

CAPÍTULO 8

MATERIALES DE RECICLO Y SU USO EN EL MEJORAMIENTO DEL CONCRETO

*Gonzalo Martínez Barrera,*¹ Enrique Viguera Santiago,¹
Miguel Martínez López¹ y Osman Gencel²*

INTRODUCCIÓN

El siglo XXI ha conllevado un uso casi ilimitado de materiales, los cuales forman parte de los productos elaborados que utilizamos a diario, entre los que se encuentran muebles, juguetes, piezas de automóvil, bolígrafos, ropa y recipientes para alimentos, sólo por mencionar algunos. Los materiales han contribuido al desarrollo de la tecnología en beneficio de la humanidad, gracias al mejoramiento de sus propiedades físicas y químicas. Sin embargo, con el desarrollo de la industria durante los últimos 50 años, se ha promovido indiscriminadamente el uso de ciertos materiales, los que después de una muy corta vida útil se convierten en basura, contribuyendo a deteriorar el entorno; mas aún, al degradarse entran en las cadenas alimenticias de animales, plantas y del mismo ser humano.

El impacto ambiental negativo ha conducido al planteamiento de metodologías alternativas, limpias e innovadoras encaminadas a la reducción y reuso de materiales. Se han efectuado investigaciones que ofrecen un atractivo costo-beneficio derivado del ahorro de energía empleada en su fabricación, y que presentan propiedades consistentes e incluso optimizadas que permiten la disposición a largo plazo de residuos.

¹ Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atlaconulco, San Cayetano 50200, México.

* <gonzomartinez02@yahoo.com.mx>. Tel.: 217-1806321.

² Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, BartinUniversity, 74100 Bartin, Turquía.

Atendiendo a la regla de las “tres erres” (reducir, reciclar y reusar), cuya meta consiste en establecer una sociedad orientada al reciclaje, en este capítulo se aborda la problemática de los materiales de desecho y su uso en el mejoramiento del concreto, abriendo un panorama hacia la sustentabilidad del mismo, al producir un concreto ambientalmente amigable.

1. PROBLEMÁTICA DE LOS MATERIALES DE DESECHO

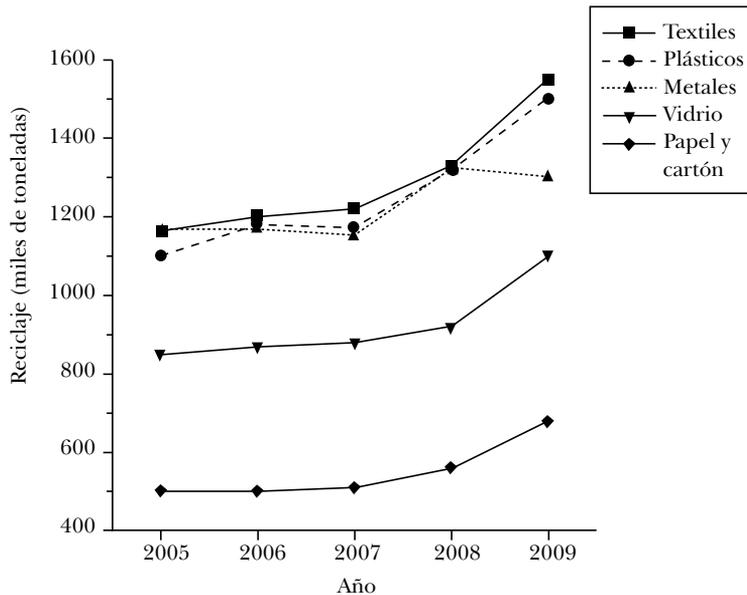
Una gran cantidad y diversidad de residuos se genera diariamente en nuestro país y en el mundo. El manejo de los mismos es un problema complejo y de difícil solución. Esta complejidad radica en las múltiples dimensiones que están involucradas y que comprenden aspectos jurídicos, económicos, tecnológicos, ambientales, territoriales, sociales, políticos y culturales. La envergadura del problema ha determinado, en gran medida, que las respuestas al mismo sean poco serias, buscando soluciones de corto plazo y dejando a un lado la importancia de minimizar la generación de residuos, la separación desde el origen y la reutilización de materiales.

No todo es basura. La separación o segregación permite recuperar el valor monetario o energético de ciertos materiales. En función de sus características y orígenes, los residuos se clasifican en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (RSU), residuos de manejo especial (RME) y residuos peligrosos (RP).

La disposición final de los residuos sólidos urbanos se lleva a cabo en los rellenos sanitarios, lo que ayuda al control de gases y lixiviados, todo ello con beneficio al ambiente y a la salud de la población. Entre los años 2000 y 2009 se incrementó en 44% la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios, mientras que los residuos en sitios sin control disminuyó 23% en el mismo periodo (Semarnat, 2013). En México, en la década de los cincuenta, el porcentaje de residuos orgánicos en la basura era de 70% de su volumen, mientras que para 2007 esta cifra se redujo a 50%.

La minimización de los residuos sólidos urbanos mediante el reciclaje disminuye la cantidad de desechos y genera una mejor administración de los sitios para la disposición final. Los materiales que más se reciclan en México son los textiles, los plásticos y los metales, con cantidades por encima del millón de toneladas (Figura 1). El porcentaje de materiales reciclados durante el periodo 2005-2009 varió entre 12% y 36% (Figura 1). Los materiales y su porcentaje de incremento en el reciclamiento fueron: los plásticos, 36%; seguidos por el papel y cartón, 36%; los textiles, 33%; el vidrio, 29%; y los metales, 12% (Semarnat, 2013).

Figura 1
Reciclaje de residuos sólidos urbanos



La generación de residuos de manejo especial se ubicó en 2005 en cuatro grandes grupos: a) el de la construcción y demolición de obras para viviendas, comercios o la industria, que fue de 77%; b) el de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, de 18%; c) el generado por servicios de transporte, de 3%; y d) el que se genera en las unidades médicas, de 2% (Semarnat-INE, 2006).

El progreso de la industria química ha permitido el desarrollo de una gran variedad de sustancias que sirven como productos o materias primas para numerosos bienes de consumo. Sin embargo, una consecuencia del uso de estas sustancias es la generación de residuos peligrosos. El volumen generado de éstos durante el periodo 2004-2008 fue de un millón 25 mil toneladas, según los datos recabados de 27 mil 465 empresas incorporadas al Padrón de Generadores de Residuos Peligrosos (PGRP) y con registro ante la Semarnat (Semarnat, 2013).

2. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL DEL CONCRETO

El concreto es, por mucho, el material de construcción más importante. A nivel mundial, cada año se producen más de 10 mil millones de toneladas. Su caracte-

rística más interesante es ser un material de ingeniería, lo que significa que puede ser diseñado para satisfacer especificaciones de rendimiento, más que cualquier otro material disponible actualmente. Pero esta popularidad viene acompañada de un alto precio que es a menudo pasado por alto: para volúmenes absolutos que se producen cada año, el concreto tiene un enorme impacto en el medio ambiente. Se requieren grandes cantidades de recursos naturales para producir esos miles de millones de toneladas de concreto al año. Cabe mencionar que en dicha producción por cada tonelada de cemento Portland se libera casi una tonelada de CO₂ a la atmósfera, aunado al gran consumo de agua y energía. Se estima que en todo el mundo la industria del cemento es responsable de 7% de todo el CO₂ generado (Malhotra, 2000: 226). Otro problema que conlleva el concreto son los desechos que produce cuando es demolido, lo cual incrementa el deterioro ambiental.

Al parecer la industria del concreto se ha convertido en una víctima de su propio éxito, por lo cual se enfrenta a grandes retos. En los últimos años se han propuesto diferentes estrategias para cumplir con los desafíos ambientales que representa la industria del concreto, las cuales se pueden resumir en

1. Aumentar el uso de materiales de desecho, especialmente de aquellos que son subproductos de procesos industriales.
2. Uso de materiales reciclados en lugar de los recursos naturales, lo cual promoverá una industria sostenible.

Dentro de los materiales reciclados que se han utilizado en el concreto se encuentran: plásticos, vidrio, elastómero de llantas, cenizas, escoria de hornos (industria del acero), desechos orgánicos (madera, fibras) y residuos agrícolas. En este capítulo se mencionan las investigaciones realizadas por nuestro grupo de trabajo sobre concreto con materiales de reciclaje, en particular tres: a) PET de botellas de agua, b) elastómero de llanta en dos presentaciones, en pellet y fibra, y c) celulosa de envases de Tetra Pak. Además se mencionan otros materiales de reciclaje utilizados en concreto.

3. PLÁSTICO RECICLADO EN CONCRETO

Los plásticos están conformados en formas distintas y presentan diversas formulaciones químicas. Estas características complican su proceso de reciclamiento y hacen poco rentable su separación. No obstante, muchos plásticos se pueden reciclar y obtener de nueva cuenta la materia prima, la cual puede ser utilizada

para la fabricación de plásticos o de termoestables. Sin embargo, la calidad del material reciclado es menor y menos homogénea que la del material virgen, razón por la cual los fabricantes generalmente prefieren darle usos alternativos, por ejemplo como “madera” de construcción plástica (Shao *et al.*, 2000: 91).

Químicamente, alcanzar las propiedades de los materiales vírgenes no es posible con las tecnologías de reciclaje disponibles actualmente, por lo que una de las opciones más socorridas de reciclamiento es la molienda del material y su uso en diferentes áreas, como la de la industria de la construcción. Un problema importante para el uso de plástico reciclado en el concreto hidráulico es la pobre adhesión entre las partículas de plástico y la matriz de cemento. Sin embargo, no todas las construcciones requieren concretos con alta resistencia, por lo que la adición parcial de plástico reciclado como sustituto de los agregados minerales en la mezcla del concreto representa una oportunidad invaluable. Tanto los agregados gruesos (grava) como los finos (arena) han sido sustituidos parcialmente. En la literatura se han reportado muchas propuestas de estas sustituciones. Por ejemplo, se ha utilizado plástico de la defensa de autos como sustitución parcial de agregado grueso, obteniéndose disminución en la resistencia a la compresión provocada por la pobre adhesión entre el plástico sin tratar y la matriz del concreto. Para solucionar la pobre adhesión se ha propuesto añadir un agente espumante y un bioplástico; sin embargo, los costos de preparación y elaboración son costosos (Shao *et al.*, 2000: 91). También se han agregado fibras de polietileno a las mezclas de concreto en porcentajes en volumen de hasta 4%, logrando mejoramiento en la resistencia a la flexión de hasta 20%.

Algunas investigaciones de concreto con PET en forma de fibras señalan mejoramiento en ciertas propiedades, entre éstas, la resistencia a la compresión y a la tensión, y el módulo de elasticidad. Algunos de los parámetros que se toman en cuenta son la naturaleza y el tamaño del PET. Añadir PET reciclado puede ayudar a disminuir los costos de producción. Otra investigación reporta que añadiendo 75% de PET se disminuye 33% la resistencia a la compresión, sin embargo la trabajabilidad se mejora en 123%.

En las investigaciones llevadas a cabo por nuestro grupo se han empleado partículas de PET obtenidas de botellas de agua purificada. En una primera etapa se seleccionó sólo el cuerpo de la botella, excluyendo la parte baja (base) y el cuello de la misma. Se cortaron tiras de 50 mm de largo por 5 mm de ancho, las cuales redujeron su tamaño a una quinta parte después de una primera molienda. Finalmente se utilizó un molino con el cual se pudieron obtener tamaños de partículas de PET de 0.5, 1.5 y 3.0 mm. El segundo tamaño es similar al de la arena utilizada, 1.4 mm, y el último tamaño es de un tercio del tamaño de la grava, 9.5 mm. La

razón de tamaños entre el PET, la arena y la grava se muestra en la Tabla 1. Con el manejo de los tamaños se pretende obtener mayor homogeneidad y, por ende, mayor trabajabilidad del concreto.

Tabla 1
Razón PET: Arena: Grava en función del tamaño

| <i>Tamaño del PET (mm)</i> | <i>PET</i> | <i>Arena</i> | <i>Grava</i> |
|----------------------------|------------|--------------|--------------|
| 0.5 | 1 | 3 | 18 |
| 1.5 | 1 | 1 | 6 |
| 3.0 | 1 | 0.5 | 3 |

Las partículas de PET se añadieron a la mezcla de concreto en concentraciones de 1.0, 2.5 y 5.0 % en volumen, en sustitución parcial de la arena. En la Tabla 2 se muestran las concentraciones de cada componente del concreto, incluidas las partículas de PET.

Tabla 2
Materiales utilizados en la elaboración del concreto (en gramos)

| <i>PET</i> | <i>Arena</i> | <i>Cemento Portland</i> | <i>Grava</i> | <i>Agua</i> |
|------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------|
| 3.26 | 914.7 | 420 | 1152 | 413 |
| 8.17 | 909.8 | 420 | 1152 | 413 |
| 16.33 | 901.6 | 420 | 1152 | 413 |

Aparte del tamaño y la cantidad utilizada de cada componente, es importante manejar un porcentaje bajo de absorción de agua por parte del PET, 0.1% en 24 horas.

Se llevaron a cabo pruebas mecánicas de resistencia a la compresión de cilindros de concreto de 5 cm de diámetro por 10 cm de largo, en una Máquina Universal Controls de acuerdo con la norma ASTM C-39M-01.

En la Figura 2 se muestran los valores de resistencia a la compresión de concreto con diferentes concentraciones y tamaños de partículas de PET. La prueba se llevó a cabo en concreto con 28 días de curado. El análisis de los resultados se realizó en términos de estos dos parámetros: la concentración y el tamaño. Respecto al tamaño se observa que los valores máximos son para concreto con tamaño de partícula de 0.5 mm y respecto a la concentración para concretos con 5.0% en volumen de partículas de PET. Es decir, para obtener alta resistencia se recomienda utilizar tamaño pequeño (0.5 mm) y mayor concentración (5.0%).

Figura 2
Resistencia a la compresión de concreto con partículas de PET reciclado

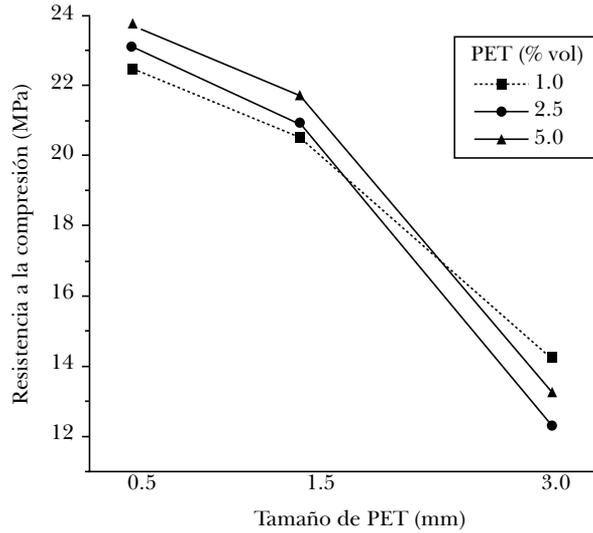
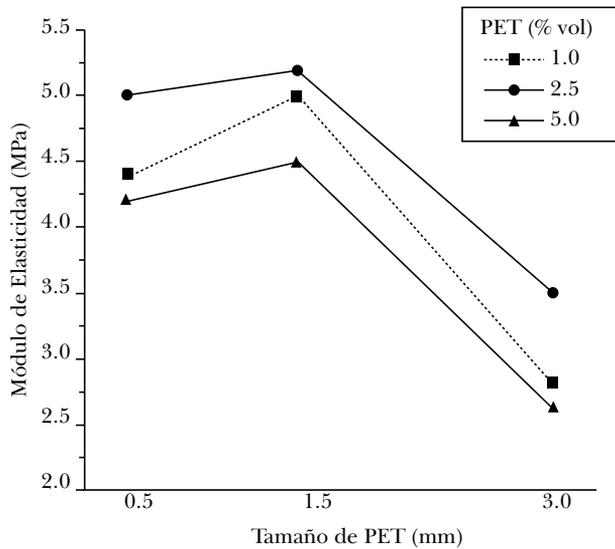


Figura 3
Módulo de elasticidad de concreto con partículas de PET reciclado



El módulo de elasticidad presenta los mayores valores para un tamaño de partícula de 1.5 mm y una concentración de 2.5% (Figura 3); esto indica que un tamaño de 1.5 mm genera un concreto más rígido, lo cual es muy diferente para un tamaño de 3.0 mm, con el cual se genera un concreto más dúctil.

4. CELULOSA DE TETRA PAK RECICLADA EN CONCRETO

Se han utilizado fibras de celulosa de madera de diferente tamaño en concreto a base de cemento Portland, considerando hasta 20% en volumen de éstas, y tres intervalos de tamaños: 0-20 mm; 20-80 mm; >80 mm (denominados lana, virutas y partículas de celulosa, respectivamente). Las fibras presentan una resistencia a la tensión de 500 a 900 MPa y un módulo de elasticidad de 25 a 40 GPa.

Las fibras de celulosa son estables en el medio altamente alcalino de la matriz de cemento, mientras que las fibras inmersas en sulfato de sodio (Na_2SO_4) favorecen la resistencia a flexión; por el contrario, las inmersas en hidróxido de sodio (NaOH) ocasionan disminución. Los métodos aplicados a las fibras, ya sean químicos o termo-mecánicos, influyen considerablemente en las propiedades mecánicas del concreto. El método químico es más costoso; no obstante esto, es compensado, ya que las fibras presentan una mayor resistencia a flexión.

Los concretos con fibras de celulosa se han empleado para fabricar paneles acústicos y térmicos, con densidades diferentes de: 350-600 kg/m^3 , 400-600 kg/m^3 y 1000-1200 kg/m^3 ; y diferentes resistencias a flexión de 0.4-1.7 MPa, 0.7-1.0 MPa y 10-15 MPa, respectivamente. La contracción del concreto es controlada por la pasta de cemento, mientras que la humedad presente en el concreto es controlada por las fibras, esto gracias a que las fibras proporcionan porosidad a los paneles.

Un punto relevante es que las propiedades de la celulosa están determinadas por el método que se utilice para hacer la pulpa; por ejemplo, métodos agresivos provocan que las fibras se degraden. En este sentido, cuando se utilice la celulosa de papel y el cartón para la elaboración de materiales compuestos debe evitarse el uso de sustancias químicas o procesos que afecten las propiedades finales.

Nuestro grupo de investigación ha estudiado la resistencia a la compresión de concreto con celulosa proveniente de envases de Tetra Pak. Las concentraciones de celulosa utilizadas son de 3, 5 y 7% en peso. La celulosa sustituyó al agregado fino (arena sílice). En la Figura 4 se observa que para concretos sin celulosa el valor máximo de resistencia a la compresión es de 21.5 MPa. Se observa que conforme aumenta el porcentaje de celulosa reciclada en el concreto, la resistencia a la compresión disminuye gradualmente, llegando a ser 48% menor que la del concreto sin celulosa.

Figura 4
Resistencia a la compresión de concreto con celulosa reciclada

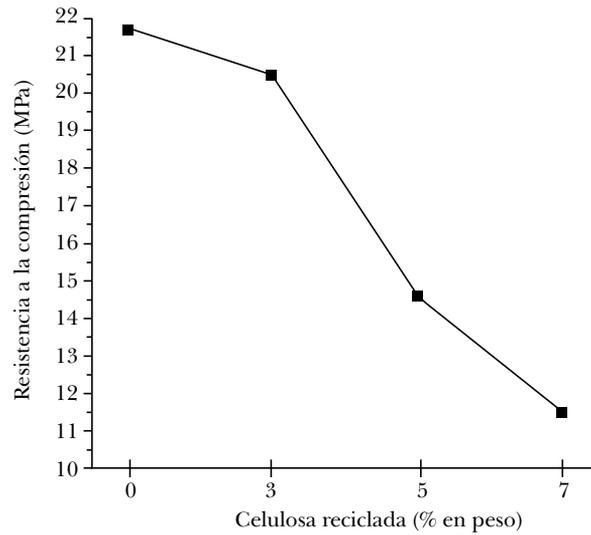
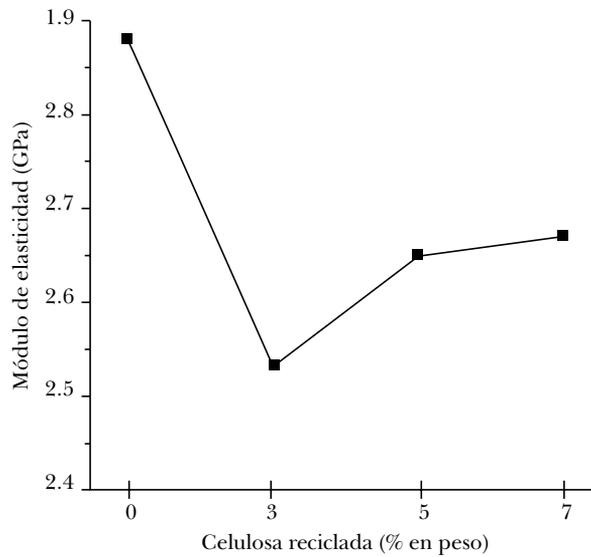


Figura 5
Módulo de elasticidad de concreto con celulosa reciclada



En el caso de los valores de módulo de elasticidad se observa un comportamiento bien definido en dos etapas: a) en la primera el valor disminuye para concreto con 3% de celulosa reciclada; pero luego, b) se incrementa para concentraciones mayores, 5 y 7% (Figura 5). Esto implica una doble ventaja, por un lado se utiliza un mayor porcentaje de celulosa y por otro disminuye el módulo de elasticidad, teniéndose un material más dúctil.

5. LLANTAS RECICLADAS EN CONCRETO

Mientras países europeos como Alemania, Francia y Austria reciclan hasta 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, 91% termina en lotes baldíos, ríos y carreteras; 5% se renueva, 2% se usa en la generación de energía y el 2% restante se deposita en centros de acopio (Taha *et al.*, 2008). Dicha situación no sólo arruina los paisajes sino que convierte estos lugares en criaderos de mosquitos, ratas, moscas y cucarachas, propagadores de enfermedades como el dengue y la rabia; además de ser sitios propensos a la generación de incendios difíciles de controlar. Algunos incendios de llantas han durado meses. Varios estudios han demostrado que la quema de llantas libera sustancias de máxima peligrosidad para el ser humano, como monóxido de carbono, furanos, tolueno, benceno y óxido de plomo.

Probablemente el método de reciclaje de llantas usadas de mayor beneficio al medio ambiente es la renovación o recauchutado. Sin embargo, el método más común es su uso como fuente de energía para producir vapor, electricidad o calor a través de la combustión. Su valor como combustible es considerablemente menor que el del material original, lo que constituye un ejemplo de “downcycling”. Aunque algunas de éstas u otras aplicaciones han sido más o menos exitosas, no se ha logrado reducir de manera considerable la cantidad de llantas viejas almacenadas.

Un uso diferente de las llantas de desecho es como agregados en la industria de la construcción. Se pueden agregar en la mezcla de concreto, de asfalto caliente o en forma de polvo en pavimentos asfálticos. Desde un punto de vista estrictamente económico, una simple sustitución de agregado fino implica un cierto grado de “downcycling”, el cual puede evitarse si se realiza un estudio serio que involucre las propiedades del elastómero, que son por lo regular superiores a las de la arena natural o de la grava.

En un estudio realizado se utilizó elastómero de llanta reciclada en diversas formas: triturado, picado, molido o en polvo, con tamaños entre 75 micras y 4.5 cm. Los valores obtenidos de las propiedades mecánicas del concreto una vez agregados los elastómeros mostraron diferencias significativas en el módulo

de Young respecto a las del elastómero y la matriz de cemento. En términos generales, el uso de partículas de elastómero evita la propagación de grietas en el concreto, con lo cual se presenta un aumento significativo de las capacidades de deformación, ductilidad y absorción de energía (Taha *et al.*, 2008).

En nuestras investigaciones se ha trabajado con dos diferentes tipos de elastómero de llanta: en grado fibra y en grado partículas. Se ha estudiado la deformación en compresión y el módulo de elasticidad del concreto. En la Figura 6a se observa que la máxima deformación se obtiene cuando se agrega 0.9% de fibras, mostrando la influencia del elastómero en el comportamiento de la deformación. Una mayor concentración de fibras, 1.2%, provoca aglomeración y disminución en los valores de deformación.

El comportamiento del módulo de elasticidad es diferente (Figura 6b), ya que los valores disminuyen conforme se incrementa la concentración de las fibras. El valor más bajo es 53% menor que el concreto sin fibras de llantas, lo cual indica que este tipo de concreto es más dúctil que el concreto con 1.2% de fibras.

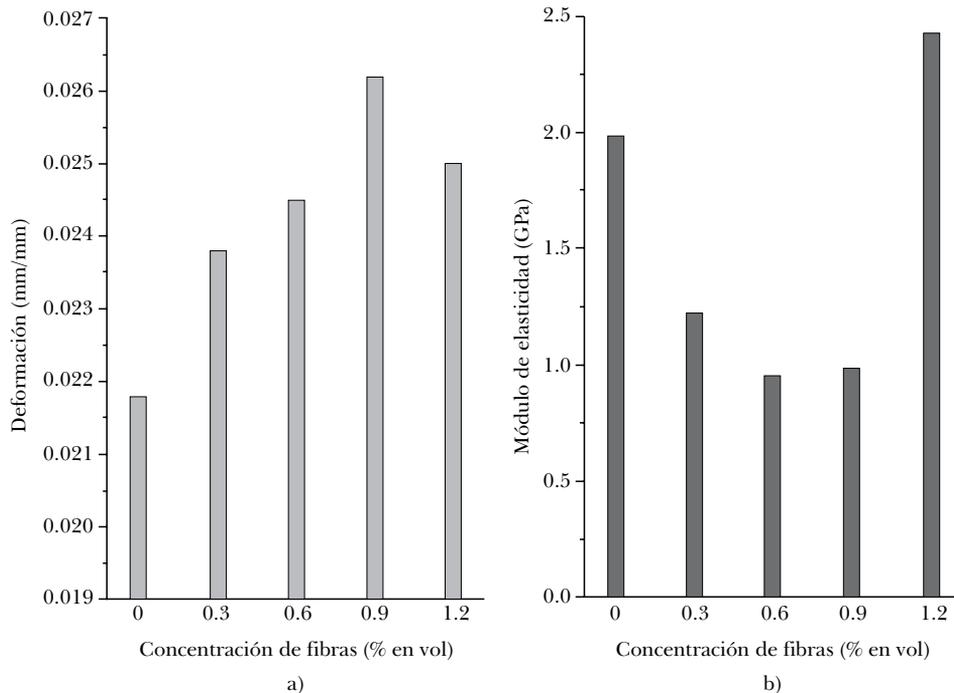
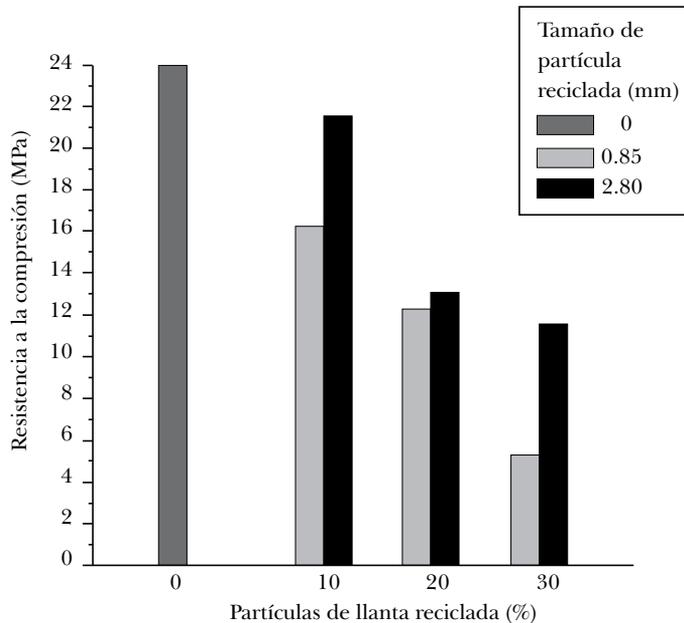


Figura 6. Concreto con fibras de llanta recicladas: a) Deformación, b) Módulo de elasticidad

En el caso de concreto con partículas de elastómero de llanta de tamaños de 0.85 mm y 2.8 mm el comportamiento es muy similar: a) los valores de resistencia a la compresión disminuyen gradualmente conforme se incrementa el porcentaje de las partículas; el valor más bajo es 80% menor que el de concreto sin fibras; b) respecto al tamaño de partícula los valores son mayores para concreto con partículas de 2.8 mm (Figura 7). La disminución de los valores de resistencia a la compresión es compensada con el uso de 10% de partículas, porcentaje con el cual sólo se tiene una disminución de 8% respecto al concreto sin fibras.

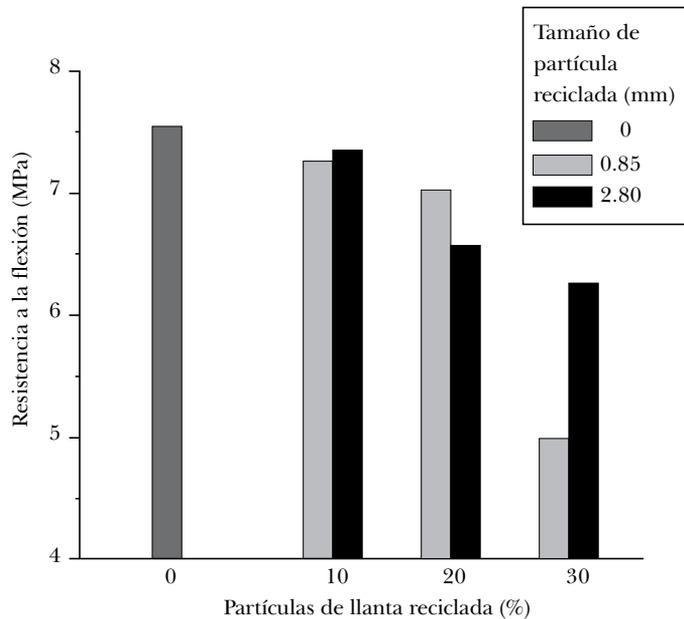
Figura 7
Resistencia a la compresión de concreto con fibras de llanta recicladas



Mejores resultados se presentan para la resistencia a la flexión, ya que los porcentajes de disminución son menores. La resistencia disminuye conforme se incrementa la concentración de partículas, además los mayores valores se obtienen cuando se utilizan partículas de 2.8 mm (Figura 8). Es evidente que la propiedad de flexión es favorecida por la presencia de partículas de elastómero, a diferencia de la propiedad de compresión. Más aún, la diferencia es mínima entre los valores

de concreto sin fibras y concreto con 10% de partículas, de sólo 3%. Inclusive se puede considerar agregar 30% de partículas, ya que la diferencia es de 15% respecto a los valores de concreto sin partículas.

Figura 8
Resistencia a la flexión de concreto con fibras de llanta recicladas



6. VIDRIO DE DESECHO UTILIZADO EN CONCRETO

Cada año se incrementa la producción de envases de vidrio en el mundo. Tan sólo en Estados Unidos se producen más de 41 mil millones de envases, y más de 11 millones de toneladas de vidrio se desechan en los hogares estadounidenses. Actualmente sólo alrededor de 27% de estas cantidades se recicla, principalmente para producir nuevas botellas. En las grandes áreas metropolitanas el costo por recolección y separación de vidrio puede ser significativo porque no existe una cultura de reciclaje para facilitar esta labor. La mayoría de las propuestas de usos secundarios para los residuos de vidrio constituye reciclaje de bajo impacto, es decir, el valor del material para su uso secundario es menor que el de su forma original.

El vidrio no absorbe agua, lo cual es una ventaja para el diseño de una mezcla de concreto para una aplicación específica. Debido a la falta de absorción de agua y las superficies lisas de las partículas de vidrio, las propiedades de flujo de concreto fresco son mejores que las de concreto con agregados naturales. Esto se traduce en una mejor trabajabilidad y una menor relación agua-cemento, además de obtenerse mayores valores en la resistencia mecánica y en propiedades como la durabilidad, sin la ayuda de un plastificante.

Si el vidrio se va a utilizar como un agregado de concreto, debe estar sujeto a las mismas especificaciones a las que son sujetos los agregados naturales. Por ejemplo, uno de los requisitos es que el vidrio esté libre de impurezas orgánicas, lo que implica que debe ser lavado correctamente. Otra ventaja del vidrio es su excelente dureza y resistencia a la abrasión, que le permite ser adecuado para adoquines, baldosas y otras aplicaciones sometidas a un gran desgaste por el uso. La durabilidad y estabilidad química del vidrio es excelente, por lo que se puede producir concreto de alta resistencia y durabilidad.

El vidrio finamente molido ha demostrado tener propiedades puzolánicas y puede servir como un excelente material de relleno para producir concreto de alto rendimiento (Jin, 1998: 811). A este vidrio molido se le conoce como “arena” o “arena blanca” y se utiliza primordialmente como sustituto del agregado en la pavimentación con asfalto (glasphalt), también como relleno en drenajes, carreteras y tuberías.

7. CENIZAS UTILIZADAS EN CONCRETO

Las propiedades cementantes de las cenizas se conocen desde hace mucho tiempo. Sin embargo, su uso generalizado se logró sólo después de que las regulaciones de la calidad del aire obligaron a instalar plantas “lavadoras” y precipitadores electrostáticos para atrapar las partículas finas, las que anteriormente se liberaban al medio ambiente. Los porcentajes de uso de las cenizas varían mucho de un país a otro, desde un mínimo de 3.5% para la India hasta un máximo de 93.7% para Hong Kong (Malhotra, 2000: 226).

Las cenizas tienen una serie de ventajas en comparación con el cemento ordinario, por ejemplo, su calor de hidratación es menor (debido a que la reacción química es retardada y diferente). Se ha logrado construir losas de cimentación de tamaños de (36 x 17 x 0.61), libres de grietas, mediante la sustitución de 57% del cemento por cenizas, manteniendo la temperatura durante la hidratación por debajo de los 15°C. El enfriamiento de las losas es cuidadosamente controlado, por lo que las tensiones térmicas se mantienen por debajo de la fuerza de agrietamiento de los concretos (Mehta *et al.*, 2000: 27). Otra investigación sobre

la microestructura del concreto reveló que la sustitución de 60% de cenizas por cemento aumenta la homogeneidad, debido a la eliminación de hidróxido de calcio (Malhotra, 2000: 226).

8. ESCORIA DE HORNOS EN CONCRETO

Como su nombre lo indica, la escoria es un subproducto de la industria del acero. Ésta se forma cuando el material fundido proveniente de hornos se enfría rápidamente; tiene una estructura granular vítrea. Con el incremento en la demanda de metales en las diferentes industrias también se ha incrementado la producción de escoria. En la producción de una tonelada de cobre, se generan aproximadamente de 2.2 a 3 toneladas de escoria de cobre como subproducto, lo que resulta en cerca de cuatro millones de toneladas al año sólo en Estados Unidos.

Estudios recientes han demostrado que la escoria se puede utilizar con gran éxito en aplicaciones específicas (Behnoud, 2005). Desde los años cincuenta se ha incrementado su uso en diferentes países, debido a sus propiedades cementantes. La primera producción de concreto registrada usando escoria proveniente de hornos fue en Alemania en 1982. Mehta sugiere que la industria del concreto ofrece condiciones ideales para el uso beneficioso de estas escorias, debido a que los metales nocivos se pueden inmovilizar de manera segura al incorporarse en los productos de hidratación de cemento (Mehta, 2000: 27).

Debido a sus excelentes propiedades, no sólo es utilizado como sustituto parcial del cemento, sino también como agregado. Los concretos elaborados con escoria presentan mayor cantidad de radicales libres y una mayor relación calcio/silicatos, en comparación con concretos a base de cemento Portland.

El porcentaje óptimo de sustitución de cemento es, a menudo, citado como de 50% y en ocasiones hasta de 70 y 80%. Al igual que las cenizas, la escoria proveniente de hornos también mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto y genera menos calor de hidratación.

Se han realizado diversos estudios con escoria. Por ejemplo se elaboró una losa de cimentación de 2.1 m para una planta de tratamiento de agua, con un 70% de escoria proveniente de hornos y 30% de cemento Portland Tipo II. El objetivo fue obtener un concreto libre de grietas, a través de minimizar las diferencias de temperatura, sin la necesidad de instalar un sistema de refrigeración interno de elevado costo.

En algunas situaciones se recomienda el uso de un sistema ternario, es decir, una mezcla de cemento Portland ordinario, cenizas y escoria de hornos. El costo de la escoria es generalmente del mismo orden que el del cemento Portland.

9. CONCRETO RECICLADO UTILIZADO EN CONCRETO

Los desechos de la construcción, así como los productos de la demolición constituyen una parte importante de todos los residuos sólidos generados. En la Unión Europea se estiman entre 200 y 300 millones de toneladas de residuos generados cada año (Lauritzen, 2004: 1). Las cifras de Estados Unidos son similares.

La forma tradicional de eliminación de estas grandes cantidades de residuos suele ser depositándolos en vertederos. Sin embargo, la capacidad de los vertederos adecuados es cada vez menor. En Japón se ha estimado que la capacidad de los vertederos restantes puede durar sólo unos cuantos años más (Kasai, 2004: 11). La industria de la construcción japonesa ha encontrado las maneras de sustituir el agregado por concreto reciclado, lo que le ha permitido ser un líder en los procesos y normas para el uso de los residuos de construcción y demolición.

En Europa, donde la escasez de agregado adecuado no es tan aguda, la mayor parte de residuos de construcción y demolición se utiliza para la base de las carreteras (Hansen *et al.*, 2004: 235). Los residuos de construcción y demolición son generalmente menos costosos y se utilizan como agregado en concretos para construcciones que no requieren altas resistencias, pero sí bajos costos.

En Estados Unidos la compañía Recycled Materials Company utilizó los restos de la demolición del antiguo aeropuerto internacional de Denver. Se usaron 6.5 millones de toneladas de concreto y elementos sólidos (suficiente agregado para construir la presa de Hoover), siendo el proyecto de reciclaje más grande del mundo, sin ningún costo para la Ciudad de Denver en seis años.

10. MATERIALES RECICLADOS EN CONCRETO POLIMÉRICO

El concreto polimérico es un material compuesto que consiste de una matriz de resina termoestable y de agregados minerales, más un catalizador que inicia el curado de la resina, a diferencia de los concretos hidráulicos que utilizan cemento tipo Portland y agua como cementante. En el concreto polimérico la resina es conocida como la fase continua y determina el comportamiento del material compuesto. Son de uso común las resinas de poliéster insaturado y peróxidos como agentes de curado; estos últimos han mostrado altas velocidades de reacción y ser eficientes para el entrecruzamiento de la resina. El concreto polimérico tiene ventajas en comparación con el concreto hidráulico, como endurecimiento rápido, alta resistencia mecánica, resistencia a ataques químicos, entre otras.

El comportamiento mecánico del concreto polimérico depende de las propiedades de la resina y los agregados minerales, así como de las concentraciones de ambos (Martínez-Barrera *et al.*, 2008: 1211; Kukacka *et al.*, 1993: 15). Las resinas

de poliéster son las más utilizadas debido a sus bajos costos y su alta resistencia a la corrosión. Los agregados minerales pueden ser silicatos, piedra de cuarzo, grava, piedra caliza, granito, arcilla, cenizas, arena sílice, entre otros.

Las características de los concretos poliméricos son:

Ligereza: entre una décima o una tercera parte del peso del concreto hidráulico.

Alta resistencia: resistencia a la compresión, flexión y tracción desde tres hasta cinco veces mayor que la del concreto hidráulico.

Menores costos de instalación y de fácil manejo, no son necesarios equipos especiales.

Estables bajo condiciones de congelación y descongelación.

Baja absorción de agua: menor de 1% según la norma ASTM D-570.

Resistentes a la corrosión: resistentes a ataques químicos, al ambiente y otras formas de deterioro.

Rentables: superan los materiales convencionales por más tiempo de vida útil.

Son no conductores, no requieren de conexión a tierra.

Debido a la rapidez de endurecimiento de los concretos poliméricos, se pueden lograr altas resistencias en poco tiempo. Dado que el concreto polimérico es más ligero que el concreto hidráulico, los elementos prefabricados son favorecidos al tener menores tamaños y espesores. Esta ligereza los hace competitivos, compensando el mayor precio con menores costos de transporte y de colocación (Zhihong *et al.*, 1995: 185).

Existe muy poca información sobre concretos poliméricos que incorporen diferentes tipos de materiales. Los pocos estudios abarcan la incorporación de fibras inorgánicas como las de vidrio, carbono o boro, así como de fibras naturales como coco o bagazo de caña (Naaman, 1985: 21; James *et al.*, 2002: 2). Se estima que hay una concentración óptima de fibra en función del contenido de resina. Se ha reportado que las fibras de vidrio cortas o las fibras de carbono mejoran las propiedades de fractura, mientras que las fibras de vidrio y silano (como gente de acoplamiento) mejoran en un 95% la resistencia a la flexión.

Se han utilizado algunos polímeros de desecho en concreto polimérico, entre ellos poliestireno, polietileno de alta densidad y fibras de llantas. Los resultados muestran una disminución en la resistencia a la compresión, densidad, porosidad y propiedades de absorción de agua. Debido a la menor densidad, el concreto polimérico se puede utilizar en estructuras que no requieren grandes capacidades de carga (Mostafizurm *et al.*, 2012). Otro estudio reporta el efecto de polímeros

termoestables en concreto polimérico, los cuales incrementan la resistencia a la compresión y flexión, y la ductilidad. Este estudio presenta una opción de tecnología viable mediante el uso de polímeros termoestables de reciclaje en concreto polimérico (Ribeiro *et al.*, 2009).

También se han agregado polímeros y agregados minerales de reciclaje al concreto polimérico: partículas de PET y mármol reciclado. En términos generales, la resistencia mecánica no se ve afectada de manera considerable, pero aumenta considerablemente la resistencia a carbonatos, hidróxidos, agua de mar y agua dulce, además de obtener concreto polimérico con baja porosidad y absorción de agua (Tawfik *et al.*, 2006: 65).

Se han utilizado residuos de alúmina industrial (subproducto de la industria del acero) en los concretos poliméricos, consideradas como “residuos retardantes de fuego”. Se encontró una reducción de 85% en el tiempo de propagación de la llama y aumento de la resistencia mecánica (Karina *et al.*, 20013: 378). Los agregados, especialmente las cenizas, pueden mejorar las propiedades del concreto polimérico (Barbut *et al.*, 2008: 13).

Una de las últimas tendencias es sustituir los agregados por concreto polimérico reciclado; la idea es contar con una opción alternativa para la elaboración de concretos sustentables. Las propiedades medidas en este estudio fueron resistencia a la compresión, a la flexión, la tracción, módulo de elasticidad y relación de Poisson (Kyu-Seok *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Se han obtenido excelentes resultados con el uso de materiales reciclados en el concreto, como son plásticos, vidrio, cenizas, escoria de hornos, madera, fibras y residuos agrícolas. En particular en este capítulo se muestran los resultados de tres materiales: a) PET de botellas de agua, b) elastómero de llanta en dos presentaciones, en pellet y en fibra; y c) celulosa de envases de Tetra Pak. En lo referente a concreto con PET los mayores valores en resistencia a la compresión se obtienen cuando se utiliza tamaño pequeño (0.5 mm) y una concentración de 5.0% de PET reciclado. Más aún, el módulo de elasticidad presenta los mayores valores para un tamaño de partícula de 1.5 mm y una concentración de 2.5%, obteniéndose un concreto más rígido. En el caso de concreto con celulosa se tiene una doble ventaja, por un lado se utiliza un mayor porcentaje de celulosa y por otro disminuye el módulo de elasticidad, teniéndose un material más dúctil. En el caso de utilizar llantas recicladas, la disminución de los valores de resistencia a la compresión es compensada con el uso de 10% de partículas, que hace disminuir los costos de producción.

REFERENCIAS

- Barbut, M. y M. Harja (2008). "Properties of Fiber Reinforced Polymer Concrete", en *Bul. Inst. Polit.*, vol. 43, pp. 13-21.
- Behnoud, A. (2005). "Effects of High Temperature on High-Strength Concretes Incorporating Cooper Slag Aggregates", en *Proceedings 7th International Symposium on High-Performance Concrete*, Washington, D.C.
- Hansen, T. C. y E. K. Lauritzen (2004). "Concrete Waste in a Global Perspective", en *Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable Develop, Special Publication*, SP-219, pp. 235-45.
- James, I. D., V. S. Gopalaratnam y M. A. Galinat (2002). "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete", en *Manual of Concrete Practice*, vol. 21, pp. 2-66.
- Jin, W. (1998). "Alkali-silica Reaction in Concrete-a Chemo-Physico-Mechanical Approach", Ph.D. Dissertation, Columbia University, New York.
- Karina, G. T. y P. G. Jane (2013), "Polymer Concrete with Recycled PET: The Influence of the Addition of Industrial Waste on Flammability", en *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 378-389.
- Kasai, Y. (2004). "Recent Trends in Recycling of Concrete Waste and Use of Recycling Aggregate Concrete in Japan", en *Recycling Concrete and other Materials for Sustainable Develop, Special Publication SP-219*, pp. 11-33.
- Kukacka, L. E. y A. J. Romano (1993). "Process Techniques for Producing Polymer-Impregnated Concrete: Polymers in Concrete", en *American Concrete Institute*, vol. 19, pp. 15-31.
- Kyu-Seok, Y., C. Yoon-Sang y H. Sang-Hoon (2010). "Properties of Recycled Polymer Concrete Using Crushed Polymer Concrete as an Aggregate", en *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*. Italy.
- Lauritzen, E. K. (2004). "Recycling Concrete-An Overview of Challenges and Opportunities", en *Recycling Concrete and Other Materials for Sustainable Development, Special Publication SP-219*, pp. 1-10.
- Malhotra, V. M. (2000). "Role of Supplementary Cementing Materials in Reducing Greenhouse Gas Emissions", en Gjorv, O. E y K. Sakai K (eds.), *Concrete Technology for Sustainable Development in the 21st Century*, E&FN Spon, London, pp. 226-235.
- Martínez-Barrera, G. y W. Brostow (2008). "Compressive Strength of Gamma-Irradiated Polymer Concrete", en *Polymer Composites*, vol. 29, núm. 11, pp. 1211-1217.

- Mehta, P. K. y W. S. Langley (2000). "Monolith Foundation: Built to Last 1000 Years", en *Concrete International*, vol. 22, núm. 7, pp. 27-32.
- Mostafizurm, R., I. Akhtarul y A. Mainuddin (2012). "Recycling of Waste Polymeric Materials as a Partial Replacement for Aggregate in Concrete", en International Conference on Chemical, Environmental and Biological Sciences. Malaysia.
- Naaman, A. E. (1985). "Fiber Reinforcement for Concrete", en *Concrete International: Design and Construction*, vol. 7, núm. 3, pp. 21-25.
- Ribeiro, C., L. Dinis, A. C. Castro, C. Meixedo y A. Ferreira (2009). "Reusability Assessment of Thermoset Polymeric Composite Wastes as Reinforcement and Filler Replacement for Polymer Concrete Materials", en 18th International Conference on Composite Materials. Scotland.
- Semarnat (2013). "Indicadores clave-residuos" [en línea], México, disponible en <www.semarnat.gob.mx> [accesado el 15 de junio de 2013].
- Semarnat-INE (2006). "Diagnóstico básico para la prevención y gestión integral de residuos" [en línea], México, [accesado en junio de 2013].
- Shao, Y., T. Lefort, S. Moras y D. Rodríguez (2000). "Studies on Concrete Containing Ground Waste Glass", en *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 91-100.
- Taha, M. R., A. S. El-Dieb y M. Nehdi (2008). "Recycling Tire Rubber in Cement-Based Materials", en *Concrete with Recycling Materials*, ACI Committee 555, Report under review.
- Tawfik, M. E. y S. E. Eskander (2006). "Polymer Concrete from Marble Wastes and Recycled Poly (Ethylene Terephthalate)", en *Journal of Elastomers and Plastics*, vol. 38, núm. 1, pp. 65-79.
- Zhihong, Z. y F. Feldman (1995). "Synthetic Fibre-Reinforced Concrete", en *Progress in Polymer Science*, vol. 20, núm. 2, pp. 185-210.