

CONCRETO POLIMÉRICO REFORZADO CON FIBRAS: EFECTO DE LA RADIACIÓN GAMMA

Gonzalo Martínez Barrera*, Elisa Martínez Cruz, Miguel Martínez López

Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca–Atlacomulco, San Cayetano 50200, Mexico; e-mail: gonzomartinez02@yahoo.com.mx

Recibido: Enero 2012; Aceptado: Junio 2012

RESUMEN

El concreto polimérico (PC) es un material compuesto muy versátil debido a su uso, en: construcción y reparación de estructuras, pavimentos de carreteras y puentes, tuberías de aguas residuales y estructurales, así como en paneles decorativos de la construcción. Estos materiales reforzados presentan valores más altos en propiedades como resistencia mecánica, rigidez, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. La ventaja de utilizar polímeros en los PCs es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos; que provocan valores diferentes en cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes. Esta modificación se puede realizar mediante radiación gamma. En este trabajo se estudiaron los efectos de la radiación gamma en las propiedades de deformación mecánica de PCs a base de resina poliéster insaturada, mármol y fibras de polipropileno (PP). Se utilizaron diferentes tamaños de partícula de mármol (0,71, 1,40 y 2,36 mm) y dosis de 200, 250 y 300 kGy.

Palabras claves: concreto polimérico, fibras de polipropileno, mármol, fuerza, radiación gamma

ABSTRACT

Polymer Concrete (PC) is a composite material which having a variety of applications: Building and repair structures, in highway or bridges pavements; as underground wastewater pipes, or as precast components for bridge panels. Some advantages compared to PCC such as: increase bond strength; increase freeze/thaw resistance, abrasion resistance, flexural, compressive and tensile strengths. Such advantages are due to the chemical modifications which provoking changes on cristalinity, density, thermal expansion, elastic modulus, permeability as well as corrosion and wear resistance. Such modifications can be carried out by gamma radiation. In the present work, we have studied the gamma irradiation effects on the *Young* modulus of polyester-based PCs with marble and polypropylene fibers (PP). Several size marble particles were used (0.71, 1.40 and 2.36 mm), and 200, 250 and 300 kGy of gamma doses.

Keywords: Polymer concrete, polypropylene fibers, marble, strength, gamma radiation.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha puesto de manifiesto la necesidad de producir materiales con propiedades mejoradas que superen las limitaciones existentes, tala es el caso de materiales reforzados (“composites”). Los cuales son la combinación de dos o más materiales, y constituidos por una matriz (fase continua) y por algún refuerzo (fase discreta); la matriz (metálica, polimérica o cerámica) es el material mayoritario y contiene al refuerzo, el cual puede estar en forma de partículas, láminas o fibras. Con los materiales compuestos se mejoran propiedades como resistencia mecánica, rigidez, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad con valores mayores que los materiales originales.

El concreto polimérico (PC: por su siglas en inglés) es un material compuesto formado por la

combinación de agregados minerales (arena, grava entre otros) y una resina polimérica. Debido a su rápido secado (dos horas), a valores altos en propiedades mecánicas y a su capacidad para soportar ambientes corrosivos, se ha incrementado el uso de PC en muchas aplicaciones, como una alternativa al concreto hidráulico. Por ejemplo, en construcción y reparación de estructuras, pavimentos de carreteras, puentes, tuberías de aguas residuales y estructurales, paneles decorativos de construcción entre otros.

Debido a su bajo costo, las matrices poliméricas más utilizadas en PC son a base de poliéster insaturado. La resina poliéster tiene una buena resistencia mecánica, adhesión relativamente buena con otros materiales, y buena resistencia química a la congelación y descongelación [1]. La elección de los agregados minerales es muy importante en la elaboración de los PCs, es conveniente tener el volumen más bajo posible de espacios vacíos [2, 3], se han utilizado bentonita cálcica, arena sílice, carbonato de calcio, mármol, entre otros. En algunos trabajos se han añadido fibras orgánicas o sintéticas a los PCs; dentro de estas últimas se encuentran fibras de polipropileno (PP) que ofrecen un menor costo comparado con las fibras de nylon, poliéster o de poliacrilato [4–6]. Poco es el efecto sobre el comportamiento mecánico de los PCs de estos refuerzos antes de sufrir alguna fractura, sin embargo mejoran sustancialmente la respuesta post-agrietamiento: mejora de dureza y ductilidad, así como resistencia a la tracción, flexión, y resistencia al impacto [7 – 11].

Cuando se somete material polimérico a la acción de radiación ionizante, se producen efectos físicos y químicos que dependen de la dosis aplicada y de la naturaleza de los polímeros en cuestión. Es bien conocido que la radiación gamma provoca tres tipos de modificación en los polímeros: degradación (*scission*), entrecruzamiento (*cross-linking*) e injerto (*grafting*), los cuales pueden ser controlados mediante una adecuada dosis de radiación [12, 13]. La ventaja de trabajar con polímeros es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos, obteniéndose materiales con propiedades diferentes en: cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes. Los cambios en las propiedades de un polímero después de la irradiación, se deben primeramente a la reordenación geométrica de su estructura de enlace. Algunas propiedades mecánicas se pueden explicar en función de la rigidez de las cadenas que tiende a evitar que estas se deslicen sobre otras como consecuencia de la orientación de las cadenas laterales, induciendo un cierto grado de cristalinidad.

La radiación gamma se ha utilizado en PCs para mejorar la compatibilidad entre la matriz

polimérica y los agregados por medio de modificaciones estructurales y superficiales de los componentes [3]. En el presente estudio se investigó el efecto de la energía ionizante (radiación gamma) sobre las propiedades de compresión y deformación mecánica de materiales reforzados elaborados con resina poliéster insaturado, mármol y fibras de polipropileno.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. Material. Para la elaboración de los PCs se empleo: Como matriz, resina de poliéster insaturada comercializada con el nombre *Polylite* 32493–00. Sus propiedades y características se muestran en la Tabla 1. Como carga se empleo mármol de diferentes tamaños de partícula: malla 25 (0,71 mm); malla 14 (1,40 mm); y malla 8 (2,36 mm), cuyas propiedades se muestran en la Tabla 2. Se adicionaron fibras de polipropileno, las propiedades se muestran en la Tabla 3. Como iniciador, se utilizó peróxido de metil etil cetona (MEKP) diluido en ftalato de metilo.

Tabla 1. Propiedades de resina poliéster insaturado.

Nombre	POLYLITE
Clave	32493–00
Aplicación	Concreto Polimérico
Química	Orto
Reactividad	Media
Gel (minutos)	6–8
Exotermia (°C)	145–163
Curado (minutos)	120
Viscosidad (cps)	100–200
No. ácido en sólidos	12–26 en solución

2.2. Equipo. Radiación gamma. Los concretos poliméricos y las fibras de polipropileno fueron irradiados con rayos gamma en un radiador *Gammabeam* 651 PT de la compañía *Nordion*, el cual funciona con lápices de cobalto 60 (^{60}Co) con vida media de 5.261 años. La tasa promedio de dosis fue de 8,5 kGy/h.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del mármol.

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³)	2,38 – 3,10
Resistencia a la compresión (MPa)	58– 98
Resistencia a la flexión (MPa)	9,8 –19,6
Resistencia al impacto (cm)	30 – 45
Coeficiente de absorción (%)	0.2
Dureza	3– 4
Porosidad aparente (%)	0,2– 1,2

Tabla 3. Propiedades de la fibra de polipropileno.

Propiedad	Valor
Fuerza a la tracción	0,67 MPa
Módulo de elasticidad	4 MPa
Punto de derretir	165°C
Punto de ignición	600°C
Gravedad específica	0,91

Ensayo de compresión. La evaluación de la resistencia mecánica a la compresión de las probetas de concreto polimérico se realizó en una máquina universal de pruebas marca *Controls*^{MR} con capacidad de 30 toneladas. La Tabla 4 muestra las condiciones del ensayo de compresión.

Tabla 4. Condiciones de trabajo de la máquina universal de pruebas.

Condiciones	Valor
Tipo de ensayo	Control
Velocidad (en fuerza)	25 kgf/s
Velocidad (en posición)	0,30 mm/min
Límite superior de fuerza	25 t
Límite superior de posición	20 mm

Difracción de rayos X. Las fibras de polipropileno fueron estudiadas por difracción de rayos-X en un difractómetro marca *Bruker D8 Advance*. Las condiciones de prueba fueron: potencia de tubo de 30 kV, ventana de 5–80°, tamaño de paso de 0,03° y tiempo de 0,3 s/paso.

2.3. Metodología

2.3.1. Diseño de formulaciones. El concreto polimérico fue elaborado usando un 30% de resina y 70% de mármol en volumen. La formulación base (para tres probetas de CP) se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidad en peso y volumen de los componentes de los concretos poliméricos.

<i>Componente</i>	<i>Peso g</i>	<i>Densidad g·cm⁻³</i>	<i>Volumen cm³</i>
Resina	124,02	1,1	112,5
Mármol	682,5	2,6	262,5
Catalizador	2,48	1,18	2,92

La concentración del mármol tuvo diferentes composiciones, de acuerdo al tamaño de las partículas (0,7, 1,4 y 2,36 mm). Es decir, se elaboraron concretos con un tamaño, con dos tamaños o bien con tres tamaños de partícula.

Para el diseño de las formulaciones de concretos con fibras de polipropileno (al 0,1; 0,2 y 0,3% en volumen), solo se sustituyó parcialmente el volumen original de mármol, tal y como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Cantidad en peso y volumen de los componentes de los concretos poliméricos con 0,1% en volumen de fibras de polipropileno.

<i>Componente</i>	<i>Peso g</i>	<i>Densidad g/cm³</i>	<i>Volumen cm³</i>
Resina	124.02	1.1	112.5
Mármol	682.5	2.6	262.5
Fibra	0.342	0.913	0.375
Catalizador	2.48	1.18	2.92

2.3.2. Preparación de muestras. Para la determinación de la resistencia a la compresión, deformación y módulo de elasticidad estático de los PCs, se elaboraron cubos de 5 x 5 x 5 cm (volumen de cada probeta, 125 cm³). El proceso de preparación se realizó de acuerdo a los siguientes pasos: 1. Pesar las cantidades de mármol, resina, fibra de PP y catalizador requeridas para cada formulación; 2. Mezclar el mármol y la resina hasta obtener una mezcla homogénea; 3. Para concretos con fibra, adicionar el PP de forma gradual para evitar aglomeraciones; 4. Adicionar el catalizador y mezclar (debe realizarse en un periodo no mayor a 4 minutos), 5. Vaciar la mezcla en los moldes correspondientes de manera gradual, esto es, agregar una cantidad suficiente para cubrir una tercera parte de la altura del cubo, apisonar esta cantidad, agregar otra tercera parte, apisonar y agregar el resto del material para llenar el molde y volver a apisonar, y 6) El material, aunque cura en un par de horas, es desmoldado a las 24 horas (Figura 1).



Figura 1. Elaboración de las probetas de concreto polimérico.

RESULTADOS

Módulo de elasticidad estático. Considerando a todos los concretos poliméricos, se obtuvieron los máximos valores del módulo de *Young* cuando se adicionó 0,1% de fibra de PP e irradiando con 250 kGy (para cualquier combinación de tamaños de partícula).

Para concretos con un solo tamaño de partícula los mayores valores se alcanzan con mármol Malla 14 e irradiando con 250 kGy. Estos valores son 27% mayores en relación a concretos sin fibra (Figura 2).

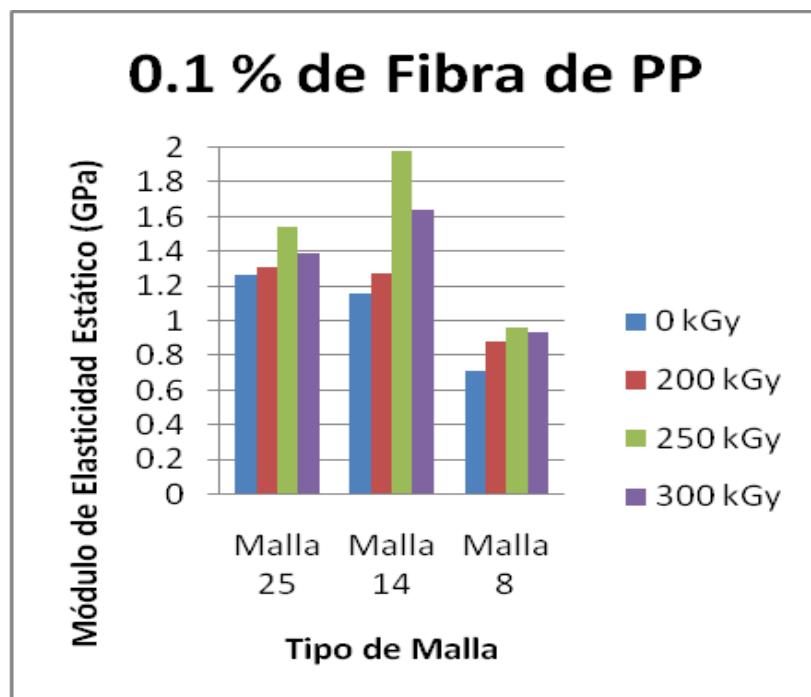


Figura 2. Módulo de elasticidad estático de concretos con un sólo tamaño de partícula de mármol y 0,1% de fibra de polipropileno.

Si se combinan dos tamaños de partículas, los máximos valores del módulo elástico se alcanza mezclando mármol Malla 25 y Malla 14 (para concretos con 0,1% de fibra) y aplicando una dosis de 250 kGy (Figura 3),

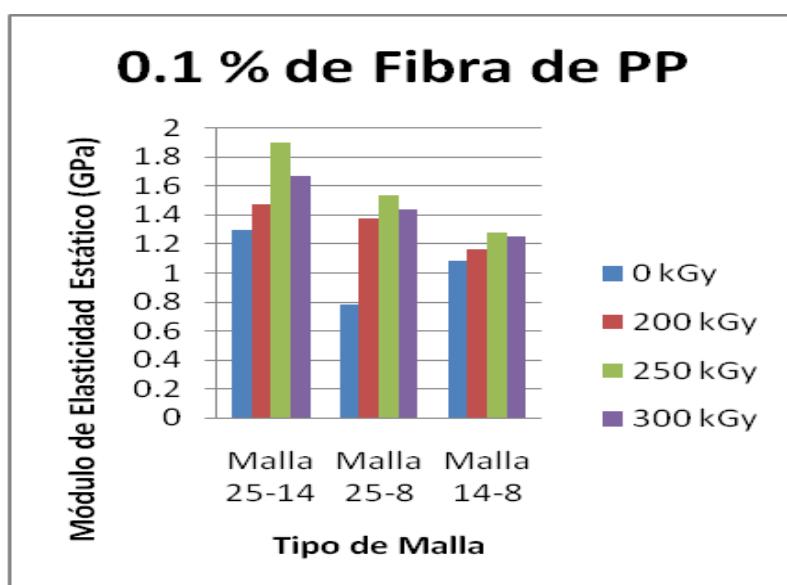


Figura 3. Módulo de elasticidad estático de concretos con dos diferentes tamaños de partícula de mármol y 0,1% de fibra de polipropileno.

Para los concretos con tres tamaños de partícula, de acuerdo a la Figura 4, se observa un ligero aumento en los mayores valores del módulo de *Young* (no mayor al 8%) para concretos con 0,1 y 0,2% de fibras, respecto al concreto sin fibra; pero una disminución para concretos con 0,3% de fibra de PP. Respecto al efecto de la energía ionizante, se observa un comportamiento característico: al irradiar con 250 kGy el módulo elástico presenta los mayores valores, siendo el más alto el del concreto elaborado con 0,1% de fibra de PP.

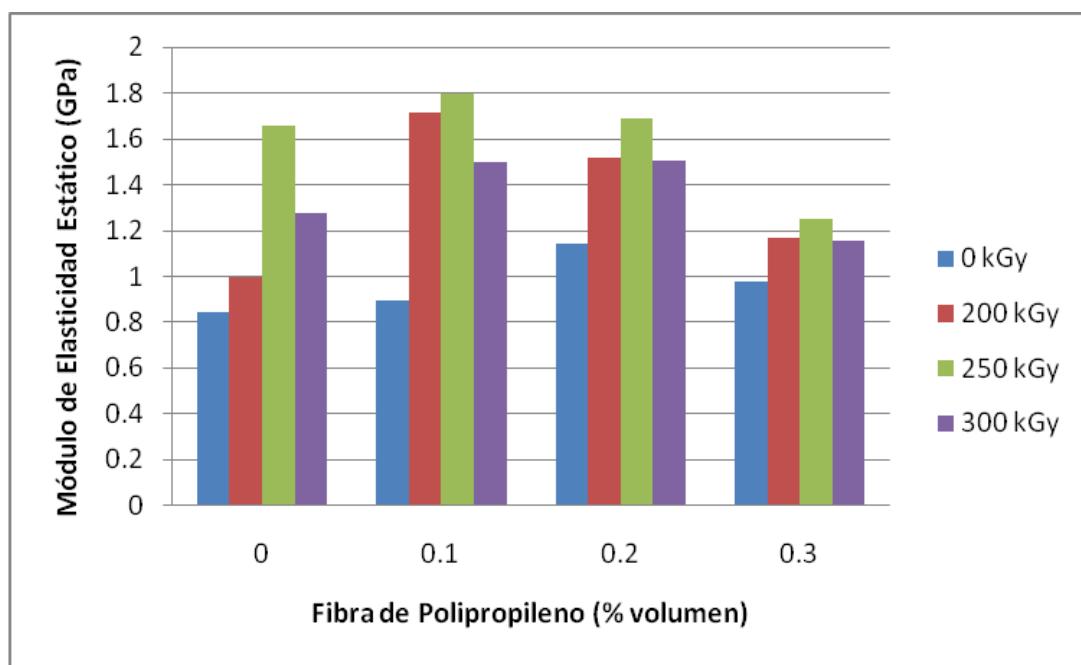


Figura 4. Módulo de elasticidad estática de concretos con tres diferentes tamaños de partícula de mármol.

El módulo de elasticidad estática presenta incrementos al adicionar 0,1% de fibra de polipropileno debido a que las fibras interrumpen y estabilizan las microfisuras provocadas por la fuerza aplicada. Al ser estabilizadas las fisuras por la fibras, se incrementa la resistencia a la compresión lo cual se ve reflejado en el incremento de los valores del módulo de elasticidad estática.

Al adicionar 0,2 y 0,3% de fibra a los concretos elaborados con uno, o dos tamaños de partícula, disminuyen los mayores valores del módulo elástico (valores menores a 1,3 GPa) respecto a los que contienen 0,1% de fibra (2 GPa). Lo anterior se debe a la mala distribución de la fibra en el proceso de mezclado provocada por la cantidad de polipropileno. Se estima que hay un contenido óptimo de fibras (basados en la máxima fuerza) para cada contenido de resina.

El módulo elástico de los concretos se incrementa al someterlos a radiación gamma debido a que la energía ionizante produce efectos en las cadenas poliméricas que los constituyen, como la formación de enlaces entre cadenas y reticulado. Los mayores valores se obtienen al irradiar con 250 kGy, pero disminuyen al alcanzar 300 kGy. Este comportamiento es constante para cualquier combinación de tamaños de partícula. Los incrementos se deben a que los concretos poliméricos se vuelven más resistentes a la compresión, por lo que disminuye la deformación, es decir, se obtienen concretos con mayor rigidez. Lo anterior se atribuye a la reordenación geométrica de la estructura de enlace de la matriz polimérica y de las fibras de polipropileno, así como al incremento en el grado de polimerización de la resina, lo cual mejora el comportamiento mecánico del concreto.

Al someter el concreto a 300 kGy disminuyen los valores de resistencia a la compresión, por lo que módulo elástico es menor. Esto se debe al efecto de la radiación gamma en las cadenas poliméricas del concreto (se presenta ruptura de cadenas).

Difracción de rayos X. En la Figura 5 se muestran los difractogramas de las fibras de polipropileno sin irradiar e irradiadas a 200, 250 y 300 kGy.

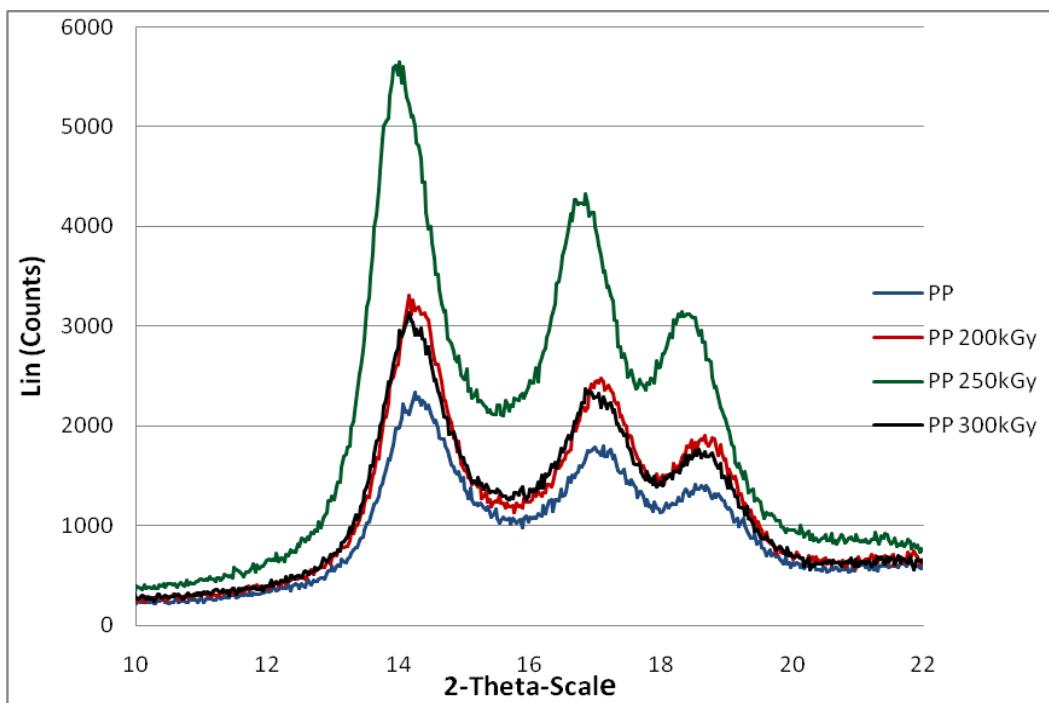


Figura 5. Difractograma de las fibras de polipropileno sin irradiar e irradiadas a 200, 250 y 300 kGy.

Al someter las fibras de polipropileno a radiación gamma se incrementa su cristalinidad lo cual mejora sus propiedades mecánicas. Al relacionar los valores en el cambio de intensidad de las

fibras irradiadas con los resultados de las pruebas mecánicas, se observa que dichos cambios concuerdan con los valores máximos de resistencia a la compresión de los concretos poliméricos. Es decir, a 250 kGy de radiación gamma, se obtiene la mayor resistencia a la compresión por lo que se incrementan los módulos de elasticidad.

4. CONCLUSIONES

Con base en las pruebas mecánicas se estableció que: a) el tamaño de partícula y la concentración de los agregados minerales influyen en las propiedades mecánicas de los concretos poliméricos debido al grado de compactación, además de su adherencia a la matriz polimérica; b) En términos generales, los módulos de Young aumentan al incrementar la dosis de radiación gamma hasta 250 kGy debido a un mayor grado de polimerización de la resina y al entrecruzamiento de las cadenas poliméricas; lo que genera concretos más rígidos; c) Al adicionar fibras de polipropileno en relación adecuada con la resina, los concretos poliméricos presentan incrementos notables en la resistencia a la compresión y por consecuencia los módulos elásticos son mayores debido a que las fibras proporcionan soporte al concreto por su distribución homogénea; d) El uso de radiación gamma como tratamiento de post-curado de concretos poliméricos es una alternativa adecuada para mejorar su comportamiento mecánico.

Agradecimientos. Al CONACYT por el financiamiento del proyecto 49899.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tavares CML, Ribeiro MCS, Ferreira AJM, Guedes RM, *Compos. & Structures*, **57**, 47 (2002)
- [2] Reis JML, Ferreira AJM. *Constr. & Building Mater.*, **18**, 523 (2004)
- [3] Martínez-Barrera G, Brostow W “Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation” en “*Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*” Research Signpost, Kerala India, 27–44 (2009)
- [4] Czarnecki L, Lukowski P, Nejman R, *Cement & Concrete Compos.*, **18**, 417 (1996)
- [5] Martinez-Ramirez S, Zamarad A, Thompson GE, Moore B, *Building and Environment*, **37**, 933 (2002)
- [6] Ribeiro MCS, Reis JML, Ferreira AJM, Marques AT, *Polym. Testing*, **22**, 849 (2003)
- [7] Ahn N, *J. Appl. Polym. Sci.*, **90**, 991 (2003)
- [8] Martinez-Barrera G, Giraldo LF, López B, Brostow W, *Polym. Compos.*, **29**, 1244 (2008)
- [9] Martinez-Barrera G, Espinosa-Pesqueira ME, Brostow W, *e-Polymers*, **083**, 1 (2007)
- [10] Martinez-Barrera G, Texcalpa-Villarruel U, Vigueras-Santiago E, Hernández-López S, Brostow W, *Polym. Compos.*, **29**, 1210 (2008)
- [11] Martinez-Barrera G, Martínez-Hernández AL, Velasco-Santos C, Brostow W, *e-Polymers*, **103**, 1 (2009)
- [12] Martinez-Barrera G, Brostow W, *e-Polymers* **61**, 1 (2010)
- [13] Bobadilla-Sánchez EA, Martinez-Barrera G, Brostow W, Datashvili T, *eXPRESS Polymer Letters*, **3**, 615 (2009)