

Residuos plásticos automotrices como agregados para concretos y morteros sostenibles

Plastic Waste Automotive as Aggregates for Sustainable Concretes and Mortars

Luis Fernando Molina-Prieto^a, Angie Tatiana Ortega-Ramírez^{b, c}

RESUMEN

El artículo aborda el tema de los residuos plásticos automotrices —porque es frecuente que sean depositados en rellenos sanitarios, incrementando la contaminación del suelo—, y propone su uso como agregados para concretos y morteros sostenibles. Se presenta un panorama de la contaminación terrestre y marítima generada por residuos plásticos y se incluyen algunos datos relativos a la contaminación por plásticos automotrices. El artículo se fundamenta en dos conceptos contemporáneos: i) metabolismo urbano; y ii) ecología industrial. A partir de ellos se llevó a cabo una búsqueda sistemática de investigaciones que, a nivel global, exploren la viabilidad de usar residuos plásticos —de diversos orígenes—, como insumos para la industria de la construcción. Se concluye que esta alternativa transforma los residuos plásticos, tanto automotrices como provenientes de otras industrias, en valiosos insumos para la arquitectura y la ingeniería civil.

PALABRAS CLAVE: metabolismo urbano; ecología industrial; metabolismo industrial; alternativas sostenibles al hormigón.

ABSTRACT

The article addresses the issue of automotive plastic waste —because they are very often deposited in landfills, increasing soil contamination— and proposes its use as aggregates for sustainable concretes and mortars. An overview of land and maritime pollution by plastic waste is presented, and some data on contamination by automotive plastics are included. The article is based on two contemporary concepts: i) urban metabolism; and ii) industrial ecology. From them is carried a systematic search of researches out that, at global level, explore the feasibility of using plastic waste —of diverse origins—, as inputs for the construction industry. It is concluded that this alternative transforms plastic waste, both automotive and other industries, in useful and valuable inputs for architecture and civil engineering.

KEY WORDS: urban metabolism; industrial ecology; industrial metabolism; sustainable concrete alternatives.

Introducción

Desde sus más remotos orígenes las civilizaciones han dependido de los materiales para elaborar utensilios, herramientas y artefactos, tanto de uso cotidiano como industrial. Durante milenios, los avances técnicos y tecnológicos se lograron gracias a los materiales naturales, tanto geológicos como orgánicos. De origen mineral: metales, rocas, arcillas y arenas; vegetal: madera, guadua, bambú, aceites, resinas, cera,

fluidos de las plantas como el caucho y resinas fosilizadas; animal: hueso, marfil, cuero, lana, cuernos, conchas marinas, caparzones, corales, cera de abejas y seda (Pasman, 1956; DeMouthe, 2005). Cabe subrayar que civilizaciones ancestrales —como la maya en América, o la romana en el Viejo Mundo— procesaron materiales naturales hasta obtener otros, como el vidrio y la cerámica (Sánchez, 1984; Rivera, 1999; Cheetham y Clark, 2006). No obstante, el

a Fundación Universidad de América, Facultad de Arquitectura. Bogotá, Colombia. ORCID Molina-Prieto, L.F.: 0000-0002-3039-427X

b Fundación Universidad de América, Facultad de Ingeniería Química. Bogotá, Colombia; Universidad Centro Panamericano de Estudios Superiores; Doctorado en Sostenibilidad. Zitácuaro, México. ORCID Ortega-Ramírez, A.T.: 0000-0002-6364-8432

c Autor de correspondencia: angie.ortega@profesores.uamerica.edu.co

Recepción: 12 de agosto de 2020. Aceptación: 27 de julio de 2021



acceso a cualquiera de los materiales mencionados tenía una gran limitante: su abundancia o escases en la superficie terrestre. En consecuencia, la producción de bienes dependió, durante siglos, de la existencia de los insumos naturales necesarios para cada producto.

En 1863, un fabricante de bolas de billar retó el ingenio y la creatividad humanos al publicar un anuncio en un periódico neoyorquino: ofrecía diez mil dólares en oro a quien encontrara una alternativa adecuada para el marfil. John Wesley Hyatt — Químico e inventor estadounidense— participó en el concurso, y aunque no ganó el premio, sí logró, junto con su hermano Isaiás, obtener un nuevo material a base de nitrato de celulosa, alcanfor y alcohol, que patentó bajo el nombre de celuloide, es decir, el primer plástico de la historia. El celuloide transformó la cultura en muchos aspectos, y permitió los procesos de producción en serie, que inicialmente cobijaron objetos de uso masivo, como los peines, además de establecerse como el material que permitiría la creación del cine y su amplio legado cultural. Años después, en 1906, el químico estadounidense de origen belga, Leo Hendrik Baekeland, mientras intentaba reemplazar un material natural, creó y comercializó la baquelita, y con ello allanó el camino para la llamada 'era de los plásticos' (Freinkel, 2011). Desde entonces, el plástico se ha integrado de manera inseparable a la cultura moderna, y sus incontables desarrollos han hecho posible la producción industrial en serie y el consumo de masas.

Debido a que el plástico es económico, liviano, durable, resistente a la humedad y no se degrada con facilidad, en diversos sectores industriales ha reemplazado a un sinnúmero de materiales naturales. Pero esas ventajas, resultan inconvenientes cuando se trata de plásticos residuales o desechados, que cabe decir, se generan a gran escala en todo el mundo. De acuerdo con Hopewell et al. (2009), el 50% de los plásticos se utilizan para aplicaciones de un solo uso, lo que incluye bolsas, envases y artículos de consumo desechables; entre el 20 y el 25%, para infraestructuras con largo plazo de duración, como tuberías, recubrimientos de cables y materiales estructurales; y el resto, para aplicaciones de consumo con un tiempo de vida intermedia: productos electrónicos, muebles y autopartes. Barnes et al. (2009),

subrayan que los plásticos no son biodegradables, y, por lo tanto, se requieren cientos de miles de años para que se degraden. En cuanto a la cantidad de desechos plásticos producidos por año, Jambeck et al. (2015), indican que en 2010 los desechos plásticos mundiales alcanzaron un total de 275 millones de toneladas, de las cuales 8 millones fueron a parar a los océanos del planeta; el resto, a vertederos, rellenos sanitarios, cuerpos de agua y áreas costeras, o fueron incinerados, todo lo cual generó elevados impactos ambientales a diversas escalas.

En lo concerniente a la contaminación marina, *Greenpeace* reporta que los plásticos afectan el lecho marino, las aguas superficiales y las áreas costeras de todos los océanos del mundo, desde las regiones polares hasta el ecuador. Esta situación es perjudicial para más de 267 especies de fauna —entre aves marinas, tortugas, focas, leones marinos, ballenas y peces—, puesto que muchas de ellas sufren enredos o ingestión de desechos plásticos, muchas veces fatales, porque, en el primer caso, les generan asfixia; y en el segundo, las condenan a la inanición (Allsopp et al., 2006). En lo concerniente al lecho marino Galgani et al. (2000), valoraron los desechos plásticos decantados en las costas europeas, y encontraron que las cantidades varían entre 0 y 101.000 unidades/km².

En el caso de los residuos plásticos automotrices, que constituyen el interés principal de este escrito, Sakai et al. (2014), estiman que cada año más de 40 millones de vehículos llegan al final de su vida útil, y con base en estudios regionales disgregan esa cantidad así: Australia 500.000; Brasil 1.000.000; Canadá 1.200.000; China 3.506.000; Corea 648.000; Estados Unidos 12.000.000; Japón 2.960.000; Unión Europea 7.800.211; resto del mundo cerca de 11.000.000. Por su parte, Rossetti et al. (2011), calculan que tan solo en la Unión Europea se generan más 2.5 millones de toneladas de desechos plásticos automotrices por año, los cuales, por lo general, se depositan en rellenos sanitarios, una práctica que: i) no es amigable con el ambiente; ii) desecha recursos valiosos; y iii) sin ninguna duda es antieconómica. Según los datos de Sakai et al. (2014), se depositan algo más de diez millones de toneladas de residuos plásticos automotrices por año en los rellenos sanitarios de todo el planeta.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el artículo busca valorar el uso de los residuos plásticos automotrices como agregados para concretos y morteros, puesto que con esta re-utilización se logran dos objetivos de alto valor ambiental y económico: por un lado, crear un destino final para los residuos plásticos automotrices, y, por ende, dejar de considerarlos material desechable; y por el otro, minimizar la extracción de agregados áridos con destino a la industria de la construcción. Cabe subrayar que para la investigación se tuvo en cuenta los desechos no metálicos de los automóviles siniestrados en Colombia, cuando las aseguradoras los consideran ‘pérdida total’, y los envían a CESVI COLOMBIA S. A. para su despiece y reutilización, cuya disposición final se realiza en rellenos sanitarios (Figuras 1 y 2).

El enorme volumen de residuos plásticos que se produce a nivel mundial es uno de los problemas ambientales más relevantes de nuestro tiempo, y es la primera de las dos problemáticas a las que el presente artículo busca dar respuesta. La segunda, es el impacto causado por la minería de agregados para la producción de concretos y morteros (arenas y gravas).

Cada vez toma más fuerza la implementación de la economía circular en el manejo de residuos sólidos, para cambiar el modelo de economía lineal tradicional. El modelo lineal consiste en fabricar, usar y desechar. Por otro lado, en la economía circular se utilizan lo máximo posible, y después se recuperan sus materiales reciclables para generar

otros productos al final de su vida útil (Plastics Europe, s.f.). En el caso de la industria automotriz, la economía circular se refleja en la remanufactura de residuos plásticos para convertirlos en agregados para concretos y morteros con la característica de ser ambientalmente sostenibles.

Marco teórico

El artículo se apoya en dos conceptos contemporáneos que fortalecen la sostenibilidad urbana. El primero, enfocado en las dinámicas propias de las ciudades: el metabolismo urbano (Wolman, 1965; Kennedy et al., 2008, 2011), puesto que permite evidenciar la manera en que un material que hace parte de los artefactos móviles de las ciudades, el plástico, pasa a inmovilizarse al ser reutilizado como agregado para concretos y morteros destinados a obras arquitectónicas y civiles. El segundo, centrado en el aprovechamiento de los residuos generados por las industrias: la ecología industrial (Allenby, 1992; Frosch, 1992; Lowe, 1993; Ehrenfeld, 1994; Socolow et al., 1994; Watanabe, 1994 Allenby y Graedel, 1995; O’Rourke et al., 1996), que establece encadenamientos entre las industrias, para ‘cerrar el bucle’, de modo que los desechos plásticos que resultan de la industria automotriz cuando los artefactos móviles entran en desuso, se transforman en insumos para otra industria: la de la construcción. De esta manera, se logra cerrar el ciclo de producción y consumo para fortalecer su sostenibilidad (Molina-Prieto et al., 2019).



Figura 1. Residuos plásticos automotrices acumulados en CESVI S. A. Fuente: L.F. Molina- Prieto (2016)

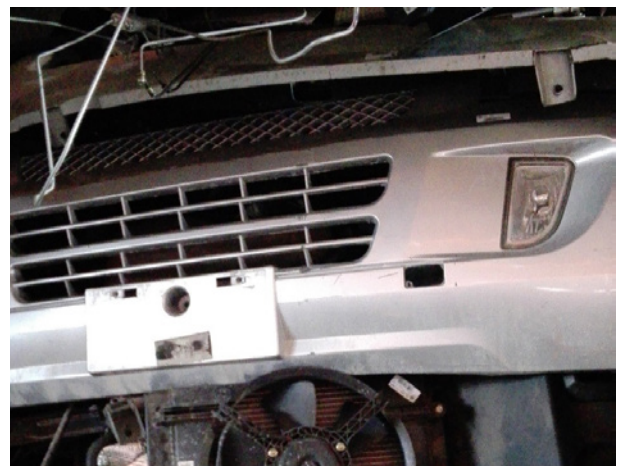


Figura 2. Residuos plásticos automotrices acumulados en CESVI S. A. Fuente: L.F. Molina-Prieto (2016)

Metodología

A partir de los dos conceptos que fundamentan el marco teórico del artículo, es decir, el metabolismo urbano y la ecología industrial, se realizó una búsqueda sistemática de investigaciones enfocadas en la re-utilización de residuos plásticos como agregados de concretos y morteros. Se seleccionaron cinco tipos de plásticos para la producción del artículo, porque son los más utilizados en la industria automotriz: polietileno (PE), poliamidas (PA), poliuretano (PUR), polietileno tereftalato PET y polipropileno (PP). Sin embargo, cabe aclarar que los tipos de polímeros o plásticos presentes en la industria del automóvil son diversos. Algunos ejemplos adicionales a los nombrados pueden ser: acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policloruro de vinilo (PVC), fibra de vidrio, polipropileno expandido (PPE), poliuretano termoplástico (TPU), poliéster, entre otros (Goldschmidt, 2015). Estos últimos, no serán objeto de estudio del artículo porque representan un porcentaje bajo del total los de residuos plásticos automotrices que se producen en la actualidad. En la sección de resultados se presentan los cinco polímeros seleccionados —en orden cronológico en relación a su descubrimiento—, haciendo énfasis en: i) una descripción general que incluye datos de su origen, su composición básica, sus principales características físico químicas, sus usos en la industria en general, y su aplicación a la industria del automóvil; y ii) los resultados que algunos investigadores han encontrado al aplicarlos como agregados de morteros y concretos.

Resultados

En la última década la gestión de residuos plásticos ha cobrado gran importancia en todo el mundo, en consecuencia, numerosos investigadores están trabajando en ese campo, y una de las líneas de trabajo más interesantes es su aprovechamiento como agregados para materiales altamente utilizados en la industria de la construcción, como el concreto y el mortero, o en obras de infraestructura, como los asfaltos. Al re-utilizar los residuos plásticos como agregados para la producción de materiales de construcción, no se aplaza su efecto nocivo, sino que son

embebidos en materiales que, cumplido su ciclo de vida, pueden ser re-utilizados nuevamente. En consecuencia, los residuos plásticos así tratados dejan de ser, definitivamente, materiales contaminantes, tema de gran interés a nivel global (Molina-Prieto y Garzón, 2017). En la industria de la construcción, al procedimiento de re-utilizar concretos procedentes de demolición con el objetivo de producir concretos frescos, se le conoce con el nombre de *Green Concrete* (Garg y Jain, 2014).

Polietileno PE

El polietileno es un polímero sintético termoplástico que se produce a partir del etano, un componente del gas natural. Fue descubierto en 1933 por dos investigadores de la Imperial Chemical Industries-ICI, los químicos ingleses Reginald Gibson y Eric Fawcett; pero fue otro miembro del ICI, Michael Perrin, quien en 1935 perfeccionó dicho descubrimiento. En 1936 el polietileno fue patentado por la ICI (Plastics Historical Society, 2015). Dos clases de polietileno se utilizan en la industria automotriz, el polietileno de alta densidad-PEAD y el polietileno de baja densidad-PEBD. El polietileno de alta densidad-PEAD es semicristalino, incoloro, inodoro, no tóxico y se puede producir con diversos niveles de opacidad. Debido a su fácil procesamiento y bajo costo, y por ser aislante y no tóxico, es el plástico más utilizado actualmente en el mundo. Por su resistencia se usa de manera extensiva en la fabricación de envases de alimentos, empaques y bolsas para supermercados; en la industria de la construcción se emplea en la fabricación de tuberías; en la industria eléctrica se desempeña como material aislante, y en la industria automotriz se utiliza para contenedores de aceite y gasolina, tanques de agua, tubos y mangueras, entre otras aplicaciones (Roca, 2005; Pastor Castillo et al., 2015). Por su parte, el polietileno de baja densidad-PEBD es blando y elástico y puede ser totalmente transparente, de acuerdo a su grosor. Además, es flexible, liviano, impermeable, económico y no tóxico. En el sector automotriz una de sus principales aplicaciones es en los depósitos de combustibles en donde el material logra ser moldeado por el proceso de soplado (Goldschmidt, 2015), permitiendo la producción de depósitos que requieren formas y moldes sofisticados.

§ *Concreto modificado con PEAD.* En la India, Bha-
vi et al. (2012), realizaron experimentos con fi-
bra de PEAD como aditivo para el hormigón,
en proporciones de 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y 1 %. Sus
resultados muestran que la resistencia a la com-
presión aumenta hasta cierto porcentaje, y luego,
disminuye a medida que se incrementa la fracción
de volumen de fibra. En Brasil, Marques Pare-
ja et al. (2009), experimentaron reemplazando el
agregado fino para el concreto, es decir, la arena,
en diversas proporciones, y generaron cilindros
de prueba de acuerdo a la norma de construcción
brasileña NBR 5739/90, y les permitieron un
proceso de curado de 14 días. Para la investiga-
ción, adquirieron plástico PEAD en una empresa
del municipio de Campo de Mourão, en forma
de gránulos de tamaño aproximado de 5 mm,
limpios y exentos de contaminantes, y los mez-
claron de acuerdo a las siguientes cantidades: i)
cemento: 7 kg; arena: 10 kg; grava: 22 kg, agua:
3,5 L y PEAD: 3,0 kg; ii) cemento: 7 kg; arena:
9 kg; grava: 22 kg, agua: 3,5 L y PEAD: 4,0 kg;
y iii) cemento: 7,0 kg; arena: 8 kg; grava: 22 kg,
agua: 3,5 L y PEAD: 5,0 kg. Los cilindros fueron
sometidos a pruebas de resistencia a la compresión,
y sus resultados evidencian que, la adición
de PEAD al concreto, en reemplazo de la arena,
en las proporciones arriba mencionadas, es viable,
puesto que la resistencia a la compresión no dis-
minuye, y en algunos casos, hasta se incrementa.

§ *Mortero modificado con PEAD.* En Chile, Gómez
et al. (2011), agregaron PEAD a morteros de ce-
mento. El material plástico provenía de bolsas
picadas, y lo adicionaron en proporciones de 0,2;
0,5 y 0,8 % del peso del cemento. Confecciona-
ron probetas estándar según la norma chilena
NCh158.Of67, y los sometieron, luego de 28 días
de curado por inmersión completa, a pruebas de
resistencia a la flexión y la compresión, y, además,
a valoraciones de permeabilidad y absorción ca-
pilar. Sus resultados evidencian que se logra una
disminución significativa de la permeabilidad y
de la absorción capilar, lo que puede ser una ven-
taja para concretos expuestos a agentes químicos
que puedan degradarlos, e incluso al agua. Destacan,
además, que son interesantes los resultados
obtenidos al agregar el PEAD en proporciones de

0,2 y 0,5 %, pero descartan totalmente la adición
del 0,8 %, puesto que no genera ningún tipo de
beneficio.

Poliamidas-PA Nylon

En 1935 el químico norteamericano Wallace Ca-
rothers, quien lideraba un equipo de investigación en
nuevos materiales de la industria química DuPont
Corporation, obtuvo la primera poliamida median-
te la reacción de condensación entre el compuesto
1,6 hexanodiamina y el ácido hexanodioico. Este
producto, prontamente fue empleado como materia
prima para la fabricación de fibras textiles, y años
más tarde, se conocería popularmente como nylon
(Kohan, 1995). Por su fuerte atracción molecular
las poliamidas —nylon 6,6— poseen características
particulares: alta dureza, resistencia al impacto, fle-
xibilidad, propiedades mecánicas excelentes, capaci-
dad de amortiguación y durabilidad, entre muchas
otras (Zúñiga, 2002). Son atractivas para la industria
porque en su gran mayoría cuentan con alta resisten-
cia a productos químicos como lubricantes, combus-
tibles, refrigerantes, limpiadores, fluidos hidráulicos,
anticongelantes, disolventes e incluso hidrocarburos
(Hwang y Ediger, 1996). No obstante, presentan
debilidad en presencia de soluciones salinas, metales
pesados, ácidos fuertes y agentes oxidantes (Laredo
y Hernandez, 1998). Las poliamidas en la industria
automotriz se usan en accesorios como manillas y
elevelunas (ventanas), airbags, parachoques, refor-
zamiento en las aletas, entre otros (Goldschmidt,
2015). Este tipo de aplicaciones pueden ser directo
sobre una de las autopartes o como refuerzo para
otro tipo de polímeros dominantes en la estructura
del vehículo.

§ *Concreto modificado con fibras de Nylon.* En Gua-
temala, López (2014), preparó concreto modifi-
cado con fibras de nylon siguiendo rigurosamente
las normas técnicas para la construcción NTG-
41007, NTG-41052 y NTG-41053 de su país.
Obtuvo las fibras de residuos de lazos de diferen-
tes tamaños, que se cortaron a un tamaño prome-
dio de 1 cm. El autor tuvo en cuenta antecedentes
de reforzamiento de concreto con fibras de nylon,
realizados por el ejército de los Estados Unidos,
que aumentaron la resistencia del concreto frente
a las ondas explosivas. Se adicionaron las fibras

de nylon a una mezcla de concreto convencional, en dos proporciones: i) 600 g y; ii) 360 g por cada metro cúbico de concreto. Sus resultados muestran que el concreto modificado con fibras de nylon incrementa su resistencia estructural significativamente frente a esfuerzos de compresión, tensión directa y flexión. En el Perú, Capitán y Saavedra (2019), experimentaron adicionando fibra de nylon reciclado a concretos convencionales, siguiendo las normas técnicas ASTM C 192 / C 192M y NPT 339.183 de su país. Sus resultados evidencian que la fibra de nylon reduce hasta en un 15 % el agrietamiento en concretos rígidos, al tiempo que mejora su rendimiento en lo concerniente a la resistencia al cizallamiento.

Poliuretano-PUR

Fue descubierto por el químico alemán Otto Bayer en 1937. Inicialmente se aprovechó para reemplazar el metal de los cartuchos en la Segunda Guerra Mundial, pero poco a poco fue permeando la industria militar y se aplicó a otros artefactos involucrados en las batallas, como los aviones o los uniformes de combate de alta resistencia (Polyurethanes, 2008). Se caracteriza por poseer alta resistencia, rigidez y dureza debido a los enlaces de tipo orgánico cruzados que lo constituyen. El poliuretano es versátil debido a que puede sintetizarse mediante diversas estructuras químicas, alcanzando propiedades amplias como material flexible con rigidez baja, o alcanzando una rigidez alta. En consecuencia, se aplica en sectores como la construcción, los textiles, los deportes, la biomedicina y la industria automotriz (Echeverría et al., 2020). El poliuretano es utilizado actualmente en un porcentaje del 17 % de las partes de un automóvil de tamaño medio. Se emplea especialmente en la fabricación de paneles de puertas, tableros de instrumentos, volantes, asientos, reposacabezas, alfombrillas, entre otros (Goldschmidt, 2015).

§ *Concretos modificados con poliuretano.* En Brasil, Modro et al. (2009), utilizaron residuos de espuma de poliuretano proveniente de la industria de la refrigeración para confeccionar encofrados para entresijos de concreto. Se elaboraron 60.000 placas de poliuretano con dimensiones de 30 x 30 x 10 cm, y se instalaron como encofrados en

tres edificios de 12 pisos cada uno, para un área total de 25.000 metros cuadrados construidos. El uso de los residuos de poliuretano disminuyó la presión sobre los vertederos, puesto que a ese material se le dio una disposición final: quedó integrado a los entresijos de concreto. Gracias al aprovechamiento de los residuos de poliuretano, se evitó la compra del mismo volumen de alguno de los materiales que se utilizan tradicionalmente con este propósito, como el poliestireno expandido, de manera que se redujeron significativamente los costos de la obra. En Santa Catarina, Brasil, Maia et al. (2004), realizaron experimentos con residuos de poliuretano provenientes de refrigeradores descartados durante el proceso de producción industrial y del desmantelamiento de refrigeradores obsoletos. Las láminas de poliuretano obtenidas se molieron en un molino construido con ese propósito, y posteriormente, se clasificaron de acuerdo a su tamaño. Adicionaron el poliuretano molido en proporciones del 5 y 10 %, a mezclas de concreto convencional preparado siguiendo la norma brasileña NBR 12821. Concluyen que es viable la adición de poliuretano en proporciones del 5 % como agregado para la producción de concretos leves, y, de acuerdo a su tamaño granulométrico, se puede producir concreto estructural (con grano fino) y concreto no estructural, con grano grueso. En Perú, Egaovil (2018), realizó experimentos adicionando residuos de poliuretano a concretos convencionales con el objetivo de reducir su conductividad térmica. El poliuretano se obtuvo de la recuperación, por logística inversa, de cajas de poliuretano utilizadas en la industria farmacéutica. Sus resultados evidencian que el concreto modificado con poliuretano, incrementa su resistencia térmica hasta en un 79%, en relación al concreto convencional.

§ *Morteros modificados con poliuretano.* En España, Junco (2012), realizó experimentos reemplazando la arena de los morteros para construcción por poliuretano, en proporciones del 25; 50, 75 y 100 %. Para la preparación de los morteros se siguieron las normas españolas UNE-EN. Inicialmente se molió la espuma de poliuretano en una trituradora industrial y se sometió a tamizado de 4 mm de abertura. En algunas probetas se obtuvo

resistencia a la compresión igual para morteros de referencia y mezclas con 25 % de poliuretano, y levemente inferior para morteros con 50 % de poliuretano. Se realizaron experimentos con aditivos dosificados en proporción del 2,0 % en la masa de cemento, lo que mejoró su resistencia mecánica. Se obtuvieron morteros con buena cohesión entre los componentes, con comportamiento mecánico inferior a los morteros de referencia, pero suficiente para cumplir con las normas españolas de construcción EN.

Polietileno tereftalato-PET

El PET fue patentado en 1941 por los químicos ingleses John Rex Whilfield y James Tennant Dickson (Ferreira Lima, 2001). Actualmente, uno de los residuos plásticos más frecuente en las ciudades —por efecto del consumo masivo que caracteriza a la sociedad globalizada— son las botellas desechables, fabricadas con material plástico transparente, duro, impermeable y liviano. Se producen con polietileno tereftalato PET, que es un polímero termoplástico obtenido a partir de glicol etilénico y ácido tereftálico. El PET es un material 100 % reciclable, no se descompone ni contiene componentes nocivos que puedan lixiviar las aguas subterráneas, pero, cuando no se recicla, genera desechos plásticos que van a parar a los rellenos sanitarios, a los ríos y a los océanos, y como es un plástico muy utilizado por la industria contemporánea, su no-re-utilización incrementa la problemática de residuos sólidos urbanos (Hachi y Rodríguez, 2010; Ferreira Lima, 2001). Se estima que el PET representa el 5 % de los materiales plásticos que hacen parte de un automóvil contemporáneo (Rau y Nentwig, 2012). Algunas de las aplicaciones particulares del PET dentro de los automóviles comprenden los recubrimientos del cableado eléctrico y los depósitos para el líquido de frenos (Goldschmidt, 2015).

§ *Concreto modificado con PET.* En Irak, Al-Hadithi (2015), utilizó fibras de botellas plásticas de PET desechadas para modificar las propiedades de concretos expuestos al contacto constante con aguas residuales y de drenaje, e incluso, para valorar la calidad de los concretos curados con este tipo de aguas. Lo anterior, porque el agua en Irak es un recurso escaso y muy costoso. Inicialmente

se sometieron las botellas plásticas a una trituradora eléctrica, y las fibras obtenidas, fueron agregadas a la mezcla de concreto, arena y grava, en proporciones de 0,5; 1,0 y 1,5 %. Se realizaron pruebas de densidad, resistencia a la compresión y resistencia a la tracción, cuando el concreto tenía 28, 56 y 90 días de vida, obteniendo los siguientes resultados. La adición de las fibras de botellas PET: i) incrementa la densidad de los concretos curados con aguas residuales; ii) incrementa la resistencia a la compresión cuando las fibras se adicionan en proporción del 0,5 %; iii) incrementa la resistencia a la tracción en todas las edades del concreto y para todos los porcentajes de fibra experimentados; y iv) se evidencia una significativa disminución del agrietamiento externo e interno del concreto gracias a las fibras PET. De igual manera son positivos los resultados de Marzouk et al. (2007), quienes, en Francia, reemplazaron los agregados finos del concreto (arena), con partículas de PET inferiores en tamaño a 5 mm, y en proporciones que variaron de 2 al 100 %. Concluyeron que al sustituir la arena en una cantidad inferior al 50 %, no se afecta la resistencia a la compresión ni a la flexión del concreto; y encuentran que el PET ofrece una buena alternativa como agregado para el concreto, que, además de ser económico, reduce consumos de energía y minimiza la extracción de arenas, además de ser una solución óptima para la re-utilización de las botellas PET desechadas. Así mismo, Frigione (2010), en Italia, reemplazó la arena natural por partículas de PET (a partir de botellas desechadas sin lavar), en proporción del 5 % y con una granulometría similar a la de la arena, encontró que los concretos así modificados y con edades de 28 y 365 días, presentaban características de resistencia a la compresión y la rotura, similares a las muestras de control. Otros investigadores que obtuvieron mejorías en la resistencia mecánica de los concretos al incluirles PET, fueron: Fraternali et al. (2011), en Italia; y Kim et al. (2010), cuando la fibra PET se limita al 1 %; y Ochi et al. (2007), en Japón, cuando la fibra no supera el 3 %.

Muy diferentes fueron los resultados de Albano et al. (2009), en Venezuela, quienes experimentaron

adicionando partículas de botellas PET en proporción del 10 y el 20 % del volumen, a concretos tradicionales; y concluyeron que, el PET en esas proporciones reduce la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad y la resistencia a la rotura del concreto. De igual forma, Sadrmomtazi et al. (2016), reemplazaron los agregados finos del concreto con partículas PET en proporciones del 5,0; 10 y 15 %, y concluyen que los concretos así modificados se les reducen las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y la flexión), y el módulo de elasticidad; sin embargo, destacan algunas ventajas del PET: se protegen los recursos naturales y se disminuye la carga muerta de las construcciones. No obstante, en estos casos el PET puede utilizarse como agregado de concretos no estructurales.

§ *Hormigón armado con PET.* Otra línea de investigación, es la que utiliza botellas desechadas de PET, no como agregado, sino como armadura para los concretos. En este sentido Foti y Papparella (2014), al igual que Foti (2013), en Italia, realizaron experimentos utilizando botellas PET, cortadas simplemente en tiras, como refuerzos para el hormigón, en sustitución a las barras de acero. Sus resultados, revelan que el hormigón armado con tiras elaboradas a partir de botellas PET desechadas, soportó efectivamente pruebas de impacto, y la adherencia entre el concreto y el PET fue elevada. En consecuencia, se sugiere su posible uso en la producción de concretos expuestos a fuerzas de impacto, tales como pavimentos para carreteras, aeropuertos y muelles, entre otros, pues cuenta con las siguientes ventajas: i) las estructuras PET no se corroen; ii) son económicas; iii) colaboran con el medio ambiente al re-utilizar desechos plásticos abundantes; y iv) reducen el impacto ambiental generado por la producción del acero para estas estructuras.

Polipropileno-PP

El polipropileno se empezó a producir a mediados de la década de 1950, gracias al catalizador desarrollado por dos químicos europeos que trabajaron de manera independiente: el alemán Karl Ziegler del Instituto Max Planc y el italiano Giulio Natta del Instituto Politécnico de Milán. Actualmente se le conoce como catalizador Ziegler-Natta (Muñoz,

2004). Este plástico se produce a partir del petróleo y el gas natural a costos relativamente bajos, es de fácil procesamiento y 100 % reciclable. Es el polímero comercial de más baja densidad (entre 0,90 y 0,93 g cm³) y es muy usado por las industrias debido a sus características físico químicas: permite ser moldeado, presenta una alta dureza y estabilidad dimensional, es ligero, impermeable, aislante térmico y eléctrico, posee alta resistencia al calor, puede presentar excelente rigidez como también flexibilidad, posee alta resistencia tanto a los impactos como a soluciones ácidas y los agentes químicos, es dúctil y cuenta con una alta capacidad de recuperación elástica (Wasiak et al., 1999; Schwarz, 2002; Harutun, 2003; Papageorgiou et al., 2012; Benavente y Pérez, 2016). Se utiliza ampliamente en artículos de uso diario como sillas, canastas para el transporte de botellas, empaques para elementos de aseo (champú, rinse, crema), contenedores domésticos para alimentos, canecas para pintura, jeringas, y por supuesto, autopartes. En la industria automotriz se emplea en la producción de partes internas y externas, como: paneles de puertas, palanca de cambios, reposacabezas, parasoles, parachoques, aletas y elementos de iluminación (Goldschmidt, 2015). En muchos casos, para la producción de estos elementos se combina el polipropileno con otros polímeros que cumplan con las funciones particulares que requiere cada autoparte.

§ *Concreto modificado con fibras de polipropileno.* En México, Mendoza et al. (2011), realizaron experimentos añadiendo fibras de polipropileno, de 38 mm de largo, a concretos convencionales, en proporciones de hasta cinco kilos por metro cúbico de concreto. Sus resultados muestran que algunas de las propiedades mecánicas del concreto así modificado se incrementan: la resistencia a la flexión y a la tracción, pero especialmente la resistencia al impacto, que alcanza a duplicarse cuando se adiciona la fibra en proporción de 5 kg m⁻³ de concreto. En Perú, Perca (2017), realizó experimentos añadiendo fibras de polipropileno a concretos convencionales en proporción hasta de 2,4 kg m⁻³ de concreto. Sus resultados evidencian que el concreto así modificado incrementa su resistencia a la flexión hasta en un 16 %. En Malasia, Kakooei et al. (2012), adicionaron fibras

de polipropileno a concretos convencionales en proporción hasta de 3 kg m^{-3} de concreto. Concluyeron que la adición de fibras de polipropileno aumenta significativamente la resistencia a la compresión, reduce la permeabilidad por lo que retrasa la degradación del material e incrementa su vida útil, y, además, se incrementa la resistencia eléctrica, lo que reduce la corrosión de la estructura metálica de refuerzo. En una investigación internacional, Mazaheripour et al. (2011), adicionaron fibras de polipropileno a concretos convencionales en proporciones del 0,3 %. Concluyen que la adición de fibras no influye en la resistencia a la compresión ni en el módulo de elasticidad, pero incrementa la resistencia a la tracción hasta en un 14,4 % y la resistencia a la flexión hasta en un 10,7 %.

Uso de residuos plásticos automotrices como agregados para concretos sostenibles

Aunque los trabajos relacionados con el aprovechamiento de residuos plásticos urbanos como agregados de concretos y morteros sostenibles, son bastante cuantiosos en la literatura, no acontece lo mismo en lo tocante al aprovechamiento de los residuos plásticos automotrices. Conviene señalar que, por el contrario, son pocos los investigadores que han abordado ese tema. A continuación, se presentan los más relevantes.

Las primeras tentativas relacionadas con el aprovechamiento de residuos plásticos automotrices, por parte de la industria de la construcción, se remontan a las postrimerías del siglo XX. En Canadá, Xu et al. (1995), realizaron experimentos con residuos no metálicos automotrices, mediante dos procesos: primero la pirolisis de autopartes plásticas, y luego, la adición de residuos plásticos triturados junto con cenizas volantes, a mezclas de concreto experimentales. Una década después, Rossetti et al. (2006), en Italia, teniendo en cuenta la dificultad de la industria de la construcción para encontrar agregados naturales para el concreto (arena y piedra), sometieron a procesos de granulación residuos no metálicos provenientes de las trituradoras de automóviles, y los adicionaron a concretos experimentales, que

alcanzaron resistencia a la compresión hasta de 30 MPa, es decir, entre 1100 y 1400 kg m^{-3} .

De manera más reciente, Snudden et al. (2014), en el Reino Unido, exploraron la posibilidad de utilizar los residuos de producción de la industria automotriz. Encontraron que la molienda mecánica de los residuos no metálicos, puede permitir su reutilización, pero genera un grupo de gránulos de fibras y resinas poliméricas de uso reducido. Concluyen que dichos gránulos son principalmente utilizables en la industria de la construcción, como agregados de concretos modificados. Por su parte, Colangelo et al. (2017), en Italia, intentando contribuir al logro de la directiva de la Comunidad Europea sobre el fin de la vida útil de los vehículos (2000/53/CE), diseñaron y caracterizaron mezclas de concreto a las cuales les agregaron residuos automotrices no metálicos triturados y granulados, y les adicionaron, además, cenizas volantes de carbón, otro subproducto industrial. Este trabajo, que se alinea con los fundamentos de la ecología industrial, mostró buenas propiedades mecánicas del concreto así obtenido. Finalmente, en Malasia, Wong et al. (2018), considerando que la gestión de vehículos al final de su vida útil —junto con los impactos ambientales que genera—, son temas de preocupación mundial, proponen articular las industrias automotriz y de la construcción, de manera que se genere una nueva tendencia que fortalezca la economía circular, puesto que mejora el porcentaje de reutilización de los residuos automotrices, al tiempo que minimiza la dependencia de materias primas por parte de ese país.

Consideraciones finales

Las ciudades del siglo XXI concentran la mayor parte de la población mundial, y el número de habitantes urbanos va en continuo aumento. Las ciudades contemporáneas dependen en gran medida de la movilidad vehicular, de manera que la producción de automóviles presenta una curva en continuo ascenso, mientras que la chatarrización es cada día más común en las grandes ciudades. Esto genera enormes volúmenes de residuos plásticos que van a parar a los rellenos sanitarios, lo que evidencia la necesidad de evaluar estrategias que impulsen el re-uso

de los materiales poliméricos, y desarrollen una secuencia sostenible entre la generación de residuos automotrices y su aprovechamiento. De otro lado, la industria de la construcción, que brinda el hábitat para la creciente población urbana, no cesa en su expansión, y, por ende, requiere de manera continua recursos naturales como la arena y la piedra para la producción del concreto, material esencial para dicha industria. El aprovechamiento —siguiendo las directrices del metabolismo urbano y la economía circular— de los residuos plásticos automotrices, para adicionarlos como agregados a concretos y morteros sostenibles, es una opción que transforma dichos residuos en valiosos insumos para la arquitectura y la ingeniería civil. Una alternativa que apenas está surgiendo en el mundo, y que puede contribuir a la reducción del impacto ambiental que generan estas dos industrias, al encadenarlas de acuerdo a los principios de la ecología industrial.

Referencias

- Al-Hadithi, A., 2015. The effects of adding waste plastic fibers on some mechanical properties of gap-graded concrete curing by drainage water and sewage water. En: Proc. The 10th Asia Pacific Conference on Sustainable Energy y Environmental Technologies. Vol. 10. University of Seoul, Korea.
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., Gutiérrez, A., 2009. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Manage.* 29(10), 2707-2716. Doi: 10.1016/j.wasman.2009.05.007
- Allenby, B., 1992. Industrial ecology: The materials scientist in an environmentally constrained world. *MRS Bull.* 17(03), 46-51. Doi: 10.1557/S0883769400040859
- Allenby, B., Graedel, T., 1995. *Industrial ecology*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Allsopp, M., Walters, A., Santillo, D., Johnston, P., 2006. Plastic debris in the world's oceans. Greenpeace International, Amsterdam.
- Barnes, D., Galgani, F., Thompson, R., Barlaz, M., 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364(1526), 1985-1998. Doi: 10.1098/rstb.2008.0205
- Benavente, R., Pérez, E. (Coord.), 2016. *Desarrollo sostenible de la industria del polipropileno: propiedades controladas a medida y optimización del consumo energético y de la degradación*. CYTED, Madrid.
- Bhavi, B., Reddy, V., Ullagaddi, P., 2012. Effect of different percentages of waste High Density Polyethylene (HDPE) fibres on the properties of fibre reinforced concrete. *Nat. Environ. Pollut. Technol.* 11(3), 461-468.
- Capitán, J., Saavedra, O., 2019. *Influencia de la macro fibra de nylon reciclado en el agrietamiento del concreto fabricado con cemento PORTLAND tipo I en un pavimento rígido*. Tesis de grado. Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú.
- Cheetham, D., Clark, J., 2006. Investigaciones recientes en Cantón Corralito: Un posible enclave Olmeca en la Costa del Pacífico de Chiapas, México. En: Laporte, J., Arroyo, B., Mejía, H. (Eds.), *Memorias XIX Simposio de Investigaciones Arqueológicas en Guatemala*. Museo Nacional de Arqueología y Etnología, Ciudad de Guatemala. pp.1-9.
- Colangelo, F., Messina, F., Di Palma, L., Cioffi, R., 2017. Recycling of non-metallic automotive shredder residues and coal fly-ash in cold-bonded aggregates for sustainable concrete. *Compos. B. Eng.* 116, 46-52. Doi: 10.1016/j.compositesb.2017.02.004
- DeMouthe, J., 2005. *Natural materials*. Routledge, Londres. DOI: 10.4324/9780080457048
- Echeverria, O., Ollo, O., Harismendy, I., Eceiza, A., 2020. Desarrollo de nuevas formulaciones de resinas PUR de altas prestaciones para procesos de alta cadencia de producción de componentes estructurales. *Rev. Mater. Compuestos* 4(1), 114-119.
- Egaovil, A., 2018. *Determinación del coeficiente de conductividad térmica del concreto con aditivo de poliuretano residual*. Tesis de grado. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Ehrenfeld, J., 1994. *Industrial ecology: A strategic framework for product policy and other sustainable practices*. En: Proc. Second International Conference and Workshop on Product Oriented Policy, Stockholm.
- Ferreira Lima, A., 2001. *Estudo da cadeia produtiva do Polietileno Tereftalato (PET) na Região Metropolitana de Salvador como subsídio para análise do ciclo de vida*. Monografía. Universidade Federal da Bahia-UFBA, Salvador, Brasil.
- Foti, D., 2013. Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Compos. Struct.* 96, 396-404. Doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.019
- Foti, D., Paparella, F., 2014. Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids. *Mech. Res. Commun.* 57, 57-66. Doi: 10.1016/j.mechrescom.2014.02.007
- Fraternali, F., Ciancia, V., Chechile, R., Rizzano, G., Feo, L., Incarnato, L., 2011. Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete. *Compos. Struct.* 93(9), 2368-2374. Doi: 10.1016/j.compstruct.2011.03.025

- Freinkel, S., 2011. *Plastic: A toxic love story*. Houghton Mifflin Harcourt, Boston/New York.
- Frigione, M., 2010. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Manage.* 30(6), 1101-1106. Doi: 10.1016/j.wasman.2010.01.030
- Frosch, R., 1992. Industrial ecology: A philosophical introduction. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89(3), 800-803. Doi: 10.1073/pnas.89.3.800
- Galgani, F., Leaute, J., Moguedet, P., Souplet, A., Verin, Y., Carpentier, A., Goraguer, H., Latrouite, D., Andral, B., Cadiou, Y., Mahe J., Poulard J., Nerisson, P., 2000. Litter on the sea floor along European coasts. *Mar. Pollut. Bull.* 40(6), 516-527. Doi: 10.1016/S0025-326X(99)00234-9
- Garg, C., Jain, A., 2014. Green concrete: Efficient y eco-friendly construction materials. *Int. J. Res. Eng. Technol.* 2(2), 259-264. Doi: 10.9790/1684-1403023335
- Goldschmidt, L., 2015. *Reciclado de los plásticos en la industria de la automoción*. Tesis de maestría. Universidad de Valladolid, Valladolid, España.
- Gómez, M., Carvajal, A., Santelices, V., 2011. Influencia del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento. *Rev. Constr.* 10(3), 110-121. Doi: 10.4067/S0718-915X2011000300011
- Hachi Quintana, J., Rodríguez Mejía, J., 2010. *Estudio de factibilidad para reciclar envases plásticos de polietileno tereftalato (PET), en la ciudad de Guayaquil*. Tesis de grado. Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil.
- Harutun, K., 2003. *Handbook of polypropylene and polypropylene composites*. 2a ed. RheTech; CRC Press, Whitmore Lake, MI.
- Hopewell, J., Dvorak, R., Kosior, E., 2009. *Plastics recycling: challenges and opportunities*. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364(1526), 2115-2126. Doi: 10.1098/rstb.2008.0311
- Hwang, Y., Ediger, D., 1996. Enhanced translational diffusion of rubrene and tetracene in polysulfone. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* 34(17), 2853-2861. Doi: 10.1002/polb.1996.952
- Jambeck, J., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K., 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347(6223), 768-771. DOI: 10.1126/science.1260352
- Junco Petrement, C., 2012. *Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano*. Obtención, caracterización y puesta en obra. Tesis de doctorado. Universidad de Burgos, Burgos, España.
- Kakooei, S., Akil, H., Jamshidi, M., Rouhi, J., 2012. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Constr. Build. Mater.* 27(1), 73-77. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015
- Kennedy, C., Cuddihy, J., Engel-Yan, J., 2008. The changing metabolism of cities. *J. Ind. Ecol.* 11(2), 43-59. Doi: 10.1162/jie.2007.1107
- Kennedy, C., Pincetl, S., Bunje, P., 2011. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environ. Pollut.* 159(8-9), 1965-1973. Doi: 10.1016/j.envpol.2010.10.022
- Kim, S., Yi, N., Kim, H., Kim, H., Kim, J.H., Song, Y.-C., 2010. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cem. Concr. Compos.* 32(3), 232-240. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002
- Kohan, M., 1995. *Nylon plastics handbook*. Hanser Publishers, Munich; New York.
- Laredo, E., Hernandez, M., 1998. Moisture effect on the low- and high-temperature dielectric relaxations in nylon-6. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* 35(17), 2879-2888. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0488(199712)35:17<2879::AID-POLB11>3.0.CO;2-4
- López, J., 2014. *Propiedades mecánicas del concreto modificado a base de fibras de nylon y polipropileno para su uso en elementos estructurales*. Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Lowe, E., 1993. Industrial ecology—an organizing framework for environmental management. *Environ. Qual. Manag.* 3(1), 73-85. DOI: 10.1002/tqem.3310030108
- Maia Siqueira, L., Stramari, M., Folgueras, M., 2004. Adição de poliuretano expandido para a confecção de blocos de concreto leve. *Rev. Matéria* 9(4), 399-410.
- Marques Pareja, J., Bernardino de Araújo, J., de Melo Franco, J., Renan Bolzani, H., Moreira Gonçalves, D., Rodrigues de Souza, S., 2009. Utilização de polietileno de alta densidade (PEAD) como agregado em substituição a areia na produção de concreto. En: *Simpósio de pós-graduação em Engenharia Urbana*. Maringá, Brasil.
- Marzouk, O., Dheilly, R., Queneudec, M., 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Manage.* 27(2), 310-318. DOI: 10.1016/j.wasman.2006.03.012
- Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S., Hoseinpour, I., 2011. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 25(1), 351-358. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.018
- Mendoza, C., Aire, C., Dávila, P., 2011. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plásticos y endurecido. *Concr. Cem. Investig. Desarro.* 2(2), 35-47.
- Modro, N., Modro, N., Modro, N., Marchi, V., 2009. Utilização de residuos de espuma de poliuretano rígido proveniente de indústria de refrigeração como elemento de enchimento de lajes nervuradas de concreto moldadas "in loco". *Rev. Tecnol. Ed. Esp. ENTECA* 2009, 49-55.
- Molina-Prieto, L., Garzón Castellanos, M., 2017. *Propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales: estado del arte*. *Arquetipo* (14), 81-98. DOI: 10.31908/22159444.3522

- Molina-Prieto, L., Suárez-Serrano, M., Villa-Camacho, M., 2019. Bucle multidisciplinar para la sustentabilidad urbana. *Rev. Arquít.* 21(2), 76-88. Doi: 10.14718/RevArq.2019.21.2.2048
- Muñoz, F., 2004. Catalizadores Ziegler-Natta, propiedades y aplicaciones. En: *Memorias VI Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química*. Mérida, Venezuela.
- Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K., 2007. Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cem. Concr. Compos.* 29(6), 448-455. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002
- O'Rourke, D., Connelly, L., Koshland, C., 1996. Industrial ecology: a critical review. *Int. J. Environ. Pollut.* 6(2-3), 89-112.
- Papageorgiou, D., Bikiaris, N., Chrissafis, K., 2012. Effect of crystalline structure of polypropylene random copolymers on mechanical properties and thermal degradation kinetics. *Thermochim. Acta* 543, 288-294. Doi: 10.1016/j.tca.2012.06.007
- Pasman, M., 1956. *Materiales de construcción*. Construcciones Sudamericanas, Buenos Aires.
- Perca, G., 2017. Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto F'c 210 kg/cm². Tesis de grado. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Perdomo, G., 2002. Plásticos y medio ambiente. *Rev. Iberoam. Polím.* 3(2), 1-13.
- Plastics Europe, s.f. Contribución del plástico a la economía circular. Disponible en: <https://www.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy>; consultado: julio de 2021.
- Plastics Historical Society, 2015. Gibson and fawcet. Disponible en: http://plasticquarian.com/?page_id=14255; consultado: marzo de 2020.
- Polyurethanes, 2008. Polyurethanes. Disponible en: <http://www.polyurethanes.org/es/que-es/historia>; consultado: marzo de 2020.
- Rau, M., Nentwig, P., 2012. Plásticos en los coches: polimerización y reciclaje. *Sci. Sch. Eur. J. Sci. Teach.* 20, disponible en: <http://www.scienceinschool.org/es/2011/issue20/plastics>; consultado: julio de 2021.
- Rivera Dorado, M., 1999. Espejos mágicos en la cerámica maya. *Rev. Esp. Antrop. Am.* 29, 65-100.
- Roca, I., 2005. Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD). Tesis de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.
- Rossetti, A., Di Palma, L., Ferraro, A., 2011. Production and characterization of aggregate from nonmetallic automotive shredder residues. *J. Mater. Civ. Eng.* 23(6), 747-751. Doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000189
- Rossetti, A., Di Palma, L., Medici, F., 2006. Production of aggregate from non-metallic automotive shredder residues. *J. Hazard. Mater.* 137(2), 1089-1095. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.03.048
- Sadrmmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., Sadeghi-Nik, A., 2016. The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *J. Clean. Prod.* 112, 2363-2373. Doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.107
- Sakai, S., Yoshida, H., Hiratsuka, J., Vandecasteele, C., Kohlmeyer, R., Rotter, V., Passarini, F., Santini, A., Peeler, M., Li, J., Oh, G.-J., Chi, N.K., Bastian, L., Moore, S., Kajiwara, N., Takigami, H., Itai, T., Takahashi, S., Tanabe, S., Tomoda, K., Hirakawa, T., Hirai, Y., Asari, M., Yano, J., 2014. An international comparative study of End-of-Life Vehicle (ELV) recycling systems. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 16(1), 1-20. Doi: 10.1007/s10163-013-0173-2
- Sánchez De Prado, M., 1984. El vidrio romano en la provincia de Alicante. *Lucentum* (3), 79-100. DOI: 10.14198/LVCENTVM1984.3.04
- Schwarz, O., 2002. *Ciencia de los plásticos: composición, propiedades, procesamiento, aplicaciones de los termoplásticos duroplásticos y clastómeros*. Grupo Editorial Costa Nogal, Montevideo.
- Snudden, J., Ward, C., Potter, K., 2014. Reusing automotive composites production waste. *Reinf. Plast.* 58(6), 20-27. Doi: 10.1016/S0034-3617(14)70246-2
- Socolow, R., Andrews, F., Berkhout, F., Thomas, V. (Eds.), 1994. *Industrial ecology and global change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Wasiak, A., Sajkiewicz, P., Woźniak, A., 1999. Effects of cooling rate on crystallinity of i-polypropylene and polyethylene terephthalate crystallized in non-isothermal conditions. *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.* 37(20), 2821-2827. Doi: 10.1002/(SICI)1099-0488(19991015)37:20<2821::AID-POL-B1>3.0.CO;2-E
- Watanabe, C., 1994. Industrial ecology and Japan's industrial policy. En: Richardson, D., Fullerton, A. (Eds.), *Industrial ecology U.S. Japan perspectives*. National Academy of Engineering, Irvine, CA.
- Wolman, A., 1965. The metabolism of cities. *Sci. Am.* 213(3), 179-190. DOI: 10.1038/scientificamerican0965-178
- Wong, Y., Al-Obaidi, K., Mahyuddin, N., 2018. Recycling of End-of-Life Vehicles (ELVs) for building products: Concept of processing framework from automotive to construction industries in Malaysia. *J. Clean. Prod.* 190, 285-302. Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.145
- Xu, G., Watt, D., Hudec, P., MacDonald, K., Northwood, D., 1995. Recycling automotive related wastes in concrete. *J. Mater. Process. Technol.* 48(1-4), 385-390. Doi: 10.1016/0924-0136(94)01673-O
- Zúñiga Martínez, I., 2002. Síntesis de copolímeros en bloque de nylon 6 / poli (éter - esteramida) mediante extrusión reactiva reforzados con resma fenólica. Tesis de maestría. Centro de Investigación en Química Aplicada, México, DF.