

## Capítulo 5

# Materiales Reciclados de Llantas Automotrices y la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto

Eduardo Sadot Herrera-Sosa<sup>1</sup>, Gonzalo Martínez-Barrera<sup>2</sup>, Carlos Barrera-Díaz<sup>1</sup>, Epifanio Cruz-Zaragoza<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable, Universidad Autónoma del Estado de México – Universidad Nacional Autónoma de México (UAEM-UNAM), Carretera Toluca-Atlacomulco, km 14.5, Unidad El Rosedal, C.P. 50200, Toluca, Edo. de México, México.

<sup>2</sup>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, México.

<sup>3</sup>Unidad de Irradiación y Seguridad Radiológica, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, A.P. 70-543, 04510, D.F. México.

[sadoths@yahoo.com.mx](mailto:sadoths@yahoo.com.mx), [gonzomartinez02@yahoo.com.mx](mailto:gonzomartinez02@yahoo.com.mx),  
[cbd0044@yahoo.com](mailto:cbd0044@yahoo.com), [ecruz@nucleares.unam.mx](mailto:ecruz@nucleares.unam.mx)

Doi: <http://dx.doi.org/10.3926/oms.245>

### Referenciar este capítulo

Herrera-Sosa, E.S., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C., & Cruz-Zaragoza, E. (2015). Materiales reciclados de llantas automotrices y la radiación gamma en el mejoramiento del concreto. En Martínez Barrera, G., Hernández Zaragoza, J.B., López Lara, T., & Menchaca Campos, C. (Eds.). *Materiales Sustentables y Reciclados en la Construcción*. Barcelona, España: OmniaScience. pp. 73-93.

## **1. Introducción**

El reciclaje de llantas es un serio problema para el ambiente, se estima que en México de los 30 millones de llantas que se desechan, solo el 10% se recicla. Los tiraderos de llantas no solo son antiestéticos y sitios de riesgo de incendios, sino que además representan un riesgo a la salud como criaderos de fauna nociva como ratas, cucarachas, moscas y mosquitos, que pueden propagar enfermedades. Algunos incendios de estos tiraderos pueden durar meses y hasta años (Taha, El-Dieb & Nehdi, 2008; Dhir, Limbachiya & Paine, 2001) por lo cual el desecho de llantas en rellenos sanitarios es a menudo prohibido. En consecuencia se ha incrementado el número de tiraderos ilegales con los consecuentes problemas ambientales y de salud, ya que en caso de producirse incendios se contamina el aire, lo vuelve tóxico, contamina los mantos freáticos del subsuelo; además estos sitios se convierten en criaderos de fauna nociva (roedores, cucarachas, víboras, arañas, alacranes, mosquitos, etc.), portadores de enfermedades o que representan un peligro a los seres humanos, así mismo contribuyen al deterioro de la imagen urbana.

Probablemente el método más utilizado de reciclaje de llantas es el reúso de estas después del destalonamiento (remoción de los alambres de acero). Son grandes las limitantes en torno a la reutilización de las llantas (Brown, Cumming, Morzek & Terrebonno, 2011; Briodsky, 2001). El método más común de desecho de llantas es quemarlas para la producción de vapor, electricidad o calor. El uso de llantas como combustible alternativo en hornos de cemento es generalizado en todo Estados Unidos y Europa (Davies & Worthinton, 2001). Pero el costo como combustible es considerablemente menor que el material original, lo cual constituye un buen ejemplo de *down-cycling*, que es el proceso por el cual al recuperar un material para su reutilización, se hace en un producto de menor valor o se compromete la integridad del material a través del proceso de recuperación, lo que significa que no puede ser utilizado en la fabricación del producto original. Otro uso para la reutilización de llantas es en mezclas bituminosas en caliente como polvo de llanta para la modificación de aglutinantes en los pavimentos de asfalto (Nelson & Hossain, 2001; Amirhanian, 2001; Navarro, Partal, Martínez-Boza & Gallegos, 2005).

Actualmente la industria del renovado ha tenido avances significativos en el proceso de reciclaje de llantas, logrando la separación de los tres componentes básicos: fibra textil, acero y elastómero. Estos dos últimos tienen diversas aplicaciones en la industria de la construcción como en pavimentos, carreteras y estructuras. En general, son agregados al concreto para modificar sus propiedades.

El concreto es uno de los materiales más importantes dentro de la industria de la construcción, esto se debe no solo a su costo sino a las propiedades que presenta como su fácil colocación antes del fraguado, su resistencia al intemperismo, su durabilidad y resistencia. Debido a esto su uso es muy popular alrededor del mundo, sin embargo su empleo tiene un gran impacto en el medio ambiente, en primer lugar, se requieren de una gran cantidad de recursos naturales para su fabricación (arena, grava y agua), además la producción del Cemento Portland genera dióxido de carbono que es liberado a la atmósfera, se estima que la industria cementera es la responsable de la emisión de una tonelada de CO<sub>2</sub> al año a nivel mundial (Malhotra, 2000).

En aras de reducir el impacto ecológico que esto conlleva, se han hecho esfuerzos por disminuir el consumo de recursos naturales no renovables en la fabricación del concreto. Una opción viable para la solución al problema causado por llantas de desecho es el reúso del elastómero de llanta en el concreto como sustituto del agregado fino o grueso, procurando la calidad del

producto y de ser posible buscar el incremento de las propiedades deseables como la resistencia, el módulo de elasticidad y la durabilidad.

## 2. Llantas Automotrices

En épocas prehispánicas, los pobladores de América central y del Sur utilizaban látex líquido que brotaba del árbol, el cual secaban y hervían en agua hasta formar una masa blanda y gomosa con la que hacían pelotas. Esta goma era dura, elástica y podía cortarse, mientras estuviera seca; pero no podía ser extendida sobre objetos.

Durante el siglo XVIII se encontró que era mejor usar el látex natural, ya que se podía extender con facilidad y al secarse dejaba una capa de goma pura, fuerte, flexible e impermeable. Tiempo después, se descubrió que un compuesto de hidrocarburos podía disolver la goma solidificada, la que al regresar a su estado sólido, podía ser amasada y machacada más fácilmente que la original. Fue en el siglo XIX cuando se descubrió que al mezclar la goma con azufre y ser calentada, esta endurecía y tomaba la calidad del cuero, sin disolverse con tanta facilidad con petróleo ni con otras soluciones, además de ser resistente al calor, a dicho proceso se le llamó vulcanización.

La fabricación de llantas automotrices se divide en tres etapas: a) En la primera, se elabora un modelo por computadora, que contiene el talón, el cinturón y la carcasa de la llanta. Posteriormente, se determina el proceso de fabricación, los materiales y las cantidades a emplear; b) Durante la segunda etapa, se elige la mezcla y el dibujo de la banda de rodadura, para fabricar llantas con cortes a mano. Los cuales son examinados en laboratorio y sometidos a pruebas de resistencia mecánica, térmica (desde -40°C hasta 50°C) y química; c) La tercera etapa es la fabricación en serie y consta de tres partes.

*Primera etapa:* denominada mezcla de gomas (Tabla 1), en esta el hule se mezcla con emulgentes y el negro de humo, para llevar a cabo la polimerización. El negro de humo es fabricado a partir de aceite y gas quemado. El aceite ayuda en la adherencia y hace que la mezcla sea blanda. En la fase de vulcanización, el azufre procura que las cadenas de moléculas de hule formen redes, para después obtener goma elástica.

Sustancias	%
Hule	48
Negro de humo	25
Aceite	12
Productos Químicos	4
Azufre	1
Otros	10

Tabla 1. Porcentaje de sustancias en la mezcla de goma

*Segunda etapa:* mediante el uso de acero y fibras sintéticas, se obtiene la carcasa, los núcleos de talón y las capas del cinturón radial. En el caso de la carcasa se cablean las fibras textiles artificiales, normalmente de rayón y se transforma en un cordón que junto con el acero se colocan a cierto ángulo. Posteriormente se recubren los cables con hule, se añade el cinturón de acero y más tarde se coloca la banda continua.

*Tercera etapa:* denominada de vulcanización, en la cual la llanta obtiene su aspecto definitivo; consiste en aplicar una temperatura entre 150 y 170°C a alta presión, haciendo que las cadenas de hule sean reticuladas. Finalmente, la llanta en bruto se prensa en moldes, aplicando presión de vapor o gas inerte (nitrógeno) de 12 hasta 24 atmósferas, para poder grabar el dibujo de la llanta durante un tiempo de 10 a 12 minutos.

Los diferentes tipos de llantas se diferencian por el porcentaje de los elementos químicos y los materiales que las constituyen (Tablas 2 y 3).

Elemento	%
Carbono, C	70
Fierro, Fe	15
Hidrógeno, H	7
Dióxido de Silicio, SiO <sub>2</sub>	5
Óxido de Zinc, ZnO	2
Azufre, S	1-3
Cloro, Cl	0.2-0.6
	<b>(ppm)</b>
Plomo, Pb	60-760
Níquel, Ni	77
Cadmio, Cd	5-10
Cromo, Cr	9-7
Talio, Tl	0.2-0.3

Tabla 2. Composición química de la llanta

Tipo de llanta	Hule estireno-butadieno (SBR) (%)	Hule Natural (NR) (%)	Alambres de acero "armónico" (%)	Fibras textiles (%)
Automóvil	70	-	15	15
Camiones de transporte	-	70	29	1
Maquinaria para excavación	70	-	15	15
Maquinaria agrícola	-	70	5	25

Tabla 3. Materiales que componen los diferentes tipos de llantas

Los copolímeros estireno-butadieno (S-B) son los hules sintéticos que han sustituido prácticamente en su totalidad al hule natural, su composición más común es de 25% de estireno y 75% de butadieno; sus aplicaciones incluyen en orden de importancia: Llantas, espumas, empaques, suelas para zapatos y mangueras.

### 2.1. Proceso de Reciclaje de Llantas

Mientras países europeos como Alemania, Francia, Austria reciclan hasta el 60% de sus llantas usadas, en México prácticamente no existe tal reciclado, debido a la escasa conciencia ambiental y a un inexistente sistema de control. De los aproximadamente 30 millones de llantas que se desechan anualmente en México, el 91% terminan en lotes baldíos, ríos y carreteras (Figura 1). Varios estudios han demostrado que la quema de llantas libera sustancias de máxima peligrosidad para el ser humano, tales como monóxido de carbono, furanos, tolueno, benceno y óxido de plomo (US Environmental Protection Agency, 1997).

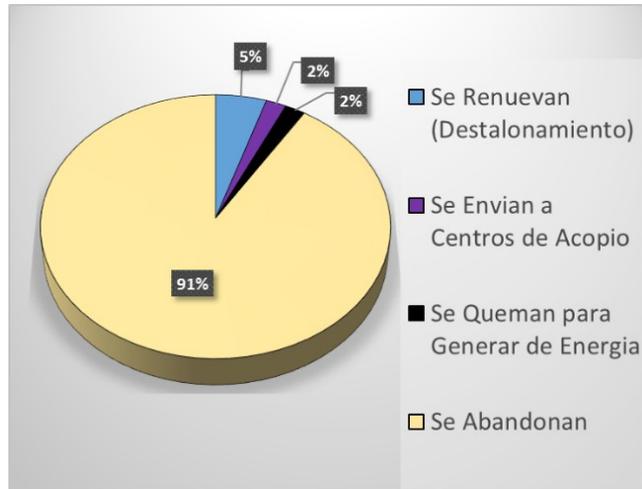


Figura 1. Disposición de llantas de desecho en México (Adaptado de Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM)

El reciclaje, se define como la obtención de materiales a partir de desechos, mediante el empleo de procesos fisicoquímicos o mecánicos, donde se somete un producto ya utilizado, a un tratamiento total o parcial para obtener una materia prima diferente o un nuevo producto, introduciéndolo de nuevo en el ciclo de vida útil. Las tecnologías para el reciclaje se implementan ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales en un sentido macro económico y para eliminar de forma eficaz los desechos.

El reciclaje se inscribe en la estrategia de tratamiento de residuos de las “Tres R”:

- Reducir: acciones para disminuir la producción de objetos susceptibles de convertirse en residuos.
- Reutilizar: acciones que permiten el volver a usar un producto para darle una segunda vida, con el mismo uso u otro diferente.
- Reciclar: el conjunto de operaciones de recogida y tratamiento de residuos que permiten reintroducirlos en un ciclo de vida (Greenpeace, 2011).

Para reciclar los materiales que conforman las llantas, es necesario que estas se sometan a los siguientes procesos:

- a) Destalonamiento: es la remoción de los alambres de acero “armónico”.
- b) Desmetalizado (separación magnética del acero “armónico”): se emplea para remover las partículas ferromagnéticas de los demás materiales. Se remueve el 99% del acero “armónico” por medio de un separador magnético.
- c) Trituración: es la reducción volumétrica de la llanta entera a trozos más pequeños; esta operación está compuesta por dos fases: la trituración primaria y la trituración secundaria. En la trituración primaria se logran obtener grandes trozos de llantas de tamaño no uniforme. Mientras que en la trituración secundaria se reducen los trozos en pedazos aún más pequeños, que varían entre 20 mm y 100 mm.
- d) Granulación primaria: es la reducción volumétrica de los trozos de llantas en granos, provenientes de las fases de trituración. Se obtienen tamaños menores a 20 mm.

Por motivos de eficiencia, el material no debe entrar en un granulador si primero no ha sido reducido con el triturador a un tamaño de 20 mm. Si el material granulado (granos de tamaño hasta de 20 mm) no contiene material textil, se separan por tamaños en una criba con tres diferentes orificios (Diámetros de 1 a 17 mm). Entre más pequeño e uniforme se logre obtener el grano, mayor será su valor en el mercado.

- e) Granulación secundaria: Si el material granulado contiene material textil, será conducido a una sucesiva fase de granulación para separar la tela de la goma, esta fase se llama granulación secundaria o de ‘refinación’. Una vez molidos los granos se separan con una criba de tres diferentes tamaños, dependiendo del tamaño de que se requiera obtener y de los tamaños de criba utilizada, estos oscilan entre 0.5 mm y 3 mm (Figura 2).
- f) Durante el proceso de granulado se produce una fracción de polvo de tela y de elastómero, así que por motivos vinculados al ambiente, estas pequeñas partículas deben ser aspiradas por medio de un sistema de aspiración de polvos formado por: el ciclón reductor de polvos, electroaspirador, rotoválvulas, filtro de mangas y las respectivas tubaciones.

Al final se logra la separación de las llantas en cuatro componentes: Partículas de 0.5 mm a 3 mm, fibras textiles, polvos y alambre de acero “armónico”.

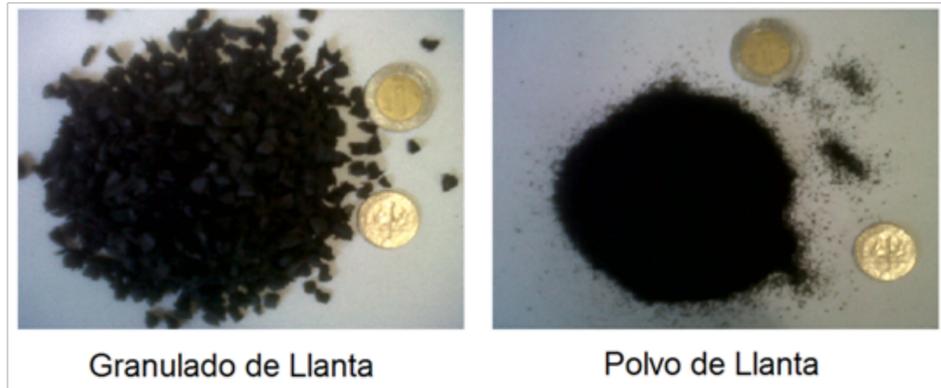


Figura 2. Partículas de llanta

Otra alternativa para el tratamiento de llantas de desecho es la pirólisis, que consiste en la descomposición térmica de las cadenas poliméricas en ausencia de oxígeno; en el caso de las llantas de desecho, primero se lleva a cabo la tritución y posteriormente se introducen las partículas de llanta en hornos con temperaturas entre 600 y 800°C en ausencia de oxígeno, esto con el fin de descomponerlos y obtener productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos (Yang, Kaliaguine & Roy, 1993).

### 3. Concreto

El concreto es la mezcla de agregados finos y gruesos con una pasta cementante compuesta de cemento Portland y agua, que al fraguar forman una masa monolítica semejante a la roca. La pasta se endurece debido a la reacción química entre el agua y el cemento Portland, generando productos de hidratación.

Los agregados finos son arenas naturales o sintéticas con tamaños máximos de hasta 10 mm y los agregados gruesos son rocas o gravas con tamaños máximos de hasta 152 mm. Ambos agregados constituyen entre el 60 y 75% del volumen total de la mezcla, por lo tanto pueden limitar las propiedades del concreto e influir en su desempeño. Sin embargo, estas propiedades dependen mayormente de la calidad de la pasta formada por el agua y el cemento, así como de la afinidad que tengan con los agregados y su capacidad de trabajar en conjunto.

Una de las mayores propiedades del concreto recién mezclado, es ser plástico, semifluido y poder adquirir prácticamente cualquier forma por medio de moldes. Durante su estado fresco, puede fluir como un líquido viscoso en el que hay muy poco o ningún contacto entre los agregados, característica que prevalece aun en el concreto ya endurecido.

Inmediatamente después del mezclado de los materiales, la reacción química que se genera propicia el paulatino endurecimiento del concreto, lo que incrementa su resistencia con la edad, siempre y cuando se presente una humedad y temperatura favorable para la hidratación del cemento.

Una propiedad física fundamental y tal vez la más importante del concreto en estado endurecido, es su resistencia a la compresión (carga máxima que puede soportar por unidad de área). Este índice es utilizado en el cálculo, diseño y elaboración de las mezclas que se emplearán para fabricar elementos que formarán parte de las estructuras.

Además, la resistencia a compresión puede ser utilizada para estimar la resistencia a otros esfuerzos como la flexión, torsión y cortante, ya que estos guardan una correlación establecida empíricamente para el análisis estructural y que depende directamente de la calidad y características de los componentes del concreto, así como de las condiciones ambientales durante su tiempo de vida.

Dentro de los principales factores que determinan la resistencia se encuentran: la edad del concreto, la relación agua-cemento de la mezcla, el grado de compactación de los agregados en el concreto, la porosidad y el contenido de aire atrapado al momento de fabricar el concreto. Otras variables que intervienen en el cálculo de la resistencia son la relación agregado-cemento, la calidad del agregado (granulometría, textura superficial, forma, resistencia, rigidez y el tamaño nominal).

El cemento Portland es obtenido de la mezcla de materiales calcáreos (piedra caliza o yeso), sílice, alúmina y óxido de hierro. Los principales componentes químicos del cemento Portland son Silicato tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ), Silicato dicálcico  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ), Aluminio tricálcico  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) y Aluminoferrito  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) (Neville & Brooks, 1998).

Los silicatos tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) y dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) son los causantes de la resistencia de la pasta del cemento, ya que al hidratarse forman silicatos hidratados de calcio (S-H-C) además de constituir aproximadamente el 75% del peso del cemento. El silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ) aporta la resistencia a corto plazo mientras que el silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) aporta la resistencia a mediano y largo plazo. El aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) es el compuesto con mayor rapidez de hidratación pero con menor contribución a la resistencia, excepto en las primeras etapas, ya que propicia una mayor velocidad en el fraguado pero su presencia hace al concreto susceptible al ataque de los sulfatos, debido a la formación de sulfo-aluminatos que genera resquebrajamientos. Aun así, es necesario para propiciar la mezcla de sílice y cal durante la fabricación del clinker. El aluminoferrito tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ) se requiere para la formación de sulfo-ferrita de calcio cuando reacciona con el yeso, su presencia es útil como fundente durante la calcinación del clinker y favorece a la hidratación de los demás componentes.

En la composición química del clinker se presentan los álcalis: óxidos de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) cuyo contenido debe ser limitado y controlado para evitar la desintegración del concreto. Otros compuestos que representan un porcentaje mucho menor son los óxidos de: magnesio ( $\text{MgO}$ ), manganeso ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ), dipotasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), como se muestra en la Tabla 2.

El cemento presenta la composición:  $\text{CaO}$  (60 – 67%),  $\text{SiO}_2$  (17 – 25%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3 – 8%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.5 – 6.0%),  $\text{MgO}$  (0.1 – 4.0%), Alcalinos (0.2 – 1.3%),  $\text{SO}_3$  (1 – 3%) (Neville & Brooks, 1998).

Cemento Portland (Tipo)	Composición química (%)						Perdida por ignición (%)	Residuo insoluble (%)	Composición potencial de los compuestos (%)				Finura Blaine (m <sup>2</sup> /kg)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>			C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	
I	20.9	5.2	2.3	64.4	2.8	2.9	1.0	0.2	55	19	10	7	370
II	21.7	4.7	6.3	63.6	2.9	2.4	0.8	0.4	51	24	6	11	370
III	21.3	5.1	2.3	64.9	3.0	3.1	0.8	0.2	56	19	10	7	540
IV	24.3	4.3	4.1	62.3	1.8	1.9	0.9	0.2	28	49	4	12	380
V	25.0	3.4	2.8	64.4	1.9	1.6	0.9	0.2	38	43	4	9	380
Blanco	24.5	5.9	0.6	65.0	1.1	1.8	0.9	0.2	33	46	14	2	490

Tabla 4. Composición química y finura de los cementos tipo I, II, III, IV, V y Blanco

Las propiedades físicas más estudiadas en el cemento son: la finura, el tiempo de fraguado, el falso fraguado, el peso específico, y el calor de hidratación. Por medio de difracción de rayos X (XRD) se pueden determinar la composición química de los diferentes tipos de cemento y de la cantidad de los componentes.

Los materiales agregados, gruesos y finos, constituyen entre el 60 y 75% del volumen (o entre el 75 y 85% del peso) total de la mezcla de concreto. Los agregados pueden ser naturales o triturados. Los naturales, como la grava o la arena se excavan de alguna mina o cantera. Mientras que agregados triturados se producen mediante la trituración de rocas de cantera, piedras tipo bola, guijarros o grava de gran tamaño.

Las rocas se clasifican en: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Las *rocas ígneas* contienen feldespatos (50%), cuarzo (30 a 40%) y mica (10 a 20%). Mientras que las *rocas sedimentarias* carbonato de calcio y magnesio. Las *rocas metamórficas* se forman por la transformación de las rocas ígneas y sedimentarias bajo la acción de la temperatura y presión.

Los áridos son arenas o gravillas procedentes de rocas naturales o artificiales. Los áridos se clasifican en: áridos rodados, áridos de machaqueo, áridos artificiales y áridos especiales. Los *áridos artificiales* más usados en la construcción son escorias de alto horno con expansión baja, escorias de hulla, las cenizas aglomeradas, restos de tejas y ladrillos, arcillas y esquistos expandidos como la perlita y la vermiculita, las virutas y las fibras. Los *áridos especiales* son áridos pesados como la barita, la magnetita, la limonita, la hematita, el hierro, se utilizan para fabricar concreto para blindaje anti-radiación.

Los agregados deben cumplir con determinados requisitos para que su empleo sea permitido en la fabricación de concreto. Las partículas deben ser durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos, arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia con la pasta de cemento.

Las características de los agregados son: la granulometría; forma y textura de las partículas; masa volumétrica y vacíos; masa específica; resistencia al desgaste y al agrietamiento; resistencia y contracción.

#### **4. Concreto Reforzado con Partículas de Llantas**

Las partículas de refuerzo en concreto generan esfuerzos de tensión cuando es sometido a una fuerza aplicada, lo que da lugar a un rápido agrietamiento y falla inmediata. No obstante, estudios reportados en la literatura señalan que las partículas de llanta pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Las partículas obtenidas de llantas provienen de procesos de rallado, picado y molido. Se deben tener en cuenta las propiedades de las partículas de llanta, así como las de los componentes del concreto. Las propiedades mecánicas del concreto con partículas de llanta dependen de: a) la concentración de partículas, y b) del tamaño de partícula.

Cuando se incrementa la concentración de partículas de llanta disminuye la resistencia a la compresión y a la tensión, así como la rigidez. La pérdida de resistencia puede ser hasta del 80% ya que las partículas de llanta no sólo actúan como concentradores de esfuerzo, sino que también son responsables de generar esfuerzos de tensión dentro de la matriz del concreto, que dan lugar a un rápido agrietamiento y falla inmediata (El-Dieb, Abdel-Wahab & Abdel-Hameed, 2001; Eldin & Senouci, 1993). Por otro lado, las partículas de llanta tienen un efecto limitado sobre la propagación de grietas, que conduce a un aumento significativo de la resistencia a tensión, ductilidad y capacidad de absorción de energía (Taha et al., 2008; El-Dieb et al., 2001).

Otra ventaja de las partículas de llanta es la absorción de sonido; más aún se está trabajando en la capacidad de absorción de energía de las partículas en beneficio de la elasticidad del concreto. Sin embargo, debido a las diferencias del módulo de Young tanto de las partículas como de la matriz de concreto, se tendrían que someter los concretos a grandes deformaciones, lo que causaría disminución progresiva en las propiedades mecánicas.

Por otro lado, existen estudios que indican que un factor importante en la disminución de la resistencia es el tamaño de partícula, en algunos se dice que al agregar partículas más grandes, se presentan resistencias más bajas, en comparación a concretos elaborados con partículas más finas de reciclado de llanta (Khatib & Bayomy, 1999; Topcu, 1995). Sin embargo, otros estudios afirman lo contrario, es decir, que partículas más finas en la mezcla de concreto, propician una menor resistencia mecánica (Ali, Amos & Roberts, 1993; Fattuhi & Clark, 1996).

Un factor preponderante en las propiedades mecánicas es la rugosidad que presentan las partículas en su superficie, de esta depende la adherencia del cemento en el concreto. Partículas de llanta fueron lavadas con agua para librarlas de contaminantes, después fueron sumergidas en ácidos y agentes Naikcon con el fin de incrementar la textura superficial, posteriormente fueron añadidas a la mezcla de concreto; los resultados muestran ligera disminución de la resistencia mecánica, respecto a los concretos normales (Eldin & Senouci, 1993; Rostami, Lepore, Silverstraim & Zundi, 2000).

En un estudio realizado por los autores sobre concreto reforzado con partículas de llantas recicladas; se sustituyó parte del agregado fino (arena) por partículas de llanta, las cuales fueron añadidas en diferentes concentraciones (10%, 20% y 30%) y tamaños (2.8 mm y 0.85 mm). Los resultados muestran que a ciertos tamaños y a determinadas concentraciones de partícula, existe una ligera disminución de la resistencia a la compresión, pero un aumento en la resistencia a tensión y en la absorción de sonido; esto confiere al concreto características deseables para usos en la industria de la construcción, como pisos industriales o bases para maquinarias sujetas a vibración constante (Herrera-Sosa, 2014). A continuación se presentan los resultados.

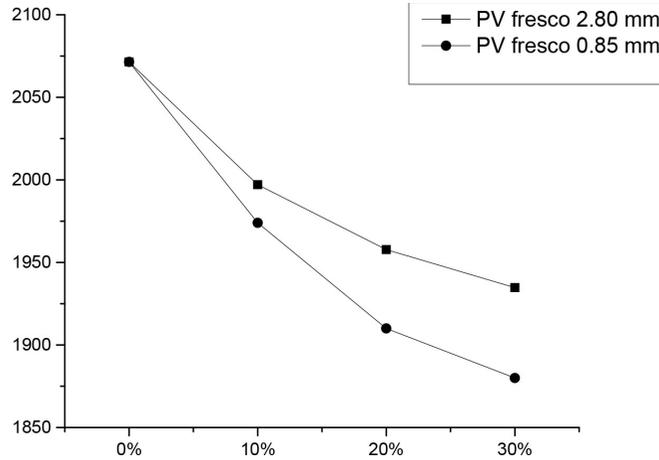


Figura 3. Peso volumétrico de concretos con partículas de llanta reciclada ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

En la Figura 3, se muestran los resultados de peso volumétrico de los concretos. Se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de llanta reciclada (en sustitución de la arena), el peso volumétrico del concreto disminuye, lo cual se debe a que las partículas ocupan un mayor volumen por unidad de peso. Además, los concretos elaborados con un tamaño mayor de partícula tienen mayores pesos volumétricos que los elaborados con menor tamaño.

La resistencia a compresión, que es uno de los parámetros más importantes a medir en el concreto, disminuye al aumentar el porcentaje de llanta; y es menor para concretos con menor tamaño de partícula, como se aprecia en la Figura 4.

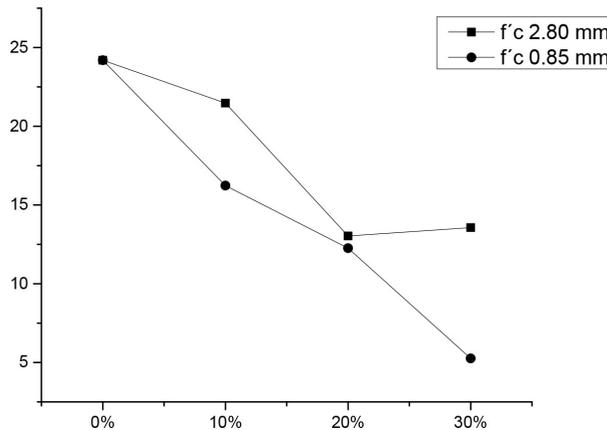


Figura 4. Resistencia a la compresión de concretos con partículas de llanta reciclada (MPa)

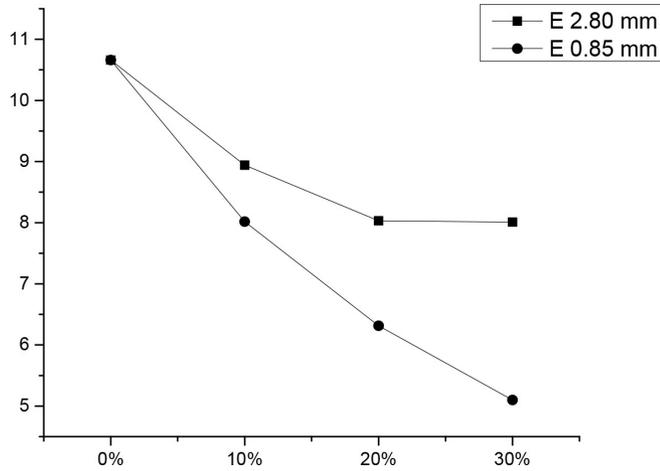


Figura 5. Módulo de elasticidad de concretos con partículas de llanta reciclada (Gpa)

La disminución de la resistencia se debe a la diferencia entre el módulo de Young entre los dos materiales (concreto y partículas de llanta) lo que genera concentradores de esfuerzos y propicia la pronta falla; esto se puede apreciar también en la disminución del módulo elástico del concreto a medida que aumenta el porcentaje de reciclado de llanta (Figura 5).

Los resultados de las pruebas a flexión muestran valores casi constantes hasta concentraciones del 20% de partículas de llanta reciclada, pero disminución de los mismos para un contenido del 30% (Figura 6).

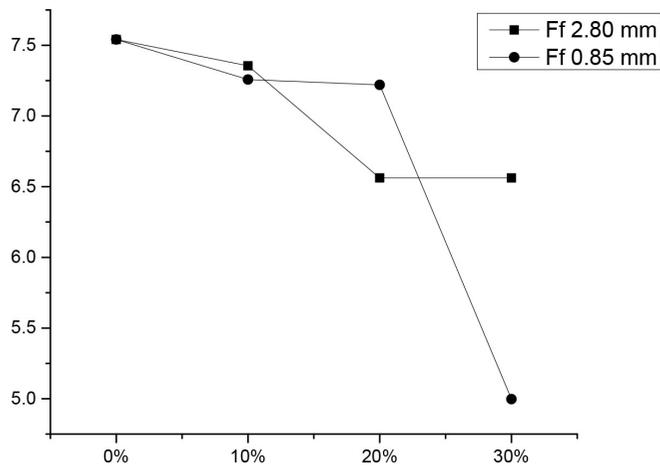


Figura 6. Resistencia a la flexión de concretos con partículas de llanta reciclada (MPa)

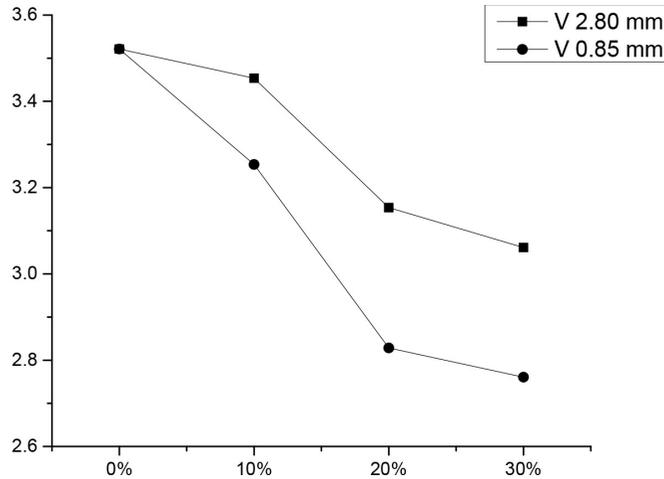


Figura 7. Velocidad de Pulso de concretos con partículas de llanta reciclada (Km/s)

Las pruebas de velocidad de pulso siguen la misma tendencia: los valores disminuyen al aumentar la cantidad de reciclado de llanta (Figura 7). Esto indica que a medida que aumenta la concentración de partículas de llanta, estas absorben más la energía de las ondas sonoras, lo que se traduciría en absorción de energía como vibraciones.

## 5. Radiación Gamma

La radiación gamma ( $\gamma$ ) es un tipo de radiación electromagnética de alta energía formada por fotones y producida generalmente por elementos radioactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación ionizante de tal magnitud, es capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta (Reichmanis, O'Donell & Hill, 1993).

Cuando se somete un material polimérico a radiación ionizante, se producen efectos físicos y químicos que están en función de la naturaleza de los polímeros, así como de la dosis de la radiación. La ventaja de trabajar con este tipo de macromoléculas, es la gran sensibilidad a cambios en los enlaces químicos, obteniéndose propiedades diferentes en cuanto a cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, permeabilidad, así como en la resistencia a la corrosión, a la abrasión y a disolventes.

La fuerza total de atracción entre las moléculas de un polímero depende del número de las interacciones. Como máximo, sería igual a la energía de enlace multiplicada por el número de átomos de carbono (C) en el caso del polietileno o por el número de carbonilos (C = O) en los poliésteres, etc. Rara vez se alcanza este valor máximo ya que las cadenas, por lo general, no pueden acomodarse con la perfección requerida.

Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases: a) Fuerzas de Van der Waals, son de dispersión y están asociadas a

las moléculas de muy baja polaridad; en general se forman dipolos no permanentes, que producen atracciones electrostáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes (2,4 Kcal/mol); b) fuerzas de Atracción dipolo-dipolo, son más energéticas, a ellas se debe la gran resistencia en tensión de las fibras de los poliésteres (3 a 5 Kcal/mol); c) enlaces de Hidrógeno, estas interacciones son tan fuertes, que fibras de poliamidas (nylon) tiene resistencia a la tensión mayor que la de una fibra de acero de igual masa (5 a 12 Kcal/mol); d) Ionómeros, son atracciones de tipo iónico, son las más intensas (>100 Kcal/mol).

La variación en la composición química y en la estructura molecular de los polímeros es el resultado de la presencia de grupos finales, ramas, variaciones en la orientación de unidades monoméricas y la irregularidad en el orden en el que se suceden los diferentes tipos de esas unidades.

Con la radiación gamma es posible modificar la estructura química de las partículas o fibras poliméricas a través de tres procesos: escisión o rompimiento de cadenas (*scission*), entrecruzamiento (*cross-linking*) e injerto (*grafting*). Estos mecanismos contribuyen, en mayor o menor medida, a modificar el comportamiento mecánico de los polímeros. La influencia de cada proceso depende de la cantidad de energía absorbida por unidad de masa (dosis), de la concentración, de la dispersión, de la atmósfera (inerte o aire) y la temperatura a la cual se realiza la irradiación, así como del post-tratamiento (Martínez, Benavides & Carrasco, 2010).

Los efectos de la irradiación gamma en polímeros suelen evaluarse a través de los cambios en la estructura química (con el análisis de la distribución de pesos moleculares) y en el comportamiento mecánico. Estos cambios que son debidos a la formación de enlaces, rotura de cadenas, desprendimiento de radicales que integran las unidades monoméricas y la oxidación entre otros, permiten incrementar el grado de polimerización o el reticulado de la estructura ya que generan una reordenación geométrica de la estructura del polímero (Povolo, Hermida & Gómez, 2000).

La radiación gamma modifica la estructura polimérica a través de la formación de una variedad de grupos funcionales como carbonilos, carboxilos, ésteres e hidroxilos, induciendo frecuente y simultáneamente, tanto la ruptura de las cadenas hidrocarbonadas como su entrecruzamiento, lo que se traduce en cambios en la resistencia mecánica, transparencia, capacidad aislante y repelencia al agua, por ejemplo. Un efecto importante promovido por la radiación, es la variación en la masa molecular, la cual proporciona información sobre la fase cristalina del polímero (Buttafava, Consolati, Mariani, Quasso & Ravasio, 2005).

Los elastómeros son muy susceptibles a la acción de la radiación, la mayoría de ellos se entrecruzan. En términos generales, los elastómeros pueden sufrir grandes deformaciones sin ruptura, y volver a su estado original cuando se suprime la fuerza aplicada. Este comportamiento elástico es una consecuencia del estado desordenado de las cadenas poliméricas. El entrecruzamiento en los elastómeros no es tan denso como en los polímeros termoestables y presentan una elevada movilidad de cadenas por encima de su temperatura vítrea ( $T_g$ ). A bajas temperaturas el comportamiento elástico no se produce y en vez de tener un material tenaz, flexible y altamente deformable, se tiene un material rígido, quebradizo y fácil de fracturar (estado vítreo).

Los elastómeros disminuyen los valores en sus propiedades elásticas a dosis del orden de 10,000 kGy. Este efecto es más pronunciado si la radiación se lleva a cabo en presencia de oxígeno, dado

que la mayoría de los elastómeros son muy sensitivos al “envejecimiento oxidativo”. Los agentes protectores más eficientes son los antioxidantes, los cuales previenen la degradación oxidativa a través de su interacción con los radicales libres producto de las reacciones del polímero ante la radiación, no permitiendo que estos se oxiden al reaccionar con el oxígeno (Chapiro, 1962).

La vulcanización del caucho mediante radiación en forma húmeda presenta algunos beneficios en comparación con vulcanización química convencional (Makuuchi, Yoshi, Ishigaki, Tsushima, Mogi & Saito, 1990); el proceso es más controlado, preciso, rápido, versátil, consume menos energía; el curado es a temperatura ambiente, se puede controlar y presenta una reticulación uniforme y no genera residuos. Este proceso en forma seca, tiene la ventaja de tener mayor estabilidad, menor degradación y mejores propiedades mecánicas (Chaudhari, Bhardwaj, Patil, Dubey, Kumar & Sabharwal, 2005).

La vulcanización de caucho natural por medio de la radiación ha sido estudiada en su forma pura, así como en presencia de aditivos (Haque, Dafader, Akhtar & Ahmad, 1996; Jayasuriya, Makuuchi & Yoshi, 2001; Sabharwal, Das, Chaudhari, Bhardwaj & Majali, 1998), que han permitido una mejor comprensión de los efectos durante la irradiación y los efectos del secado de las partículas curadas post-irradiación (Qiao, Wei, Zhang, Zhang, Gao, Zhang et al., 2002).

Se han reportado los efectos de la radiación en cauchos sintéticos de polibutadieno, ampliamente utilizado en diversas aplicaciones (Perera, Albano, Gonzalez, Silva & Ichazo, 2004). Así como en el polibutadieno y sus mezclas (Marcilla, Garcia-Quesada, Hernandez, Ruiz-Femenia & Perez, 2005; Peng, Wang, Qiao & Wei, 2005).

Algunos de los efectos que se han podido observar, en cuanto a las propiedades mecánicas del elastómero, son la disminución de la resistencia a la tracción y de la deformación, pero aumento del módulo elástico, con el aumento de la dosis. Después del proceso de radiación, las partículas del elastómero se funden juntas en una película transparente debido a un proceso de evaporación del medio de emulsión; la interacción entre las partículas determina la resistencia a la tracción y el aumento de la resistencia a la rotura de la película esto es debido al aumento de la densidad de la retícula al aumentar la dosis (Liu, Huang, Hou Deyu & Zhang, 2007).

En estudios de mezclas de estireno y butadieno irradiados con una fuente de <sup>60</sup>cobalto se observa que la dureza de las muestras aumentaba con la dosis. La densidad de reticulación del polímero aumenta ligeramente, pero la del aromático disminuye ligeramente (Traeger & Castonguay, 1966). En otro estudio se reporta la obtención de polibutadieno mediante la polimerización inducida por radiación gamma de butadieno en etanol, a temperatura entre 15 y 45°C; se observa que la velocidad de polimerización aumenta al agregar peróxido de hidrógeno como iniciador (Zhang, Zhang & Ying, 1991).

## **6. Uso de la Radiación Gamma en el Mejoramiento del Concreto**

En el concreto, una alternativa que ha probado ser eficiente para aumentar los valores de resistencia, es el uso de la radiación gamma a través de dos métodos:

- Modificación de las propiedades estructurales de los refuerzos y su posterior incorporación a las mezclas de concreto.
- Irradiación directa del concreto con los refuerzos incluidos.

Después de la irradiación, los cambios estructurales de los refuerzos se relacionan con las propiedades mecánicas del concreto, incluidas la resistencia a tensión, a la compresión, al impacto, así como las deformaciones en el punto de cedencia y a la ruptura.

Son pocas las investigaciones encaminadas a evaluar el efecto de la radiación gamma en concretos. En uno de los trabajos se llevó a cabo la modificación estructural de fibras de nylon 6 mediante la aplicación de radiación gamma a dosis de 5, 10, 50, y 100 kGy; las cuales posteriormente fueron incorporadas en las mezclas de concreto. Los resultados muestran que los valores más altos de resistencia a la compresión se lograron con fibras irradiadas a 50 kGy y añadidas al 2% en volumen en el concreto; el mayor valor fue de 122.2 MPa, mientras que el concreto sin fibras irradiadas tuvo un valor de 35 Mpa (Martínez-Barrera, Viguera-Santiago, Hernández-López, Menchaca-Campos & Brostow, 2005; Martínez-Barrera, 2009).

Los cambios en los refuerzos pueden ser controlados mediante una dosis apropiada de radiación, por ejemplo se puede lograr una superficie rugosa y agrietada que permita obtener una mayor compatibilidad con la matriz cementante (Martínez-Barrera, 2009). En otro estudio, se analizó el efecto de la radiación gamma en las propiedades mecánicas del concreto utilizado en estructuras para seguridad nuclear. El concreto se expuso a una dosis de 500 kGy de radiación gamma, obteniéndose disminución la porosidad y en las propiedades mecánicas del concreto; atribuida a la formación de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) en un medio de  $\text{CO}_2$  (Voda'k, Trtik, Sopko, & Kapickova, 2005).

En un estudio realizado sobre concreto reforzado con partículas de llanta reciclada irradiada y sin irradiar, se obtuvieron diversos resultados de las propiedades de: Resistencia a la compresión ( $f'_c$ ), módulo de elasticidad (E), resistencia a la tensión (T), velocidad de pulso ultrasónico ( $V_p$ ), Resistencia a la flexión ( $f_r$ ) y peso volumétrico (PV) (Herrera-Sosa, 2014).

En las Figuras 8 y 9, se muestran los resultados de concretos irradiados a 200 y 250 KGy, elaborados con partículas de llanta de 0.85 mm y 2.8 mm, en sustitución de la arena a razón de 10, 20 y 30% en peso. También se muestran los concretos con partículas sin irradiar y con los mismos porcentajes de sustitución, con el fin de comparar resultados.

Los concretos con partículas de 0.85 mm presentan mayor disminución en las propiedades mecánicas, que los concretos con partículas de 2.8 mm. No obstante, el peso volumétrico aumenta cuando se incrementa la dosis de radiación. En general, este incremento se debe a que las partículas irradiadas se vuelven más compactas y rígidas.

En la Figura 9, se puede observar aumento de la resistencia a compresión para los concretos elaborados con partículas de llanta de 2.8 mm e irradiados a 250 KGy, que no solo son mayores a sus equivalentes sin irradiar y los irradiados a 200 KGy, sino que incluso, los elaborados con el 10% de este material, son mayores a los resultados obtenidos con los concretos testigo. A 250 kGy se mejora la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad con respecto a los concretos elaborados con partículas de llanta irradiados a menor dosis, pero estos no exceden el valor de los concretos testigos.

Estos resultados abren la posibilidad de investigaciones con grandes beneficios, por un lado el reúso de llantas recicladas en concretos y por otro el mejoramiento de las propiedades del mismo. Se desea asegurar el beneficio económico en el contexto del desarrollo sostenible, que implica resolver el problema de la contaminación ambiental provocada por las llantas de desecho, para lograr el bienestar de la población mejorando su calidad de vida.

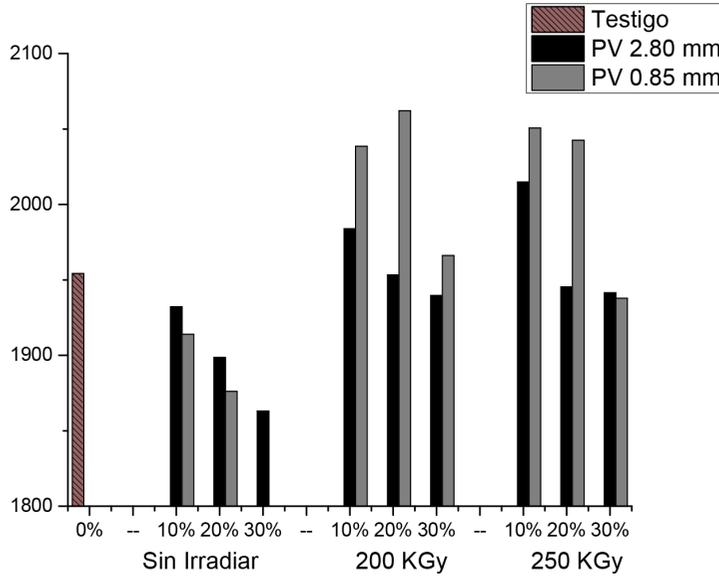


Figura 8. Peso volumétrico de concretos irradiados con partículas de llanta reciclada(kg/m³)

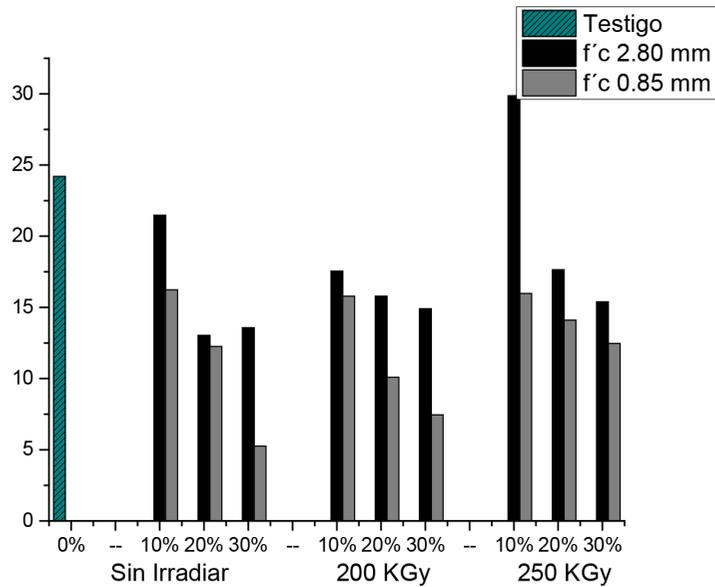


Figura 9. Resistencia a la compresión de concretos irradiados con partículas de llanta reciclada (Mpa)

## 7. Conclusiones

Grandes esfuerzos se han hecho en materia ambiental para disminuir la contaminación, como la presente investigación, que contempla el uso de llantas de desecho como material de refuerzo del concreto. En general se observa disminución en las propiedades mecánicas de los concretos cuando se añade el reciclado de llanta, algo no deseado para un concreto; sin embargo, el tratamiento a base de rayos Gamma permite mejorar las propiedades dentro de la mezcla, con resultados superiores a los concretos testigos. Esto representa una solución a los inconvenientes de utilizar estos materiales dentro de la industria de la construcción. Finalmente, la combinación del bajo costo del material de desecho y del aumento en las propiedades mecánicas del concreto, hacen de este un producto atractivo con beneficios no solo económicos, sino ambientales.

## Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), por la beca otorgada a E.S. Herrera-Sosa para la realización de sus estudios de Doctorado en Ciencias Ambientales en la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM); lo que permitió su colaboración en esta investigación.

## Referencias

- Ali, N.A., Amos, A.D., & Roberts, M., (1993). Use of ground rubber tires in Portland cement concrete. En: Dhir, R.K. (Ed.). *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000*, University of Dundee, Scotland, UK. 379-390.
- Amirkhanian, S.N. (2001). *Utilization of Crumb Rubber in Asphaltic Concrete Mixtures - South Carolina's Experience*. Research report. South Carolina Department of Transportation.
- Briodsky, H. (2001). *The Important Role Retreads Can Play in Reducing the Scrap Tyre Problem. Recycling and Use of Used Tyres*. London: Thomas Telford.
- Brown, K.M., Cumming, R., Morzek, J.R., &Terrebonno, P., (2001). Scrap Tire Disposal: Three Principles for Policy of Choice. *Natural Resources Journal*, 41 (1), 9-22.
- Buttafava, A., Consolati, G., Mariani, M., Quasso, F., & Ravasio, U. (2005). Effects induced by gamma irradiation of different polyesters studied by viscometry, thermal analysis and positron annihilation spectroscopy. *Polymer Degradation and Stability*, 89, 133-139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2005.01.009>
- Chapiro, A. (1962). *Radiation chemistry of polymeric systems*. London: Interscience.
- Chaudhari, C.V., Bhardwaj, Y.K., Patil, N.D., Dubey, K.A., Kumar, V., & Sabharwal, S., (2005). Radiation-induced vulcanization of natural rubber latex in presence of styrene-butadiene rubber latex. *Radiat. Phys. Chem.*, 72, 613-618.

- Davies, R.W., & Worthinton, G.S. (2001). Use of scrap Tyre as a Fuel in the Cement Manufacturing Process. En Dhir R.K. (Ed.). *Recycling and Use of Tyres*. London: Thomas Telford.
- Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., & Paine K.A. (Ed.) (2001). *Recycling and Use of Tyres*. London: Thomas Telford.
- El-Dieb, A.S., Abdel-Wahab, M.M., & Abdel-Hameed, M.E. (2001). Concrete Using Tire Rubber Particles as Aggregate. En Dhir R.K. (Ed.). *Recycling and Use of Tyres*, London: Thomas Telford.
- Eldin, N.N., Senouci, A.B. (1993). Tire Rubber Particles as Concrete Aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), 478-498.
- Fattuhi, N.I., & Clark, N.A. (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Journal of Construction and Building Materials* 10(4), 229-236.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00004-9](http://dx.doi.org/10.1016/0950-0618(96)00004-9)
- Greenpeace International. Las tres R del Reciclaje. <http://www.greenpeace.org/international>. (Consultado: Marzo 2011).
- Haque, M.E., Dafader, N.C., Akhtar, F., & Ahmad, M.U., (1996). Radiation dose required for the vulcanization of natural rubber latex. *Radiat. Phys. Chem.*, 48(4), 505-510.
- Herrera-Sosa, E.S. (2014). Waste tire particles and gamma radiation as modifiers of the mechanical properties of concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, Article ID 327856, 7 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/327856>
- Instituto de Investigaciones en Materiales-UNAM. <http://www.iim.unam.mx/> (consultado mayo 2012).
- Jayasuriya, M.M., Makuuchi, K., & Yoshi, F. (2001). Radiation vulcanization of natural rubber latex using TMPTMA or PEA. *Euro. Polym. J.*, 37, 93-98.
- Khatib, Z.K., & Bayomy, F.M. (1999). Rubberized portland cement concrete. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* 11 (3), 206-213.
- Liu, Y., Huang, Y., Hou, J., Deyu, G., & Zhang, X. (2007). Vulcanization of polybutadiene latex induced by 60Co  $\gamma$  radiation. *Journal of Radiation Research and Radiation Process*, 25, 350-354.
- Makuuchi, K., Yoshi, F., Ishigaki, I., Tsushima, K., Mogi, M., & Saito, T. (1990). Development of rubber gloves by radiation vulcanization. *Radiat. Phys. Chem.*, 35, 154-157.
- Malhotra, V.M. (2000). *Role of Supplementary Cementing Materials in Reducing Greenhouse Gas Emissions. Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21<sup>st</sup> Century*. London. 226-235.
- Marcilla, A., Garcia-Quesada, J.C., Hernandez, J., Ruiz-Femenia, R., & Perez, J.M. (2005). Study of polyethylene crosslinking with polybutadiene as coagent. *Polym. Test.*, 24(7), 925-931.
- Martínez-Barrera, G., Giraldo, L.F., López, B.L., & Brostow, W. (2008). Effect of gamma radiation on fiber-reinforced polymer concrete. *Polym. Compos.*, 29, 1245-1251.  
<http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2009.77>
- Martínez-Barrera, G. (2009). *Uso de fibras poliméricas en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto. Tópicos en Materiales*. México: UAEM. 125-169.

Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2009). *Fiber-reinforced polymer concrete: Property improvement by gamma irradiation. Gamma radiation effects on polymeric materials and its applications*. Kerala India: Research Signpost. 27-44. ISBN 978-81-308-0293-0.

Martínez-Barrera, G., Viguera-Santiago, E. Hernández-López, S., Menchaca-Campos, C., & Brostow W. (2005). Mechanical improvement of concrete by irradiated polypropylene fibers. *Polym. Eng. Sci.*, 21, 1426-1431. <http://dx.doi.org/10.1002/pen.20418>

Martínez, M.E., Benavides, C., & Carrasco, H. (2010). Efecto de la radiación ionizante en polímeros. *Contribuciones del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares al avance de la Ciencia y la Tecnología en México*. Edición conmemorativa Cap. 27.

Navarro, F.J., Partal, P., Martínez-Boza, F., & Gallegos, C. (2005). Influence of Crumb Rubber Concentration on the Rheological Behavior of Crumb Rubber Modified Bitumen. *Energy and Fuels*, 19, 1984-1990. <http://dx.doi.org/10.1021/ef049699a>

Nelson R.G., & Hossain, A.S.M.M. (2001). *An Energetic and Economic Analysis of Using Scrap Tyres for Electricity Generation and Cement Manufacturing. Recycling and Use of Tyres*. London: Thomas Telford.

Neville, A.M., & Brooks, J.J. (Eds.) (1998). *Tecnología del Concreto*. México: Trillas.

Peng, J., Wang, M., Qiao, J., & Wei, G. (2005). Radiation-induced grafting polymerization of MMA onto polybutadiene rubber latex. *Radiat. Phys.Chem.*, 72, 739-743.

Perera, R., Albano, C., Gonzalez, J., Silva, P., & Ichazo, M., (2004). Effect of gamma radiation on the properties of polypropylene blends with styrene-butadiene-styrene copolymers. *Polym. Degrad. Stab.*, 85, 741-750.

Povolo, F., Hermida, E.B., & Gómez, A. (2000). Tracción de películas de polipropileno-etileno (PEP) irradiado en un reactor experimental. *Trabajo presentado en las Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga* (pp. 995-1000). Argentina.

Qiao, J., Wei, G., Zhang, X., Zhang, S., Gao, J., Zhang, W. et al. (2002). US Patent 6, 423, 760, July 23.

Reichmanis, E.F., O'Donell, H.J., & Hill, T.J.D. (1993). Radiation Effects on Polymeric Materials: A brief overview. *Irradiation of Polymeric Materials*. ACS Symposium Series.

Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T., & Zundi, I., (2000). Use of recycled rubber tires in concrete. En: Dhir, R.K. (Ed.). *Proceedings of the International Conference on Concrete 2000*, University of Dundee, Scotland, UK. 391–399.

Sabharwal, S., Das, T.N., Chaudhari, C.V., Bhardwaj, Y.K., & Majali, A.B. (1998). Mechanism of n-BA sensitization action in radiation vulcanization of natural rubber latex. *Radiat. Phys. Chem.*, 51(3), 309-315.

Taha, M.R., El-Dieb, A.S., & Nehdi, M. (2008). *Recycling Tire Rubber in Cement-Based Material*. Concrete with Recycled Materials, ACI Committee 555.

Topcu, I.B. (1995). The properties of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304-310.

Traeger R.K., & Castonguay, T.T. (1966). Effect of  $\gamma$ -radiation on the dynamic mechanical properties of styrene-butadiene rubbers. *Journal of Applied Polymer Science*, 10(3), 491-509.

- US Environmental Protection Agency. (1997). *Emisiones al Aire de la Combustión de Llantas Usadas*, EPA-600/R-97-115, U.S.-México Centro de Información sobre Contaminación del Aire / CICA. Fecha último acceso: Julio 2013. [http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/tire\\_esp.pdf](http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/tire_esp.pdf)
- Voda'k, F., Trtík, K.V., Sopko, O., & Kapickova, P. (2005). Effect of  $\gamma$ -irradiation on strength of concrete for nuclear-safety structures. *Cement and Concrete Research*, 35, 1447-1451. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.016>
- Yang, J., Kaliaguine, S., & Roy, C. (1993). Improved quantitative determination of elastomers in tire rubber by kinetic simulation of DTG curves. *Rubber Chemistry and Technology*, 66, 213-229.
- Zhang, J., Zhang, Z., & Ying, S. (1991). Study of gamma-ray radiation-induced polymerization of butadiene in ethanol. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry*, 37(2), 263-266. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-0197\(91\)90139-S](http://dx.doi.org/10.1016/1359-0197(91)90139-S)