

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA RADIACIÓN GAMMA EN FIBRAS DE REFUERZO

N. Delbianco^{1,2}, C. Priano², M. Pérez³, A. Satti³

¹ Becaria CONICET, UNS, Dep. Ing., UNS-CIC, B. Blanca, delbianconati@gmail.com

² Instituto de Ingeniería, Dep. Ingeniería, UNS-CIC, B. Blanca, cpriano@uns.edu.ar

³ Dep. Química, INQUISUR, UNS-CONICET, B. Blanca, mperez@criba.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo, se evaluó el efecto de la radiación gamma en macrofibras de polipropileno de uso habitual como refuerzo de hormigón. Cuando se somete material polimérico a la acción de radiación ionizante, se inicia una serie de reacciones químicas con la consecuente modificación molecular, estructural y de las propiedades mecánicas, físicas y térmicas. Dependiendo del tipo de polímero y de la dosis aplicada, es posible que se produzcan escisiones o entrecruzamientos de las cadenas poliméricas y un cambio químico en la superficie de las fibras que puede modificar la adherencia entre éstas y el mortero. Para estudiar este efecto, las fibras fueron expuestas a diferentes dosis de radiación gamma (25, 50 y 100 kGy) y se caracterizaron mediante ensayos a tracción. Complementariamente, se moldearon probetas cilíndricas de hormigón con la incorporación de 4 kg/m³ de fibras de polipropileno para ensayar a compresión. A medida que aumentó la dosis de radiación, se registró un leve incremento en la resistencia a compresión del hormigón fibrado.

Palabras claves: fibras de polipropileno, radiación gamma, hormigón

INTRODUCCIÓN

El efecto beneficioso de fibras en el incremento de ductilidad del hormigón sometido a flexión ha sido motivo de una amplia variedad de estudios. Éstas influyen en todos los modos de falla del hormigón, y en forma especial en las inducidas por fatiga, tensión directa, impacto y esfuerzo de corte [1]. El mecanismo del aumento de la resistencia de las fibras involucra la transferencia de esfuerzos de la matriz cementícea a las fibras mediante corte en la interfase. El esfuerzo se comparte por ambas hasta que la matriz se agrieta, entonces el total del esfuerzo se transfiere progresivamente hacia las fibras.

En la industria de la construcción se emplean diferentes tipos de fibras para reforzar los materiales con poca capacidad de deformación de tracción. Una de las más empleadas son las fibras sintéticas, y en especial dentro de ellas, las de polipropileno. Originalmente se utilizaron las denominadas monofilamento de sección uniforme y posteriormente se buscó mejorar la adherencia a través del proceso de fibrilación para provocar una estructura ramificada y secciones irregulares.

La forma, textura superficial y recubrimiento de las fibras inciden directamente en la efectividad para la transmisión de esfuerzos en el material compuesto. La interacción matriz-fibra de polipropileno se establece, principalmente, por la fricción entre ambas en la interfaz, después de producida la primera fractura del material. Este hecho confiere al

hormigón un comportamiento dúctil, evitando que se produzca la rotura frágil. Por esta causa tiene gran importancia la morfología y la superficie de las fibras en contacto con la matriz [2].

Mientras que en las fibras metálicas la adherencia se mejora en función de la forma y geometría, en las fibras poliméricas además de estas dos características, existen varias técnicas para mejorar la interacción de las mismas con la pasta de cemento. Se han reportado diversos tratamientos para modificar la superficie de las fibras como, por ejemplo, con plasma de argón, con ácido crómico, oxifluoración, e inclusive con la incorporación de nanopartículas para elaborar fibras bi-componentes [3-8].

La radiación gamma es otra de las técnicas utilizadas que genera cambios significativos en las propiedades físicas y químicas de las fibras de polímero. La alta energía que poseen los rayos gamma rompe enlaces de las cadenas poliméricas, produciendo de esta manera radicales y macroradicales libres. Estos radicales reaccionan entre sí, en los fenómenos conocidos como entrecruzamiento y escisión. En el primero, los macroradicales formados reaccionan para dar cadenas poliméricas, ramificadas o reticuladas, de mayor peso molecular. En el segunda, reaccionan radicales y macroradicales entre sí para producir cadenas de menor tamaño al original. Estos dos efectos cambian drásticamente muchas de las propiedades finales del polímero, como las mecánicas y viscoelásticas. También pueden generarse cambios morfológicos y en sus funcionalidades químicas [9].

La probabilidad de cuanto sucede de cada uno de esos efectos depende no sólo de la estructura química de la muestra y la dosis de radiación absorbida por ella, sino también de la tasa de dosis, de la atmósfera en la cual se irradia y de la temperatura a la cual se realiza la irradiación [10, 11]. Algo a recalcar de esta técnica, es que fácilmente se pueden cambiar las propiedades de un dado polímero, sin necesidad del uso de agentes químicos, solventes o altas temperaturas.

Los estudios sobre el polipropileno indican que la irradiación a 50 kGy en el aire provoca un ligero incremento de la cristalinidad [12]. También se ha informado que la radiación introduce una disminución de algunas propiedades mecánicas del polipropileno, como la deformación por tensión [13-15]. Sin embargo, se han reportado trabajos en los que, al incorporar estas fibras irradiadas a una matriz de hormigón, se han logrado mejoras en algunas de sus propiedades mecánicas [11, 16-17]. Martínez-Barrera *et al.* indican que hay una mejor adherencia de fibras de polipropileno irradiadas al hormigón, debido a un aparente agrietamiento superficial de las fibras [11].

En el presente trabajo se estudió el efecto de la radiación gamma sobre una macrofibra de polipropileno de origen comercial con el fin de, en una etapa posterior, poder evaluar su comportamiento como refuerzo a flexión en matrices cementíceas. En esta etapa, se analizó la resistencia a tracción de la fibra antes y después de someterla a diferentes dosis de radiación gamma, así como la resistencia a compresión de hormigón elaborado con la incorporación de estas fibras de polipropileno irradiadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron macrofibras de polipropileno de uso comercial como refuerzo en hormigón, denominadas en este trabajo como "S" (Figura 1). Fueron expuestas a distintas dosis de radiación gamma de Co-60, en la planta de irradiación semi-industrial (PISI) del Centro Atómico Ezeiza. Se alcanzaron dosis de 25, 50 y 100 kGy, a temperatura ambiente y en aire.



Figura 1: Fibras S.

En la primera etapa de trabajo se realizaron ensayos de tracción con un equipo Instron (Figura 2) operado con Programa Bluehill para caracterizar las macrofibras. Se trabajó con un grupo de 6 fibras de cada dosis de radiación para determinar la tensión máxima a tracción, la deformación máxima y el módulo elástico. Se evaluó la morfología de la fibra antes y después del ensayo a tracción para observar las diferencias en la sección de rotura.



Figura 2: Ensayo a tracción con equipo Instron.

Una vez caracterizadas, se utilizaron las fibras S para elaborar hormigón, incorporándolas en una proporción de 4 kg/m^3 , dentro del rango sugerido por el fabricante en la ficha técnica. Para ello, se dosificaron mezclas de hormigón de relación agua-cemento $a/c=0,47$ y se utilizaron como materiales, agua desmineralizada, cemento proveniente de una fábrica de la provincia de Buenos Aires, caratulado como CPC40, canto rodado de tamaño máximo 19 mm y arena natural silíceo de módulo de finura 3,1.

Se moldearon probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para determinar la resistencia a compresión a 28 días de edad, de cinco pastones diferentes. Todas las muestras se mantuvieron en cámara húmeda hasta la edad de ensayo. En la Tabla 1 se detalla la nomenclatura otorgada a cada uno de ellos.

Tabla 1: Pastones elaborados

| Muestra | Característica |
|---------|---------------------------------|
| P | Sin fibras |
| S | Con fibras sin irradiar |
| S25 | Con fibras irradiadas a 25 kGy |
| S50 | Con fibras irradiadas a 50 kGy |
| S100 | Con fibras irradiadas a 100 kGy |

En todos los casos la dosificación utilizada fue de 360 kg de cemento, 830 kg de arena y 1020 kg de canto rodado por metro cúbico de hormigón, obteniéndose una mezcla de buen aspecto y con una consistencia plástica. Al incorporar las fibras no se modificó significativamente el asentamiento pero se constató cierta dificultad para la terminación superficial de las probetas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de las fibras de polipropileno

Ensayo a tracción

Las fibras S son del tipo multifilamento con una superficie rugosa marcada con un patrón para mejorar la adherencia con la matriz cementicia. En cuanto a las dimensiones, tienen una longitud de 48 mm y una sección rectangular de 1,37x0,53 mm, con un diámetro equivalente de 0,96 mm. El índice de esbeltez o relación de aspecto, definido como la relación longitud/diámetro, resulta de 50.

En la Figura 3(a) se puede observar la deformación que sufre la fibra S sin irradiar al ensayarla a tracción, y en la Figura 3 (b, c y d) el cambio en el aspecto de la zona de rotura en las fibras irradiadas, a medida que aumenta la dosis de radiación gamma.

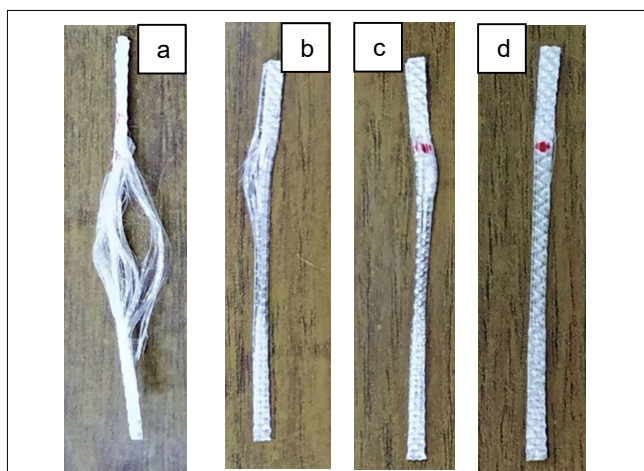


Figura 3: Zona de falla en fibras S (a) sin irradiar y con (b) 25, (c) 50 y (d) 100 kGy de dosis de irradiación.

En la Figura 4 y 5 se observan las características de la superficie de la fibra sin irradiar, antes y después del ensayo a tracción, respectivamente. En estas imágenes se ve claramente el patrón en la superficie de la macrofibra y la separación de los filamentos en la zona de rotura.

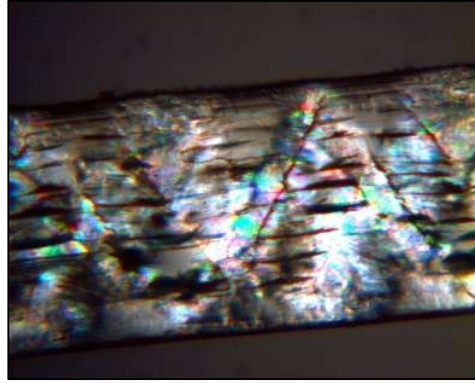


Figura 4: Fibras S sin irradiar antes de ensayar.

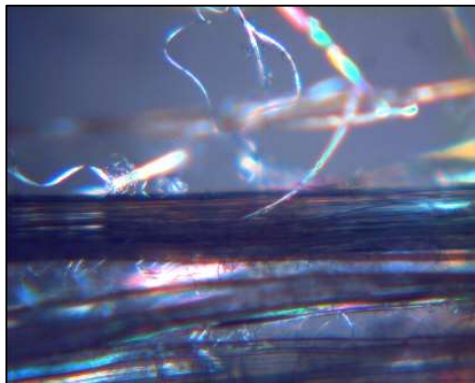


Figura 5: Fibras S sin irradiar luego del ensayo.

Los resultados del ensayo a tracción de las fibras S se detallan en la Tabla 2, donde cada uno de los valores es promedio de 6 determinaciones.

Tabla 2: Fibras “S” ensayadas a tracción

| Muestra | Tensión Máxima (MPa) | Deformación Máxima (%) | Módulo de elasticidad (GPa) |
|---------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| S | 297 ± 18 | 16,1 ± 2,0 | 4,0 ± 0,4 |
| S25 | 257 ± 17 | 13,2 ± 0,9 | 4,0 ± 0,8 |
| S50 | 210 ± 27 | 8,9 ± 0,7 | 5,0 ± 0,9 |
| S100 | 143 ± 30 | 7,1 ± 1,1 | 4,3 ± 0,2 |

Se pudo establecer que la máxima tensión alcanzada en el ensayo de resistencia a tracción se ve afectada por la acción de la radiación gamma, ya que se registraron disminuciones del orden del 48 % para la mayor dosis aplicada. Un comportamiento similar se observa cuando se evalúa la deformación, donde las pérdidas alcanzan a ser de más del 55 % para las fibras irradiadas con una dosis de 100 kGy. En cuanto a los valores del módulo de elasticidad no se puede establecer una influencia significativa de la radiación sobre las fibras.

Este comportamiento mecánico podría ser consecuencia de los dos efectos principales producidos por la irradiación de polímeros, que en el caso del polipropileno pueden competir, el entrecruzamiento y la escisión. La escisión, que suele prevalecer en el polipropileno, produce cadenas más chicas, razón por la cual se observa una disminución de los valores de tensión con la radiación [18,19]. Sin embargo, estas mismas cadenas de menor tamaño, a su vez pueden plegarse y ordenarse más fácilmente, generando una baja proporción de zonas cristalinas dentro de lo que en la muestra no irradiada era zona amorfa [11,18]. Este efecto, junto con la proporción de polímero que también entrecruce, afectaría el comportamiento elástico de la fibra, como si fueran dominios interrumpiendo el alineamiento de las cadenas al sufrir la deformación de estiramiento [19].

Ensayo a compresión del hormigón reforzado con fibras

En la Figura 6 se representan los resultados de los ensayos a compresión sobre probetas de hormigón sin la incorporación de fibras (P), con la incorporación de 4 kg/m³ de fibras (S) y con la incorporación en la misma proporción de fibras irradiadas con una dosis de 25 kGy, 50 kGy y 100 kGy de radiación gamma (denominadas como S25, S50 y S100 respectivamente). Para cada una de las mezclas se graficaron los promedios de tres determinaciones y el correspondiente desvío estándar.

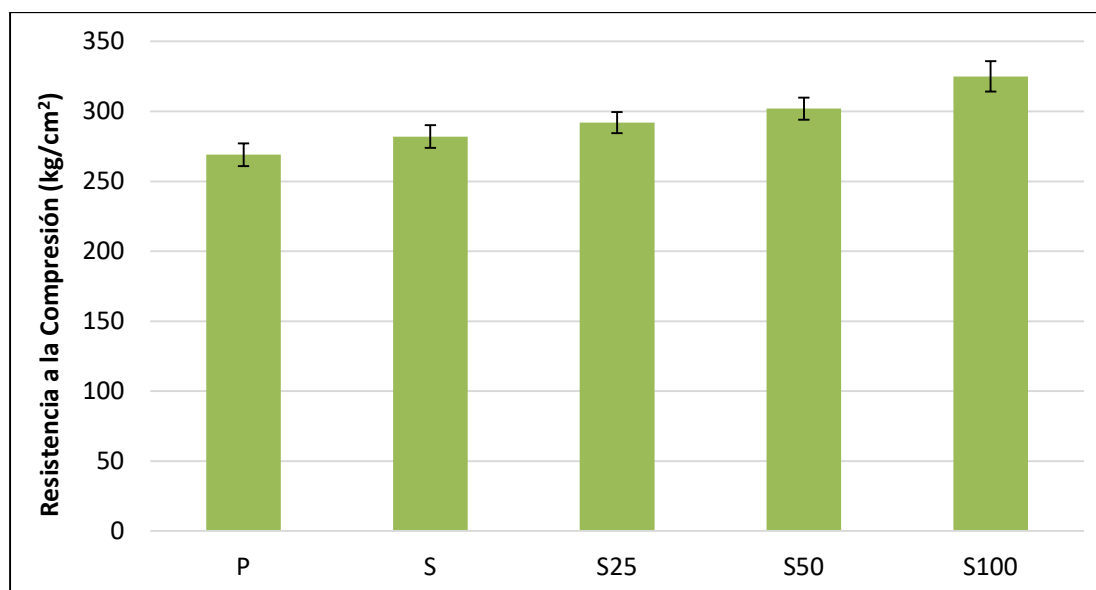


Figura 6: Ensayo a compresión de probetas de hormigón fibrado.

Se puede observar que, al incorporar al hormigón las fibras sin irradiar, se produce un leve aumento (5 %) en la resistencia a compresión. Este efecto se acentúa para los hormigones elaborados con las fibras irradiadas. Se registró una tendencia ya que, a medida que la dosis de irradiación aumenta, también lo hace el incremento de la resistencia. El máximo valor obtenido corresponde a 100 kGy de radiación gamma, con un aumento del 15 % respecto del hormigón con fibras sin irradiar y del 21 % respecto al hormigón sin la incorporación de fibras.

Estas diferencias en el comportamiento en la compresión podrían estar en parte relacionadas con la mejora en la adherencia de la fibra con la matriz cementicia debido a los cambios superficiales originados por la radiación, como indicaran los estudios de Martinez-Barrera *et al.* [11].

CONCLUSIONES

La radiación gamma generó cambios en la estructura de la fibra de polipropileno analizada, que se vieron reflejados en sus propiedades mecánicas. A mayor dosis de irradiación, se observó una disminución en la tensión máxima debida a la escisión de cadenas poliméricas. También se registró una disminución en la deformación a tracción, debido a un impedimento dado por la posible formación de zonas cristalinas y de cadenas entrecruzadas por la radiación.

El aumento en la resistencia a compresión del hormigón elaborado con las fibras irradiadas se puede asociar a una mejora en la interacción con la matriz para la transferencia de cargas. La modificación en las propiedades del polipropileno irradiado y los posibles cambios en la estructura superficial pudieron generar un mayor grado de anclaje y un fortalecimiento de la adherencia. Se continúa trabajando en el tema para comprobar estas hipótesis.

REFERENCIAS

- [1] Carmona Malatesta S, Cabrera Contreras M, "Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero", Revista Ingeniería de Construcción, vol. 24, N°1, (2009), 74-94.
- [2] Cornejo Álvarez L, "Influencia de la adición de fibras cortas discontinuas en las propiedades y en el comportamiento de los materiales cementíceos: parámetros de evaluación de la eficiencia de su utilización", Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, (2014), p.142.
- [3] Singh S, Shukla A, Brown R, "Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix", Cement and Concrete Research, vol. 34, (2004), 1919–1925.
- [4] Morent R, De Geyter N, Verschuren J, De Clerck K, Kiekens P, Leys C, "Non-thermal plasma treatment of textiles", Surface & Coatings Technology, vol. 202, (2008), 3427–3449.
- [5] Terlingen J, "Introduction of functional groups at polymer surfaces by glow discharge techniques". Functionalization of Polymer Surfaces: Chapter 2. Europlasma Technical Paper, (2008), p. 29.
- [6] Richaud E, Farcas F, Divet L, Benneton J, "Accelerated ageing of polypropylene geotextiles, the effect of temperature, oxygen pressure and aqueous media on fibers-methodological aspects", Geotextiles and Geomembranes, vol. 26, (2008), 71-81.
- [7] Felekoglu B, Tosun K, Baradan B, "A comparative study on the flexural performance of plasma treated polypropylene fiber reinforced cementitious composites", Journal of Materials Processing Technology, vol. 209, (2009), 5133–5144.
- [8] Kaufmann J, Lübben J, Schwitter E, "Mechanical reinforcement of concrete with bi-component fibers", Composites: Part A, vol. 38, (2007), 1975–1984.
- [9] Satti AJ, Ressia JA, Cerrada ML, Andreucetti NA, Vallés EM, "Rheological analysis of irradiated crosslinkable and scissionable polymers used for medical devices under different radiation conditions", Radiation Physics and Chemistry, vol. 144, (2018), 298-303.
- [10] Martínez-Barrera G, Campos C, Ureña-Nuñez F, "Gamma radiation as a novel technology for development of new generation concrete", Gamma Radiation, Chapter 6, IntechOpen, (2012), 90-114.
- [11] Martínez-Barrera G, Viguera-Santiago E, Hernández-López S, Brostow W, Menchaca-Campos C, "Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers", Polymer Engineering and Science, (2005), 1426-1431.
- [12] Zhang XC, Cameron RE, "The morphology of irradiated isotactic polypropylene", J. Appl. Polym. Sci. vol. 74, N° 9, (1999), 2234-2242.
- [13] Nishimoto S, Kitamura K, Watanabe Y, Kagiya T, "The correlation between the morphology and radiation resistance of polypropylene solid materials", Radiat. Phys.Chem. vol. 37, N°1, (1991), 71-75
- [14] Rolando RJ, "Radiation Resistant Polypropylene- New Developments", J. Plastic Film Sheeting, vol. 9, N° 4, (1993), 326-333.
- [15] Martakis N, Niaonakis M, Pissimissis D, "Gamma-sterilization effects and influence of the molecular weight distribution on the postirradiation resistance of polypropylene for medical devices", J. Appl. Polym. Sci. vol. 51, N° 2, (1994), 313-328.

- [16] Menchaca Campos C, Barrera-Diaz CE, Martínez-Barrera G, Gencel O, "Influence of irradiated polymeric fibers on the mechanical properties of concretes: analysis by microscopy", *Current Microscopy Contributions to Advances in Science and Technology*, (2012), 1123-1129.
- [17] Martínez-Barrera G, Brostow W, "Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation", *Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*, *Research Signpost*, (2009), 27-44.
- [18] Satti AJ, Andreucetti NA Quijada R, Vallés EM, "Crosslinking of metallocenic α -olefin propylene copolymers by vacuum gamma irradiation", *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 81, N° 12, (2012), 1874-1880.
- [19] Angel J Satti, Erica C Molinari, Augusto GO de Freitas, Walter R Tuckart, Cristiano Giacomelli, Andrés E Ciolino, Enrique M Vallés, "Improvement in abrasive wear resistance of metallocenic polypropylenes by adding siloxane based polymers", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 188, (2017), 100-108.