

FIBRAS NATURALES Y LA RADIACIÓN GAMMA EN LA ELABORACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

**Héctor Omar Camacho Gutiérrez¹, Gonzalo Martínez Barrera^{2*},
Liliana Ivette Ávila Córdoba³, Patricia Montes de Oca Valdés¹**

¹Posgrado en Ciencia de Materiales, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Colon esquina Paseo Tollocan S/N, 50180 Toluca, México.

²Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atacomulco, San Cayetano 50200, México.

³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Av. Universidad S/N, Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria; Toluca, México.

hocg6toe@hotmail.com, gonzomartinez02@yahoo.com.mx, liac07@gmail.com,
pathii.fis13@gmail.com

<https://doi.org/10.3926/oms.409.04>

Camacho Gutiérrez, H. O., Martínez Barrera, G., Ávila Córdoba, L. I., & Montes de Oca Valdés, P. (2022). Fibras naturales y la radiación gamma en la elaboración de materiales compuestos. En E. Viguera Santiago y G. Martínez Barrera (Ed.), *Materiales Avanzados y Nanomateriales: aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente* (pp. 95-120). Barcelona, España: OmniaScience.

Resumen

En la actualidad se ha puesto de manifiesto la necesidad de producir materiales con propiedades mejoradas, incluidas altas resistencias mecánicas, disminución de peso, tamaños y espesores, además de la durabilidad ante ambientes agresivos. Propiedades que se han logrado con la incorporación de fibras sintéticas a materiales compuestos. Se han podido mejorar la resistencia a la tensión, compresión, fatiga, impacto y abrasión, así como la estabilidad térmica y resistencia al fuego. Sin embargo, muy pocas investigaciones han abordado el efecto de fibras naturales en materiales compuestos, en particular el uso de fibras de luffa (Esponja). Otra de las necesidades actuales radica en el mejoramiento de las interfaces entre las fibras y las matrices poliméricas, para lo cual se han empleado tratamientos térmicos o bien procesos con ataques químicos, los cuales han dado resultados satisfactorios, sin embargo, poco se ha estudiado sobre el uso de la radiación ionizante, como los rayos gamma, para tal mejoramiento. Por estas razones en este capítulo se estudian los efectos de la radiación gamma y la incorporación de fibras naturales, entre ellas las de luffa, para el mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas de materiales compuestos.

Palabras clave

Fibras naturales, fibras de luffa, radiación gamma, materiales compuestos, propiedades mecánicas.

1. Fibras naturales

Las fibras naturales son materiales con forma de filamentos o hebras que pueden ser de origen animal o vegetal. El conocimiento y uso de las fibras naturales ha sido de gran importancia para el desarrollo humano, ya que han satisfecho necesidades básicas, como vestimenta, calzado y alimentación, así como en la elaboración de diversos objetos, como los mostrados en la Figura 1.

Las fibras de origen vegetal son extraídas de diferentes secciones de las plantas, como se muestra en la Tabla 1. Por ejemplo, las obtenidas de las hojas de agave o las de coco (Figura 2).

Las fibras de origen vegetal están compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa, las cuales aportan la resistencia mecánica, así como lignina, que favorece la durabilidad. Las propiedades físicas de cada fibra dependerán del porcentaje de



Figura 1. Objetos elaborados con fibras naturales

| Parte de Extracción | Fibra |
|---------------------|------------------------------------|
| Semillas | Algodón, Kapok |
| Frutos | Luffa, Bonote (Mesocarpio de coco) |
| Tallo | Yute, Kenaf, Lino, Cañaño, Ramio |
| Hojas | Sisal, Agave, Henequén |

Tabla 1. Fibras naturales de acuerdo a la sección de la planta utilizada



Figura 2. Planta de agave y fruto de coco

celulosa, hemicelulosa y lignina que contenga cada fibra. Las ventajas de estos materiales celulósicos son su biocompatibilidad, biodegradabilidad, durabilidad y bajo costo. En la Tabla 2 se presentan las características de fibras de origen vegetal (Mochane, Mokhena, Mokhothu, Mtibe, Sadiku, Ray et al., 2019; Adekomaya, Jamiru, Sadiku & Huan, 2017; FAO, 2020; Quiñones-Bolaños, Gómez-Oviedo, Mouthon-Bello, Sierra-Vitol, Berardi & Bustillo-Lecompte, 2021; Pereira, Wisky-Silva & Eugênio, 2020; Sánchez-Olivares, Rabe, Pérez-Chávez, Calderas & Bernhard, 2019).

En el caso del Agave y Bonote, la producción depende de la generación de residuos de materia prima, pues estos son subproductos de la planta y el fruto respectivamente. El avance tecnológico y científico ha permitido el desarrollo de nuevas e innovadoras aplicaciones de las fibras vegetales en diferentes industrias tales como: industria textil, papelera, de construcción y automotriz.

Las ventajas técnicas, económicas, ambientales y socioculturales posicionan a las fibras naturales de origen vegetal como sustitutos favorables de las fibras sintéticas. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) en colaboración con la *Discover Natural Fibers Initiative* (DNFI) en el año 2018, de los 110 millones de toneladas métricas (Tm) de fibras producidas, un 35 % correspondió a fibras de origen vegetal (38 millones). El algodón ocupa el primer lugar, con el 81.1 %; el segundo lugar yute y kenaf, con el 7.8 %, como se observa en la Figura 3 (Townsend, 2019).

Los cultivos para la producción de fibras naturales vegetales se desarrollan en regiones cálidas con temperaturas cerca de 30 °C y tropicales con humedad promedio entre 60 % - 90 %. En la Tabla 3 se muestran los principales países productores de fibras naturales (Adekomaya et al., 2017; FAO, 2020).

| Fibras | Composición | Características | Principales aplicaciones |
|---|--|---|--|
| Algodón (<i>Gossypium hirsutum</i>) | Celulosa: 90-99 % | Longitud: 10-65 mm Diámetro: 11-22 μm Alta resistencia a la tracción Alta retención de humedad Textura suave | Industria textil, industria farmacéutica |
| Yute (<i>Corchorus capsularis</i>) | Celulosa: 57-64 % Hemicelulosa: 21-25 % Lignina: 11-16 % | Longitud: 1-4 m Diámetro: 17-20 μm Alta resistencia a la tracción Baja conductividad térmica Aislante Moderada retención de humedad | Industria textil, arpillera, materiales compuestos |
| Hemp o Cáñamo (<i>Cannabis sativa</i>) | Celulosa: 70 % Lignina: 13 % | Longitud: 2-4 m Diámetro: 3-50 μm Alta resistencia a la tracción Buena conducción térmica Propiedades antibacterianas | Industria farmacéutica, industria textil, materiales de construcción |
| Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i>) | Celulosa y Lignina | Longitud: 0.6-2.5 mm Diámetro: 3-12 μm Módulo de Young: 21-60 GPa | Industria textil, industria papelera, embalaje, forraje, revestimiento |
| Bonote (Mesocarpio de coco) | Celulosa: 32.3 % Lignina: 42.5 % Pentosa: 14.7 % | Longitud: 30-60 mm Diámetro: 1-15 μm Módulo de Young: 189.24 MPa Porcentaje de elongación: 29.04% | Construcción, geotextiles, embalajes, materiales compuestos |
| Agave | Celulosa: 41 % Lignina: 9 % Hemicelulosa: 14 % | Longitud (fibra corta): 44-105 μm Longitud (fibra larga): 300-425 μm Módulo de Young: 2.6-2.9 GPa | Industria tequilera, materiales compuestos. |

Tabla 2. Características de las fibras vegetales

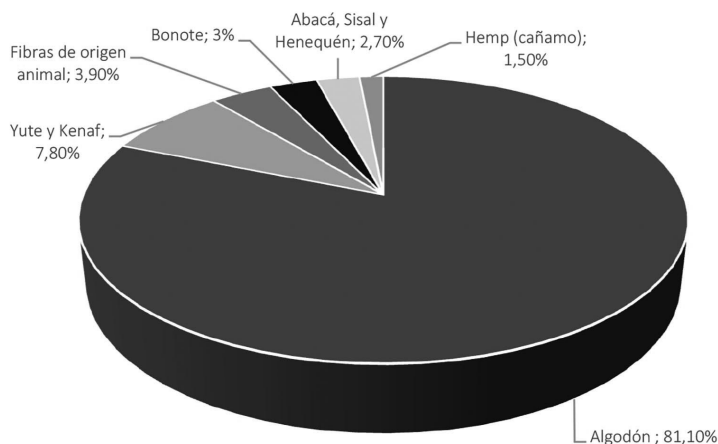


Figura 3. Porcentaje de producción mundial de fibras naturales de origen vegetal y animal

| Países productores | Principales fibras producidas |
|--|-----------------------------------|
| China | Yute, Sisal, Algodón, Kenaf, Hemp |
| India | Yute, Bonote, Algodón, Kenaf |
| México | Agave, Henequén, Algodón, Sisal |
| Brasil | Yute, Sisal, Algodón |
| Tailandia | Yute, Bonote |
| Indonesia | Abacá, Yute |
| Bangladesh | Yute |
| Estados Unidos, Perú | Algodón |
| Bélgica, Francia | Lino |
| Ecuador, Filipinas | Abacá |
| Colombia, Sri Lanka | Bonote |
| Angola, Haití, Kenia, Madagascar, Mozambique, Tanzania | Sisal |

Tabla 3. Principales países productores de fibras naturales

1.1. Fibras de luffa (Esponja)

Las fibras naturales son un recurso ambientalmente limpio, renovable y biodegradable. Día con día más industrias se interesan por su uso. Uno de los tipos de fibra natural que ha captado la atención de científicos son las fibras de luffa, debido a sus propiedades fisicoquímicas. Proviene de una planta subtropical de la familia de las cucurbitáceas, que produce un fruto con un sistema vascular fibroso (luffa). El fruto de luffa crece en condiciones idóneas sobre sustratos con pH de 6 a 6.8 y altos porcentajes de potasio y fósforo. Para obtener esponja de luffa con propiedades óptimas, se requiere que sea plantada en lodo arenoso a temperatura promedio de 25 °C; además se recomienda utilizar un sistema de crecimiento vertical, que ayuda la irrigación y dispersión de los frutos, los cuales se logran entre 4 y 5 meses (Oboh & Aluyor, 2009).

Las fibras de luffa están compuestas principalmente por celulosa (55 %), hemicelulosa (30 %) y lignina (15 %). El contenido de celulosa en luffa es mayor que el existente en la madera, bonote o agave; es similar al de las fibras de sisal y ramio, pero mucho menor que el existente en el algodón. Mientras que el porcentaje de lignina y hemicelulosa es mayor que el que contiene el algodón, sisal y ramio, pero menor que la madera (Siqueira, Bras & Dufrense, 2010).

Dependiendo de la región de procedencia, el fruto de luffa presenta diferentes especies: acutangla, echinata, sepium, operculata y cilíndrica. Los cuales, son abundantes en países con clima subtropical y con altas temperaturas en verano como China, Japón y otros países de Asia, Centroamérica y Sudamérica (Oboh & Aluyor, 2009; Siqueira et al., 2010; Tanobe, Sydenstricker, Murano & Amico, 2005; Bal, Bal & Lallam, 2004; Shen, Xie, Huang, Zhou & Ruan, 2012).

Las propiedades de las fibras de luffa se resumen en la Tabla 4.

La estructura del sistema fibroso de las fibras de luffa, a nivel macroscópico presenta estructuras parecidas a un nido de abejas, con tamaños de hasta 100 cm; y a nivel micrométrico, presenta fibrillas con diferentes orientaciones, como se muestra en la Figura 4. Las fibras tienen diámetros entre 0.2 mm - 1 mm (Tanobe et al., 2005).

Debido a su estructura y su disponibilidad en diversas zonas del mundo, las esponjas de luffa han tenido diversas aplicaciones. Cuando se encuentra en su

| Propiedad | Valores |
|--|-------------|
| Densidad (g/cm ³) | 0.35 |
| Densidad de pared celular (g/cm ³) | 0.82 |
| Área superficial (m ² /g) | 123.0 |
| Capacidad de absorción de agua (g/g) | 13.6 |
| Resistencia a la tensión (MPa) | 21.3 ± 6.6 |
| Resistencia a la flexión (MPa) | 80-90 |
| Módulo de elasticidad (GPa) | 0.86 ± 0.34 |
| Porcentaje de elongación (%) | 4.55 ± 0.47 |

Tabla 4. Propiedades de las fibras de luffa

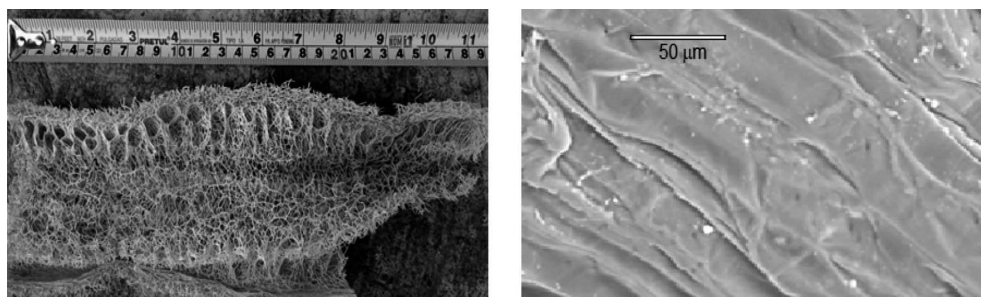


Figura 4. Fibras de luffa a diferentes dimensiones de tamaño

estado rígido se utiliza como estropajo para la higiene personal y la limpieza de utensilios de cocina; pero cuando se desgasta, es cortada en pequeños pedazos para producir tapetes o relleno de almohadas. También se han utilizado en la absorción de humedad, el tratamiento de aguas residuales, reforzamiento en materiales compuestos, como inmovilizador de células, así como en la alimentación. En un estudio sobre luffa cilíndrica, se encontraron en su composición minerales (magnesio, calcio, sodio, potasio, hierro, cobre, cinc, y manganeso), taninos, oxalatos, fósforo y ácido fítico. La luffa puede ser una fuente de proteína vegetal para la alimentación de humanos y animales. Más aun, las semillas de

luffa tienen en promedio 40 % de aceites, los cuales son útiles en la alimentación y como fertilizante. Estos aceites se utilizan para la producción de biodiesel, lo cual ha tenido gran aceptación en la industria debido a su baja emisión de CO_2 . En la medicina antigua oriental, la luffa cilíndrica se receta en el tratamiento de la fiebre, enteritis e hinchazones en general. También se preparan extractos con la enredadera donde crece el fruto, los cuales son aplicados como ungüentos para remover toxinas y regenerar la piel o estimular circulación de sangre en venas varicosas y celulitis. Mientras que los frutos que no han llegado a la madurez se consumen como suplemento alimenticio para la diabetes (Oboh & Aluyor, 2009).

Los estudios de las propiedades mecánicas de la luffa muestran que, en pruebas de compresión, los valores del esfuerzo son casi constantes en un amplio intervalo de deformación. La deformación total se determina mediante la suma de las deformaciones obtenidas en una dirección de las fibras, cuando son probadas en compresión, tensión y flexión. Se han aplicado esfuerzos de compresión a columnas de fibras de luffa molidas hasta un valor nominal del 95 %. Después de retirar el esfuerzo, las columnas recuperan su forma original hasta en un 98 %, si se sumergen en agua y se dejan secar. Esto hace de la luffa un material ideal para usos donde sea requerida alta absorción de energía, como el embalaje. Las fibras de luffa tienen valores comparables a los de materiales celulares, como las fibras de aluminio. Más aun, las esponjas de luffa son más resistentes y ligeras que algunos materiales, como las micro-redes de níquel o el poliestireno expandido (EPS) (Bal et al., 2004; Shen et al., 2012).

Respecto al comportamiento ante la temperatura, las fibras de luffa disminuyen su masa 7 % a 100 °C, la cual está asociada con la pérdida de agua; 11 % entre 200 °C y 260 °C, correspondiente a la degradación de hemicelulosa; 20 % entre 240 °C y 350 °C asociada a la degradación de celulosa, y finalmente 65 % de disminución entre 280 °C y 500 °C, correspondiente a la degradación de la lignina. Entre 100 °C y 500 °C, las fibras cambian de color claro a tonos más oscuros. Después de los 500 °C el material restante se carboniza (Shen et al., 2012).

Existen tratamientos que se usan comercialmente para mejorar el aspecto o uso de la esponja de luffa, dentro de los cuales destacan: i) el blanqueamiento con cloro que proporciona un aspecto estético. Sin embargo, el cloro produce pérdida de masa, reduciendo el contenido de celulosa y lignina, además de disminuir su resistencia mecánica; ii) tratamientos con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a temperatura de 80 °C con agitación constante, durante un tiempo

determinado, con el fin de purificar la celulosa o eliminar componentes en las fibras; iii) métodos para generar monocristales muy delgados (whiskers) o celulosa micro fibrilada (Siqueira et al., 2010; Shen et al., 2012).

2. Radiación Gamma

En comparación con los procesos térmicos o los llevados a cabo con ataques químicos, para las modificaciones fisicoquímicas de materiales, la radiación gamma tiene ciertas ventajas, como: a) gastar menos tiempo y dinero; b) la radiación de inicio no requiere energía de activación; c) no requiere catalizadores o aditivos para iniciar la reacción; d) la iniciación es homogénea en todo el sistema; d) el proceso se puede realizar a cualquier temperatura y se puede interrumpir en un tiempo de reacción específico; e) la reacción de terminación está prácticamente controlada, el material puede analizarse en una etapa de reacción específica, y f) durante la temperatura de inicialización se mantiene la reacción, a diferencia de la que se presenta en un curado exotérmico convencional (Dobo, 1985; Clough, 2001) .

La radiación ionizante directa consta de partículas cargadas, como los electrones energéticos, positrones, protones, partículas alfa, mesones cargados, muones y iones pesados. Este tipo de radiación interactúa con la materia, principalmente a través de la fuerza de Coulomb, que hace repeler o atraer electrones de átomos y moléculas en función de sus cargas. El límite energético inferior para la radiación ionizante suele situarse en 10 keV. En el caso de la radiación ionizante indirecta, esta es producida por partículas sin carga. Los tipos más comunes son las generadas por fotones con energía superior a 10 keV (rayos X y rayos gamma) y los neutrones.

La radiación gamma es radiación electromagnética emitida por un núcleo cuando experimenta una transición de un estado de energía más alta a un estado energético más bajo. El número de protones y neutrones del núcleo no varía en estas transiciones. Los rayos gamma se emiten a menudo inmediatamente después de una desintegración alfa o beta. Por ejemplo, la desintegración beta del cobalto 60 (^{60}Co) presenta una cascada de dos rayos gamma con energías de 1,17 MeV y 1,33 MeV, para transformarse en níquel 60 (^{60}Ni).

Los fotones de los rayos X y gamma interactúan con la materia y causan ionización de tres maneras diferentes: i) Los fotones de energía más baja interactúan

sobre todo el material mediante el efecto fotoeléctrico, es decir el fotón cede toda su energía a un electrón, el cual abandona el átomo o molécula; ii) Los fotones de energía intermedia interactúan fundamentalmente mediante el efecto Compton, en el cual el fotón y un electrón colisionan esencialmente como partículas. El fotón continúa su trayectoria en una nueva dirección con su energía disminuida, mientras que el electrón liberado parte con el resto de la energía entrante (menos la energía de unión del electrón al átomo o a la molécula); iii) La producción de pares: el fotón desaparece, y en su lugar aparece una pareja electrón-positrón (este fenómeno sólo ocurre en la proximidad de un núcleo, por consideraciones de conservación del momento cinético y de la energía). Estos electrones y positrones energéticos se comportan como radiación ionizante directa. A medida que pierde energía cinética, un positrón puede llegar a encontrarse con un electrón, y las partículas se aniquilarán entre sí. Entonces se emiten dos fotones de 0,51 MeV desde el punto de aniquilación, a 180 grados uno de otro. Con un fotón dado puede ocurrir cualquiera de estos supuestos, salvo que la producción de pares sólo es posible con fotones de energía superior a 1,022 MeV. En resumen, la energía cinética total del par electrón-positrón es igual a la energía del fotón menos la suma de las energías de la masa residual de electrón y positrón (1,02 MeV).

2.1. Efectos de la radiación gamma en fibras naturales

Cuando se somete un polímero a la acción de radiaciones ionizantes, como los rayos gamma, se producen efectos físicos y químicos. Los efectos producen desprendimiento de radicales que integran las unidades monoméricas, así como modificaciones en las cadenas poliméricas, mediante tres procesos diferentes: formación de enlaces entre cadenas (*cross-linking*), rompimiento de cadenas (*chain scission*), e injertos (*grafting*). La permanencia de cualquiera de estos procesos depende de la naturaleza de la radiación, la estructura química del polímero y la dosis aplicada. También se produce oxidación, daño en regiones cristalinas, modificación del peso molecular de algunos polímeros. Además de cambios en densidad, coeficiente de expansión térmica, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes.

En general, todos estos cambios contribuyen, en mayor o en menor medida, a modificar el comportamiento mecánico de los polímeros. Los efectos de la radiación dependen no sólo de la estructura química y la dosis absorbida, sino

también de la tasa de dosis, de la atmósfera y la temperatura a la cual se realiza la irradiación (Curling & Winandy, 2008; Divos & Bejo, 2005).

Los efectos de la irradiación en polímeros se evalúan a través de la estructura química (mediante el análisis de la distribución de pesos moleculares, el aumento de las ramificaciones de las cadenas, del mayor reticulado de la muestra, etc.), y de su comportamiento mecánico. Las propiedades mecánicas de tensión, deformación máxima y a la ruptura, se toman como parámetros característicos de las modificaciones micro-estructurales debidas a la irradiación. Estas propiedades mecánicas se pueden explicar en función de la rigidez de las cadenas, las cuales tiende a evitar que estas se deslicen sobre otras como consecuencia de la orientación de las cadenas laterales, induciendo un cierto grado de cristalinidad (Loos, 1992).

Las fibras de algodón consisten de 90 a 99 % de celulosa, la cual es modificada cuando es sometida a los rayos gamma; los cambios en su estructura, morfología y propiedades mecánicas dependen de la dosis. Cuando las dosis de radiación son menores a 25 kGy, las fibras de algodón no presentan cambios drásticos en sus propiedades. Pero a dosis de 40 kGy, la resistencia disminuye, lo cual se debe a la disminución en el grado de polimerización, de hasta el 86 %. Para dosis a 100 kGy, la resistencia a la tracción disminuye un 28 % y la deformación a la rotura 16 %. Ambos cambios se deben al rompimiento de las cadenas poliméricas producidas por los rayos gamma; lo cual se agudiza cuando las fibras van envejeciendo (Machnowski, Gutarowska, Perkowski & Wrzosek, 2013). En la Figura 5 se observan regiones homogéneas para las fibras no irradiadas de algodón, sin

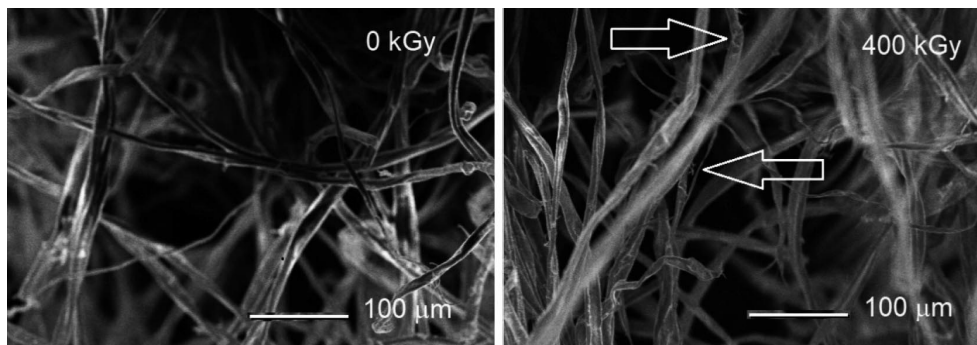


Figura 5. Imágenes de fibras de algodón sin irradiar e irradiadas, obtenidas de pantalones (Denim)

embargo, cuando se aplica una dosis de 400 kGy, se forman pequeñas fibrillas y grietas en la superficie de las fibras (señaladas por las flechas).

La copolimerización por injerto para la celulosa se puede realizar utilizando radiación gamma; dicha copolimerización presenta ventajas como no usar aditivos, presentar homogeneidad y tener el control de los parámetros de injerto. Se utiliza la celulosa (polímero base), un monómero y un disolvente. La radiación gamma produce la formación de radicales libres de la cadena principal, lo que significa tener más sitios de inicio disponibles para el injerto. El número de radicales libres creados depende de la dosis de radiación. Durante la copolimerización, se adicionan grupos funcionales a la cadena principal de la celulosa, lo que va determinando el grado de injerto (Dg). El proceso de injerto no tiene un efecto negativo en la estructura cristalina de la celulosa.

La aplicación de rayos gamma disminuye el proceso de degradación de la celulosa. La máxima degradación de los microcristales de celulosa sin irradiar se presentó a los 345 °C, mientras que celulosa con 18 % de injerto, producido por la irradiación, presentaron un incremento en la temperatura de degradación, 380 °C (Madrid & Abad, 2015). Los rayos gamma producen en la celulosa disminución del grado de polimerización (DP) a dosis de 10 kGy; degradación del 6 al 12 % en su estructura a 31 kGy, así como un cambio total del grado de cristalinidad a 300 kGy. En la Figura 6, se muestran fibras de celulosa obtenidas de envase de Tetra Pak, las cuales se modifican cuando son irradiadas con rayos gamma a dosis de 400 kGy, presentando pequeñas fibrillas sobre la superficie de las fibras.

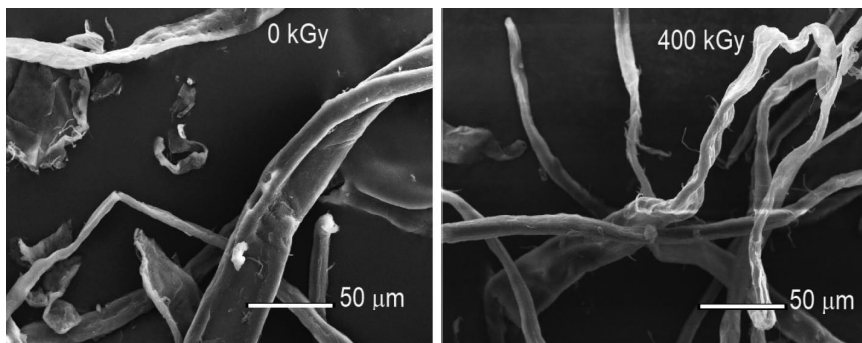


Figura 6. Imágenes de fibras de celulosa sin irradiar e irradiadas, obtenidas de envase de Tetra Pak

2.2. Efectos de la radiación gamma en fibras de luffa

En la Figura 7 se muestran los difractogramas de las fibras de luffa sin irradiar e irradiadas a dosis de 50 y 100 kGy. Se observan tres picos principales a $2\theta = 15^\circ$, 22° y 34° , los cuales se relacionan con los planos cristalográficos (1-10), (002) y (023), respectivamente.

El cálculo del porcentaje del índice de cristalinidad (ICR), de las fibras se realizó con la ecuación (Tserki, Zafeiropoulos, Simon & Panayiotou, 2005):

$$ICR \% = \frac{I_m - I_1}{I_m} \times 100$$

donde I_m es la intensidad máxima de difracción del pico en un ángulo de 2θ entre 22° y 23° , mientras que I_1 es la intensidad de la difracción del material amorfo, que se toma en un ángulo de 2θ entre 18° y 19° cuando la intensidad es mínima. Las fibras sin irradiar tuvieron un ICR de 73 %, el cual tuvo una variación mínima para fibras irradiadas a 50 kGy (72 %), y se mantuvo para dosis de 100 kGy (73 %). Es decir, la radiación gamma no modifica la cristalinidad de las fibras.

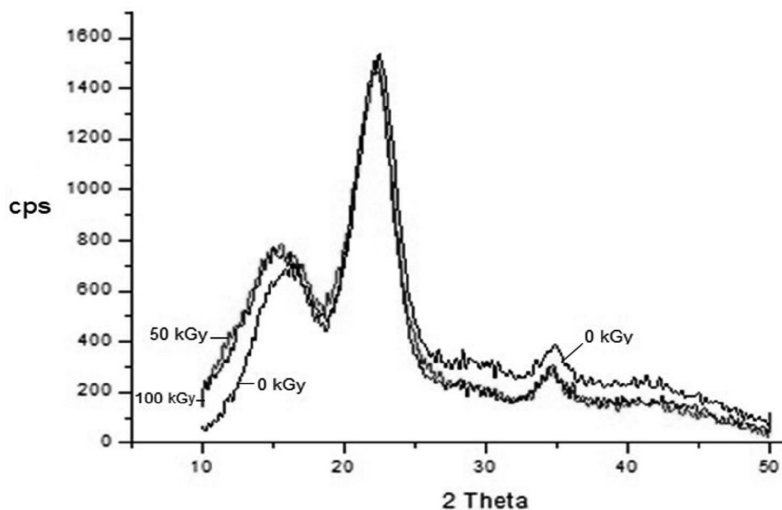


Figura 7. Difractograma de fibras de luffa no irradiadas e irradiadas

Más aún, las distancias interplanares (calculadas utilizando la ley de Bragg), varían muy poco con la radiación, como se muestra en la Figura 8. La máxima variación fue de 6.9 %, la presentó el pico 2θ (22°) a una dosis de 50 kGy.

Mientras que las intensidades de los picos presentan muy poca variación conforme se incrementa la dosis de radiación, como se muestra en la Figura 9.

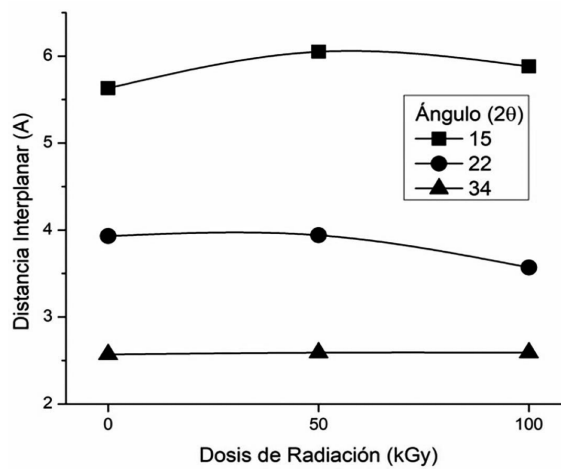


Figura 8. Distancia interplanar de fibras de luffa no irradiadas e irradiadas

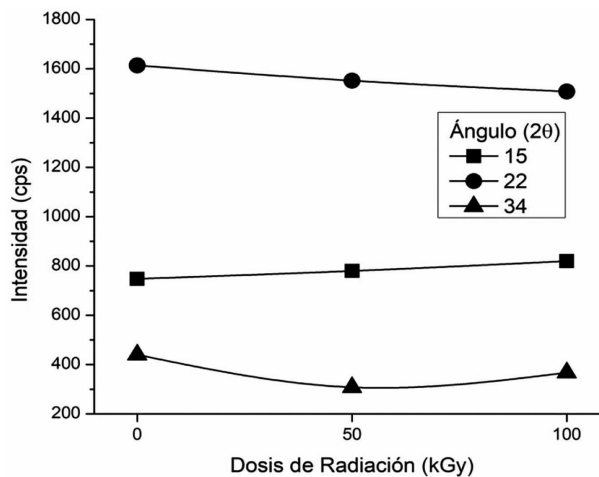


Figura 9. Intensidad de picos de difracción de fibras de luffa no irradiadas e irradiadas

En la Figura 10 se muestran los espectros de infrarrojo (FT-IR) de las fibras de luffa sin irradiar e irradiadas a 50 y 100 kGy. Se observan cuatro bandas características: a) 3370 cm^{-1} correspondiente al estiramiento del enlace OH; b) 1640 cm^{-1} correspondiente al estiramiento de grupos hidroxilo; c) 1370 cm^{-1} atribuida a la flexión del grupo hidroxilo de la celulosa; y d) 1050 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de estiramiento del enlace C-OH de la celulosa (Akerholm, Hinterstoisser & Salmén, 2004). No existen cambios en los grupos funcionales, sin embargo, los valores de transmitancia para dosis de 50 kGy son menores que los del espectro sin irradiar; pero los de 100 kGy son mayores a estos.

Las fibras de luffa sin irradiar tienen una superficie rugosa; partículas de lignina con diferentes formas y la grietas de 4 a $12\text{ }\mu\text{m}$. Así mismo, se observa la presencia de una fina capa de lignina que cubre las fibrillas celulósicas. Para fibras de luffa irradiadas, a dosis de 50 kGy no se observan cambios notables en la superficie.

3. Materiales compuestos con fibras naturales

Debido a la demanda cada vez más frecuente en la tecnología del concreto, se han propuesto nuevas formulaciones que incorporan materiales poliméricos. Los

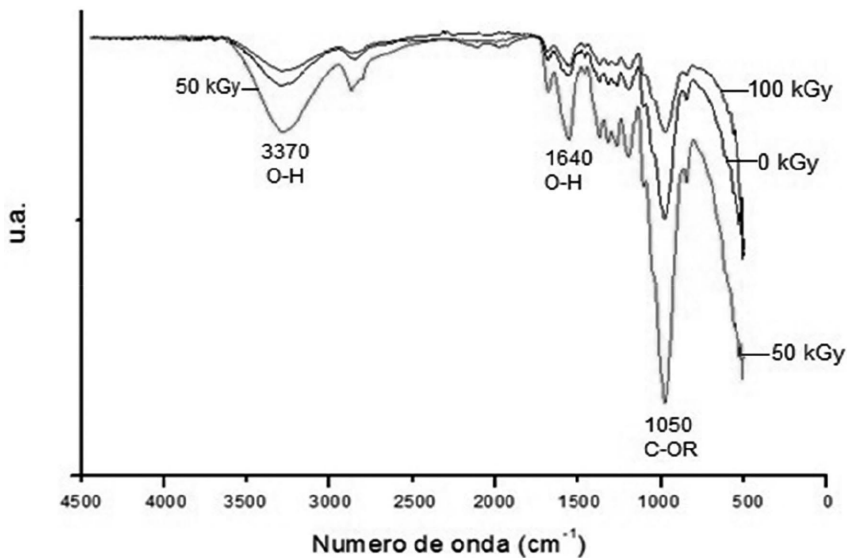


Figura 10. Espectro infrarrojo de fibras de luffa sin irradiar e irradiada a diferentes dosis

concretos que utilizan polímeros se clasifican en: i) Concreto modificado con polímeros (CMP), que consiste en utilizar polímeros y cemento; ii) Concreto impregnado con polímeros (CIP), en el cual se introduce un monómero o polímero en la red de poros del concreto ya endurecido, y posteriormente polimerizar in situ; y iii) el Concreto polimérico (CP), en el cual el aglutinante es un polímero, el cual sustituye a la pasta de cemento. En estos tipos de concretos se han logrado mejoramientos cuando son sometidos a esfuerzos mecánicos, obteniéndose altas resistencias a la compresión, tensión y flexión.

En los pocos trabajos de investigación sobre concretos poliméricos reforzados con fibras sintéticas se señala mejoramiento en las propiedades mecánicas, por ejemplo, se han obtenido mayores resistencias a la compresión (16 %) al adicionar fibras de carbón (2 % en peso), así como 9 % cuando se adiciona 1 % de fibras de vidrio. Agregar fibras sintéticas a los concretos poliméricos mejora la propiedad de flexión. Por ejemplo, concretos elaborados con resina epoxi y reforzados con fibras de vidrio, tuvieron un incremento del 5 % en la resistencia a la flexión para concentraciones del 1 % en peso de fibra. Mientras que concretos poliméricos reforzados con 1 % de fibras de madera sintética, lograron una mejora del 6 % en resistencia a la flexión (Reis, 2006).

El efecto de fibras naturales como materiales de refuerzo en las propiedades mecánicas de materiales compuestos, es estudiado cada día más por la ciencia e ingeniería de materiales. Esto debido a la sustitución de fibras sintéticas, como las de vidrio. Las fibras por su origen natural son un recurso ambientalmente limpio, renovable y biodegradable. Razón por la cual muchas industrias se están interesando en su uso.

El uso de fibras naturales como relleno en materiales compuestos debe contemplar en primera instancia las propiedades fisicoquímicas de las fibras, incluidas la estructura química y la polaridad. Las interfaces entre las fibras y la matriz polimérica, por lo general son débiles; ocasionando transferencia de carga deficiente a las fibras. Lo cual se puede comprobar por los valores de resistencia a la tensión por debajo de lo esperado teóricamente.

Son escasos los estudios de los efectos de las fibras naturales en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos elaborados con resinas poliméricas. Uno de los objetivos es estudiar el comportamiento frente a la intemperie, ya que las fibras naturales absorben fácilmente humedad. Por ejemplo, las fibras de luffa

tienen la capacidad de absorber humedad fácilmente y de actuar como material de refuerzo en materiales compuestos híbridos. Se han utilizado fibras de luffa con diámetros promedio entre 150-200 μm , en la elaboración de concretos poliméricos (Boynard & D'Almeida, 2000; Satyanarayana, Arizaga & Wypych, 2009).

4. Efectos de la radiación gamma en materiales compuestos a base de resina poliéster y fibras naturales

Una estrategia viable para producir excelente adhesión en la interface entre las fibras poliméricas y la matriz polimérica está basada en las modificaciones fisicoquímicas de las fibras, por ejemplo, se pueden mejorar las superficies de las fibras. Algunas opciones de modificación pueden ser poco atractivas, en base a los costos que estas implican. Principalmente por el gasto de la compra de productos químicos para dichas modificaciones. Una de los tratamientos para la modificación se basa en el uso de energía ionizante, como la radiación gamma.

Existe poca información de estudios que abordan el uso de fibras naturales y rayos gamma como herramientas para mejorar las características físicas y mecánicas de los compuestos poliméricos, principalmente aquellos que utilizan resina de poliéster como matriz polimérica. De este tipo de materiales se mencionan a continuación, algunos ejemplos: 1) Se modificaron tejidos de yute (algodón) con silicato de sodio (Na_2SiO_3) (1-4 %) y se mezclaron con resina de poliéster insaturada. Los resultados muestran que con añadir 2 % de Na_2SiO_3 , se mejoran la resistencia a la tensión (48 %), la resistencia al impacto (20 %) y el módulo de tensión (10 %), pero se disminuye la deformación a la rotura (40 %). Sin embargo, cuando se irradiaron estos materiales compuestos a dosis de 5 kGy, se obtuvieron mayores valores, ya que la resistencia a la tensión se incrementó 85 %, la resistencia al impacto 35 % y módulo de tensión 15 % (Hossain, Hossain, Uddin, Khan & Chowdhury, 2020). 2) En otro estudio, se agregaron dos tipos de fibras de yute como refuerzos del poliéster: yute natural y yute modificado químicamente (con polietilenglicol, PEG). Los materiales compuestos se polimerizaron con temperatura y posteriormente se irradiaron con rayos gamma. Los mayores valores de la resistencia a la tensión y a la flexión de los materiales compuestos se obtuvieron con fibras de yute natural e irradiado a 10 kGy. Dichos mejoramientos se deben a la alta reticulación entre las moléculas y fibras de poliéster debidas a la radiación. Sin embargo, se obtuvo mayor deformación del material compuesto cuando se agregaron fibras de yute modificadas, ya que

dichas fibras mostraron rápida degradación fotoquímica y por lo tanto disminuyó su contenido en lignina (Hoque, Bhuiya, Saiduzzaman, Islam, Khan & Shauddin, 2015). 3) Se añadieron fibras de yute no tejidas (40-65 % en peso) a resina de poliéster insaturado. Los valores más altos de propiedades mecánicas para los materiales compuestos sin irradiar se obtuvieron con 55 % de yute. Mientras que los irradiados (2,5-12,5 kGy), presentaron los mayores valores a dosis de 7,5 kGy, es decir 29,86 % más de resistencia a la tensión y 14,6 % más de resistencia a la flexión; esto debido a la alta compatibilidad entre las fibras de yute y la matriz poliéster (Khan, Shauddin, Dhar & Khan, 2014). 4) Se irradiaron tejidos de yute de tela de yute de arpillera (2-9 kGy), luego se mezclaron con resina de poliéster. Se obtuvieron mejoras en la resistencia a la tensión y a la flexión, así como en la resistencia a la humedad, a 5 kGy, debido a la alta entrecruzamiento entre las moléculas de celulosa vecinas. Sin embargo, a dosis más altas (> 5 kGy), los valores de absorción de agua, tensión y flexión disminuyen significativamente debido a la fotorreticulación y la fotodegradación producidas por los rayos gamma (Ayma, 2017). V) Materiales compuestos de resina de poliéster y tejido de yute fueron irradiados con rayos gamma (1-5 kGy). Los mayores valores se obtuvieron al aplicar dosis de 2 kGy, en particular se obtuvieron incrementos del 52 % en la resistencia al impacto, 49% en el módulo de Young, 47 % en la resistencia a la tensión, 45% en resistencia a la flexión y 42 % en la deformación a la rotura (Motaleb, Islam & Milasius, 2019). VI) se produjeron compuestos de resina de poliéster insaturado y 40 % en peso de telas de yute; los cuales posteriormente fueron irradiados (2.5-7.5 kGy) y sometidos a diferentes temperaturas (-18 °C, 30 °C y 50 °C). Los resultados muestran mayor resistencia a la tensión y módulo de tensión, para los materiales compuestos irradiados a 5 kGy y sometidos a -18 °C. Este mejoramiento se debió a la alta adherencia entre las fibras de yute y la matriz poliéster (Hossain, Chowdhury & Khan, 2017).

4.1. Materiales compuestos de resina poliéster y fibras de luffa irradiados

Concretos a base de resina poliéster, arena sílice y fibras de luffa (0.3 y 0.9 %), fueron irradiados con rayos gamma a dosis de 50 y 100 kGy. En la Figura 11 se muestran la resistencia mecánica a la compresión de los concretos. Para el concreto tomado como control (sin fibras y sin irradiación), la resistencia a la compresión fue de 27 MPa, la cual se disminuyó ligeramente cuando se añadieron las fibras. Sin embargo, después de ser irradiados, los valores dismi-

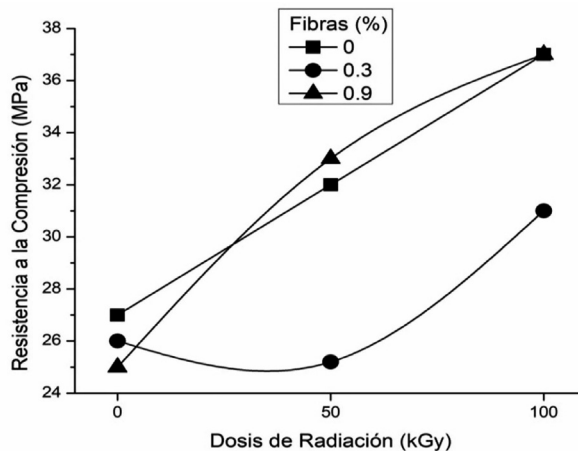


Figura 11. Resistencia a la compresión de concretos con fibras

nuyeron para concretos con 0.3 % de fibras, pero fueron muy similares para 0.9 % de fibras. El máximo valor de compresión fue para concentraciones de fibras de 0.9 % y dosis de radiación de 100 kGy. El cual fue 27 % mayor que el del concreto control. Este incremento puede atribuirse a las modificaciones provocadas por los rayos gamma sobre la resina, los cuales promueven la formación de enlaces entre cadenas poliméricas (*cross-linking*), e incrementan el grado de polimerización.

En el caso de la resistencia a la flexión de los concretos poliméricos. El concreto control presenta un valor de 10 MPa. Cuando se agrega 0.3 % de fibras, los valores aumentan, y lo hacen en mayor medida después de la irradiación. Es decir, los rayos gamma mejoran la unión física entre las fibras y la matriz, ya que las fibras poseen adecuadas propiedades de absorción y de porosidad. Sin embargo, cuando se agrega 0.9 % de fibras, los valores disminuyen, y son más notables estas disminuciones conforme se incrementa la dosis de radiación (Figura 12).

En el caso de la deformación en compresión, los concreto control tienen un valor de 0.019 mm/mm, el cual se incrementa cuando se agregan las fibras y se irradia (Figura 13). Los máximos valores se obtienen para concretos con 0.9 % de fibras e irradiados a una dosis de 100 kGy, los cuales son 48 % mayores que los valores del concreto control. Las fibras añadidas y la aplicación de rayos gamma producen un material compuesto con mayor deformación plástica.

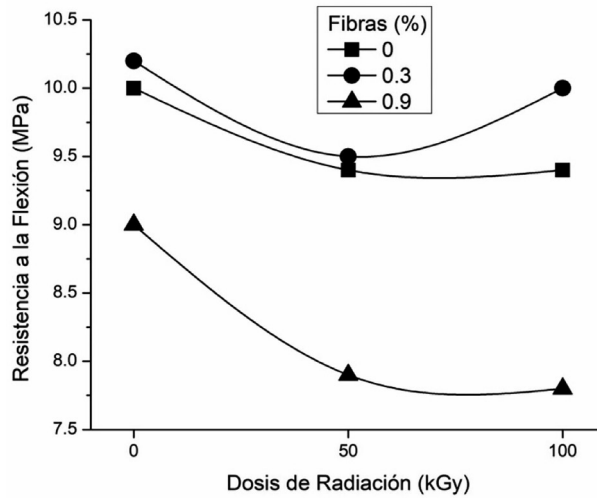


Figura 12. Resistencia a la flexión de concretos poliméricos con fibras de luffa

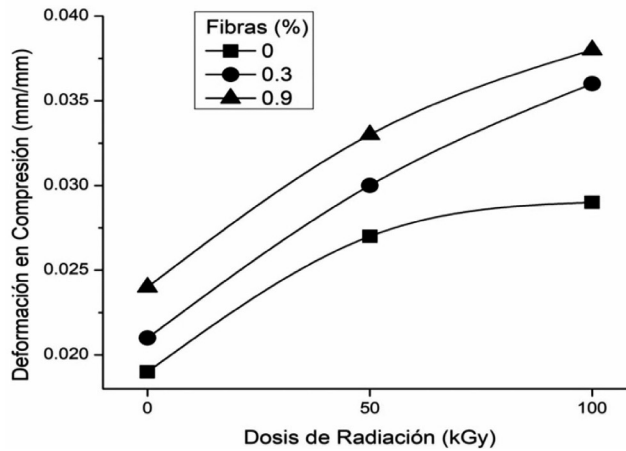


Figura 13. Deformación en compresión de concretos poliméricos con fibras de luffa

Para la deformación debida al esfuerzo de flexión se tiene un valor de 0.41 mm/mm para el concreto control (Figura 14). Los valores se incrementan gradualmente conforme se incrementa la concentración de fibra y la dosis de radiación. Los máximos valores se obtienen para 0.9 % de fibra y 100 kGy, los cuales representan un 37 % de mejoramiento.

El módulo de elasticidad del concreto control fue de 2.85 GPa. Los valores fueron disminuyendo gradualmente al añadir fibras y ser irradiados; siendo los menores valores para concretos con 0.9 % de fibras e irradiados a 50 kG. Los cuales fueron 61 % menores que los del concreto control. Es decir, añadir fibras e irradiar con rayos gamma produce un material compuesto más dúctil.

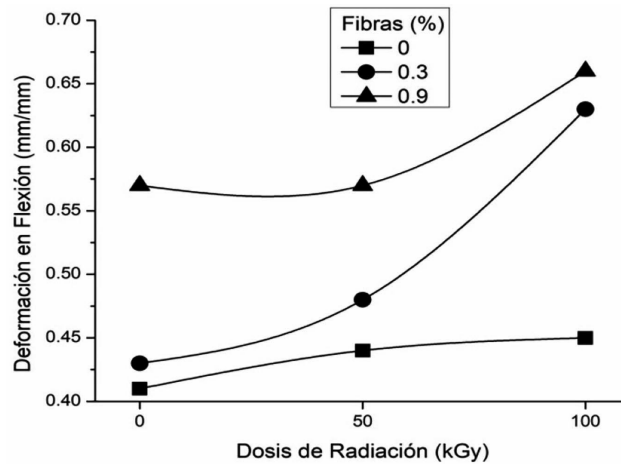


Figura 14. Deformación en flexión de concretos poliméricos con fibras de luffa

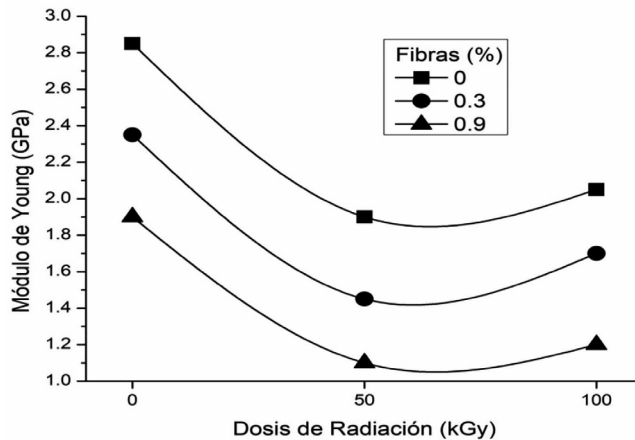


Figura 15. Módulo de elasticidad de concretos poliméricos con fibras de luffa

5. Conclusiones

Con la adición de fibras naturales vegetales, entre ellas las de luffa, y la aplicación de rayos gamma, es posible mejorar las propiedades fisicoquímicas de materiales compuestos elaborados con resinas poliméricas. Las ventajas de utilizar fibras naturales vegetales radican en su biocompatibilidad, biodegradabilidad, durabilidad y bajo costo. Aunado a su baja densidad, con lo cual producir materiales más ligeros. Mientras que el uso de rayos gamma, permite mejorar las interfaces entre las fibras y las matrices poliméricas, lo cual produce incrementos en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de estudios de Maestría otorgada a uno de los autores (H.O. Camacho Gutiérrez). A la Universidad Autónoma del Estado de México, por el financiamiento del proyecto UAEM 6228/2020CIB.

Referencias

- Adekomaya, O., Jamiru, T., Sadiku, R., & Huan, Z. (2017). Negative impact from the application of natural fibers, *J. Clean. Prod.*, 143, 843-846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.037>
- Akerholm, M., Hinterstoisser, B., & Salmén, L. (2004). Characterization of the crystalline structure of cellulose using static and dynamic FT-IR spectroscopy, *Carbohydr. Res.*, 339(3), 569-578. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2003.11.012>
- Ayma, A. (2017). Effect of Gamma radiation on the properties of jute reinforced polyester matrix composites, *J. Textile Sci. Eng.*, 7(2), 1-3. <https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000294>
- Bal, K.E., Bal, Y., & Lallam, A. (2004). Gross morphology and absorption capacity of cell-fibers from the fibrous vascular system of Loofah (*Luffa cylindrica*), *Textile Res. J.*, 74, 241-247. <https://doi.org/10.1177/004051750407400310>

- Boynard, C. A., & D'Almeida, J. R. M. (2000). Morphological characterization and mechanical behavior of sponge gourd (*luffa cylindrica*)–polyester composite materials, *Polym. Plast. Technol. Eng.*, 39(3), 489-499. <https://doi.org/10.1081/PPT-100100042>
- Clough, R.L. (2001). High-energy radiation and polymers: A review of commercial processes and emerging applications, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 185, 8-33. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(01\)00966-1](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(01)00966-1)
- Curling, S., & Winandy, J. E. (2008). Comparison of the effects of gamma irradiation and steam sterilization on southern pine sapwood, *For. Prod. J.*, 58, 87-90.
- Divos, F., & Bejo, L. (2005). The effect of gamma irradiation on the MOE of various species, *Wood Sci. Technol.*, 40(2), 87-93. <https://doi.org/10.1007/s00226-005-0024-y>
- Dobo, J. (1985). Some features of radiation processing in the plastics industry, *Radiat. Phys. Chem.*, 26, 555-558. [https://doi.org/10.1016/0146-5724\(85\)90208-0](https://doi.org/10.1016/0146-5724(85)90208-0)
- Hoque, A., Bhuiya, A. K., Saiduzzaman; Islam A., Khan M. A., & Shauddin S. M. (2015). Preparation of raw jute fabric reinforced and low lignin content modified jute fabric reinforced polyester composites-Effects of Gamma radiation on their properties, *Proceedings of the International Conference on Materials, Electronics & Information Engineering, ICMEIE-2015*, Bangladesh.
- Hossain, S., Chowdhury, A. M. S., & Khan, R. A. (2017). Effect of disaccharide, gamma radiation and temperature on the physic-mechanical properties of jute fabrics reinforced unsaturated polyester resin-based composite, *Radiat. Eff. Defect S.*, 172(5-6), 517-530.
- Hossain, T., Hossain, S., Uddin, M. B., Khan, R. A., & Chowdhury, A. M. S. (2020). Preparation and characterization of sodium silicate-treated jute-cotton blended polymer-reinforced UPR-based composite: effect of γ -radiation, *Adv. Compos. Hybrid Mater.* <https://doi.org/10.1007/s42114-020-00162-4>
- Khan, R. K., Shauddin, S. M., Dhar, S. S., & Khan, M. A. (2014). Comparative experimental studies on the physico-mechanical properties of jute caddies reinforced polyester and polypropylene composites, *J. Polym. Biopolym. Phys. Chem.*, 2(3), 55-61. <https://doi.org/10.12691/jpbpc-2-3-3>

- Loos, W. E. (1992). Effect of Gamma Radiation on the Toughness of Wood. *For. Prod. J.*, 12(5), 261-264.
- Machnowski, W., Gutarowska, B., Perkowski, J., & Wrzosek, H. (2013). Effect of gamma radiation on the mechanical properties of and susceptibility to biodegradation of natural fibers, *Textile Res. J.*, 83(1), 44-55. <https://doi.org/10.1177/0040517512449045>
- Madrid, J. F., & Abad, L. V. (2015). Modification of microcrystalline cellulose by gamma radiation - induced grafting, *Radiat. Phys. Chem.*, 115, 143-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.06.025>
- Mochane, M. J., Mokhena, T. C., Mokhothu, T. H., Mtibe, A., Sadiku, E. R., Ray, S. S. et al. (2019). Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: A review, *Express Polym. Lett.*, 13(2), 159-198. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.15>
- Motaleb, K. Z. M. A., Islam, S., & Milasius, R. (2019). Effect of gamma radiation on the mechanical properties of natural fabric reinforced polyester composites, *Fibers Text. East. Eur.*, 27(4), 88-93. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.1824>
- Oboh, I. O., & Aluyor, E. O. (2009). *Luffa cylindrica* - an emerging cash crop, *Afr. J. Agric. Res.*, 4(8), 684-688.
- FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020). *Fibras del Futuro*. <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/es/>
- Pereira, T. G. T., Wisky-Silva, D., & Eugênio, T. M. C. (2020). Coconut fibers and quartzite wastes for fiber-cement production by extrusion. *Materials Today: Proceedings*, 31(2), 309-314. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.394>
- Quiñones-Bolaños, E., Gómez-Oviedo, M., Mouthon-Bello, J., Sierra-Vitol, L., Berardi, U., & Bustillo-Lecompte, C. (2021). Potential use of coconut fibre modified mortars to enhance thermal comfort in low-income housing. *J. Environ. Manag.*, 277(1), 111503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111503>
- Reis, J. M. L. (2006). Fracture and flexural characterization of polymer concrete reinforced with wood waste. *Congreso Brasileiro de Ciencia e Engenharia de Materiales*, 2871-2882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.008>

- Sanchez-Olivares, G., Rabe, S., Pérez-Chávez, R., Calderas, F., & Bernhard, S. (2019). Industrial-waste agave fibres in flame-retarded thermoplastic starch biocomposites, *Compos. B Eng.*, 177, 107370. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107370>
- Satyanarayana, K. G., Arizaga, G. G. C., & Wypych, F. (2009). Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers-An overview, *Prog. Polym. Sci.*, 34, 982-1021. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002>
- Shen, J., Xie, Y.M., Huang, X., Zhou, S., & Ruan, D. (2012). Mechanical properties of luffa sponge, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 15, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.07.004>
- Siqueira, G., Bras, J., & Dufrense, A. (2010). Luffa Cylindrica as a lignocellulosic source of fiber, microfibrillated cellulose, and cellulose nanocrystals, *BioResources*, 5(2), 727-740. <https://doi.org/10.15376/biores.5.2.727-740>
- Tanobe, V. O. A., Sydenstricker, T. H. D., Murano, M., & Amico, S. C. (2005). A comprehensive characterization of chemically treated Brazilian sponge-gourds (*Luffa cylindrica*), *Polym. Test.*, 24(4), 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2004.12.004>
- Townsend, T. (2019). Natural Fibres and the World Economy. *Discover Natural Fibers Initiative*. https://dnfi.org/coir/natural-fibres-and-the-world-economy-july-2019_18043/
- Tserki, V., Zafeiropoulos, N. E., Simon, F., & Panayiotou, C. (2005). A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Compos. Part A Appl Sci Manuf.*, 36(8), 1110-1118. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.004>