

Valorización de Poliestireno Expandido Fuera de Especificación en Concreto Ligero: Un Caso de Aplicación de Economía Circular

Ana Beatriz Morales-Cepeda ^{1,*}, Patricia Mendoza-Guzmán ², Angela Beatriz Huerta-Morales ³, David Victoria Valenzuela ⁴, Homero Salas Papayanopolos ⁵

¹ Centro de Petroquímica Secundaria, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero/Tecnológico Nacional de México, Ciudad Madero, Tamaulipas, Mexico

² Departamento de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero/Tecnológico Nacional de México, Ciudad Madero, Tamaulipas

³ Instituto De Estudios Superiores de Tamaulipas, Universidad Anáhuac, División de Ciencias Económico Administrativas, Altamira, Tamaulipas, México.

⁴ Centro de Petroquímica Secundaria, Instituto Tecnológico de Ciudad Madero/Tecnológico Nacional de México, Ciudad Madero, Tamaulipas, Mexico

⁵ Styropek S.A. de C.V. Altamira, Boulevard de los Ríos Km. 1+880, Altamira Tamaulipas, México

* Autor de correspondencia: ana.mc@cdmadero.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Economía Circular)

Recibido: 21 de marzo de 2026

Aceptado: 8 de junio de 2026

Publicado: 12 de junio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.695>

Resumen: Este artículo presenta un enfoque de economía circular que utiliza perlas de poliestireno expandido (EPS) fuera de especificación en la fabricación de concreto ligero, con el objetivo de redirigir este residuo industrial hacia una aplicación con valor tecnológico y ambiental. Se evaluaron cinco formulaciones con 0, 5, 10, 15 y 25 % en peso de EPS como sustituto parcial de arena fina. Los especímenes cilíndricos se caracterizaron mecánicamente mediante la resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M-18), el contenido de aire (ASTM C231-09a) y el asentamiento (ASTM C143) a los 3, 7, 14 y 28 días de curado. Los resultados muestran que la formulación con 10 % en peso de EPS (C10) alcanzó 33.85 MPa a los 28 días, lo que representa un incremento del 38 % respecto al concreto de referencia (CO: 24.52 MPa) y supera en 38.2 % el valor mínimo normativo de 24.5 MPa para el concreto ligero estructural. El análisis de varianza unidireccional (ANOVA, $p < 0.001$) y la prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD, $\alpha = 0.05$) confirmaron diferencias significativas entre las formulaciones. La formulación C10 mantuvo la trabajabilidad del concreto fresco (asentamiento de 21.5 cm) sin comprometer la plasticidad ni la cohesión. Se realizó un análisis de costos unitarios conforme al Reglamento de Obras Públicas (Gobierno de México), que mostró una reducción del 2 % en el costo directo respecto del concreto convencional. La huella de carbono estimada mediante una evaluación de ciclo de vida simplificada (ISO 14040:2006) se redujo de 250 kg CO₂ eq/m³ (concreto ligero convencional) a 80–150 kg CO₂ eq/m³ en la formulación C10. Los hallazgos demuestran que el EPS fuera de especificación puede incorporarse a la cadena de valor de la economía circular en el sector de la construcción, en consonancia con la Ley General de Economía Circular de México (2021).

Palabras clave: poliestireno expandido, concreto ligero, economía circular

Valorization of Out-Of-Spec Expanded Polystyrene in Lightweight Concrete: A Case of Circular Economy Application

Abstract: This article presents a circular economy approach that uses off-specification expanded polystyrene (EPS) beads in lightweight concrete production, aiming to redirect this industrial waste toward an application with technological and environmental value. Five formulations with 0, 5, 10, 15, and 25 wt.% EPS as a partial fine-aggregate replacement were evaluated. Cylindrical specimens were mechanically characterized using compressive strength (ASTM C39/C39M-18), air content (ASTM C231-09a), and slump (ASTM C143) at 3, 7, 14, and 28 curing days. Results show that the 10 wt.% EPS formulation (C10) reached 33.85 MPa at 28 days, representing a 38% increase over the reference mix (CO: 24.52 MPa) and exceeding by 38.2% the normative minimum of 24.5 MPa for structural lightweight concrete. One-way ANOVA ($p < 0.001$) and Tukey's HSD post-hoc test ($\alpha = 0.05$) confirmed statistically significant differences among formulations. Formulation C10 preserved fresh-concrete workability (slump 21.5 cm) without compromising plasticity or cohesion. A unit-cost analysis conducted under Mexico's Public Works Regulation showed a 2% reduction in direct cost compared to conventional concrete. A simplified life-cycle assessment (ISO 14040:2006) estimated a carbon footprint reduction from 250 kg CO₂ eq/m³ (conventional lightweight concrete) to 80–150 kg CO₂ eq/m³ for C10. The findings demonstrate that off-specification EPS can be integrated into the circular economy value chain in the construction sector, in alignment with Mexico's General Circular Economy Law (2021).

Keywords: expanded polystyrene, lightweight concrete, circular economy

Introducción

El modelo económico lineal de producción y consumo —«extraer, fabricar, desechar»— es insostenible a largo plazo. Los compromisos del Acuerdo de París (2015) establecen tres objetivos para 2030: (1) limitar el incremento de la temperatura a 1.5 °C respecto a los niveles preindustriales, (2) fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación al cambio climático, y (3) alinear las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) con dichos objetivos. En este contexto, México asumió compromisos específicos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Gaceta Parlamentaria, 2021).

La economía circular (EC) representa una alternativa sistémica al modelo lineal. De acuerdo con la Fundación Ellen MacArthur (2020), la EC puede contribuir a reducir las emisiones no dependientes del sistema energético hasta en un 45 % mediante la optimización de los flujos de materiales y la eliminación de residuos. En México, la Ley General de Economía Circular, aprobada en noviembre de 2021 (Gaceta Parlamentaria, 2021), establece cuatro principios rectores: (1) preservar el capital natural, (2) optimizar el uso de recursos a lo largo del ciclo de vida, (3) promover la eficiencia del sistema, y (4) fomentar sinergias entre los actores involucrados.

El poliestireno expandido (EPS) es uno de los polímeros de mayor consumo en sectores como el embalaje, la refrigeración y la construcción. Su baja densidad, resistencia térmica y bajo costo lo hacen versátil; sin embargo, su gestión como residuo representa un reto ambiental significativo. Las perlas de EPS fuera de especificación —aquellas que no cumplen los estándares dimensionales de venta o que se generan como barridos de silos— contienen n-pentano residual y deben gestionarse como residuos peligrosos conforme a la normatividad mexicana (SEMARNAT, 2020). En 2019, únicamente 12 empresas en México reportaron el uso de residuos peligrosos industriales como insumo en sus procesos productivos, lo que evidencia la escasa integración de la EC en el sector industrial nacional.

Las opciones actuales para el EPS fuera de especificación incluyen: (a) confinamiento en relleno sanitario, con tiempos de degradación de cientos de años y riesgo de contaminación del suelo y de los acuíferos; (b) pirólisis para la recuperación de gas de síntesis; y (c) reciclaje mecánico, viable solo para material no preexpandido. La incorporación de EPS en mezclas de cemento ha sido documentada en la literatura como sustituto parcial de agregados finos (Lapyote *et al.*, 2022; Ramli *et al.*, 2019), aunque persisten vacíos en la integración de análisis económicos y de ciclo de vida bajo un marco explícito de EC.

Los objetivos específicos del estudio son: (1) caracterizar, física y mecánicamente, cinco formulaciones de concreto ligero con distintos porcentajes de EPS fuera de especificación, (2) determinar la formulación óptima mediante un análisis estadístico ANOVA + Tukey, (3) cuantificar el beneficio económico y ambiental de la formulación óptima, y (4) proponer un esquema de integración de la academia en la cadena de valor de la EC.

Materiales y Métodos

Materiales

Las perlas de EPS fuera de especificación fueron proporcionadas por Styropek S.A. de C.V. (Altamira, Tamaulipas, México), el principal productor nacional de EPS. El material incluía dos tipos de rechazo: perlas fuera de rango dimensional de venta (diámetro promedio de 2.3 ± 0.1 mm) y barridos de silo. El n-pentano residual fue eliminado mediante aireación forzada y exposición solar durante 336 h (14 días), conforme a un procedimiento interno validado. La ausencia de pentano residual se verificó mediante la expansión de 5 muestras en la estufa a 150 °C, mediante métodos gravimétricos y visuales, a fin de confirmar su presencia o ausencia. Antes de la preparación de las mezclas, el contenido residual fue < 50 ppm (v/v), considerado seguro para su uso en la construcción. Para las mezclas de concreto se utilizaron: cemento Portland ordinario tipo I (CPC 30, NMX-C-414), arena silíceo de río clasificada (módulo de finura 2.8), grava caliza 3/8" (ASTM C33/C33M-18) (ASTM International, 2018c), agua potable y aditivo inclusor de aire (Sika AER, dosis según la ficha técnica). La relación agua/cemento (a/c) se mantuvo constante en 0.50 para todas las formulaciones.

Diseño de mezclas y preparación de especímenes

Las mezclas se diseñaron conforme a los requisitos del American Concrete Institute (ACI 211.1) para un concreto con una resistencia nominal de 24.5 MPa. El EPS fuera de especificación sustituyó en peso a la arena fina en proporciones de 0 % (C0), 5 % (C5), 10 % (C10), 15 % (C15) y 25 % (C25). Se prepararon especímenes cilíndricos de 100 mm × 200 mm (ASTM C39/C39M-18) para cada formulación, en triplicado para cada tiempo de curado (3, 7, 14 y 28 días), para un total de 60 cilindros. Los especímenes se curaron en agua a temperatura controlada (23 ± 2 °C) durante los periodos indicados; previamente a los ensayos se secaron al ambiente durante 24 h.

Métodos de caracterización

Resistencia a la compresión (ASTM C39/C39M-18): se empleó una máquina de ensayo universal (UTM M-D JGG, con capacidad de 200 kN) y se aplicó una carga continua hasta la fractura. Los resultados se expresan como el promedio de tres réplicas \pm desviación estándar (Figura1) (ASTM International, 2018c).

Determinación de asentamiento (ASTM C143): cono de Abrams estándar ($h = 300$ mm, \varnothing base = 200 mm, \varnothing superior = 100 mm); compactación en tres capas, con 25 golpes de varilla de 16 mm. Realizada por duplicado en concreto fresco (ASTM International, 2018a).

Determinación de contenido de aire (ASTM C231-09a): método de presión con medidor de aire tipo B. La caída de presión se correlaciona con el porcentaje de aire atrapado en la pasta, de acuerdo con la ley de Boyle (ASTM International, 2018b).

Análisis óptico: microscopía de luz reflejada (Zeiss - AXIO) sobre secciones transversales pulidas de cilindros curados para visualizar la distribución y la geometría de las perlas de EPS en la matriz de cemento.

Análisis estadístico

Los datos de resistencia a la compresión a los 28 días se analizaron mediante ANOVA unidireccional (factor: porcentaje de EPS) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, utilizando el software Minitab 21. La homocedasticidad se verificó mediante la prueba de Levene y la normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Dado que el ANOVA resultó significativo, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD) para identificar los pares con diferencias estadísticamente significativas.

Análisis de costos

Se realizó un análisis de costo unitario (costos directos e indirectos) del concreto ligero in situ de 24.5 MPa con aditivo acelerante para la zona económica norte de México. Los precios unitarios de los materiales corresponden a cotizaciones del primer trimestre de 2024. El cálculo se efectuó conforme al Reglamento de la Ley de Obras Públicas y de los Servicios Relacionados con las mismas del Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. La base de presupuesto es de 1 m³ de concreto colocado.

Evaluación de huella de carbono

Se realizó una evaluación de ciclo de vida simplificada (ACV) conforme a la norma ISO 14040:2006, con un alcance de la cuna a la puerta (cradle-to-gate). Los límites del sistema incluyen la extracción y transporte de materias primas, la fabricación de cemento y los

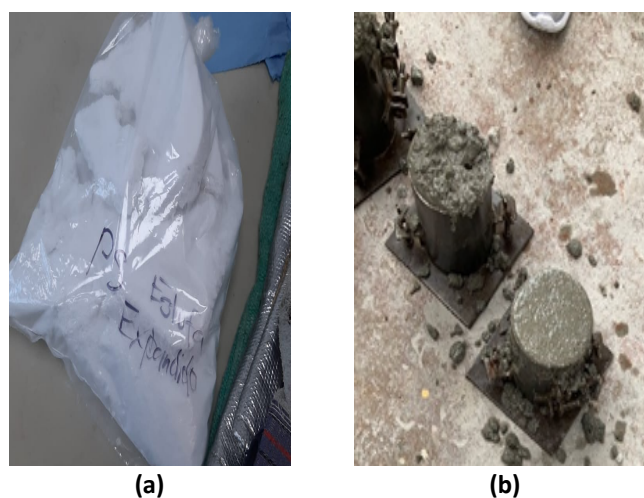


Figura 1. (a) Perlas de EPS fuera de especificación, (b) mezcla de concreto en cilindros para evaluación de compresión.

procesos de mezcla. Los factores de emisión para cemento Portland (0.83 kg CO₂/kg), arena (0.0048 kg CO₂/kg) y transporte (0.095 kg CO₂/ton-km) se tomaron de la base de datos Ecoinvent v3.9 y del reporte de la IEA (2020). Para el EPS fuera de especificación se asignó un factor de emisión de cero en el módulo de extracción (residuo industrial sin valor de mercado), conforme al principio de asignación por expansión del sistema descrito en ISO 14044:2006.

Resultados y Discusión

Caracterización del concreto

La Tabla 1 resume los resultados de asentamiento, contenido de aire y resistencia a la compresión de las cinco formulaciones evaluadas. El concreto de referencia (C0) presentó un asentamiento de 24.00 ± 0.10 cm, consistente con una mezcla plástica convencional. La incorporación de 5 % y 10 % de EPS (C5 y C10) redujo marginalmente el asentamiento (23.00 y 21.50 cm, respectivamente), sin comprometer la plasticidad ni la cohesión del concreto fresco, valores que se encuentran dentro del rango admisible de 15–25 cm para el concreto estructural. En contraste, las formulaciones C15 y C25 mostraron asentamientos de 12.00 y 13.00 cm, valores que indican una pérdida de trabajabilidad asociada a la naturaleza hidrofóbica del EPS a concentraciones elevadas (Ismail y Al-Hashmi, 2008).



Figura 2. Muestra de concreto con EPS.

El contenido de aire aumentó progresivamente con el porcentaje de EPS (0 % en C0, 4, 7, 9 y 12 % en C5, C10, C15 y C25, respectivamente). Los valores de C10 (7 %) se encuentran dentro del rango normativo para concreto ligero con inclusión de aire (5–8 %), lo que confirma que las perlas de EPS actúan como microincluyentes de aire de geometría esférica constante, a diferencia de otros polímeros con geometría irregular que comprometen la distribución de vacíos (Figura 2) (Liu *et al.*, 2019).

Tabla 1. Resumen de la caracterización del concreto ligero de 24.5MPa de resistencia de Compresión

Id	%EPS	Caída de asentamiento cm	Aire %	Compresión Días de experimento			
				3	7	14	28
C0	0	24.00±0.1	0	24.52 ±0.02	24.52 ± 0.04	24.52 ± 0.03	24.52 ± 0.02
C5	5	23.00±0.2	4	28.34±0.11	28.73 ± 0.25	31.00 ± 0.03	32.85 ± 0.04
C10	10	21.50±0.1	7	28.37±0.13	28.37 ± 0.10	31.50 ± 0.10	33.85 ± 0.35
C15	15	12.00±0.05	9	33.34±0.09	36.77 ± 0.08	40.40 ± 0.05	39.61 ± 0.15
C25	25	13.00±0.10	12	25.30±0.10	27.16 ±0.07	30.20 ± 0.04	28.63 ± 0.02

Nota: valores expresados como promedio ± desviación estándar de tres réplicas.

C0 = referencia (0 % EPS); C5, C10, C15, C25 = formulaciones con 5, 10, 15 y 25 % en peso de EPS fuera de especificación.

Resistencia a la compresión y análisis estadístico

La resistencia a la compresión a los 28 días presentó una tendencia no lineal en función del contenido de EPS. Las formulaciones C5, C10, C15 y C25 superaron la resistencia de C0 (24.52 MPa) en 32.85, 33.85, 39.61 y 28.6 %, respectivamente. La formulación C10 alcanzó 33.85 ± 0.35 MPa, cumpliendo con el requisito mínimo de 24.5 MPa y presentando un margen de 38.2 %. La formulación C15 alcanzó la mayor resistencia (39.61 MPa), pero su asentamiento comprometido (12.00 cm) la vuelve inviable para aplicaciones estructurales que requieren alta trabajabilidad.

El ANOVA unidireccional sobre los datos de resistencia a la compresión a 28 días (Tabla 2) confirmó diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($F [4,10] = 1\ 254$, $p < 0.001$). Las pruebas de Levene ($p = 0.412$) y de Shapiro-Wilk ($p = 0.183$) no rechazaron los supuestos de homocedasticidad y de normalidad, respectivamente. La prueba de Tukey HSD (Tabla 3) indica que C10 difiere significativamente de todas las demás formulaciones a $\alpha = 0.05$,

salvo la diferencia C10–C5 ($p = 0.042$), que requiere interpretación en el contexto de la trabajabilidad. Por tanto, C10 se confirma como la formulación óptima para el equilibrio entre resistencia y trabajabilidad.

Tabla 2. ANOVA unidireccional de la resistencia a la compresión a los 28 días (factor: % EPS)

Fuente de variación	SC	gl	CM	F cal	p
Entre grupos (%EPS)	388.45	4	97.11	1 254	< 0.001
Error (dentro de grupos)	1.16	10	0.116	—	—
Total	389.61	14	—	—	—

SC: suma de cuadrados; gl: grados de libertad; CM: cuadrado medio; F cal: estadístico F calculado.

Tabla 3. Comparaciones múltiples de Tukey HSD ($\alpha = 0.05$) para la resistencia a 28 días

Comparación	Diferencia media (MPa)	p ajustado	Interpretación	
C10 vs C0	33.85 – 24.52	9.33	< 0.001	Diferencia significativa ($p < 0.05$)
C10 vs C5	33.85 – 32.85	1.00	0.042	Diferencia significativa ($p < 0.05$)
C10 vs C15	33.85 – 39.61	-5.76	< 0.001	C15 mayor resistencia; trabajabilidad comprometida
C10 vs C25	33.85 – 28.63	5.22	< 0.001	C10 significativamente superior

Diferencias medias calculadas respecto del promedio de tres réplicas por formulación.

Estos resultados son consistentes con los reportados por Espindola-Flores *et al.* (2024) para concreto con R-PET (60 MPa a los 80 días, con incorporación del 5 % en peso y relación a/c de 0.40). Si bien la resistencia absoluta del concreto con R-PET es mayor, las condiciones experimentales difieren significativamente (tamaño de partícula de 0.25–0.45 mm vs. 2.3 mm; días de curado de 80 vs. 28; a/c de 0.40 vs. 0.50), por lo que la comparación directa debe interpretarse con cautela. Una ventaja diferencial del EPS frente al R-PET es su inercia química: las perlas de EPS no participan en reacciones álcali-sílice ni álcali-carbonato (Lapyote *et al.*, 2022), lo que permite incorporar un porcentaje mayor sin necesidad de agentes de acoplamiento.

Impacto económico y ambiental

El análisis de costo unitario (Figura 3) indica un costo de 270.88 USD/m³ para la formulación C10, frente a 276.42 USD/m³ para el concreto convencional (C0), lo que representa una reducción del 2.0 % en el costo directo. Esta reducción se origina principalmente en la menor cantidad de arena requerida (-8.4 kg/m³) y en la eliminación del costo de disposición del EPS como residuo peligroso (estimado en 0.45 USD/kg por parte de Styropek S.A. de C.V., comunicación personal, 2024). El margen de ganancia sobre los costos directos e indirectos aumenta de 240.10 a 267.23 USD/m³, lo que representa un diferencial del 11.3 %.

El ACV simplificado (Tabla 4) estima una reducción de la huella de carbono del 40–68 % al sustituir la arena por EPS en la formulación C10 (de 250 a 80–150 kg CO₂ eq/m³). El amplio rango refleja la incertidumbre en el factor de emisión de transporte del EPS (distancia Altamira–punto de uso: 0–200 km) y en el escenario contrafactual de disposición final del EPS (confinamiento vs. pirólisis). Estos resultados son coherentes con los reportados por Habert *et al.* (2020) para estrategias de reducción de clínker en concreto sostenible.

Tabla 4. Huella de carbono por tipo de concreto (ACV, cuna a puerta, ISO 14040:2006)

Tipo de concreto	Huella de carbono (kg CO ₂ eq/m ³)
Concreto ligero convencional	250
Concreto ligero con EPS (10% p/p)	80 – 150 *

* Rango asociado a la variabilidad de la distancia de transporte (0–200 km) y al escenario de disposición del EPS. Factor de emisión EPS fuera de especificación = 0 kg CO₂/kg (residuo sin asignación).

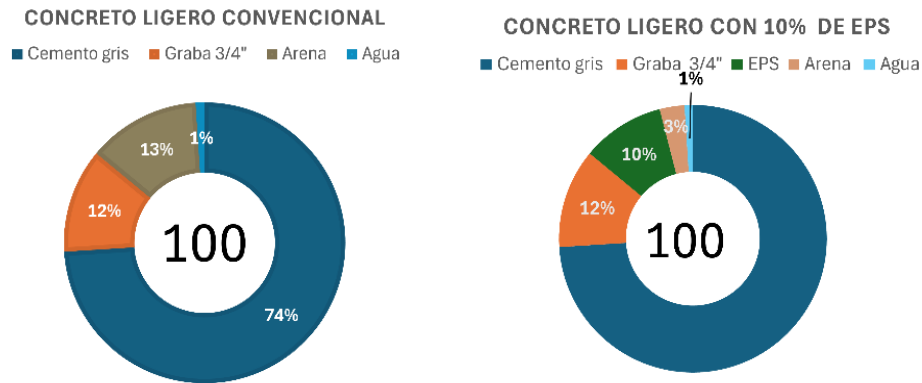


Figura 3. Análisis de costos del concreto ligero convencional y concreto ligero con 10% de EPS.

Integración de la academia en la cadena de valor de la economía circular

Este artículo constituye un caso de sinergia entre la industria y la academia, orientado a la implementación de la EC. La Figura 4 propone un esquema de cadena de suministro circular que incorpora a la academia como actor periódico de I+D+i, sin constituirse en proveedor ni en cliente permanente. Este rol diferenciado es coherente con el análisis desde la perspectiva de Ogunmakinde (2024), quien sostiene que la transición hacia la EC requiere una colaboración multisectorial entre la industria y el mercado.

La academia aporta: (a) metodologías de caracterización validadas, (b) análisis estadístico riguroso, (c) evaluaciones de ciclo de vida y (d) documentación científica con visibilidad internacional. En contraparte, la industria provee materiales reales fuera de especificación, infraestructura de prueba a escala piloto y contexto de mercado. Esta sinergia es difícil de replicar en un modelo lineal, en el que los residuos industriales se consideran únicamente un costo.

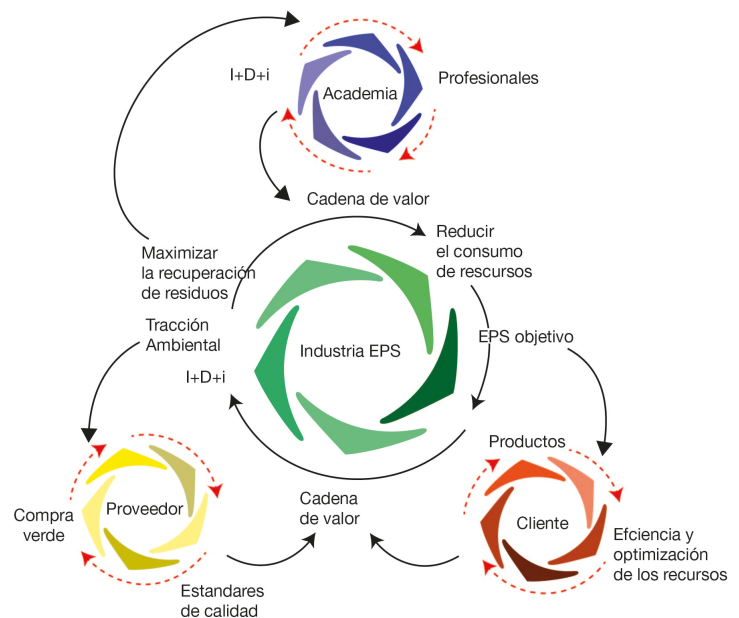


Figura 4. Propuesta para la inclusión de la academia en la cadena de valor de la economía circular (EC).

Este artículo contribuye a la economía circular en el ámbito del EPS, un residuo de baja densidad que ocupa gran espacio y contamina. Cabe señalar que el manejo del concreto demolido es otro tema de interés que la industria del concreto está estudiando.

Conclusiones

La incorporación de 10 % en peso de perlas de EPS fuera de especificación, como sustituto de arena en concreto ligero, produce una resistencia a la compresión de 33.85 ± 0.35 MPa a los 28 días, un incremento del 38 % respecto a la formulación de referencia (24.52 MPa) y 38.2 % por encima del mínimo normativo de 24.5 MPa. El análisis estadístico ANOVA + Tukey HSD identifica a C10 (10 % EPS) como la formulación óptima, con diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) respecto a todas las demás formulaciones; la formulación C15 presenta una mayor resistencia absoluta (39.61 MPa), pero su baja trabajabilidad (asentamiento de 12 cm) la descarta para aplicaciones estructurales convencionales. En términos económicos y ambientales, la formulación C10 reduce el costo directo en un 2,0 % y la huella de carbono en un 40–68 % respecto al concreto ligero convencional (ACV, ISO 14040:2006). Asimismo, la incorporación de la academia en la cadena de valor de la EC, como actor de I+D+i, permite transformar residuos industriales (EPS fuera de

especificación) en insumos de valor tecnológico, reducir la explotación de recursos naturales finitos (arena de río) y generar evidencia científica publicable que amplíe el alcance de las políticas de economía circular en México.

Los resultados de este estudio respaldan la viabilidad técnica, económica y ambiental del EPS fuera de especificación como insumo para el concreto ligero en el marco de la Ley General de Economía Circular (2021). Se recomienda escalar la evaluación a nivel piloto y ampliar el análisis de ciclo de vida con datos primarios de inventario.

Agradecimientos y financiamiento: Agradecemos el apoyo de Styropek S.A. de C.V. y Concretera Tancol del grupo Velas S.A. de C.V. Este proyecto está registrado en el Tecnológico Nacional de México bajo el CDMA-PYR-2024-1954.

Bibliografía

- ASTM International. (2018a). *ASTM C143: Standard specification for concrete determination of slump*.
- ASTM International. (2018b). *ASTM C231-09a: Standard specification for concrete determination for air content*.
- ASTM International. (2018c). *ASTM C33/C33M-18: Standard specification for concrete aggregates*.
- Cámara de Diputados del Gobierno de México. (2021). Minuta con proyecto de decreto por el que expide la Ley General de Economía Circular. *Gaceta Parlamentaria*, 25.
- Ellen MacArthur Foundation. (2020). *Financing the circular economy: Capturing the opportunity*. Ellen MacArthur Foundation.
- Espindola-Flores, A. C., Luna-Jimenez, M. A., Onofrale-Bustamante, E., & Morales-Cepeda, A. B. (2024). Study of the mechanical and electrochemical performance of structural concrete incorporating recycled polyethylene terephthalate as a partial fine aggregate replacement. *Recycling*, 9, 51. <https://doi.org/10.3390/recycling9030051>
- Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinose, M., & Lenoir, T. (2020). Reducing environmental impact by increasing the sustainability of concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 9(1), 3–15. <https://doi.org/10.1080/21650373.2019.1685590>
- Ogunmakinde, O. E. (2024). The circular economy in the construction industry: From research to practice. *Journal of Circular Economy*, 2(3), 1–6. <https://doi.org/10.55845/DHNN3429>
- Prasittisopin, L., Termkhajornkit, P., & Kim, Y. H. (2022). Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132919. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919>
- Ramli Sulong, N. H., Mustapa, S. A. S., & Abdul Rashid, M. K. (2019). Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 136, 47529. <https://doi.org/10.1002/app.47529>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos* (1a ed.).