
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE RESIDUOS POLIMÉRICOS COMO AGREGADOS DEL CONCRETO: UNA REVISIÓN

NATALIA FUENTES, KATERIN JIMÉNEZ, RICARD OTERO AÑEZ Y WILFRIDO UZURIAGA

RESUMEN

Los residuos poliméricos reducen el consumo de materias primas en la industria de la construcción, mejorando la eficiencia económica y creando productos ecológicos sostenibles en el tiempo. La sustitución de los agregados pétreos convierte los desechos en una solución ecológica a los problemas de contaminación ambiental, como alternativa de reciclaje y valorización, y en las últimas décadas se viene innovando en la producción de concretos ecológicos. La presente revisión plantea los análisis más importantes en el reemplazo parcial de agregados pétreos por subproductos poliméricos no biodegradables de otros procesos industriales. Para comprender los desafíos y compensaciones

de su aprovechamiento sostenible en las propiedades frescas y endurecidas del concreto y proporcionar una visión general de la viabilidad técnica del reciclaje para cerrar su ciclo, se analizó la literatura más reciente. En los resultados se evidencia una relación inversamente proporcional entre el volumen de reemplazo y la resistencia a la compresión, reducción del peso ocasionada por la naturaleza ligera de los residuos, mayor flexibilidad y capacidad de ajuste, mejores propiedades de aislamiento térmico y eléctrico, así como bajos costos de producción, creando una nueva cadena de valor, al tiempo que se minimiza el efecto negativo de los polímeros residuales sobre el medio ambiente.

La generación de residuos poliméricos no biodegradables se ha convertido en una preocupación que representa una amenaza por los impactos negativos sobre el medio ambiente y la salud humana (Mohajerani *et al.*, 2018; Tafheem *et al.*, 2018; Nematzadeh *et al.*, 2020). Esta problemática ha presentado un incremento considerable en las últimas décadas debido a

la creciente fabricación de productos para satisfacer las nuevas demandas del mercado y un ciclo de vida cada vez menor de los artículos de consumo (Feng *et al.*, 2015; Bodzay y Banhegyi, 2017; Shubbar y Al-Shadeedi, 2017), lo que conlleva la acumulación de grandes volúmenes de estos residuos en corto tiempo, causados por los sistemas de gestión insuficientes, incapacidad de apreciar el valor potencial, falta de incentivos de mercadeo

ecológico, poca responsabilidad ante eventos de contaminación, falta de educación ambiental y deficiencias en los sistemas tratamiento y disposición final. Sumado a lo anterior se tiene el agotamiento de los recursos naturales a un ritmo cada vez mayor, consecuencia del rápido desarrollo urbanístico mundial (Dong *et al.*, 2018; Pittau *et al.*, 2018). Las investigaciones realizadas en los últimos años muestran un aumento en la

PALABRAS CLAVE / Agregados / Concreto / Construcción / Residuos Poliméricos / Sostenibilidad /

Recibido: 06/04/2021. Modificado: 08/07/2021. Aceptado: 10/07/2021.

Natalia Fuentes Molina. Ingeniera Ambiental y Sanitaria, y Magister en Ciencias Ambientales, Universidad Popular del César, Colombia. Doctor en Gestión de la Innovación, Universidad Rafael Belloso Chacín, Venezuela. Docente investigador, Universidad de La Guajira, Colombia. Dirección: Universidad de La Guajira. Km 5, vía a Maicao Riohacha, La Guajira, Colombia. e-mail: nnfuentes@uniguajira.edu.co

Katerin Jiménez Mendoza. Estudiante de Ingeniería Ambiental, integrante del grupo de investigación Ciencia + Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira Colombia. Km 5, vía a Maicao Riohacha, La Guajira.

Ricard Otero Añez. Estudiante de Ingeniería Ambiental, integrante del grupo de investigación Ciencia + Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira Colombia. Km 5, vía a Maicao Riohacha, La Guajira.

Wilfrido Uzuriaga Marulanda. Estudiante de Ingeniería Ambiental, integrante del grupo de investigación Ciencia + Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira Colombia. Km 5, vía a Maicao Riohacha, La Guajira.

producción de concreto, de lo que se deduce una mayor demanda en la utilización de materiales y en la generación del volumen de residuos, ocasionado afectaciones al medio receptor.

En la industria de la construcción, el concreto es uno de los materiales más utilizados, con estimaciones anuales a nivel mundial que oscilan entre 2500 y 3000x10⁶t de cemento (Wang *et al.*, 2017; Nadimalla *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020) y de 10x10⁶t en Colombia (Acevedo y Posada, 2019) que requieren elevados volúmenes de minerales y energéticos (Jaivignesh y Sofi, 2017). Ningún material de construcción ha sido usado en estas proporciones; analizando la visión de futuro, no parece interesar otros materiales que compitan con el concreto en magnitud de volumen.

Los recursos utilizados en el concreto incluyen aproximadamente tres cuartas partes de su volumen en agregados pétreos para su producción (León y Ramirez, 2010). En consecuencia, es necesario desarrollar nuevos materiales, que logren disminuir su alto consumo, haciéndolos más sostenibles. Se han realizado esfuerzos para estudiar el uso de residuos poliméricos no biodegradables, reemplazando los agregados pétreos (Acevedo y Posada, 2019; Mustafa *et al.*, 2019; Nadimalla *et al.*, 2019; Almeshal *et al.*, 2020) y el cemento (Martinez *et al.*, 2015) en el concreto, analizando las propiedades del material, los efectos, las ventajas y desventajas potenciales. Las nuevas tecnologías e innovaciones en el uso de los residuos poliméricos no biodegradables cada vez son más frecuentes, por el agotamiento y el sobrecosto de algunos recursos minerales, la accesibilidad y el cumplimiento de normativas ambientales.

Las políticas de sostenibilidad, innovaciones ecológicas, e investigaciones ambientales mencionadas han permitido avanzar en una nueva forma de construir reduciendo el consumo de energía, bajando los costos de producción, mejorando la flexibilidad, versatilidad, así como la preocupación social, haciendo este sector cada vez más sensible y motivado para promover una economía circular que convierta los residuos poliméricos en un material secundario que se puede volver a introducir en el sistema (Díaz *et al.*, 2017; Lozano *et al.*, 2018; Spósito *et al.*, 2020), y para usar en nuevos componentes y productos, con una funcionalidad diferente. La economía circular del post-consumo promueve el reciclaje de los desechos convirtiéndolos en nuevos componentes y productos con funcionalidades similares o inferiores (Flores *et al.*, 2014; Hahladakis y Iacovidou, 2019), alejándose de la economía lineal donde se produce,

utiliza y desecha (Payá *et al.*, 2015; Hahladakis y Iacovidou, 2019; Spósito *et al.*, 2020).

Frente a estas expectativas, la presente revisión tiene como propósito describir las metodologías para el reciclaje de residuos poliméricos no biodegradables, como adición al concreto para las fabricaciones no estructurales, de tal manera que contribuya en el análisis de las estrategias de valorización e innovación para la reutilización de este material en la industria de la construcción.

Clasificación de los Residuos Poliméricos no Biodegradables

Los poliméricos son uno de los recursos de consumo más comunes, presentan propiedades químicas, mecánicas, ópticas y térmicas excepcionales, que están estrechamente relacionadas con su diversificación, versatilidad, alto rendimiento, ligereza, durabilidad, flexibilidad, resistentes al calor, corrosión y bajo costo, en comparación con otro tipo de materiales (Coreño y Méndez, 2010; Shubbar y Al-Shadeedi, 2017). Se utilizan y desechan con mucha facilidad, tienen diversas características de interés, conferidas por el tipo de enlace entre macromoléculas, los ángulos, longitudes y disposición espacial que integran las miles unidades estructurales repetidas. La heterogeneidad de los plásticos tiene una influencia en las tasas de reciclaje y les confiere una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos como materia prima. Según su clasificación, pueden presentarse diversas categorías, de las cuales se describirán tres: termoplásticos, termoestables y elastómeros, teniendo en cuenta sus características (Peters, 2015; Jaiswal y Mishra, 2019).

Los termoplásticos se caracterizan por un bajo módulo de elasticidad, resistencia tensil y una elongación que oscila entre 20-800%. Las fuerzas intermoleculares y las barreras de rotación carbono-carbono son altas, lo que aumenta sus propiedades mecánicas, las cadenas conservan suficiente flexibilidad. Pueden ser semi-cristalinos o amorfos, y entre los más empleados están el polietileno, poliestireno, polipropileno, politereftalato de etileno, poliésteres, epóxicas y policarbonatos (Flores *et al.*, 2014; Peters, 2015; Jaiswal y Mishra, 2019). Cuando se someten a esfuerzo en la región elástica las láminas se desplazan entre sí, en las cadenas carbonadas de las zonas intermedias amorfas, y al dejar de aplicar el esfuerzo regresan a su lugar, antes del punto de cadencia en donde las láminas se rompen en secciones pequeñas, venciendo algunas fuerzas intermoleculares.

Los elastómeros se caracterizan por su elevada elasticidad, fácil deformación, cadenas flexibles y presentar elongaciones reversibles hasta 500-1000% a esfuerzos relativamente bajos. Estas características se deben a las bajas fuerzas intermoleculares, así como a las barreras de rotación, lo que permite que las cadenas adopten diversas configuraciones; cuando existen entrecruzamientos químicos o físicos entre las cadenas debido a su alto peso molecular, los elastómeros tienden a regresar a sus dimensiones originales, al retirar el esfuerzo que origina la deformación (Peters, 2015; Jaiswal y Mishra, 2019). Entre los más empleados se encuentran el caucho natural o vulcanizado, el neopreno, poliuretano estireno, butadieno, polibutadieno y poliisoprenos (Albano *et al.*, 2008; Sofi, 2018; Li *et al.*, 2019, 2020; Lara *et al.*, 2020).

Los termoestables o termo-endurecidos se caracterizan por su rigidez, con moderada resistencia tensil elongaciones pequeñas (<0,5-3%); son estructuras entrecruzadas con poca flexibilidad y fragilidad si se usan en estado puro, infusibles e insolubles que mediante la presión y la temperatura se reblandecen y pueden moldearse en su fase fluida una sola vez y antes de que la reacción de polimerización haya finalizado por completo. Ejemplos de ellos son resinas fenólicas, ureicas, epoxi, melamina epóxica y melamina, formaldehído (Coreño y Méndez, 2010; Peters, 2015; Jaiswal y Mishra, 2019).

La utilización adecuada de estos residuos requiere un aprovechamiento sostenible con medidas ambiciosas para invertir la tendencia donde el mayor volumen de residuos sea reciclado y no dispuesto en rellenos sanitarios y botaderos satélites, a partir de cambios disruptivos en el modelo de producción y consumo lineal para avanzar hacia un modelo más circular. En los últimos años, se estima que los residuos poliméricos en la mayoría de los casos son dispuestos en vertederos en un 51%, incinerados en un 27% y cerca del 22% son reciclados (Shubbar y Al-Shadeedi, 2017; Bodzay y Banhegyi, 2017; Saikia y Brito, 2014); sin embargo los procesos de aprovechamiento representados por el menor porcentaje no es sostenible en el tiempo en muchas ocasiones (Ignatyev *et al.*, 2014; Hahladakis y Iacovidou, 2019; Li *et al.*, 2020) representando una enorme carga ambiental debido a la no-degradabilidad.

Diversas investigaciones han evaluado el desempeño del reciclaje de los residuos poliméricos no biodegradables en comparación con la incineración y la disposición en vertederos, demostrando el ahorro neto de energía resultante

(Moon *et al.*, 2017; Lamnatou *et al.*, 2018), una reducción en las emisiones de gases y material particulado (Bhogayata *et al.*, 2012; Sofi 2016; Peng *et al.*, 2017), una disminución de los efectos de acidificación y nitrificación de las agua superficiales (Mattsson *et al.*, 2015; Park *et al.*, 2015; Sposito *et al.*, 2020; Thakur *et al.*, 2020), entre los análisis que intentan contribuir en el debate de la viabilidad técnica del reciclaje.

Propiedades del Concreto

En términos generales, los resultados de varios estudios concuerdan en que los residuos poliméricos no biodegradables incorporados en el concreto, no siempre mejoran las resistencias mecánicas, pero sí logran extender la vida útil y otras propiedades, tales como el aislamiento térmico, flexibilidad, capacidad de ajuste, bajos costos de producción y naturaleza ligera, entre otros. Se han desarrollado diferentes procesos a fin de obtener un tamaño del material residual óptimo para las sustituciones de los agregados pétreos del concreto con aplicaciones en la industria de la construcción; las técnicas de molienda pueden producir partículas según las especificaciones requeridas, y los más frecuentes oscilan entre 1,5 y 3,5mm, como se evidencia en la Tabla I.

En la actualidad se alcanzan reducciones hasta tamaños <0,1mm a través de diferentes tecnologías, mejorando la cohesión entre las partículas para sustituir el agregado fino y en forma parcial el cemento.

Propiedades Frescas

Trabajabilidad

La trabajabilidad, que determina el esfuerzo requerido para manipular cierta cantidad de mezcla de concreto fresco fácil de manejar y contraer sin un riesgo apreciable de segregación, ha sido evaluada por diferentes autores, demostrándose que disminuye debido al aumento de la formas irregulares y no uniforme de las partículas y el volumen de los termoplásticos en la mezcla de cemento (Rahmani *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2015; Coppola *et al.*, 2016; Akinyele y Ajede, 2018; Mustafa *et al.*, 2019).

En ese mismo orden Ahmad (2017) demostró que el concreto con residuos elastoméricos de hasta el 60% muestra una buena capacidad de trabajo, y Gupta *et al.* (2014) y Bisht y Ramana (2017) mostraron que la trabajabilidad del concreto con elastómeros disminuye gradualmente al aumentar el porcentaje y el tamaño de partícula. Por ello

se plantea que estos agregados deben estar bien graduados y con proporciones de mezcla bajas para mejorar su capacidad de fluidez y los requerimientos de agua (Thomas y Gupta, 2016; Mendis *et al.*, 2017; Aiello y Leuzzi, 2010).

Propiedades Endurecidas

Densidad seca

Al analizar la densidad seca en las diferentes investigaciones donde se determina la relación entre la masa del concreto y el volumen absoluto de la misma, se evidencia una relación inversa entre ésta y el contenido de agregado polimérico, tal como lo reportan Wasan y Khalaf (2017), quienes encontraron que la densidad seca del concreto que contiene agregado grueso de residuos termoplásticos disminuye a medida que se aumenta el contenido de reemplazo, lo cual posiblemente es debido a la fórmula angular que contribuye a la formación de grandes cavidades en el concreto y también a la baja gravedad específica de los termoplásticos en comparación con los agregados gruesos naturales. En ese mismo orden, Kumar y Baskar (2015) afirman que las densidades tienden a disminuir debido a la diferencia de peso y volumen entre termoplástico y agregados

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE LOS RESIDUOS POLIMÉRICOS EN LA SUSTITUCIÓN DE AGREGADOS DEL CONCRETO EN ESTUDIOS PREVIOS

Tipo de matriz	Tamaño del material residual (mm)	Porcentajes de sustitución %	Tipo de agregado reemplazado	Autores
Termoplástico	1 - 8	5 - 20	Grueso	Akinyele <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	1 - 1,5	10 - 50	Fino	Almeshal <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	0,2 - 2	3 - 5	Grueso	Arulrajah <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	-	10 - 25	Fino	Nakhai y Alhumoud (2020)
Termoplástico	10	2,5 - 7,5	Grueso	Thakur <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	4	2,5 - 10	Fino	Venitez <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	2,36	5 - 20	Fino	Acevedo y Jaramillo; (2019)
Termoplástico	0,3 - 0,15	5 - 20	Fino	Mustafa <i>et al.</i> (2019)
Termoplástico	4,75	10 - 30	Grueso	Jafar <i>et al.</i> (2018)
Termoplástico	3,2	2.5 - 10	Grueso	Aswatama <i>et al.</i> ,(2018)
Termoplástico	0,05 - 0,2	5 - 30	Grueso y fino	Poonyakan <i>et al.</i> (2018),
Termoplástico	0,8 - 3	5 - 10	Grueso	Tafheem <i>et al.</i> (2018)
Termoplástico	-	10 - 80	Fino	Ahmad, (2017)
Termoplástico	6,25	20 - 40	Grueso	Di Marco y Leon (2017)
Termoplástico	-	10 - 50	Grueso	Wasan y Khalaf (2017)
Termoplástico	2,74 - 7,95	10 - 10	Grueso	Muthadhi <i>et al.</i> (2017)
Termoplástico	-	1 - 8	Fino	Shubbar y Al-shadeedi (2017)
Termoplástico	8,2	10 - 30	Grueso	Ashwini (2016)
Termoplástico	0,25 - 0,40	0,40 - 1,25	Grueso	Pešić <i>et al.</i> (2016)
Termoplástico	1,5 - 4	10 - 30	Fino	Yang <i>et al.</i> (2015)
Elastómero	-	10 - 20	Fino	Lara <i>et al.</i> (2020)
Elastómero	-	7 - 50	Grueso	Nazer <i>et al.</i> (2019)
Elastómero	-	5 - 15	Fino y grueso	Farfán y Leonardo (2018)
Elastómero	-	5	Fino y grueso	Albano <i>et al.</i> (2008)

gruesos, mientras Gupta *et al.* (2014) indican que esta reducción es inversamente proporcional al porcentaje de reemplazo de los residuos elastómeros, por su bajo peso unitario, razón por la cual el concreto recubierto de elastómero presenta bajas densidades.

Resistencia a la compresión

Al revisar la capacidad del concreto con residuos poliméricos para resistir las cargas de aplastamiento antes de llegar a la rotura se encuentran diferentes hallazgos que oscilan entre 3 y 110MPa. En las investigaciones de Shubbar y Al-shadeedi (2017), Wasan y Khalaf (2017), Acevedo y Posada (2018), Aswatama *et al.* (2018), Nadimalla *et al.* (2019) y de Venitez *et al.* (2020) se reportó una disminución de la resistencia a la compresión con contenidos que oscilan entre el 2,5 y 50% de residuos termoplásticos como reemplazo de agregados pétreos en comparación con el concreto de referencia, como se muestra en la Tabla II. Frente a lo anterior, Muthadhi *et al.* (2017), Wasan y Khalaf (2017), Tafeem *et al.* (2018) y Almeshal *et al.* (2020) indican que esta reducción puede atribuirse a la disminución de la resistencia adhesiva entre la superficie del polímero de sustitución y la mezcla de cemento. Además, de

Muthadhi *et al.* (2017), Shubbar y Al-shadeedi (2017), Thafeem *et al.* (2018) y de Venitez *et al.* (2020) lo consideran un material hidrófobo, por lo que esta propiedad puede restringir la entrada de agua necesaria para la hidratación del cemento a través de los poros durante el proceso de curado.

En otros estudios se reportan resultados contrarios a los anteriores. Shubbar y Al-shadeedi (2017), Nadimalla *et al.* (2019) y Venitez *et al.* (2020) reportaron un aumento de la resistencia a la compresión en el concreto con 1 a 10% de residuos termoplásticos como reemplazo de agregados pétreos. Lo anterior posiblemente es debido al bajo contenido de agregado sustituido, que no altera las fuerzas internas de las estructuras. En las investigaciones de Sofi, (2018) y Nakhai *et al.* (2020) se reportan sustituciones con residuos de elastómeros donde la resistencia a la compresión es inversamente proporcional al porcentaje de reemplazo, las disminuciones son consideradas resultado de la textura de la mezcla de cemento, que al ser más suave ocasiona un rápido desarrollo de grietas alrededor de las partículas durante la carga y esto conduce a una falla rápida de las muestras. También es atribuido a las fuerzas intermoleculares entre estas partículas y la mezcla de cemento.

Resistencia a la flexión

Los esfuerzos máximos a los que se somete el concreto con agregados poliméricos justo antes de agrietarse o romperse en los ensayos de flexión, de 0,4 a 23MPa, reportados por Pereira y Castro, (2011), Saikia y Brito (2014), Azhdarpour y Nikoudel (2016), Özbay *et al.* (2016), Almeshal *et al.* (2020) y Akinyele y Ajede (2018), mostraron que esta resistencia aumenta con el porcentaje de sustitución. Los ensayos fueron realizados con reemplazos que oscilan entre 0,4 y 10% de termoplástico, indicando que cuando la cantidad de agregado plástico en el concreto aumenta la flexión, la resistencia a la tensión disminuye (Saikia y Brito 2014). Contrario a lo anterior, Rai *et al.* (2012) y Nadimalla *et al.* (2019) revisaron la influencia de la sustitución de varias formas y volúmenes de agregados termoplásticos en la resistencia a la flexión del concreto, evidenciando una disminución, a pesar de trabajar con porcentajes similares que oscilan entre 5 y 15% de agregado termoplástico.

Cuando se reemplaza el agregado pétreo por residuos de elastómeros, se observa un aumento en la resistencia a la flexión (Gupta *et al.*, 2014; Farfan y Leonardo, 2018; Nazer *et al.*,

TABLA II
PROPIEDADES MECÁNICAS Y RENDIMIENTO DE DURABILIDAD DE LAS MATRICES DE CONCRETO CON RESIDUOS POLIMÉRICOS EN ESTUDIOS PREVIOS

Tipo de matriz	Resistencia a compresión (Mpa)	Resistencia a flexión (MPa)	Absorción de agua (%)	Autores
Termoplástico	0,85 - 5,15	13,28 - 20,42	6,57 - 10,29	Akinyele <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	2,69 - 35,9	0,45 - 3,1	-	Almeshal <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	1,55 - 5,84	-	8,24 - 11,28	Arulrajah <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	10 - 40	-	5,2 - 5,9	Nakhai y Alhumoud (2020)
Termoplástico	17 - 20	-	-	Thakur <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	18 - 20	-	-	Venitez <i>et al.</i> (2020)
Termoplástico	6,7 - 25,9	-	-	Acevedo y Jaramillo (2019)
Termoplástico	32 - 42	-	-	Mustafa <i>et al.</i> (2019)
Termoplástico	13,34 - 25,36	2,12 - 5,26	0,65	Jafar <i>et al.</i> (2018)
Termoplástico	24,73 - 62,27	2,22 - 6,22	-	Aswatama <i>et al.</i> (2018)
Termoplástico	16 - 28	-	22	Poonyakan <i>et al.</i> (2018),
Termoplástico	15 - 20	1,8 -3,2	-	Tafheem <i>et al.</i> (2018)
Termoplástico	568 - 945	-	3,6 - 19,46	Ahmad (2017)
Termoplástico	22,9 - 56	0,35 - 0,45	7,9 - 8,2	Di Marco y Leon (2017)
Termoplástico	84 - 110,4	17,15 - 23,94	-	Wasan y Khalaf (2017)
Termoplástico	16 - 31	2,68 - 3,43	10	Muthadhi <i>et al.</i> (2017)
Termoplástico	20,6 - 41,84	-	-	Shubbar y Al-shadeedi (2017)
Termoplástico	24,5 - 53,5	-	3,6	Ashwini (2016)
Termoplástico	23,3 - 40,1	2,79 - 4,37	-	Pešić <i>et al.</i> (2016)
Termoplástico	20 - 28	2,3 -3,0	16,2	Yang <i>et al.</i> (2015)
Elastómero	3,70 - 5,17	-	-	Lara <i>et al.</i> (2020)
Elastómero	23,6 - 35,3	3,4 - 4,8	-	Nazer <i>et al.</i> (2019)
Elastómero	14,62 - 29	6,98 - 10	-	Farfan y Leonardo (2018)
Elastómero	19 - 20	1,8 - 1,9	-	Albano <i>et al.</i> (2008)

2019) en una relación directamente proporcional en sustituciones de 2,5 a 10%, lo cual es atribuido al efecto de relleno del agregado que produce una zona de transición más densa, homogénea y estrecha, evidenciado en la Tabla II. Por el contrario, Sofi (2018) observa en las pruebas de flexión una reducción de la resistencia del elastómero al reemplazar el agregado grueso en lugar del fino. Las razones de la disminución seguramente se deben a la textura de la mezcla, dando como resultado el desarrollo de grietas alrededor de las partículas durante la carga, lo que conduce a una rápida falla de las muestras por la distribución no uniforme de los esfuerzos entre las partículas, en comparación con las mezclas de cemento y el agregado natural.

Rendimiento y Durabilidad

Absorción de agua

Las variaciones en la absorción de agua en el concreto en relación a la incorporación de residuos poliméricos oscilan entre 0,65 y 16,2% (Tabla II) guardando una relación directamente proporcional (Colangelo *et al.*, 2016; Poonyakan *et al.*, 2018; Akinyele *et al.*, 2020; Arulrajah *et al.*, 2020; Nakhai y Alhumoud, 2020). La absorción aumenta con la cantidad de residuos incorporados en el concreto, causando más porosidad. Las influencias de los agregados de elastómeros presentaron un comportamiento similar a los termoplásticos, demostrado por las investigaciones de Gupta *et al.* (2014), Bisht y Ramana (2017) y Youssf *et al.* (2017), quienes relacionan incremento con el porcentaje de reemplazo de partículas de elastómeros. Para complementar lo anterior, Hilal (2011) y Pedro *et al.* (2013) encontraron que solo el 5% de agregado de elastómeros con partículas <2mm logran disminuir la absorción de agua, toda vez que los porcentajes que oscilan entre el 10 y 15% de este contenido aumentan la capacidad de absorción de agua, tomando como referencia el contenido y tamaño del agregado, que deben ser considerados factores fundamentales para la absorción de agua del concreto.

Contracción por secado

En el efecto de la contracción por secado se evidencia una menor rigidez y mayor flexibilidad con la incorporación de los agregados poliméricos, ocasionado por la modificación de la porosidad, reduciendo las restricciones longitudinales internas y mejorando las tasas de pérdida de agua por capilaridad. Autores como Li *et al.* (2020) indicaron

en su revisión que el reemplazo de agregado pétreo con residuos termoplásticos causó un cierto aumento en la contracción. La razón principal del incremento es la baja rigidez y la alta compresibilidad que ofrecen una restricción insignificante hacia el movimiento. Mientras, autores como Silva *et al.* (2013) afirman que estos agregados la reducen independientemente del tamaño de las partículas (1-11,2mm) en sustituciones menores al 15%, en comparación con el concreto convencional; aunque el módulo de elasticidad del agregado polimérico es menor, relacionan la reducción con su hidrofobicidad, que en consecuencia deja más agua libre disponible para la hidratación. Lo anterior es atribuido al volumen de agua absorbido por los agregados, el cual es menor debido a la naturaleza impermeable de los termoplásticos; como resultado, se dispone de más agua libre para hidratar el cemento, lo que condujo a valores más bajos de contracción.

Resistividad eléctrica

La calidad y durabilidad del concreto fueron analizadas en el trabajo de Li *et al.* (2019), quienes observaron que la incorporación de partículas en polvo y fibras de elastómeros aumentan la resistividad eléctrica del concreto en 5 a 20% cuando se reemplaza un volumen de cemento, presentando ventajas en la ductilidad y resistencia; ventajas que le permiten ser empleado como material de construcción en áreas de daños sísmicos, vías ferroviarias electrificadas modernas y barreras acústicas. Por el contrario, los estudios de Si *et al.* (2017) y Mohammed y Abdul (2019) evidenciaron un incremento en la resistividad eléctrica del concreto al incorporarle mayor contenido de agregado pétreo y consideraron que el aumento puede estar relacionados con la menor capacidad de transporte del agregado de elastómeros. Autores como Li *et al.* (2019) reportan una disminución a nivel superficial y el volumen en un 51 y 48% respectivamente cuando se reemplaza el cemento por estos agregados. La reducción es atribuida al contenido excesivo de elastómero particulado, que causa numerosas estructuras de panal; en forma adicional se analizan los pretratamientos con hidróxido de sodio, donde las modificaciones exhibieron reducciones de la resistividad, que deben seguir siendo analizadas con otras sustancias químicas como cloruro de calcio, hidróxido de calcio y cloruro de sodio para conocer su efectividad. Por otra parte, Si *et al.* (2017) recomiendan que las relaciones de reemplazo no sean superiores al 50% para evitar la disminución de resistividad; Li *et al.*

(2020) indican que los agregados poliméricos son un aislante, que aumenta la resistividad eléctrica del concreto; y Nili *et al.* (2014) informan que aumentos significativos pueden estar relacionada con el efecto de relleno del agregado plástico, haciendo que el concreto sea más denso y en consecuencia aumente la conductividad.

Resistencia a la congelación y descongelación

Los ensayos de las incidencias de heladas y deshielo incorporando los polímeros, así como la viabilidad y las ventajas del uso de éstos fueron llevados a cabo por Wang y Meyer (2012), quienes indican que los termoplásticos en forma de espuma expandida se usan ampliamente como agregado para mejorar la resistencia a la congelación y descongelación; Kan y Demirboga (2009) demostraron que el concreto era más susceptible al deterioro cuando se emplean agregados gruesos en comparación del reemplazo con finos; y Guo *et al.* (2018) observaron que se mejora a medida que el componente relativamente blando puede proporcionar espacio extra para la expansión del agua durante la congelación. Girskas y Nagrockiene (2017) demostraron la relación directa del reemplazo, y las de Paine *et al.* (2002) destacaron los efectos positivos, con respecto a la resistencia al hielo y deshielo en función del volumen, el tamaño y el tratamiento previo del agregado, en comparación con el concreto normal.

Conclusiones

La estrecha relación entre las propiedades y la estructura de los polímeros residuales hace posible diseñar concretos para aplicaciones tecnológicas con requerimientos de desempeño específicos, como sustitutos de otros materiales; su comportamiento en determinadas condiciones se puede anticipar cuando se conoce la estructura química.

La trabajabilidad de la mezcla disminuye ligeramente con sustituciones parciales. En ocasiones se presenta un aumento en los requerimientos de agua por las propiedades hidrofóbicas de los polímeros facilitando la capacidad de fluidez, según la forma, tamaño y volumen de las partículas.

La resistencia a la compresión se reduce, como es de esperarse, siendo los mejores reemplazos aquellos menores al 15%. Sin embargo, ello no quiere decir que estos sean los reemplazos más adecuados, siendo conveniente analizar el beneficio ambiental que se ofrece,

toda vez que las estructuras que contienen entre 30-50% en volumen de estos agregados residuales clasifican como concreto no estructural y estructural ligero.

La porosidad, absorción de agua y conductividad térmica presentan una disminución en el concreto con contenidos 5%, y en los casos que se registran aumentos, estos fueron influenciados por el tamaño y forma de las partículas sustituidas, las fuerzas de unión entre partículas, la zona de transición interna y la humectabilidad de la superficie hidrofóbica. El peso unitario fresco y seco de las muestras de concreto también se reduce hasta en un 4%, generando influencia en la trabajabilidad, densidad, rendimiento mecánico y durabilidad con una relación inversamente proporcional al volumen adicionado.

Adicionalmente, se demuestra que la incorporación de los polímeros mejora la flexión, resistividad eléctrica, durabilidad, resistencia a la congelación y descongelación, comportamiento dúctil, reduce la formación y propagación de grietas, siendo interesante para varias aplicaciones ingenieriles, en el intento por promover la sostenibilidad ambiental, logrando aportar en la búsqueda de diseños óptimos para un mayor desempeño en las condiciones estáticas y dinámicas, como instrumentos económicos que buscan potenciar la innovación y las buenas prácticas.

REFERENCIAS

- Acevedo A, Posada J (2019) Polyethylene terephthalate as a partial replacement of fine aggregate in concrete mixes. *Rev. Ing. Univ. Medellín* 18: 45-46.
- Ahmad K (2017) Recycling of polyethylene waste to produce plastic cement. *Procedia Manufact.* 8: 635-642.
- Aiello M, Leuzzi F (2010) Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Manag.* 30: 1696-1704.
- Akinyele J, Ajede A (2018) The use of granulated plastic waste in structural concrete. *Afr. J. Sci. Technol. Innov. Devel.* 10: 169-175.
- Akinyele J, Igba U, Adigun B (2020) Effect of waste PET on the structural properties of burnt bricks. *Scient. Afr.* 7: e200301.
- Albano C, Camacho N, Hernandez M, Bravo A, Guevara H (2008) concrete studio made with recycled rubber of different particle sizes. *Rev. Fc. Ing. Univ. Central Venez.* 23: 67-75.
- Almeshal I, Tayed B, Alyousef R, Alabduljabbar H, Mustafa A (2020) Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand. *J. Mat. Res. Technol.* 9: 4631-4643.
- Arulrajah A, Perera S, Choy Y, Horpibulsuk S, Maghool F (2020) Stiffness and flexural strength evaluation of cement stabilized PET blends with demolition wastes. *Constr. Build. Mat.* 239: 117819.
- Ashwini BT (2016) Partial replacement of E-plastic waste as coarse-aggregate in concrete. *Procedia Environ. Sci.* 35: 731-739.
- Aswatama K, Suyoso H, Meyfa N, Tedy P (2018) The effect of adding PET (polyethylene terephthalate), plastic waste in SCC (self-compacting concrete) on the behavior and mechanical characteristics of fresh concrete). *J. Phys. Conf. Ser.* 953: 012023.
- Azhdarpoor A, Nikoudel M (2016) The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construct. Build. Mat.* 109: 55-62.
- Bhogayata A, Shah KD, Vyas BA, Arora NK (2012) Performance of concrete by using non-recyclable plastic wastes as concrete constituent. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 1: 1-3.
- Bisht K, Ramana PV (2017) Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Constr. Build. Mat.* 155: 811-817.
- Bodzay B, Banhegyi G (2017) Polymer waste: Controlled breakdown or recycling. *Int. J. Design Sci. Technol.* 22: 109-138.
- Colangelo F, Cioffi R, Liguori B, Iucolano F (2016) Recycled polyolefins waste as aggregates for lightweight concrete. *Composites Part B: Eng.* 106: 234-241.
- Coppola C, Courard L, Michel F, Incarnato L, Maio L (2016) Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Eng.* 99: 75-83.
- Coreño J, Méndez M (2010) Relación estructura-propiedades de polímeros. *Chem. Educ.* 21: 291-299.
- Dong L, Wang Y, Li HX, Jiang B, Al-Hussein M (2018) ACV based on temporary manufactured housing carbon reduction measures with renewable energy systems. *Sustainability* 10: 728-750.
- Farfán M, Leonardo E (2018) Caucho reciclado en la resistencia a la compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante. *Rev. Ing. Constr.* 33: 241-250.
- Feng L, Yong Y, Lijuan L, Cheng L, Gongfa C (2015) Performance of recycled plastic-based concrete. *J. Mat. Civil Eng.* 27: 0989.
- Flores V, Rojas J, Torres R, Vallejos R, Flores P, Flores M, (2014) Mezclas de cemento y agregados de plástico para la construcción de viviendas ecológicas. *Cienc. Tecnol. Agr.* 1: 101-110.
- Girskas G, Nagrockiene D (2017) Crushed rubber waste impact of concrete basic properties. *Constr. Build. Mat.* 140: 36-42.
- Guo S, Hu J, Dai Q (2018) A critical review on the performance of portland cement concrete with recycled organic components. *J. Cleaner Prod.* 188: 92-112.
- Gupta T, Chaudhary S, Sharma R (2014) Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tyre as fine aggregate. *Constr. Build. Mat.* 73: 562-574.
- Hahladakis JN, Lacovidou E (2019) An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of postconsumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *J. Haz. Mat.* 380: 120887.
- Hilal AA (2011) Effect of crumb tyres rubber on some properties of foamed concrete. *Anbar J. Eng. Sci.* 4: 1-17.
- Ignatyev I, Thielemans W, Vanderbeke B (2014) Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem.* 7: 1579-1593.
- Jafar M, Mohamed A, Mohamed M, Mohamed M, Mohamed P (2018) Experimental investigation on partial replacement of E-waste as coarse aggregate in concrete. *Int. J. Eng. Sci. Comput.* 8: 16918-16920.
- Jaiswal VK, Mishra M (2019) Polymer waste management - A review. *Int. J. Pure Appl. Biosci.* 7: 544-556.
- Jaivignesh B, Sofi A (2017) Study on mechanical properties of concrete using plastic waste as an aggregate. *Earth Environ. Sci.* 80: 012016.
- Kan A, Demirboga R (2009) A novel material for lightweight concrete production. *Cement Concrete Compos.* 31: 489-495.
- Kumar K, Baskar K (2015) Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries. *J. Mat. Cycles Waste Manag.* 17: 718-724.
- Lamnatou C, Lecoivre B, Chemisana D, Cristofari C, Canaletti JL (2018) Concentrating photovoltaic/thermal system with thermal and electricity storage: CO2eq emissions and multiple environmental indicators. *J. Cleaner Prod.* 192: 376-389.
- Lara E, Guerrero D, Altamirano B (2020) Influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto. *Rev. Técn. Fac. Ing. LUZ* 43: 134-141.
- León M, Ramírez F (2010) Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. *Rev. Ing. Constr.* 25: 215-240.
- Li X, Ling T, Mo K (2020) Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete - A review. *Constr. Build. Mat.* 240: 117869.
- Li Y, Zhang S, Wang R, Dan F (2019) Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete - A comprehensive review. *Constr. Build. Mat.* 225: 1183-1201.
- Lozano A, Hermoso M, Martínez C, Rojas J (2018) Comparative study on the environmental impact of traditional clay bricks mixed with organic waste using life cycle analysis. *Sustainability* 10: 2917-2934.
- Martínez W, Torres AA, Alonso EM, Chávez HL, Hernández H, Lara C, Martínez W, Pérez JT, Bedolla JA, González FM (2015) Concreto reciclado: Una revisión. *Rev. Alconpat.* 5: 235-248.
- Mattsson K, Hansson LA, Cedervall T (2015) Nanoplastics in the aquatic environment. *Environ. Sci.: Proc. Impacts* 17: 1712-1721.
- Mendis AS, Al-Deen S, Ashraf M (2017) Behaviour of similar strength crumbed rubber concrete (CRC) mixes with different mix proportions. *Constr. Build. Mat.* 137: 354-366.
- Mohajerani A, Ukwatta A, Setunge S (2018) Fired clay bricks incorporating biosolids: life cycle benchmarking. *J. Mat. Civil Eng.* 30: 2308.
- Mohammed A, Abdul B (2019) Employment the plastic waste to produce the light-weight concrete. *Energy Procedia* 157: 30-38.
- Moon D, Sagisaka M, Tahara K, Tsukahara K (2017) Progress towards sustainable production: environmental economic, and social assessments of the cellulose nanofiber production process. *Sustainability* 9: 2368-2384.
- Mustafa M, Hanafi I, Mahmoud R, Tayeh BA (2019) Effect of partial replacement of sand by plastic waste on impact resistance of concrete: experiment and simulation. *Structures* 20: 519-526.

- Muthadhi A, Mohamed A, Madivarma R, Sathesh J, Raghavarman R (2017) Experimental investigations on concrete with E-plastic waste. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 8: 50-54.
- Nadimalla A, Masjuki SA, Saad AB, Ismail KB, Ali MB (2019) Polyethylene terephthalate (PET) bottles waste as fine aggregate in concrete. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 8: 1177-1180.
- Nakhai AB, Alhumoud J (2020) Properties of concrete containing scrap (recycled) tire-rubber. *J. Eng. Appl. Sci.* 15: 653-658.
- Nazer A, Honores A, Chulak P, Pavez O (2019) Hormigón sustentable basado en fibras de neumáticos fuera de uso. *Rev. Int. Contamin. Ambient.* 35: 723-729.
- Nematzadeh M, Shahmansouri AA, Fakoor M (2020) Post-fire compressive strength of recycled PET aggregate concrete reinforced with steel fibers: Optimization and prediction via RSM and GEP. *Constr. Build. Mat.* 252: 119057.
- Nili M, Biglarijoo N, Hosseinian S, Ahmadi S (2014) Disposing waste demolition in concrete as aggregate replacement. *Int. J. Mat. I:* 105-110.
- Özbay E, Erdermir M, Durmus H (2016) Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties - A review. *Constr. Build. Mat.* 105: 423-434.
- Paine KA, Dhir RK, Moroney R, Kopasakis K (2002) Use of crumb rubber to achieve freeze/thaw resisting concrete. *Challenges Concrete. Constr.* 6: 485-498.
- Park Y, Abolmaali A, Mohammadagha M, Lee S (2015) Structural performance of dry-cast rubberized concrete pipes with steel and synthetic fibers. *Constr. Build. Mat.* 77: 218-226.
- Payá J, Monzó J, Borrachero MV, Tashima MM (2015) Reuse of aluminosilicate industrial waste materials in the production of alkali-activated concrete binders. In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Woodhead. Soewston, RU. pp. 487-518.
- Pedro D, Brito J, Veiga M (2013) Mortars made with fine granulate from shredded tires. *J. Mat. Civil Eng.* 25: 519-529.
- Peng T, Zhou S, Yuan Z, Ou X (2017) Life cycle greenhouse gas analysis of multiple vehicle fuel pathways in China. *Sustainability* 9: 2183-2207.
- Pereira LA, Castro JP (2011) Physical and mechanical behaviour of recycled PET fibre reinforced mortar. *Constr. Build. Mat.* 25: 1712-1717.
- Pešić N, Živanović S, Garcia R, Papastergiou P (2016) Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Constr. Build. Mat.* 115: 362-370.
- Peters E (2015) Thermoplastics, thermosets, and elastomers descriptions and properties. *Mat. Sci.:* 335-355
- Pittau F, Krause F, Lumia G, Habert G (2018) Fast-growing bio-based materials as an opportunity to store carbon in walls outside. *Build. Environ.* 129: 117-129.
- Poonyakan A, Rachakornkij M, Wecharatana M, Smittakorn W (2018) Potential use of plastic wastes for low thermal conductivity concrete. *Materials II:* 1938-1955.
- Rahmani E, Dehestani M, Beygi MH, Allahyari H, Nikbin IM (2013) On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Constr. Build. Mat.* 47: 1302-1308.
- Rai B, Rushad S, Bhavesh Kr, Duggal S (2012) Study of waste plastic mix concrete with plasticizer. *Int. Schol. Res. Not.* 2012: 469272.
- Saikia N, Brito J (2014) Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Constr. Build. Mat.* 52: 236-244.
- Shubbar S, Al-Shadeedi A (2017) Utilization of waste plastic bottles as fine aggregate in concrete. *Kufa J. Eng.* 8: 132-146.
- Si R, Guo S, Dai Q (2017) Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-Solution treated rubber particles. *Constr. Build. Mat.* 153: 496-505.
- Silva R, Brito J, Saikia N (2013) Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement Concrete Compos.* 35: 23-31.
- Sofi A (2016) Sustainable concrete with scrap tire rubber: an overview. *J. Chem. Pharm. Sci.* 9: 848-853.
- Sofi A (2018) Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete a review. *Ain Shams Eng. J.* 9: 2691-2700.
- Sposito FA, Higuti RT, Tashima MM, Akasaki JL, Melges JL, Assunção CC, Bortoletta M, Silva RG, Fioriti CF (2020) Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on portland cement/hydrated lime. *J. Build. Eng.* 32: 101506.
- Tafheem Z, Islam R, Esharhullah MD, Alam SM, Islam MD (2018) Experimental investigation on the properties of concrete containing post-consumer plastic waste as coarse aggregate replacement. *J. Mat. Eng. Struct.* 5: 23-31.
- Thakur G, Asalam M, Mohammed El (2020) Energy efficient building envelope using waste PET in concrete. *MATEC Web Conf.* 307: 01022.
- Thomas B, Gupta R (2016) Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *J. Cleaner Prod.* 113: 86-92.
- Venitez J, Córdoba Y, Mena K, Arbelaez O (2020) Mechanical properties of concrete modified with recycled marine plastic as a replacement for fine aggregates. *Polytech. Magaz.* 16: 77-84.
- Wang R, Meyer C (2012) Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement Concrete Compos.* 34: 975-981.
- Wang X, Yu R, Shui Z, Song Q, Zhang Z (2017) Mix design and characteristics evaluation of an eco-friendly ultra-high performance concrete incorporating recycled coral based materials. *J. Cleaner Prod.* 165: 70-80.
- Wasan I, Khalaf K (2017) Eco-friendly concrete containing pet plastic waste aggregate. *Diyala J. Eng. Sci.* 10: 92-105.
- Yang S, Yue X, Liu X, Tong Y (2015) Properties of self-compacting lightweight concrete containing recycled plastic particles. *Constr. Build. Mat.* 84: 444-453.
- Youssif O, Hassanli R, Mills JE (2017) Mechanical performance of FRP-confined and unconfined crumb rubber concrete containing high rubber content. *J. Build. Eng.* 11: 115-126.

SUSTAINABLE USE OF POLYMERIC WASTE AS AGGREGATES OF CONCRETE: A REVIEW

Natalia Fuentes, Katerin Jiménez, Ricard Otero Añez and Wilfrido Uzuriaga

SUMMARY

Polymeric waste reduces the consumption of raw materials in the construction industry, improving economic efficiency and creating products that are environmentally sustainable over time. The replacement of stone aggregates makes waste an ecological solution to environmental pollution problems, as an alternative to recycling and recovery, and in recent decades innovations in the production of ecological concrete have taken place. The present review presents the most important analyses in the partial replacement of stone aggregates by non-biodegradable polymer by-products from other industrial processes. To understand the

challenges and trade-offs of the sustainable use in the fresh and hardened properties of concrete and provide an overview of the technical feasibility of recycling to close its cycle, the most recent literature was analyzed. The results show an inversely proportional relationship between the replacement volume and the compressive strength, a reduced weight due to the light nature of the residues, greater flexibility and adjustment capacity, and better thermal and electrical insulation properties, as well as low production costs, creating a new value chain while minimizing the negative impact of residual polymers on the environment.

APROVEITAMENTO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS POLIMÉRICOS COMO AGREGADOS DO CONCRETO: UMA REVISÃO

Natalia Fuentes, Katerin Jiménez, Ricard Otero Añez e Wilfrido Uzuriaga

RESUMO

Os resíduos poliméricos reduzem o consumo de matérias-primas na indústria da construção, melhorando a eficiência econômica e criando produtos ecológicos sustentáveis ao longo do tempo. A substituição dos agregados pétreos converte os resíduos em uma solução ecológica para os problemas de contaminação ambiental, como uma alternativa de reciclagem e valorização, e nas últimas décadas tem se inovado na produção de concretos ecológicos. A presente revisão aborda as análises mais importantes na substituição parcial de agregados pétreos por subprodutos poliméricos não biodegradáveis de outros processos industriais. Para compreender os desafios e custos-benefícios de

seu aproveitamento sustentável nas propriedades frescas e endurecidas do concreto e proporcionar uma visão geral da viabilidade técnica da reciclagem para fechar seu ciclo, foi analisada a literatura mais recente. Os resultados evidenciam uma relação inversamente proporcional entre a mudança de volume e a resistência à compressão, redução do peso ocasionada pela natureza leve dos resíduos, maior flexibilidade e adaptabilidade, melhores propriedades de isolamento térmico e elétrico, bem como baixos custos de produção, criando uma nova cadeia de valor, que por sua vez minimiza o efeito negativo dos polímeros residuais sobre o meio ambiente.