simples, para geometrías complejas y condiciones de frontera y de carga en general, la obtención de tales soluciones es una tarea casi imposible y se recurre a métodos numéricos para encontrar una solución aproximada [46].

El comportamiento del plástico se asume que es elástico lineal. Esto se hace con el fin de simplificar la ecuación de gobierno. Briassoulis [28]; Briassoulis and Schettini, [29], realizaron simulaciones en sus investigaciones para la cubierta de invernaderos suponiendo este comportamiento y llegaron a resultados satisfactorios respecto a sus datos experimentales. Entonces, asumiendo este comportamiento la ecuación de gobierno es la siguiente:

$$\frac{E}{2(1+v)}\left[\nabla^2\mathbf{u}+\frac{1}{1-2v}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{u})\right]+\mathbf{b}=0 \qquad (6)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, v es el coeficiente de Poison, $\mathbf{u}$ son los desplazamientos y $\mathbf{b}$ las fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo. Esta ecuación se obtiene combinando las ecuaciones constitutivas, ecuaciones de equilibrio y el tensor de esfuerzos.

Para implementar el método del elemento finito se necesita discretizar la ecuación de gobierno ([47]). Se utilizó la formulación de los residuos pesados para lograrlo. Se expresa el problema físico en uno puramente matemático, se sustituye el valor exacto por el aproximado y se obtiene un residuo debido al error, se multiplica la función por una función de peso y se integra para minimizar el error. La elección de la función de peso da a este método variantes, generalmente se selecciona la misma función de aproximación. A este método se le conoce como la formulación de Galerkin y la ecuación discretizada queda de la siguiente forma:

$$\int_V \boldsymbol{\sigma}^T\boldsymbol{\epsilon}dV-\int_V \boldsymbol{u}^T\mathbf{f}dV-\int_S \boldsymbol{u}^T\boldsymbol{T}dS=0 \qquad (7)$$

Donde $\boldsymbol{\sigma}$ representa las tensiones, $\boldsymbol{\epsilon}$ son las deformaciones, $\mathbf{f}$ representa las fuerzas de cuerpo y $\boldsymbol{T}$ son las fuerzas que actúan en la superficie.

Sustituyendo las funciones de interpolación para los esfuerzos y las deformaciones se llega a un sistema de ecuaciones simultáneas.

2.3.1.3 Condiciones de frontera y cargas

Las condiciones de frontera son de suma importancia, ya que de ellas dependerá en gran parte el resultado de la simulación. En este caso, la sección que se analizó se consideró como si el plástico estuviera fijo en toda la frontera y los alambres en el interior también se tomaron en consideración como restricciones. Cabe señalar que los alambres sufren también desplazamientos, aún no en la misma medida que el plástico, pero al no contar con datos experimentales sobre ello, se tomaron como restricciones sin libertad. Para las cargas se tomaron magnitudes de presiones distintas con el fin de ejemplificar el comportamiento en distintas condiciones de cargas. Las cargas que se tomaron fueron: 1 kPa, 2 kPa, 3 kPa, 4 kPa y 5 kPa.

©2017 Universidad Simón Bolívar

2.3.2. Proceso

2.3.2.1 Selección de las funciones de interpolación

La selección de las funciones de interpolación es de suma importancia, ya que de estas dependerá la convergencia del método. Lo más común es seleccionar funciones lineales para asegurar la continuidad. De esta forma los desplazamientos son calculados de la siguiente forma:

$$u = \sum N_i a_i \tag{8}$$

Donde N es la función de aproximación y a representa los desplazamientos dentro del elemento.

2.3.2.2 Ensamble de la matriz de rigidez total y vector de fuerzas

Para poder representar el comportamiento del cuerpo en su totalidad, es necesario realizar el ensamble de las matrices de cada uno de los elementos. Esto se realiza con la información de conectividad de los elementos ([46]) y se representa de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{K} \leftarrow \sum_{e} \boldsymbol{k}^{e} \tag{9}$$

Donde $\boldsymbol{K}$ es la matriz de rigidez global del cuerpo y $\boldsymbol{k}^{e}$ es la matriz de rigidez del elemento.

De la misma forma se tiene que realizar el ensamble del vector de cargas global y se representa de forma análoga.

$$\mathbf{F} \leftarrow \sum_{e} \mathbf{f}^{e} \tag{10}$$

Donde $\mathbf{F}$ representa el vector de fuerzas global y $\mathbf{f}^{e}$ representa el vector de fuerzas de cada elemento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Radiación

a) PAR

Se puede observar que la absorción media del polímero 1 fue del 37,44%. La figura 7 muestra la evolución de la radiación PAR desde el 1 de febrero del año 1 hasta el 30 de abril del año 3, tanto la recogida en el exterior (Rad PAR) como la registrada bajo el polímero 1 (RadPAR1).

En la figura 8 se presenta la radiación PAR absorbida (mediante pérdida por reflexión y absorción) para el polímero 1 a lo largo del tiempo. La figura 9 muestra el ajuste mediante una aproximación por el método de los mínimos cuadrados de los datos del porcentaje en tanto por ciento de radiación PAR absorbida por el polímero 1.

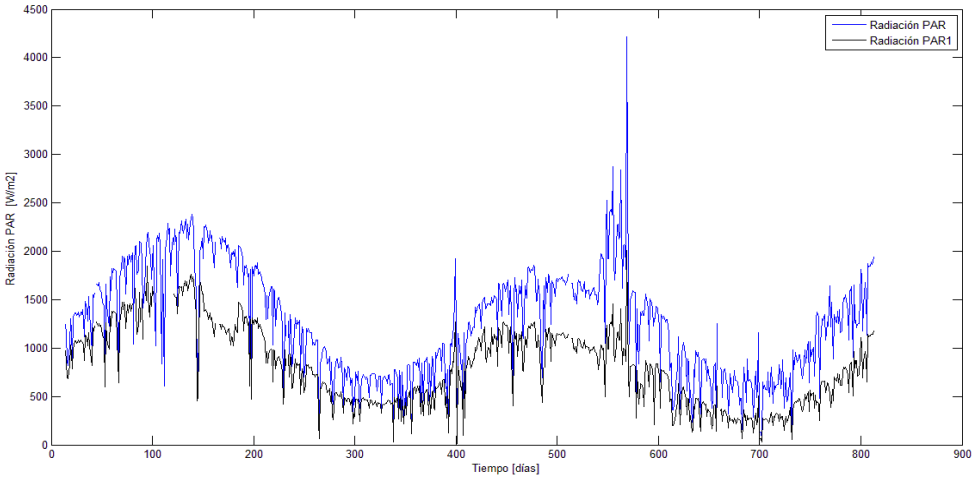


Figura 7. Radiación PAR (W/m2) recogida en el exterior en comparación con la del polímero 1 durante todo el tiempo de ensayo.

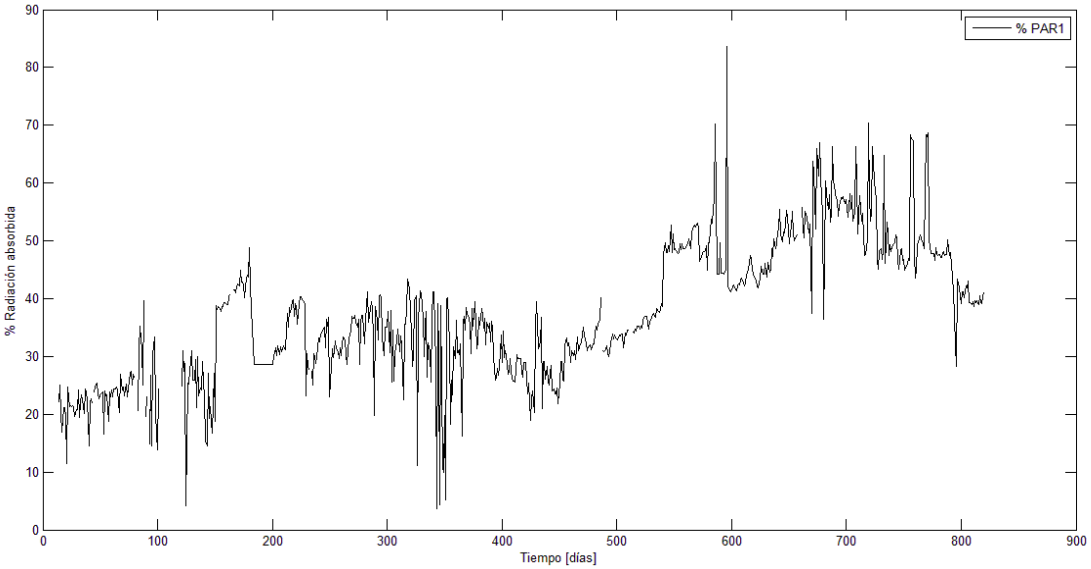
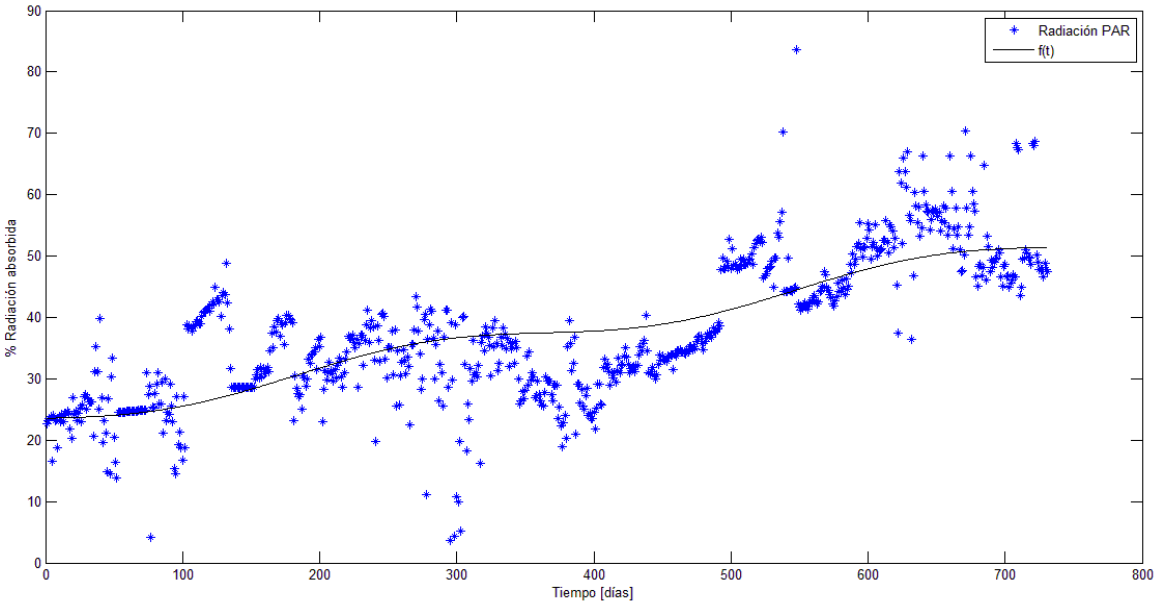


Figura 8. Porcentaje de radiación PAR absorbida en función del tiempo.



PLÁSTICO	ECUACIÓN	R^2
Polímero 1	$f(t) = 0{,}03818 \cdot t + 23{,}5531 - 1{,}863217 \cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$	0,5636

Figura 9. Ajuste del % de radiación PAR absorbida por el polímero 1 mediante el método de aproximación por mínimos cuadrados.

b) Radiación Global

Se observa que la absorción media del polímero 1 fue del 36,71%. La figura 10 muestra la evolución de la radiación GLOBAL desde el 1 de febrero del año 1 hasta el 30 de abril del año 3, en comparación con la radiación GLOBAL recogida para el polímero 1 durante el mismo periodo de tiempo.

En la figura 11 se representa la radiación global absorbida, expresada como porcentaje de la radiación Global que incide a lo largo del tiempo. La figura 12 muestra una aproximación por el método de mínimos cuadrados a los datos de absorción de radiación GLOBAL del polímero 1.

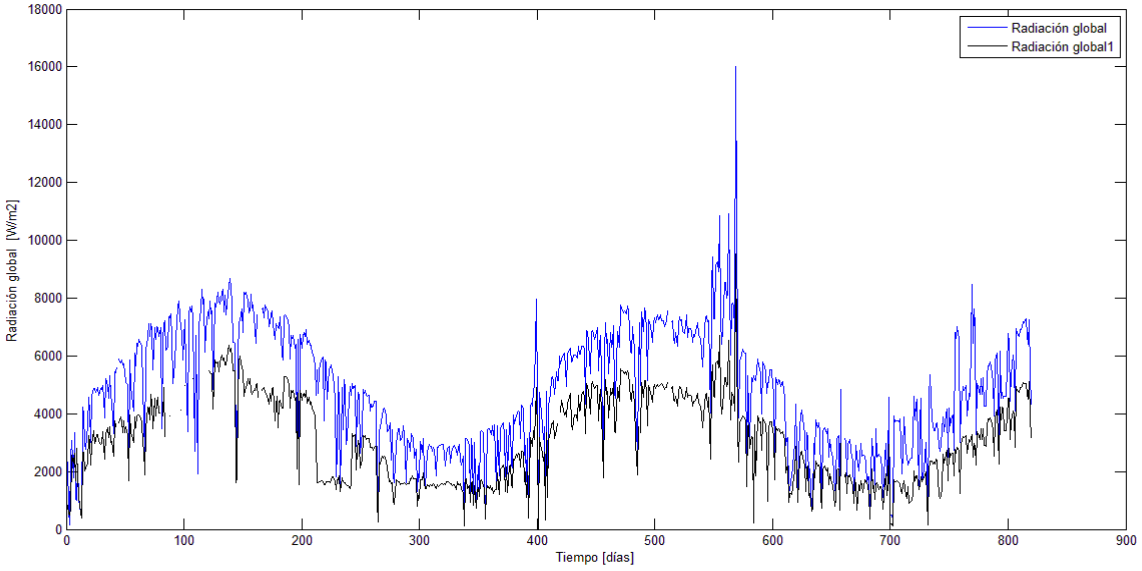


Figura 10. Evolución de la radiación GLOBAL a lo largo del ensayo.

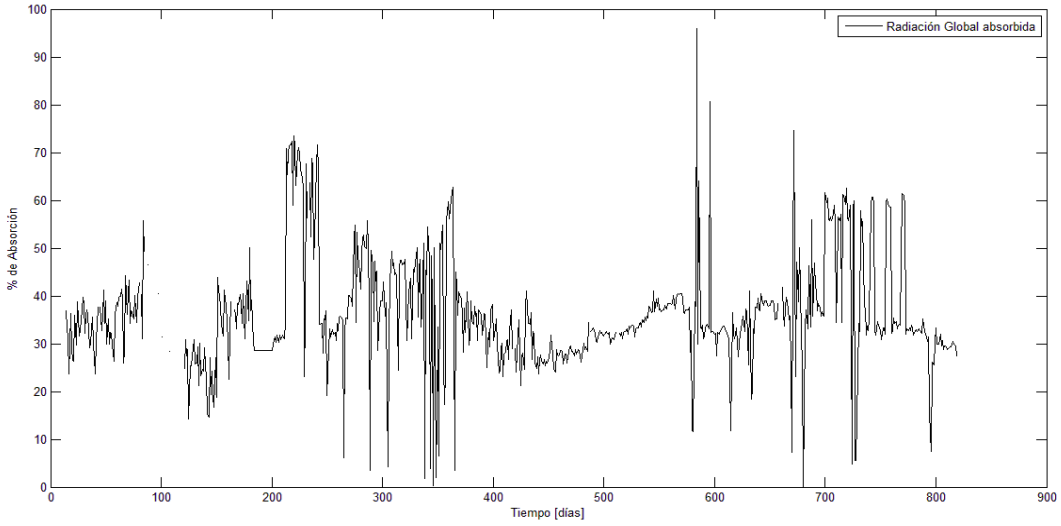
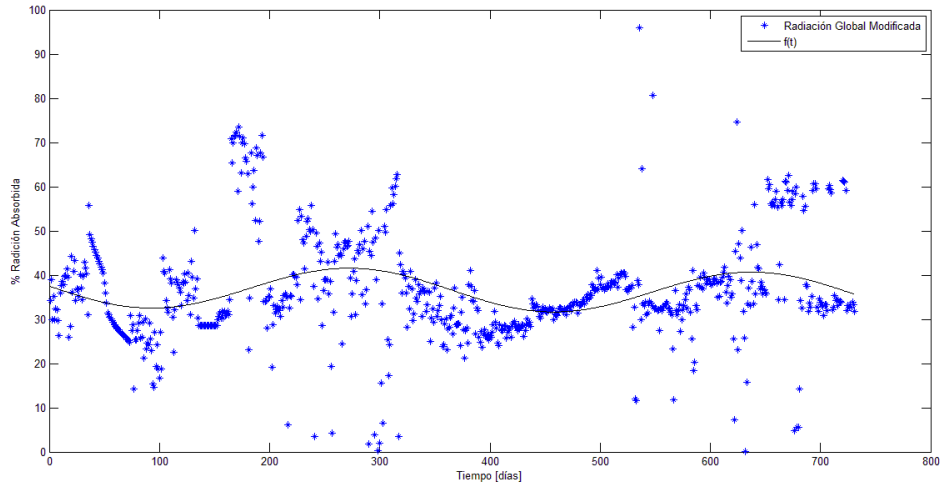


Figura 11. Porcentaje de radiación GLOBAL absorbida en función del tiempo.



PLÁSTICO	ECUACIÓN	R^2
Polímero 1	$f(t) = -0{,}00239 \cdot t + 37{,}4857 - 4{,}722129 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$	0,7005

Figura 12. Ajuste del % de radiación GLOBAL absorbida por el polímero 1 mediante el método de aproximación por mínimos cuadrados.

Del resultado de la radiación PAR, y de la radiación GLOBAL, se deduce que la vida útil del polímero 1 es de dos años ([48]). A esta conclusión se llega después de observar que la radiación PAR absorbida después del segundo año de uso es del 37,92%. Igualmente, se comprueba que la radiación GLOBAL absorbida es de 36,71%. Si se comparan estos datos con los aportados por Papaseit et al. [20], en el que la transmisión de radiación GLOBAL para un plástico es del 90% (obtenido este valor de forma experimental y bajo condiciones que no son reales en el campo), entonces se deduce que cuando un plástico absorbe el 45% de la radiación GLOBAL, ha perdido el 50% de sus valores iniciales, pierde entonces su utilidad como cubierta de invernadero para su uso en agricultura.

Los datos de la vida útil coinciden, en gran medida, con los de un Polietileno (PE) estudiado por otros autores [4, 7, 17, 20, 49, 50], con un espesor que oscilaría entre las 180-200 μm (720-800 galgas). Al poseer una duración de 2 años, se podrían tipificar como un PE de larga duración o bien un PE térmico de larga duración.

No se han encontrado antecedentes de estudios previos que indiquen la adecuación de realizar un ajuste mediante un modelo matemático de datos de radiaciones obtenidas para los plásticos de la cubierta de invernaderos. Por tanto, se debe indicar la adecuación del modelo con respecto a criterios estadísticos ([51]), mediante la estimación del coeficiente de determinación R2. Dicho coeficiente oscila entre 0 y 1, siendo 1 el valor idóneo y 0 el que indica una total inadecuación, pero se establece que este valor es aceptable a partir de 0,7. Este valor tampoco supone que realmente el modelo sea perfecto, puesto que mediante la adición de polinomios se incrementa su valor.

En el modelo matemático desarrollado mediante la aproximación por mínimos cuadrados, el valor del coeficiente de determinación es muy pequeño para la radiación PAR y Global. Pero mientras que en el caso de la radiación PAR la curva que se obtiene es muy plana, para la radiación Global sigue de forma clara la trayectoria de los datos empíricos.

3.2. Ensayo a tracción

Los resultados del ensayo se dan agrupados en

tablas en función de la propiedad mecánica indicada (Tablas 1, 2 y 3). En la tabla 4 se presenta la elongación en el punto de rotura en función de la zona muestreo y orientación de la probeta. Los resultados de la resistencia a tracción obtenidos por los plásticos durante el ensayo realizado en la Universidad de Almería (Tabla 1), están incluidos dentro de los valores dados por diversos autores: 11-20 MPa para el PELD [4, 7], 15,7-19 MPa para PE-IR [4, 7], 18 MPa para los PE termoaislantes [17].

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación [52] se comprueba que los plásticos se corresponden con un material blando y tenaz, en el que se detecta un punto de fluencia con una posterior estabilización. Estas curvas también las clasifica la norma UNE-EN ISO 527-1[40] como curvas tipo b, que se corresponden con materiales dúctiles con punto de fluencia. Los puntos de fluencia, así como el valor del esfuerzo, vienen detallados en las tablas 2 y 3.

Los datos de la elongación a la rotura obtenidos en el ensayo realizado en el Laboratorio de Control de Calidad de la Consejería de Transportes y Obras Publicas de la Junta de Andalucía, sobrepasan el valor del 500% dado por Matallana and Montero [49] y los dados por Briassoulis et al. [4, 7] que oscilan entre el 375-600% para el PELD, y el 500-700% para el PE-IR, aunque están dentro de los valores dados por este ultimo en cuanto a variación longitudinal y trasversal de los mismos de entre 640(l),100(t)%. El alto valor obtenido de los mismos, se debe a que este plástico está muy degradado, ya que se encuentra en su cuarto año de vida (Tabla 4).

Tabla 1. Resistencia a tracción expresada en MPa de las diferentes muestras.

RESISTENCIA A TRACCIÓN (MPa)			
MUESTRA	*MEDIA*	*DESVIACIÓN ESTANDAR*	*INTERVALO DE CONFIANZA 95%*
1-NE-Y	15.7	0.0763	15.6<m<15.8
1-NE-X	18.5	0.0962	18.3<m<18.6
1-NW-Y	18.0	0.6668	17.2<m<18.9
1-NW-X	14.2	3.4255	10.0<m<18.5
1-SE-Y	16.8	0.6710	15.9<m<17.6
1-SE-X	14.4	0.2497	14.1<m<14.7
1-SW-Y	13.1	2.9943	9.4<m<16.7
1-SW-X	14.3	3.3584	10.2<m<18.5

Tabla 2. Esfuerzo en el punto de fluencia expresado en MPa de cada una de las muestras.

ESFUERZO EN EL PUNTO DE FLUENCIA (MPa)			
MUESTRA	*MEDIA*	*DESVIACIÓN ESTANDAR*	*INTERVALO DE CONFIANZA 95%*
1-NE-Y	9.21	0.0890	9.10<m<9.32
1-NE-X	11.9	0.1792	11.6<m<12.1
1-NW-Y	11.8	0.2667	11.5<m<12.2
1-NW-X	9.18	0.4904	8.57<m<9.79
1-SE-Y	11.1	0.3415	10.6<m<11.5
1-SE-X	8.79	0.1276	8.64<m<8.95
1-SW-Y	8.78	0.3296	8.38<m<9.19
1-SW-X	10.2	1.2284	8.69<m<11.7

©2017 Universidad Simón Bolívar

Tabla 3. Elongación en el punto de fluencia expresada en % de cada una de las muestras.

ELONGACIÓN EN EL PUNTO DE FLUENCIA %			
MUESTRA	*MEDIA*	*DESVIACIÓN ESTANDAR*	*INTERVALO DE CONFIANZA 95%*
1-NE-Y	320	0.15220	323<m<323
1-NE-X	300	2.81500	300<m<307
1-NW-Y	290	9.05600	277<m<299
1-NW-X	260	111.3639	123<m<400
1-SE-Y	310	11.3372	291<m<319
1-SE-X	320	0.36510	322<m<323
1-SW-Y	220	150.2827	35<m<408
1-SW-X	270	48.7613	204<m<325

Tabla 4. Elongación en el punto de rotura expresada en % de cada una de las muestras.

ELONGACIÓN EN EL PUNTO DE ROTURA %			
MUESTRA	*MEDIA*	*DESVIACIÓN ESTANDAR*	*INTERVALO DE CONFIANZA 95%*
1-NE-Y	1000	190.96	776<m<1250
1-NE-X	730	146.06	553<m<956
1-NW-Y	430	136.77	265<m<605
1-NW-X	920	199.61	673<m<1169
1-SE-Y	790	143.02	610<m<966
1-SE-X	970	154.39	777<m<1160
1-SW-Y	900	162.59	693<m<1096
1-SW-X	650	74.96	558<m<744

3.2.1 Variabilidad espacial en función de la posición de la muestra

La resistencia a tracción media del polímero 1 ha sido la siguiente: para la zona de muestreo NW 16,1 MPa, para la zona NE 17,1 MPa, 15,6 MPa para la zona SE y 13,7 MPa para la zona SW (Tabla 1). Según un análisis de la varianza, existe un efecto significativo entre la resistencia a tracción del polímero 1 y la posición de la muestra (P<0,05), y según un test de mínimas diferencias significativas (MDS), se puede agrupar a los plásticos en dos categorías, la **a** compuesta por las zonas NW, NE y SE, y la zona **b** compuesta por las zonas SE y SW. El resultado para la resistencia a tracción es que ambas cumplen con una distribución normal, según los test de Kurtosis y de Skewness.

El esfuerzo en el punto de fluencia para el polímero 1 es de 10,6 MPa para la zona de muestreo NW, para la zona NE 10,5 MPa, 9,5 MPa para la zona SW y 10,0 MPa para la zona SE (Tabla 2). La distribución de ambas indica que es normal para el test de Skewness.

De forma análoga, el resultado de la elongación en el punto de fluencia media para el polímero 1 ha sido la siguiente: 274,7% para la zona NW, 313,1% para la zona NE, 313,6% para la zona SE y 243,1% para la zona SW (Tabla 3). El análisis de la varianza para la elongación en el punto de fluencia del polímero 1 indica que existe un efecto significativo entre dicha elongación y la posición de la muestra (P<0,05). Se pueden agrupar los resultados según un test de mínimas diferencias significativas en dos categorías, la **a** formada por la zona NW, NE y SE, y la **b** formada por las zonas SW y NW. Los datos se ajustan a una distribución

©2017 Universidad Simón Bolívar

normal según el test de Skewness.

A continuación, en la tabla 5 se presenta una comparación de los valores medios de la resistencia a tracción, el esfuerzo en el punto de fluencia y la elongación en el punto de fluencia.

Tabla 5. Valores medios totales de las propiedades medidas para el polímero.

PLÁSTICO	*R. TRACC. (MPa)*	*E. FLUE. (MPa)*	*ELOG. FLU. (%)*
FILM 1	15.6	10.1	286.1

3.2.2 Variabilidad espacial en función de la orientación de la probeta en la muestra

La resistencia a tracción media de las diferentes zonas de muestreo para el polímero 1 viene reflejada en la tabla 6, en la que se indica el valor medio de la resistencia en función de la orientación (MPa), y si el análisis de la varianza revela que existe un efecto significativo entre la resistencia a tracción y la orientación (P<0,05), y los tests de normalidad que cumplen.

El esfuerzo en el punto de fluencia medio de las diferentes zonas de muestreo para el polímero 1 viene reflejada en la tabla 7, en la que se indica el valor medio del esfuerzo en el punto de fluencia en función de la orientación (MPa), y si el análisis de la varianza revela que existe un efecto significativo entre la elongación en el punto de fluencia y la orientación (P<0,05), y el test de normalidad que cumple.

La elongación en el punto de fluencia medio de las diferentes zonas de muestreo para el polímero 1 viene reflejada en la tabla 8, en la que se indica el valor medio de la elongación en el punto de fluencia en función de la orientación (%), y si el análisis de la varianza revela que existe un efecto significativo entre la elongación en el punto de fluencia y la orientación (P<0,05), y el test de normalidad que cumple.

El plástico se ve influenciado por la posición de la muestra tomada para su análisis en cuanto a la relación de esta posición con la resistencia a la tracción y con la elongación en el punto de fluencia (tablas 6, 7 y 8).

Con respecto a la interacción existente entre la orientación de la probeta dentro de la muestra y las distintas propiedades, se observa que existen diferencias significativas en todas aquellas zonas en las que no lo existen por la interacción-posición de la zona de muestra-propiedades. En cambio, en las zonas en las que sí existe esta interacción zona-propiedad (1-NW y 1-SW para la elongación en el punto de fluencia, y 1-SW para la resistencia a tracción), no existe interacción entre orientación-propiedad. Se deduce entonces que en las zonas más castigadas, la orientación de las fibras no juega un papel importante en las características resistentes del material de cubierta, mientras que las diferencias entre las dos orientaciones en las zonas que no han sido tan deterioradas están patentes.

Tabla 6. Variabilidad espacial de la resistencia a tracción (MPa) en función de la orientación de la probeta con respecto a la muestra.

MUESTRA	*ORIENTACIÓN*	*VALOR MEDIO (MPa)*	*EFECTO SIGNIFICATIVO RESISTENCIA-ORIENTACIÓN*	*TEST*
1-NW	X	14,2	SI	SHAPIRO
	Y	18,0		SKEWNESS
1-NE	X	18,4	SI	SHAPIRO
	Y	15,7		SKEWNESS
1-SW	X	13,1	NO	SHAPIRO
	Y	14,3		SKEWNESS
1-SE	X	14,4	SI	SHAPIRO
	Y	16,8		SKEWNESS
	Y	16,1		

Tabla 7. Variabilidad espacial del esfuerzo en el punto de fluencia (MPa) en función de la orientación de la probeta con respecto a la muestra.

MUESTRA	*ORIENTACIÓN*	*VALOR MEDIO (MPa)*	*EFECTO SIGNIFICATIVO ESFUERZO-ORIENTACIÓN*	*TEST*
1-NW	X	9,2	SI	SKEWNESS
	Y	11,8		
1-NE	X	11,9	SI	SKEWNESS
	Y	9,2		
1-SW	X	10,2	SI	SKEWNESS
	Y	8,8		
1-SE	X	8,8	SI	SKEWNESS
	Y	11,1		
	Y	11,3		

Tabla 8. Variabilidad de la elongación en el punto de fluencia (%) en función de la orientación de la probeta con respecto de la muestra.

MUESTRA	*ORIENTACIÓN*	*VALOR MEDIO (%)*	*EFECTO SIGNIFICATIVO ELONGACIÓN-ORIENTACIÓN*	*TEST*
1-NW	X	261,7	NO	SKEWNESS
	Y	287,5		
1-NE	X	303,4	SI	SKEWNESS
	Y	322,8		
1-SW	X	204,6	NO	SKEWNESS
	Y	221,5		
1-SE	X	304,6	SI	SKEWNESS
	Y	322,6		
	Y	269,0		

3.3 Simulación numérica de resultados

Se realizó una simulación de la acción de las cargas teniendo en cuenta propiedades del polímero nuevo, y otra teniendo en consideración las propiedades medidas en los experimentos, los cuales ya se encuentran afectados por la exposición del material. En la figura 13 se muestran los resultados de los desplazamientos, simulando con una carga de 5 kPa, mostrando un patrón de desplazamiento donde se aprecia que los desplazamientos máximos se encuentran en las secciones del centro del malla formada por los alambres y la estructura, comparando los desplazamientos del polímero nuevo con el usado podemos ver que en el polímero usado se producen desplazamientos menores debido a que el material ha perdido elasticidad por el proceso de cristalización del polietileno por la exposición a rayos UV. En la figura 14 se ven los resultados de los esfuerzos correspondientes, observando que los esfuerzos mayores se presentan en los extremos, ya que ahí es donde se encuentran las restricciones de movimiento y, por lo tanto, las reacciones mayores, si se comparan los esfuerzos. Estos se producen en mayor magnitud en el polímero nuevo ya que los esfuerzos dependen de los desplazamientos y como se mencionó antes estos son mayores en el plástico nuevo.

©2017 Universidad Simón Bolívar

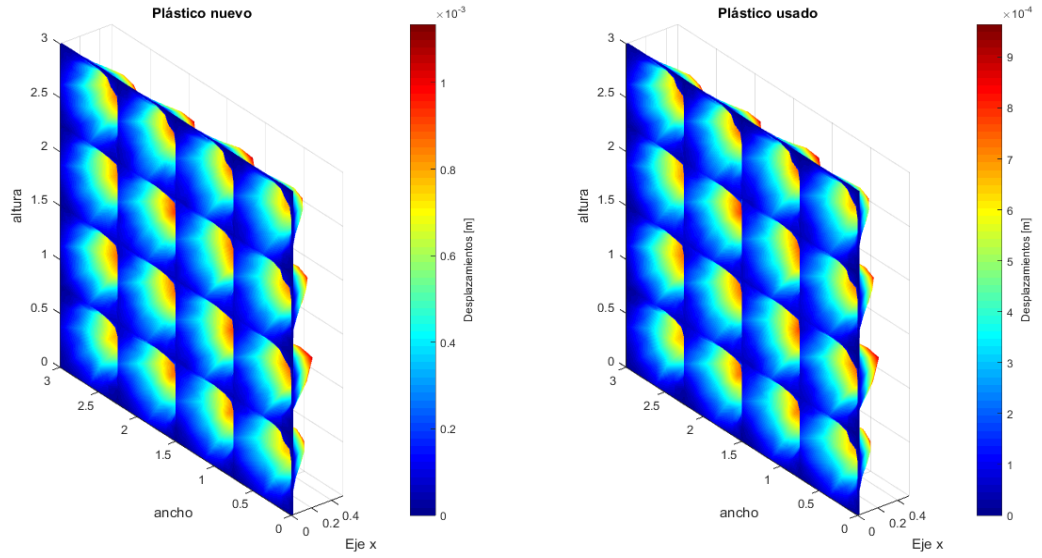


Figura 13. Resultados de la simulación de 5kPa, tanto de plástico nuevo como usado.

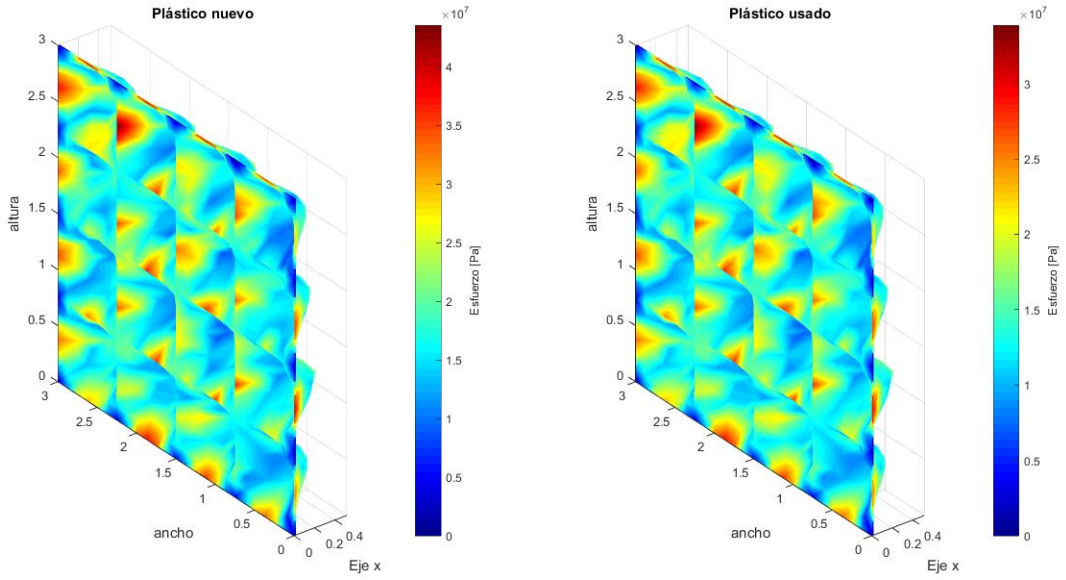


Figura 14. Resultados de los esfuerzos obtenidos en plástico nuevo como en usado.

Debido a las condiciones de frontera, es de particular interés conocer los valores de los desplazamientos en el centro de las secciones formadas por los alambres, ya que se espera que ahí se presenten los máximos desplazamientos. La figura 15 muestra los valores de los desplazamientos en dicha zona. Se comparan los valores del plástico nuevo con el usado en diferentes condiciones de cargas, mostrando los desplazamientos en la región central donde se presentan los máximos. Se puede notar que sigue el mismo patrón tanto en el polímero nuevo como en el usado. Esto se debe que el patrón de desplazamientos tiene que ver con la geometría y no con el material.

Se consideran de igual manera los esfuerzos en la

©2017 Universidad Simón Bolívar

misma región. Se incorporan además marcas del esfuerzo de fluencia del plástico nuevo y del usado con el fin de su comparación. La figura 16 muestra los esfuerzos en la zona central. Puede apreciarse que los mayores se presentan en la unión del plástico y las estructuras, es decir, a la altura 0 y altura 3, aunque en la zona del alambrado también se presentan concentraciones de esfuerzos, teniendo en cuenta las marcas de los esfuerzos de fluencia. También se observa que en la zona central tanto el plástico nuevo como el usado trabajan en la zona elástica en condiciones de cargas bajas, pero en general las condiciones de trabajo del polímero está en la zona superior al punto de fluencia, es decir en la zona plástica.

Para una mejor visualización de los valores en la sección, se presenta la figura 17, en la que se incorporan los valores máximos de desplazamientos de acuerdo con las diferentes condiciones de carga. Es interesante ver cómo varía de forma lineal debido a las cargas.

De igual forma, se obtienen los valores máximos de esfuerzos en las diferentes condiciones de carga. Se incluyen los esfuerzos de rotura obtenidos en las pruebas (figura 18). Se ve que al igual que los desplazamientos varían de forma lineal a las cargas. Con las marcas de esfuerzos de rotura puede apreciarse que el polímero nuevo no alcanza dicho esfuerzo, mientras que el polímero usado sí supera este esfuerzo en cargas mayores a 3 kPa, es decir en cargas mayores a ésta, el plástico se rompería.

A diferencia de los desplazamientos, los esfuerzos mayores no se encuentran en el centro sino en las zonas laterales donde se restringe el movimiento. Por tal razón se evaluaron los esfuerzos en dicha zona. Cabe mencionar que en esta zona no se evaluaron los desplazamientos, ya que por las restricciones el valor de estos es cero. La figura 19 muestra los esfuerzos en la zona lateral a diferentes alturas, donde están localizados los mayores valores. Como puede verse, en esta zona el plástico supera en más lugares y menores cargas los límites de fluencia, recalcando que el área de mayor trabajo de la cubierta es la región plástica.

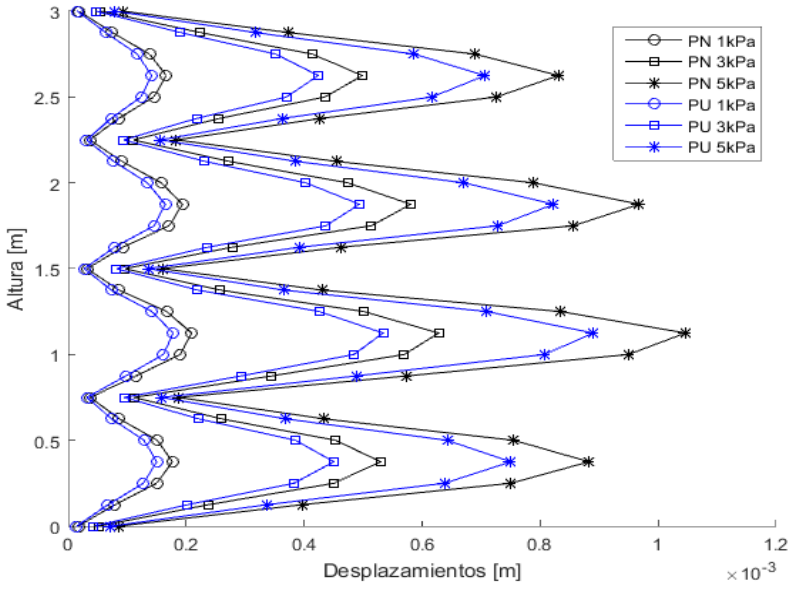


Figura 15. Comparación de los desplazamientos en la sección media del alambrado, plástico nuevo (PN) y plástico usado (PU).

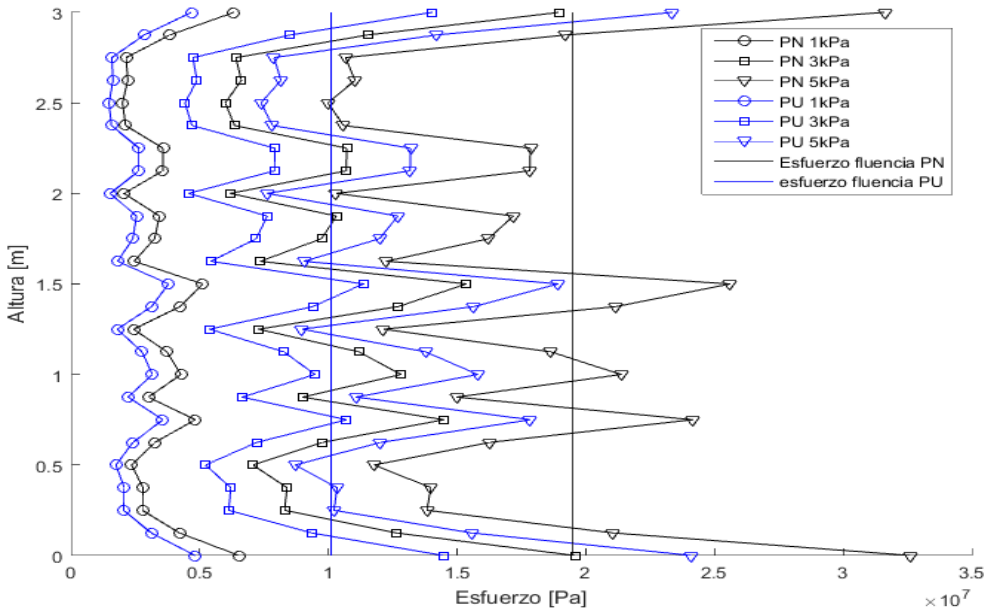


Figura 16. Esfuerzos en la parte central del alambrado, plástico nuevo (PN) y usado (PU).

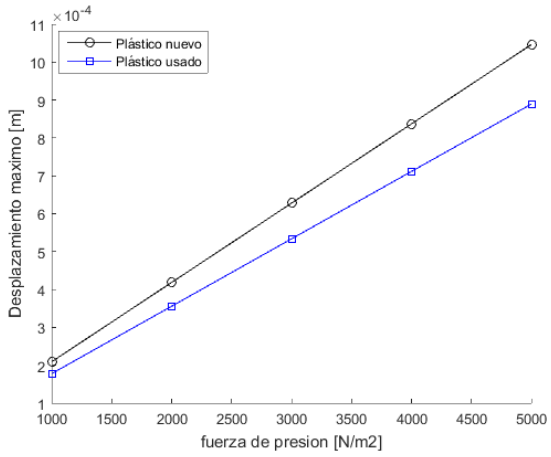


Figura 17. Máximos desplazamientos en las distintas condiciones de cargas.

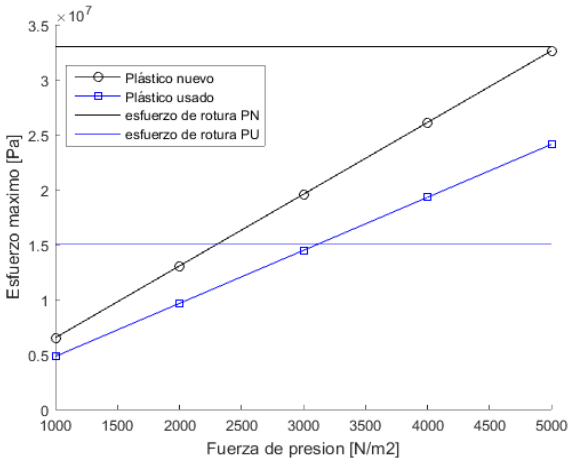


Figura 18. Esfuerzos máximos en la zona central del alambrado en las diferentes cargas.

La figura 20 permite observar los esfuerzos máximos en la zona lateral y se incluyen marcas para el esfuerzo de fractura. Se observa que en la zona lateral en cargas máximas el plástico nuevo también es susceptible de romperse, y el plástico usado resiste menores cargas, que en la zona central, por lo cual es de esperarse que en esta zona sea dónde generalmente el plástico se esté rompiendo.

4. CONCLUSIONES

Se ha observado que conforme pasa el tiempo aumenta la radiación PAR absorbida en un material polimérico estudiado en este trabajo como cubierta de invernaderos. Sin embargo, esta tendencia no se ha manifestado claramente respecto a la radiación global. Se ha deducido que la radiación PAR y Global absorbidas a lo largo del tiempo se pueden ajustar a distintos modelos matemáticos en relación

©2017 Universidad Simón Bolívar

al proceso de envejecimiento del polímero deduciéndose las siguientes:

PAR:

$$f(t) = 0{,}03818 \cdot t + 23{,}5531 - 1{,}863217 \cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$$

GLOBAL:

$$f(t) = -0{,}00239 \cdot t + 37{,}4857 - 4{,}722129 \cdot sen\left(\frac{2\pi t}{365}\right)$$

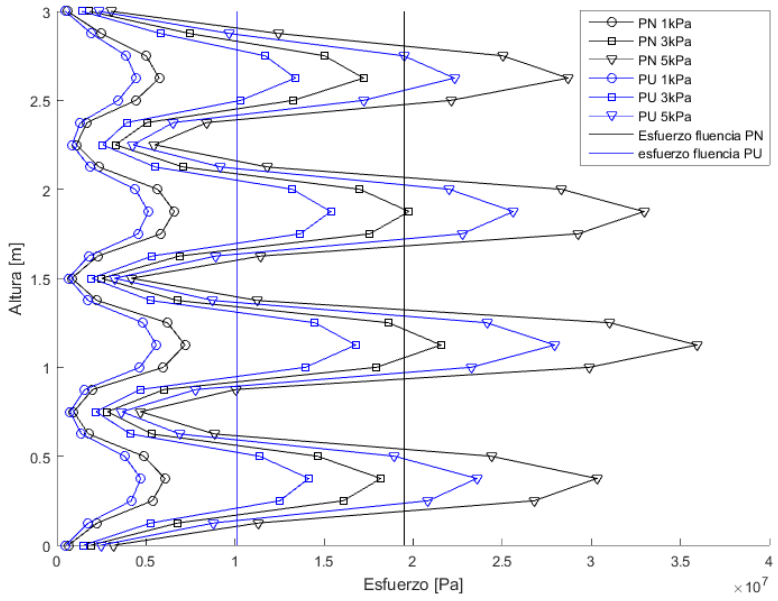


Figura 19. Esfuerzos en la zona lateral a diferentes alturas.

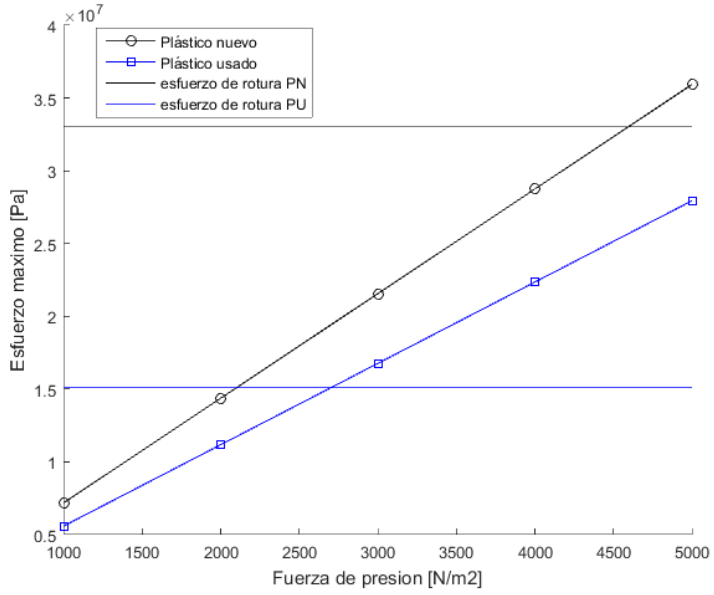


Figura 20. Esfuerzos máximos en la zona lateral en diferentes condiciones de carga.

Dichos modelos permiten predecir la radiación absorbida (PAR o Global) en un instante de tiempo determinado y, en función de dicho parámetro, muestran su utilidad para estimar el grado de deterioro del material de cubierta y ayudan en la toma de decisiones necesarias sobre su renovación. La aplicación se considera de elevado potencial a la hora del diseño de cubiertas para invernaderos de uso en agricultura intensiva.

Se ha visto que la elongación a la rotura está por encima del 500% dada en la bibliografía. Este alto valor se debe a que el polímero está muy degradado, ya que se encuentra en el cuarto año de vida. También se ha comprobado que la zona dónde se ha tomado la muestra influye tanto en la resistencia a tracción como en la elongación en el punto de fluencia. Con respecto a la orientación de las fibras dentro de la muestra, se ha observado que en las zonas más castigadas la orientación de las fibras no juega un papel importante en las características resistentes del material, mientras las diferencias entre las dos orientaciones en las zonas menos deterioradas son bastante apreciables.

Las simulaciones numéricas pueden representar de forma adecuada el comportamiento de las cubiertas de los invernaderos, siempre y cuando se tomen las consideraciones adecuadas. Esta investigación muestra que el polímero ensayado ya no está en condiciones de ser usado como cubierta de invernadero debido a la pérdida de sus propiedades mecánicas. De igual manera muestra que el comportamiento, en general, de la cubierta está en la zona plástica del material y, por tanto, las consideraciones de linealidad que se tomaron en un principio han mostrado resultados limitados, ya que si se pretenden obtener resultados más generales, se debe considerar la parte plástica y, por tanto, un comportamiento no lineal. Aún así los resultados de comparación son interesantes y de gran ayuda para ilustrar el proceso de falla en las cubiertas y la influencia de la degradación en ella.

5. REFERENCIAS

[1]. Von Elsner B, Briassoulis D, Waaijenberg D, Mistriotis A, Zabeltitz C, Gratraud J, Russo G, Suay-Cortes R. Journal of Agricultural Enginnering Research 2000; 75: 1-16.

[2]. [Wittwer S, Casilla N. Horttechnology 1995; 5 (1): 6-23.

[3]. Tidjani A. Polym. Degrad. Stab. 2000; 68: 465–9.

[4]. Briassoulis D, Waaijenberg D, Gratraud J, von Elsner B. Journal of Agricultural Engineering Research 1997a; 67: 81–96.

[5]. Dilara PA, Briassoulis D. Journal of Agricultural Engineering Research 2000; 76: 309–321.

[6]. Abdelkader D, Abdel-Hamid I, Khaled D, Hilal-Alnaqb A. Polymer Engineering and Science 2015; 55: 287–298.

[7]. Briassoulis D, Waaijenberg D, Gratraud J, von Elsner B. Journal of Agricultural Engineering Research 1997b; 67: 171-217.

[8]. Dilara PA, Briassoulis D. Polymer Testing 1998; 17: 549–585.

[9]. Marco I. Plasticulture 2001; 119:14-25.

[10]. Pacini L. Informatore-Agrario 2001; 57 (34): 43–46.

[11]. Hassini N, Guenachi K, Hamou A, Saiter JM, Marais S, Beucher E. Polym. Degrad. Stab. 2002; 75: 247–254.

[12]. Diaz T, Espi E, Fonotecha A, Jiménez JC, López J, Salmerón A. Los Filmes Plásticos En La Producción Agrícola, Ed. Reposol: Mundi-Prensa, Madrid, 2001.

[13]. Rabek FJ. Polymer Photodegradation. Mechanisms and Experimental Methods, Chapman & Hall, London, 1995.

[14]. Amin MB, Hamid HS, Khan JH. Journal of Polymer Engineering 1995; 14(4): 253–267.

[15]. Briassoulis D, Aristopoulou A. “A modified artificial ageing procedure for low density polyethylene (LDPE) agricultural films”. In: EurAgEngPaper No 02-SE-014, International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2002, 30 June–4 July, Budapest, Hungary, 2002.

[16]. Pollet IV, Pieters JG, Verschoore R. Solar Energy 2002; 73 (5): 327–335.

[17]. Robledo F, Martín L. Aplicación de los plásticos en la agricultura, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 1988, p. 573.

[18]. Palomar F. Los invernaderos en la costa occidental de Almería, Editorial Cajal, Almería, 1982, p.159.

[19]. Serrano Z. Construcción de invernaderos, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 1994, p. 122.

[20]. Papaseit P, Badiola J, Armengol E. Los plásticos y la agricultura, Ediciones de Horticultura S.L., Madrid, 1997, p. 204.

[21]. Lozano GM, González D, Santos E. Plasticulture 1996; 110: 15–22.

[22]. Jaffrin A, Makhlouf S. Acta Horiculturae 1990; 281: 11–24.

©2017 Universidad Simón Bolívar

[23]. Pieters JG. Plasticulture 1996; 112: 23–31.

[24]. Jaffrin A. Plasticulture 1997; 114: 14–33.

[25]. Geoola F, Kashti Y, Peiper UM. Journal of Agricultural Engineering Research 1998; 71 (4): 339–346.

[26]. Pollet IV, Pieters J.G. Solar Energy Materials and Solar Cells 2002; 73 (4): 435–439.

[27]. Papadakis G, Brisassoulis D, Mugnozza G, Vox G, Feuilloley P, Stoffers A. Journal Agricultural Engieering Research 2000; 77 (1): 7-38.

[28]. Briassoulis D. Biosystems Engineering 2004; 87 (2): 209–223

[29]. Briassoulis D, Schettini E, "Modelling the mechanical behaviour of greenhouse LDPE film using the finite element method". In: AgEng 2000 Conference, Warwick, UK. EurAgEng Paper No 00-FB-038, 2000.

[30]. Fragos VP, Psychoudaki SP, Malamataris N.A. Int. J. Num. Methods Fluids 1997; 25: 495-512.

[31]. Reichrath S, Davies T.W. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 2002; 90(3):139-149.

[32]. Mistriotis A, Briassoulis D. Comp. Electric. Agric. 2002; 34:191-205.

[33]. Tieleman H.W. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 2003; 91(12-15):1627-1649.

[34]. Shklyar A, Arbel A. J. Wind Eng. Ind. Aerod. 2004; 92(12):1039-1059.

[35]. Briassoulis D, Aristopoulou A, Vitali M, "Adaptation and harmonisation of standard testing methods for mechanical properties of low density polyethylene (LDPE) films". In: AgEng 2000 Conference, Warwick, UK. EurAgEng Paper No 00-FB-007, 2000.

[36]. Norma ASTM D882, Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting, American Society for Testing and Materials, ASTM International, USA, 1991.

[37]. Norma ISO 527-3, Plastics determination of tensile properties, part 3: test conditions for films and sheets, International Organization for Standardization, 1995.

[38]. Briassoulis D, Aristopoulou A. Polymer Testing 2001; 20: 615–634

[39]. Wald M, Considine J, Turner K. Experimental Mechanics 2013; 53:931–941.

[40]. Norma UNE-EN ISO 527-1, Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios Generales, AENOR, Madrid, 1996, p.17.

[41]. Norma UNE-EN ISO 527-3, Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 3: Condiciones de ensayo para películas y hojas, AENOR, Madrid, 1996, p. 9.

[42]. Norma ISO 2602, Statistical interpretation of test results-Estimation of the mean-Confidencial Interval, International Organization for Standarization, Ginebra, 1980, p. 5.

[43]. Norma UNE-EN ISO 291, Plásticos. Atmósferas normalizadas para acondicionamiento y ensayos, AENOR, Madrid, 1998, p. 9.

[44]. Norma ISO 5893, Rubber and plastics test equipment-Tensile, flexural and comprension types (constant rate traverse)-Description, International Organization for Standarization, Génova, 1993, p. 6.

[45]. Chapra S, Canale R. Métodos numéricos para ingenieros, McGrawHill, México, 2007, p. 906-910.

[46]. Chandrupatla T, Belegundu A. Introducción al elemento finito en ingeniería, Prentice Hall Hispanoamericana, México, 1999, p.1-8.

[47]. Zienkiewicz O. M., 2007. El método de los elementos finitos, Reverte. España, p. 24-26.

[48]. Lozano M J, González E. Plasticulture 1999; 117: 2-11.

[49]. Matallana A, Montero JI. Invernaderos. Diseño, construcción y Ambientación, Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 1989, p. 159.

[50]. Palomar F. Los invernaderos en la Provincia de Almería, Instituto de Estudios Almerienses, Almería, 1994, p.150.

[51]. Montgomery D, Runger G. Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería, McGraw-Hill, México, 1996, p. 895.

[52]. Horta A, Sánchez C, Pérez A, Fernández I. Los plásticos más usados, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, 2000, p. 355.

©2017 Universidad Simón Bolívar