

Concreto Sostenible: Aprovechamiento de residuos de cantera como material cementante

Sustainable concrete: Use of quarry waste as cementitious material

Javier Medianero¹, Jorge Ortega¹, Moisés Pinilla¹, Ernesto Martínez^{*2}, Karina García², Rita D. Rodríguez G.²

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Panamá

²Universidad Tecnológica de Panamá, Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación Propuesta de Geoparque Puente de las Américas, Panamá

Fecha de recepción: 31 de octubre de 2025. **Fecha de aceptación:** 12 de enero de 2026.

***Autor de correspondencia:** ernesto.martinez@utp.ac.pa

Resumen. Este estudio analiza alternativas y estrategias para reducir el impacto ambiental y socioeconómico de la producción de cemento mediante la sustitución parcial del cemento Portland evaluando el uso de dos subproductos disponibles (puzolana natural y desechos de tina) desechados por la cantera Corona, en San Carlos (Panamá). El objetivo principal fue evaluar la viabilidad técnica de esta sustitución, garantizando el desempeño mecánico-estructural del concreto, reduciendo las emisiones de CO₂ y aprovechando recursos geológicos locales disponibles. Los subproductos mostraron alta finura y contenidos de sílice del 88%–91%, que indica buena reactividad puzolánica. En mezclas con 5%, 12.5% y 20 % de reemplazo, el desecho de tina alcanzó 3637.55 psi a los 28 días, superando a la mezcla control, mientras que la puzolana natural, aunque con menor resistencia inicial, logró 2727.43 psi a los 28 días con 20% de reemplazo, mostrando aumento de resistencia a largo plazo. La Cantera cuenta con 26,800 toneladas de material utilizable permitiendo evitar la emisión de aproximadamente 24,120 toneladas de CO₂, representando una reducción en la huella ambiental del concreto. Los subproductos mejoran la compactidad y durabilidad de las mezclas, y pueden integrarse a procesos industriales sin requerir ajustes técnicos relevantes. Se recomienda incluir ensayos de durabilidad a largo plazo como permeabilidad al cloruro, absorción capilar, carbonatación y ataque por sulfatos, para confirmar su comportamiento. Esta solución técnica, ambiental y económicamente viable impulsa una construcción más sostenible en Panamá, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible: ODS 12 (producción y consumo responsables) y ODS 9 (industria, innovación e infraestructura).

Palabras clave. Desecho, dióxido de carbono, durabilidad, economía circular, resistencia, sostenible, viable.

Abstract. This study analyzes alternatives and strategies to reduce the environmental and socioeconomic impact of cement production through the partial substitution of Portland cement by evaluating the use of two available by-products (natural pozzolan and sludge waste) extracted from the Corona quarry in San Carlos (Panama). The main objective was to assess the technical feasibility of this substitution, ensuring the mechanical-structural performance of the concrete, reducing CO₂ emissions, and leveraging available local geological resources. The by-products showed high fineness and silica contents of 88%–91%, indicating good pozzolanic reactivity. In mixtures with 5%, 12.5%, and 20% replacement, the sludge waste reached 3637.55 psi at 28 days, surpassing the control mix, while the natural pozzolan, although with lower initial strength, achieved 2727.43 psi at 28 days with 20% replacement, showing increased long-term strength. The quarry has 26,800 tons of usable material, allowing the avoidance of approximately 24,120 tons of CO₂ emissions, representing a reduction in the environmental footprint of concrete. By-products improve the compactness and durability of the mixtures and can be integrated into industrial processes without requiring significant technical adjustments. It is recommended to include long-term durability tests such as chloride permeability, capillary absorption, carbonation, and sulfate attack to confirm their performance. This technically, environmentally, and economically viable solution promotes more sustainable construction in Panama, aligned with the Sustainable Development Goals: ODS 12 (Responsible consumption and production) and ODS 9 (Industry, innovation and infrastructure).

Keywords. Waste, carbon dioxide, durability, circular economy, resilience, sustainable, viable.

1. Introducción

En las últimas décadas, el impacto ambiental generado por la industria de la construcción ha despertado gran preocupación, especialmente por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) derivadas de la producción de cemento Portland. Este proceso libera grandes cantidades de CO₂ debido a la calcinación de la piedra caliza y al elevado consumo energético involucrado [1]. La producción de cemento es responsable aproximadamente del 6% al 7% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂), situándose como la tercera mayor fuente de emisiones industriales a nivel mundial que contribuye al calentamiento global y al cambio climático [2].

El cemento en Panamá se utiliza en infraestructuras, viviendas y en todo tipo de construcción en general. Su proceso de fabricación ha evolucionado debido a los avances tecnológicos. Sin embargo, los efectos ambientales asociados siguen siendo significativos [3].

Una de las estrategias más viables para lograr este objetivo es la incorporación de materiales cementantes suplementarios, como la puzolana. Este es un material de origen natural o artificial con propiedades ricas en sílice o compuestos silicoaluminosos que, en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento Portland, formando compuestos con capacidad cementante, como el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) [4].

El empleo de puzolana en la mezcla de concreto proporciona diversos beneficios. Entre estos, destaca la mejora en la durabilidad del concreto, dado que reduce la porosidad y la permeabilidad del material endurecido, lo que dificulta la penetración de agentes agresivos como sulfatos y cloruros [5]. Además, contribuye a disminuir la temperatura de hidratación, lo cual resulta beneficioso en obras de gran volumen, y minimiza la aparición de fenómenos expansivos como la reacción álcali-sílice [6].

Ante este desafío, surge el concepto de concreto sostenible, una alternativa orientada a reducir el impacto ambiental sin comprometer el desempeño estructural que apoya las metas 12.2, 12.4, 12.5 y 13.2 de los Objetivos de Desarrollo Sostenibles ODS12 y sus secundarios como el ODS9 Y ODS13 [7] y a las investigaciones del Proyecto Geoparque Puente de Las Américas donde se promueve alternativas y estrategias vinculadas a la sostenibilidad y conservación ambiental.

El objetivo de esta investigación consiste en Evaluar la viabilidad técnica de sustituir parcialmente el cemento Portland en mezclas de concreto mediante la incorporación de puzolana natural y desechos de tina, garantizando el desempeño mecánico-estructural del material, promoviendo una alternativa constructiva más sostenible que reduzca las emisiones de CO₂ y aprovechando recursos locales disponibles.

1.1 Antecedentes

El cemento, como material de construcción, tiene sus orígenes en la antigüedad. Las civilizaciones egipcias, griega y romana ya empleaban mezclas de cal y cenizas volcánicas para unir piedras y fabricar estructuras duraderas. Los romanos, por ejemplo, desarrollaron un tipo de cemento hidráulico al mezclar cal con puzolana (ceniza volcánica), lo que les permitió construir acueductos, templos y el famoso Panteón de Roma [8].

Durante la Edad Media, el conocimiento sobre estas técnicas se perdió en gran parte en Europa y no fue hasta el siglo XVIII que se retomaron los estudios sobre cementos. En 1824, Joseph Aspdin patentó el cemento Portland, llamado así por su similitud con la piedra de Portland, marcando el inicio de la era moderna de este material, hoy uno de los más utilizados en la construcción [8].

En Panamá, los desechos de tina representan un problema ambiental debido a la gran cantidad de residuos no aprovechados. Además, el alto consumo de cemento implica una intensa extracción de materias primas y una considerable contaminación asociada a su producción. El país cuenta con numerosas canteras de materiales cementantes, como cemento, puzolana natural y desechos de tina. Para este estudio, el material se recolectó en la cantera “Corona”, en el distrito de San Carlos, provincia de Panamá Oeste (8°30'N, 79°58'O).

Se trata de un depósito terrestre de origen volcánicosedimentario, cuya litología predominante está compuesta por tobas volcánicas, cenizas compactadas, puzolana natural y materiales arcillosos con características cementantes [9]. Desde el punto de vista geotécnico, el yacimiento exhibe una alta reactividad puzolánica, granulometría variable y buena trabajabilidad en mezclas con cal o cemento Portland. Sus principales aplicaciones incluyen la fabricación de suelocemento, mezcla para concreto de bajo costo, estabilización de suelos y elaboración de bloques prensados [10].

2. Materiales y métodos

Se aplicó un enfoque experimental-laboratorial combinado con análisis geoespacial, se realizó revisión bibliográfica, trabajo de campo, diseño y ensayos de la mezclas y fotogrametría satelital para cuantificar el volumen disponible y proyectar la reducción de CO₂.

Los materiales utilizados fueron: puzolana natural, desecho de tina, cemento GU (uso general), arena, grava, FOURNEY, VFD automatic, horno, tamiz N°200 y equipo de ensayo de cilindro

A continuación, se describen los métodos y ensayos en la investigación fueron los siguientes.

2.1 Revisión bibliográfica

Se revisó literatura especializada como normas técnicas de organismos como ASTM y ACI, artículos científicos y tesis para sustentar la viabilidad del reemplazo parcial del cemento por materiales alternativos como puzolana natural y desechos de tina, como contribuye a disminuir las emisiones de CO₂. Esta etapa permitió comprender el comportamiento fisicoquímico de estos materiales, su influencia en las propiedades mecánicas del concreto, y criterios de dosificación utilizados en investigaciones previas. La información oriento al diseño experimental y la interpretación de los resultados de ensayos de laboratorios.

2.2 Trabajo de Campo

Las muestras se recolectaron en zonas representativas del residuo generado durante la extracción de roca. Las muestras fueron extraídas manualmente con el uso de una pala y depositadas en bolsas plásticas limpias y resistentes con el fin de evitar la contaminación cruzada. Se trasladaron las muestras al laboratorio para su posterior análisis y caracterización.

2.3 Ensayos

- Porcentaje de Humedad. ASTM C556 Conforme a la ASTM C556 (Método de ensayo estándar para el contenido total de humedad evaporable en agregados por secado). Se tomaron muestras de cada material húmedo y, posteriormente, se secaron en un horno a temperatura constante de 100 C° por 24 horas. Los porcentajes de masas se calcularon a partir de la diferencia entre la masa húmeda y la seca [11].
- Granulometría ASTM C136/C136M: la distribución de tamaño de partícula de la puzolana natural y los desechos de tina se determinó mediante el análisis granulométrico, la ASTM C136/C136M (método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos) [12].

- Análisis químico ASTM C114: se tomaron muestras representativas de puzolana natural y desecho de tina previamente pulverizados. El análisis consistió en determinar cuantitativamente el contenido de óxidos principales mediante técnicas de laboratorio, evaluando principalmente el porcentaje de sílice (SiO₂). Los resultados se expresaron como porcentaje en masa respecto al total del material seco, permitiendo identificar el potencial puzolánico de cada muestra [13].
- Límites de Attenberg ASTM D4318-17: se determinaron las propiedades de plasticidad del material fino. Para el límite líquido, se utilizó el dispositivo de copa de Casagrande, mientras que el límite plástico se obtuvo mediante el método de rollado manual. El índice de plasticidad se calculó como la diferencia entre ambos valores. Estas pruebas permiten clasificar el suelo según su comportamiento plástico y su potencial de retracción o expansión [14].
- Control de finura del material ASTM-C430 Se realizó un ensayo de tamizado seco basado en lo establecido por la norma ASTM C430, la cual emplea el tamiz No. 325 (45 µm) como referencia. Sin embargo, debido a la disponibilidad limitada del tamiz No. 325, se utilizó como alternativa el tamiz No. 200 (75 µm), permitiendo una evaluación aproximada del contenido de partículas finas presentes en la muestra. El procedimiento consistió en secar previamente el material, colocarlo sobre el tamiz y agitarlo manualmente durante un tiempo determinado. Este ensayo permite estimar la finura del material, la cual influye directamente en su reactividad y comportamiento en mezclas de concreto [15].
- Diseño de mezcla ACI 211.1: el diseño de mezcla para la experimentación por compresión se realizó para llegar a una resistencia de compresión de 3000 psi a los 28 días. Se elaboro una mezcla de control utilizando únicamente cemento portland. Adicionalmente, se diseñaron mezclas donde el cemento portland se reemplazó parcialmente por los dos materiales en estudio, en porcentajes de sustitución en 5%, 12.5% y 20%. Las proporciones de cemento, material de reemplazo, agua, agregado fino y grueso en cada muestra se determinaron aplicando el procedimiento de dosificación establecido en la norma ACI 211.1 (Práctica estándar para la selección de proporciones para concreto normal, pesado y masivo) (tabla 1) [16].

Tabla 1. Proporciones de materiales

Mezcla	Cemento (Kg)	Reemplazo (Kg)	Agua (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)
5%	10.60	0.56	6.13	22.85	36.41
12.5%	9.76	1.40	6.13	22.85	36.41
20%	8.93	2.23	6.13	22.85	36.41

- Fabricación y curado especímenes de cilindros ASTM C31/C31M: el procedimiento de moldeo y compactación se adhirió estrictamente a las indicaciones de la ASTM C31/C31M (práctica estándar para la fabricación y curado de especímenes de concreto en campo) [17]. Los especímenes fueron cubiertos para dejarse en reposo en el centro experimental durante 24 horas. Tras ese periodo se desencofraron los cilindros y se llevaron al cuarto de curado, donde reposan en una piscina con el agua a una temperatura controlada de 23 grados, con el fin de promover la hidratación adecuada del cemento (figura 1).



Figura 1. Confección de cilindros.

- Ensayos de resistencia a la compresión ASTM C39/C39M-24: conforme dicta al ASTM C39/C39M-24 (Métodos de ensayo estándar para la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto) [18]. Para la prueba se utilizó una máquina de ensayo de compresión de marca FOURNEY, modelo VFD Automatic. Se configuró la máquina para una precarga de 4 Kn, velocidad de carga de 0.25 Mpa/s y una falla 90%.

- Análisis ambiental: se realizó una aproximación a los materiales disponibles en la cantera, específicamente puzolana natural y desechos de tina, identificando sus cantidades en unidades de peso. Posteriormente, se consultaron referencias sobre el impacto ambiental de actividades extractivas para estimar las emisiones asociadas. Con base en ello, se cuantificó el ahorro potencial de dióxido de carbono (CO₂) derivado de su uso como sustituto parcial del cemento, considerando los volúmenes disponibles y los factores de emisión documentados en la literatura especializada.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización física de los materiales

Los materiales evaluados corresponden a residuos de la cantera clasificados como puzolana natural y desechos de tina. El color de la muestra es 10YR8/1 (White) para la puzolana y 8/2 (Pale Brown) para el desecho de tina según la tabla de Munsell. Ambos materiales provienen de litologías asociadas a la Formación Río Hato, perteneciente al Complejo Volcánico El Valle, con edades estimadas menores a 50,000 años y una composición magmática ácida.

En cuanto a la granulometría mostrada en la figura 2, ambos materiales presentaron alta finura con paso significativo por el tamiz de 0.075 mm, lo que sugiere un comportamiento tipo filler, favoreciendo la densidad de empaque y reduciendo la porosidad del concreto [5]. La adición de un 7% a 10% de relleno mineral al agregado fino (0 mm a 2 mm) mejora las propiedades del concreto [19]. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la puzolana natural se clasificó como "arena pobremente graduada" y el desecho de tina como "arena con arcilla de baja plasticidad". Aunque las arcillas suelen evitarse en concreto, el desecho contiene más del 50 % de sílice, lo que le otorga alta reactividad puzolánica. Los suelos arcillosos ricos en sílice pueden formar geles C-S-H al reaccionar con hidróxido de calcio, mejorando la calidad del concreto [20]. La clasificación SUCS confirma el potencial de estos materiales como sustitutos parciales del cemento.

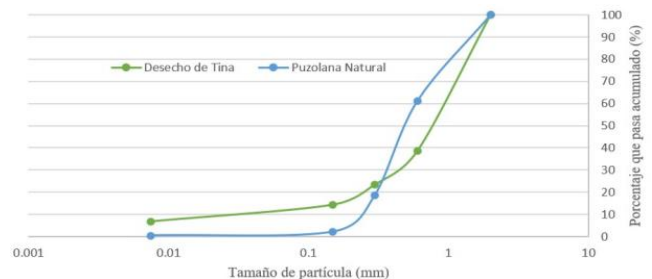


Figura 2. Distribución granulométrica.

La arcilla de baja plasticidad en el desecho de tina actúa como sitio de nucleación (puntos de arranque) para la reacción puzolánica, mejorando la resistencia a largo plazo, densidad y reduciendo la permeabilidad del concreto. La puzolana, como arena pobremente graduada y de alta finura, funciona como "filler", optimizando la compacidad. Estos atributos físicos son fundamentales para una sustitución exitosa del cemento, mejorando las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto en la ingeniería civil sostenible [21].

Los resultados obtenidos para el contenido de humedad fueron de 6.84% en desecho de tina y 5.36% en puzolana natural, valores consistentes con estudios previos realizados en materiales volcánicos naturales y residuos de corte [22]. Este contenido de humedad debe ser cuidadosamente considerado en el diseño de mezcla para evitar sobreestimación del agua disponible, lo cual puede alterar la relación agua/material cementante y afectar la trabajabilidad del concreto (tabla 2) [16].

Tabla 2. Porcentaje de humedad

Material	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	% de humedad
Desecho de tina	2149	2002	6.84
Puzolana natural	2164	2048	5.36

3.2 Análisis químico de la muestra

Según el análisis químico realizado bajo la norma ASTM C114, la puzolana natural contiene un 88% de sílice y el desecho de tina un 91%, lo que indica una alta reactividad puzolánica favorable para su uso como material cementante suplementario. Estos valores superan los mínimos recomendados para materiales con potencial cementante. [23]

3.3 Resistencia a la compresión

El desecho de tina, aplicado en un 12.5% de reemplazo, supera incluso a la mezcla de referencia sin adiciones, alcanzando una resistencia de 3637.55 psi a los 28 días (figura 3). Este comportamiento sugiere una sinergia entre la acción puzolánica latente y el efecto filler, donde partículas finas no cementantes aceleran la hidratación temprana y densifican la zona de transición interfacial (ITZ). Investigaciones previas con materiales similares, como escorias de estaño, respaldan este fenómeno de ganancia de resistencia temprana por refinamiento de la microestructura y nucleación adicional de geles C-S-H [24].

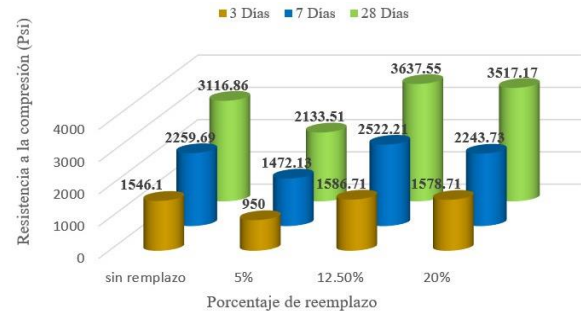


Figura 3. Resistencia a la compresión con reemplazo de desecho de tina a los 3 días, 7 días y 28 días.

La puzolana natural (figura 6), aunque con menor impacto inicial en la resistencia (menores valores a 3 días y 7 días), mostró una evolución sostenida, alcanzando 2727.43 psi a los 28 días con un 20 % de reemplazo. Este comportamiento es característico de las puzolanas de origen volcánico, cuya reactividad depende del contenido de sílice amorfa y el grado de finura. Su acción retardada pero progresiva mejora la estructura de poros y contribuye a una matriz cementante más compacta y duradera. Estudios recientes confirman que un contenido de entre 10–20 % de puzolana natural es ideal para equilibrar la pérdida inicial de resistencia con beneficios a largo plazo [25].



Figura 4. Resistencia a la compresión con reemplazo de puzolana natural a los 3 días, 7 días y 28 días.

3.4 Aprovechamiento de material de cantera

En la imagen satelital los polígonos rojos delimitan las lagunas de desecho de tina y los naranjas los acopios de puzolana natural (figura 5). A partir de la digitalización planimétrica se obtuvo un área posible depósito de puzolana de 12430.06 m² (Naranja) y un área de los lagos de desecho de tina 12797.37 m² (Rojo).

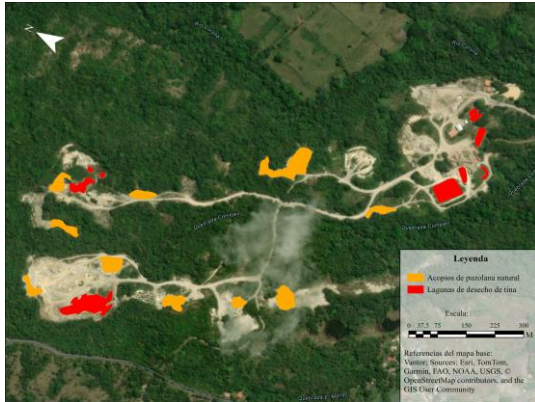


Figura 5. Imagen satelital con las áreas de depósito de los materiales.

El cálculo del área es una aproximación, y el volumen de las lagunas de desecho se estimó usando funciones área-profundidad [26]. Considerando una profundidad media de 2 m [27]. El volumen estimado del desecho de tina fue de 25,595 m³. Aplicando una densidad de 1.65 t/m³, se calculó un total de 42,231 toneladas de material extraíble. Para la puzolana, se emplea la ecuación 1 [28].

$$V = F \cdot H \quad (1)$$

Donde

F representa el área de la base

H la altura promedio.

Se asumió una altura media operativa $H = 2.5$ m. Obteniendo un volumen de puzolana natural de 31,075 m³. Los estudios en escorias volcánicas reportan densidades sueltas de 0.56 toneladas/metro³ a 0.82 toneladas/metro³ [29]. Adoptando el extremo alto (0.80 toneladas/metro cúbico), se calculó un peso de puzolana natural de 24,800 toneladas, extraíble en la cantera. Debido al proceso de control de partículas finas para su adición al concreto como remplazo se tomó un factor de reducción de 0.40 del material utilizable final. Con base en el análisis geométrico y en propiedades físico-mecánicas reportadas en la literatura técnica, se estima que la cantera cuenta con aproximadamente 26,800 toneladas de material aprovechable entre desecho de tina y puzolana natural.

3.5 Cuantificación de las emisiones por kilogramo de cemento

La producción de cemento libera aproximadamente 0.9 Kg de dióxido de carbono por cada kilogramo de cemento [30]. Reemplazar parte del cemento con puzolana natural y desecho de tina reduce directamente estas emisiones al disminuir la cantidad de clinker. Según los datos obtenidos en el aprovechamiento del material, las 26,800 toneladas aproximadas de material utilizable en la cantera equivalen a

24,120 toneladas de CO₂, lo cual constituye una reducción significativa en la huella de carbono asociada a la fabricación de concreto. Este resultado refuerza la viabilidad ambiental del aprovechamiento de materiales locales en estrategias de producción sostenible.

3.6 Industrialización de proyecto

La industrialización del uso de desechos de cantera en Panamá como sustituto parcial del cemento Portland es una alternativa técnica y económica viable para la producción de concreto sostenible. Estos desechos, tras procesos de tamizado y secado, pueden incorporarse en plantas de concreto premezclado y prefabricados sin necesidad de modificaciones significativas en los sistemas de dosificación o mezclado. Económicamente, el uso de materiales suplementarios similares, como la escoria de alto horno (BFS), ha demostrado reducir los costos de producción hasta en un 60% respecto al cemento convencional (US\$41.7/t vs US\$100/t), lo que puede representar ahorros adicionales superiores al 1% en mezclas con un 30% de reemplazo [31]. En este contexto, la disponibilidad local de residuos volcánicos posiciona a estos materiales como una solución técnica, ambiental y económicamente competitiva para la industria del concreto en Panamá. Además, ofrece una solución para el uso de materiales de desecho que representan un gasto operativo en una nueva fuente de ingreso para las canteras.

4. Conclusiones

La sustitución parcial del cemento Portland por puzolana natural y desecho de tina se consolida como una alternativa técnica, ambiental y económicamente viable para la construcción en Panamá. Los ensayos confirmaron que ambos materiales presentan propiedades fisicoquímicas adecuadas y un desempeño mecánico dentro de los rangos estructurales exigidos, validando su uso en mezclas de concreto. Esta estrategia reduce la explotación de recursos no renovables, la generación de residuos industriales y evita más de 24 mil toneladas de CO₂, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

La disponibilidad local de estos materiales facilita su aprovechamiento sin cambios significativos en las plantas, promoviendo su adopción a bajo costo. Además, mejoran la compactación y durabilidad del concreto, reduciendo el mantenimiento y favoreciendo su replicabilidad en Panamá y otros países. Para evaluar su desempeño a largo plazo, se recomiendan ensayos de durabilidad como permeabilidad al cloruro, absorción, resistencia a sulfatos y carbonatación. Este enfoque se alinea con los ODS 12 y 9, impulsando una ingeniería civil más resiliente y sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro Experimental de ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá, por facilitar los instrumentos y equipos utilizados para los diferentes ensayos.

A la cantera “Corona” por brindarnos el material. A toda aquella persona que apoyó la investigación de una u otra forma.

REFERENCIAS

- [1] K. L. Scrivener, J. Vanderley M. y E. M. Gartner, «Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry,» *Cement and Concrete Research*, vol. 114, pp. 2-26, 2018.
- [2] Universidad Pontificia Comillas, «Informe técnico OBS 2022-2023 (Rev. 2),» [En línea]. Available: <https://files.griddo.comillas.edu/obs-tecnico-2022-23rev2.pdf>. [Último acceso: 8 junio 2025].
- [3] C. Progreso, «cementos progreso,» cementos progreso, [En línea]. Available: <https://www.cempro.com.pa/proceso-de-produccion-decemento>. [Último acceso: 19 mayo 2025].
- [4] A. M. a. P. K. Sharma, «Use of industrial waste and natural pozzolana in sustainable construction materials: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 247,» 2020.
- [5] M. Hossain, «"Blended cement using volcanic ash and pumice," *Cement and Concrete Research*, vol. 33».
- [6] ASTM C618-19, «"Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.,» [En línea].
- [7] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivos de desarrollo sostenible,» Organización de las Naciones Unidas, [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivo-sde-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 12 Junio 2025].
- [8] J. Toirac Corral, «El suelo-cemento como material de construcción,» *Ciencia y Sociedad*, Vol., vol. XXXIII, n° 4.
- [9] G. Poveda, Y. Solis M. y J. Bradley, «Evaluación de la Estabilidad de Taludes Naturales en los Alveos, provincia de Coclé, Panamá,» *ResearchGate*, pp. 161168, Septiembre 2023.
- [10] Ministerio de Comercio e Industrias, «Informe sobre la potencialidad minera en la región occidental de Panamá,» Dirección Nacional de Recursos Minerales, Gobierno de la República de Panamá., 2015.
- [11] ASTM C556, Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying.
- [12] ASTM C136/C136M-19, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International.
- [13] ASTM International, «ASTM D4318-17: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [14] ASTM International, «ASTM C114-23: Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement,» ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023.
- [15] ASTM C430-17, tandard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-µm (No. 325) Sieve. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [16] ACI 211.1-91, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [17] ASTM C31/C31M-19, Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field, West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [18] ASTM C39/C39M, tandard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [19] A. U. İlker Bekir Topçu, «Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 7, pp. 1071-1075, 2003.
- [20] K. Onyelowe, M. E. Onyia y D. Bui Van, «Pozzolan Reaction in Clayey Soils for Stabilization Purposes: A Classical Overview of Sustainable Transport Geotechnics,» *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
- [21] W. V. Bezerra, «External sulfate attack on compressed stabilized earth blocks,» *ScienceDirect*, 2018.
- [22] C. Domingo, F. Martínez y J. Vargas, «Caracterización de residuos volcánicos como materiales cementantes suplementarios,» *Revista de Ingeniería Civil*, vol. 45, n° 2, pp. 87-96, 2020.
- [23] K. M. Hossain, «Blended cement using volcanic ash and pumice,» *ScienceDirect*, 20 septiembre 2002.
- [24] N. Olukotun, A. R. Mohd Sam, N. H. Abdul Shukor Lim, M. Abdulkareem, I. Mallum y O. Adebisi, «Mechanical Properties of Tin Slag Mortar,» *MDPI Open Access Journals*, 2021.
- [25] T. Amsalu Fode, Y. A. Chande Jande y T. Kivevele, «Effect of Natural Pozzolana on Physical and Mechanical Properties of Concrete,» *Wiley Online Library*, 2024.
- [26] U. Marin-Comitre, «Using Geomatic Techniques to Estimate Volume–Area Relationships of Watering Ponds,» *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 10, n° 8, p. 502, 26 julio 2021.
- [27] O. V. Shuvaeva, S. B. Bortnikova, T. M. Korda y E. V. Lazareva, «Arsenic Speciation in a Contaminated Gold Processing Tailings,» *Geostandards Newsletter*, vol. 24, n° 2, pp. 247-252, 22 mayo 2007..
- [28] H. M. Yilmaz, «Close range photogrammetry in volume computing,» *Experimental Techniques*, vol. 34, n° 1, pp. 48-54, 2010.
- [29] A. Bouyahyaoui, «Mechanical and chemical characterisation of pozzolan of middele atlas in Morocco,» *International Journal of Geomate*, vol. 14, n° 41, 2018.
- [30] R. M. Andrew, «Copernicus GmbH,» *Earth System Science Data*, 2018. [En línea]. Available: <https://essd.copernicus.org/articles/10/2213/>. [Último acceso: 7 6 2025].
- [31] T. Hyoungh Kim, S. Ho Tae, C. U. Chae y W. Young Choi, «The Environmental Impact and Cost Analysis of Concrete Mixing Blast Furnace Slag Containing Titanium Gypsum and Sludge in South Korea,» *MDPI Open Access Journals*, 2016.