

Comparative life cycle assessment and structural performance of LC3 eco-friendly cement as a CO₂ reduction alternative to Portland cement

Mirian Adelis Puma Pumachara¹ ; Nikole Kristell Melany Mejia Mamani² ; Claudia Valentina Puma Quispe³ ; Dayana Lucia Llanos Portillo⁴ 

¹Universidad Tecnológica de Perú, Perú, u23221085@utp.edu.pe, u22209223@utp.edu.pe, u22212474@utp.edu.pe, u17212034@utp.edu.pe

Abstract: In countries such as Brazil, Chile, and Peru, the expansion and sustained increase in global infrastructure demand continue to maintain a strong dependence on cementitious systems with a high clinker factor, representing a significant share of industrial CO₂ emissions associated with production. This study develops a comparative evaluation between Ordinary Portland Cement (OPC) Type I and the ternary Limestone Calcined Clay Cement (LC3) system as a decarbonization strategy for the construction sector in Latin America. The research integrates environmental analysis, mechanical performance, and economic assessment under a quantitative approach. The environmental impact was determined through a Life Cycle Assessment (LCA) in the cradle-to-gate phase, conveniently modeled in OpenLCA for a functional unit of 1 ton of cement. Due to the limited availability of standardized regional inventories, the modeling was aligned with a European database to preserve methodological consistency and comparability between scenarios. The results show emissions of 903.5 kg CO₂-eq/t for OPC and 513.5 kg CO₂-eq/t for LC3, representing an approximate 43% reduction mainly associated with the decrease in clinker content to 50%. Mechanical performance was evaluated through mix design under the American Concrete Institute (ACI) 211 method, and the input data were mathematically modeled in MATLAB. The comparison demonstrates that, at 28 days, concrete produced with LC3 achieved 32.52 MPa, exceeding the 29.56 MPa obtained for OPC. A Structural-Environmental Efficiency Index (SEEI) of 0.17 MPa/kg CO₂ was formulated for LC3, compared to 0.08 MPa/kg CO₂ for OPC, evidencing an efficiency improvement of approximately 112%. Although LC3 presented a higher estimated cost of US\$264/t of cement compared to OPC (US\$150/t of cement), the heterogeneous variation of US\$114/t is mainly attributable to market conditions, industrial availability, transportation factors, and local regulatory frameworks related to the lack of widespread LC3 production in Latin America. Overall, the results demonstrate that LC3 provides greater structural performance per unit of emission, consolidating its position as a technically viable alternative for CO₂ reduction in the cement industry across the region.

Keywords: Limestone Calcined Clay Cement (LC3), Life Cycle Assessment (LCA), CO₂ Emission Reduction, Compressive Strength, Decarbonization

Análisis comparativo del ciclo de vida (ACV) y desempeño estructural del cemento ecológico LC3 como alternativa de reducción de CO₂ frente al cemento Portland

Mirian Adelis Puma Pumachara¹ ; Nikole Kristell Melany Mejia Mamani² ; Claudia Valentina Puma Quispe³ ; Dayana Lucia Llanos Portillo⁴ 

¹Universidad Tecnológica de Perú, Perú, u23221085@utp.edu.pe, u22209223@utp.edu.pe, u22212474@utp.edu.pe, u17212034@utp.edu.pe

Resumen– En países como Brasil, Chile y Perú, la expansión y el incremento sostenido de la demanda global de infraestructura mantiene una alta dependencia a sistemas cementicios con elevado factor clinker y una proporción significativa condicional de las emisiones industriales de CO₂ asociadas a la producción. Este estudio desarrolla una evaluación comparativa entre el cemento Portland ordinario (OPC) tipo I y el sistema ternario Limestone Calcined Clay Cement (LC3) como estrategia de descarbonización en el sector construcción en América Latina. La investigación integra análisis ambiental, desempeño mecánico y evaluación económica bajo un enfoque cuantitativo. El impacto ambiental se determinó mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la fase cradle-to-gate convenientemente modelada en OpenLCA para una unidad funcional de 1 tonelada de cemento. Debido a la limitada disponibilidad de inventarios regionales estandarizados, el modelado se alineó a una base de datos europea para preservar la consistencia metodológica y comparabilidad entre escenarios. Los resultados muestran emisiones de 903.5 kg CO₂-eq/t para el OPC y 513.5 kg CO₂-eq/t para el LC3, valores que representan una reducción aproximada del 43% asociada principalmente a la disminución del contenido de clinker al 50%. El desempeño mecánico se evaluó mediante diseño de mezclas bajo el método ACI 211 y los datos de entrada se modelaron matemáticamente en MATLAB. La comparativa demuestra que, a los 28 días, el concreto con LC3 alcanzó 32.52 MPa, superior a los 29.56 MPa obtenidos para el OPC. Se formuló un Índice de Eficiencia Estructural-Ambiental (IEEA) de 0.17 MPa/kg CO₂ para el LC3 frente a 0.08 MPa/kg CO₂ del OPC, evidenciando una mejora de eficiencia cercana al 112 %. Aunque el LC3 presentó un costo estimado superior de US\$ 264/t de cemento respecto al OPC (S/ US\$ 150/t de cemento), la diferencia y variación heterogénea de US\$ 114/t responden a factores de mercado, disponibilidad industrial, transporte y normativas locales referentes a la falta de producción generalizada de cemento LC3 en América Latina. En conjunto, los resultados demuestran que el LC3 ofrece mayor desempeño estructural por unidad de emisión, consolidándose como una alternativa técnicamente viable para la reducción de CO₂ en la industria del cemento en la región.

Palabras clave–Limestone Calcined Clay Cement, Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Reducción de CO₂, Resistencia a compresión, Descarbonización

I. INTRODUCCIÓN

La industria del cemento constituye una de las principales fuentes de emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO₂), representando aproximadamente entre el 5 % y el 8 % de las emisiones globales debido al alto contenido de clinker y al proceso de producción del cemento Portland [1]. La creciente presión por reducir el impacto ambiental de la infraestructura ha impulsado el desarrollo de sistemas cementicios alternativos capaces de disminuir las emisiones asociadas al material sin comprometer el desempeño mecánico ni las condiciones de aplicabilidad técnica requeridas en entornos constructivos contemporáneos para su aplicación en el sector construcción [2].

Diversas investigaciones han evaluado estrategias orientadas a la reducción del factor clinker mediante la incorporación de materiales cementantes suplementarios y el desarrollo de sistemas ternarios más eficientes [1], [3]. En el presente estudio, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura científica complementada con un análisis asistido por software, empleando OpenLCA y MATLAB para la gestión, clasificación y procesamiento de los datos extraídos de los artículos recientes con el propósito de identificar alternativas técnicamente viables y ambientalmente eficientes para la sustitución parcial del cemento Portland. Como resultado de este análisis comparativo, el cemento ecológico Limestone Calcined Clay Cement (LC3) fue seleccionado como la alternativa más prometedora, debido a su capacidad de reducir significativamente las emisiones de CO₂, su disponibilidad de materias primas y el desempeño mecánico reportado en diferentes contextos internacionales [1], [4], [2]. El estado del arte actual documenta que el LC3 permite alcanzar reducciones estimadas del orden de 30–40% en emisiones respecto al cemento Portland convencional, manteniendo propiedades estructurales compatibles con aplicaciones en ingeniería civil [1], [4].

Asimismo, investigaciones comparativas han evidenciado que el LC3 presenta un comportamiento mecánico competitivo frente al cemento Portland, consolidándolo como una alternativa técnicamente viable dentro de las estrategias de

descarbonización del sector construcción [4], [3]. Algunos estudios incluyen la solidificación por carbonatación por microondas de escoria de carburo, que permite una mineralización rápida e inmovilización del CO₂ y técnicas de curado por carbonatación en etapas tempranas que mejoran la resistencia mientras se une permanentemente al CO₂ dentro de los productos hidratantes. Estos enfoques demuestran el panorama más amplio de las tecnologías de cemento eficientes en carbono y destacan la importancia de desarrollar estrategias complementarias como el LC3, que reduce sinérgicamente el contenido de clínker mientras permite el CO₂ potencial de utilización.

De manera complementaria, la amplia disponibilidad geográfica de arcillas caoliníticas y caliza refuerza su potencial de implementación en distintos contextos productivos, favoreciendo su escalabilidad industrial [2]. Otros autores han demostrado los resultados del LC3 mediante ensayos industriales realizados en Cuba e India [1], [4].

No obstante, aunque la literatura internacional respalda el potencial técnico y ambiental del LC3, gran parte de los estudios se han centrado en evaluaciones experimentales del material o en análisis ambientales independientes, sin integrar de manera simultánea la evaluación ambiental, el desempeño mecánico y el análisis económico aplicado a proyectos de construcción reales [1], [4]. Esta convergencia resulta fundamental para determinar la viabilidad práctica de su implementación frente al cemento Portland convencional, especialmente en escenarios donde el costo y la aplicabilidad constructiva son factores determinantes para su adopción.

En este contexto, el presente estudio propone una evaluación comparativa integral entre el cemento Portland y el cemento LC3, mediante el desarrollo de un análisis de ciclo de vida (ACV) por tonelada de cemento utilizando OpenLCA, complementado con un análisis en MATLAB, para comparar su resistencia mecánica y emisiones de CO₂, y un cálculo independiente de los costos de producción por tonelada. Este enfoque permitió abordar de manera simultánea los aspectos ambientales, estructurales y económicos de ambos materiales, al igual que se busca contribuir a la generación de evidencia técnica que respalde el uso del LC3 como alternativa sostenible y económicamente viable dentro de las estrategias de descarbonización del sector construcción [1], [4], [2].

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto secuencial, compuesto por una fase de revisión sistemática de literatura y una fase de aplicación comparativa. La primera etapa permitió identificar las principales estrategias de descarbonización en la industria del cemento y fundamentar la selección del sistema ternario LC3 como objeto de estudio. La segunda fase consistió en la evaluación comparativa ambiental, mecánica y económica entre el cemento Portland Tipo I y el sistema LC3 bajo condiciones equivalentes.

FASE I: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

El proceso secuencial de búsqueda y selección de literatura se desarrolló siguiendo las directrices del modelo PRISMA [5] dado su carácter metodológico estandarizado y los criterios explícitos adjuntos al modelo para la depuración documental y la reducción de sesgos durante el proceso de selección bibliográfica. El diagrama de flujo se presenta en la Fig. 1.

Durante la etapa de identificación, se realizaron búsquedas en las bases de datos Scopus y ScienceDirect empleando combinaciones de términos relacionados con tecnologías de reducción de emisiones en la industria del cemento, incluyendo: “CO₂ emissions”, “clinker reduction”, “life cycle assessment (LCA)”, “carbon footprint”, “decarbonization”, “carbon capture”, “CCS”, “CCUS”, “supplementary cementitious materials” y “low-carbon cement”. A partir de las ecuaciones de búsqueda formuladas, se obtuvieron inicialmente 550 resultados.

En la etapa de cribado, se eliminaron 405 artículos que no abordaban directamente estrategias de reducción de emisiones de CO₂ asociadas al ciclo de vida del cemento y estudios que ajenos a resultados cuantitativos ambientales, técnicos o tecnológicos. Asimismo, se excluyeron 58 investigaciones que no eran de libre acceso (Open Access) y, a la par, se aplicó un criterio de temporalidad considerando publicaciones entre 2015 y 2025.

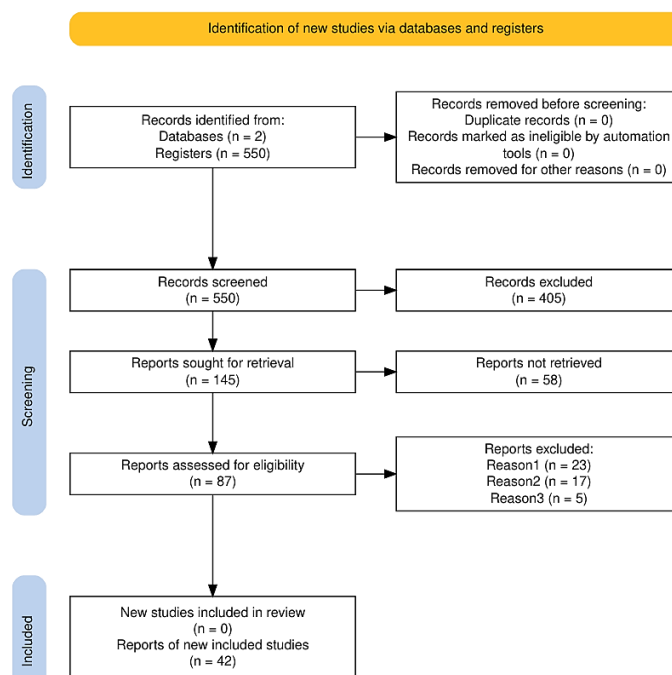


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA [5] el proceso de selección de estudios, digrama realizado en : Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis Campbell Systematic Reviews, 18, e1230. <https://doi.org/10.1002/cl2.1230>.

El número total de estudios resultante final fue de 42 artículos, teniendo en cuenta los criterios de inclusión para el refinamiento de las búsquedas. La Tabla I adjunta los seis criterios de inclusión considerados.

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSIÓN

C1	El artículo aborda métodos relacionados a la reducción de emisiones de CO ₂ en la producción de cemento.
C2	El artículo corresponde a un artículo original de investigación, no revisiones o similares.
C3	El artículo fue publicado entre 2015 y 2025.
C4	El artículo completo es de libre acceso (Open Access).
C5	El artículo pertenece a áreas afines a la ingeniería, ciencias de los materiales o energía.
C6	El artículo presenta resultados técnicos o cuantitativos relevantes

Bajo una distribución de patrones de concentración temáticos, según la definición de la etapa prominente de la descarbonización y la reducción de la huella de carbono del cemento, como se detalla en la Tabla II, de los 42 artículos identificados en la búsqueda inicial, únicamente 29 fueron clasificados para el análisis detallado, debido a que abordaban de manera directa la producción, propiedades mecánicas y desempeño ambiental del cemento ecológico con estrategias de Cementos de Bajo Carbono obtenidos por sustitución parcial de materias primas o reemplazos porcentuales de la masa del crudo previo a la clinkerización, como el LC3 (Limestone Calcined Clay Cement). La distribución de patrones de concentración temáticos puede clasificarse, además, según la definición de la etapa prominente de la descarbonización y reducción de la huella de carbono del cemento.

Siguiendo esta delimitación, el análisis distingue dos configuraciones del ciclo del cemento. El enfoque *cradle-to-gate* comprende las etapas que van desde la extracción y procesamiento de materias primas hasta la producción del cemento como producto terminado en planta, restringiéndose a la fase industrial. El enfoque *cradle-to-cradle*, en cambio, incorpora las etapas posteriores al uso, incluyendo la gestión de residuos y la reincorporación de materiales al proceso productivo bajo un esquema de recirculación material [6]. Las estrategias de reducción de CO₂ pueden situarse indistintamente en el ciclo lineal previo a la comercialización del cemento, mediante intervenciones sobre el clínker, el crudo o la eficiencia del proceso, o en la etapa posterior que conforma el ciclo circular del cemento. La consideración integrada de ambas etapas define el alcance *cradle-to-grave*, que abarca la totalidad del ciclo del cemento desde la extracción de materias primas hasta el fin de vida del material.

TABLA II
CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS Y ESTRATEGIAS POR ETAPAS

Ciclo	Etapa	Publicaciones		
		Artículo	Nº	Total
Cradle to gate	Obtención de materias primas	[7]	1	17
	Clinkerización	[1], [2], [3], [4], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]	13	
	Molienda de cemento	[17], [18], [19]	3	
Cradle to cradle	Subproductos de cemento	[20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]	7	12
	Construcción y puesta	[27], [28], [29], [30], [31]	5	

La clasificación de los estudios según su alcance dentro del ciclo de vida evidenció una mayor concentración de publicaciones en el enfoque *cradle-to-gate*, que comprende desde la extracción de materias primas hasta la salida y manufactura del cemento terminado en planta, con un total de 17 artículos. Dentro de esta categoría, la etapa de clinkerización registró la mayor frecuencia con 13 estudios, seguida de la molienda de cemento con 3 investigaciones y la obtención de materias primas con 1 publicación. Por su parte, el enfoque *cradle-to-cradle*, que incorpora además procesos de reutilización y reincorporación del material al sistema productivo, agrupó 12 estudios, distribuidos en 7 investigaciones relacionadas con subproductos de cemento y 5 orientadas a construcción y puesta en servicio. Estos resultados evidencian un mayor interés investigativo en las etapas asociadas a la producción y optimización del clínker debido a su incidencia directa en el consumo energético y las emisiones de CO₂.

FASE II: APLICACIÓN COMPARATIVA

Con el propósito de evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica del sistema ternario Limestone Calcined Clay Cement (LC3) como cemento ecológico frente al cemento Portland convencional, se desarrolló una evaluación comparativa sustentada en parámetros fisicomecánicos, ambientales y económicos reportados en literatura científica especializada, así como en escenarios de modelación representativos. La metodología incluyó tres componentes principales: (i) análisis de ciclo de vida, (ii) diseño de mezclas y modelado matemático, y (iii) análisis económico basado en el costo por tonelada de cemento, considerando ambos tipos.

A. Impacto ambiental

La evaluación ambiental se desarrolló mediante Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de un material con un enfoque *cradle-to-gate* de reincidencia en las materias primas del cemento aislando procesos comprendidos desde la extracción y la configuración energética en planta para la obtención del cemento terminado. El modelado se realizó en la plataforma

libre de OpenLCA compatible con la base de datos de la European Reference Life Cycle Database (ELCD) 3.2 como fuente de inventarios, referenciados en contexto europeo y seleccionados por su uniformidad metodológica y consistencia en los factores de emisión asociados a procesos.

Se adoptó como unidad funcional 1 tonelada de cemento producido. El OPC se modeló bajo los lineamientos del proceso estándar disponible en la base de datos para cementos tipo CEM I. Para el sistema LC3, el inventario fue reconstruido a partir del proceso base de cemento Portland, ajustando los flujos másicos de entrada conforme a proporciones de sustitución reportadas en formulaciones experimentales previamente consolidadas [1], [2] y en materiales específicos: clinker, arcilla calcinada, piedra caliza, yeso. La reducción del contenido de clinker al 50% y la incorporación de materiales calcáreos y arcillosos se establecieron dentro de rangos documentados para sistemas LC3 validados [3].

La comparación ambiental se realizó mediante el indicador Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kg CO₂-eq/t de cemento, bajo el uso de Lazy/On-demand como caracterización compatible con los inventarios dentro de la categoría de impacto predominante en estudios comparativos de cementos con sustitución de clinker [6] Los resultados obtenidos a nivel de ligante fueron complementarios para la posterior proyección a escala de concreto estructural.

B. Diseño de mezclas y predicción de resistencia

Para el análisis comparativo de la resistencia se definieron dos sistemas cementantes: un cemento Portland Tipo I convencional y un sistema ternario (LC3). La formulación del LC3 se estableció considerando una sustitución del 50 % del clinker por materiales cementantes suplementarios, empleando una composición de 500 kg de clinker, 300 kg de arcilla calcinada, 150 kg de caliza y 50 kg de yeso por tonelada de cemento, manteniendo así una proporción 50–30–15–5 característica del cemento ecológico. Las cantidades incidentes se encuentran reportadas en la literatura como configuración óptima en términos de desempeño mecánico y reducción de emisiones [7] considerando una ratio de 15% a 30% de sustitución de arcilla calcinada [3], [2], [8].

Las condiciones estructurales equivalentes y verificadas en blinders, morteros y pastas [9], [4], [2] se trasladaron a nivel macro, constituido por la formulación de concreto visto como la primera fase del ciclo circular *cradle to cradle* del cemento. El concreto se obtuvo mediante el diseño de mezclas para una resistencia de diseño de 21 MPa aplicando el procedimiento del método ACI 211. Las variables de diseño incluyeron la relación agua/cemento, el contenido de agregados y asentamiento objetivo, obteniéndose dosificaciones expresadas en kg. Esta formulación permitió vincular las emisiones cuantificadas por tonelada de cemento con el volumen real de concreto requerido para alcanzar una misma resistencia estructural.

Con el fin de asegurar condiciones comparables, las formulaciones fueron evaluadas simultáneamente bajo el mismo criterio de desempeño mecánico, considerando la resistencia a compresión como variable principal. La evolución temporal de la resistencia fue analizada a edades de 7, 14, 28, 50 y 90 días, a partir de datos realizados en el diseño de mezclas, con consideraciones puntuales en el peso específico del OPC comercial para un cemento nacional Tipo I y el cemento ecológico LC3 de Holcim (Apasco Eco Planet). El modelado del comportamiento mecánico se desarrolló mediante un ajuste matemático de los datos experimentales empleando el software Matrix Laboratory, *MATLAB*. A través de técnicas de regresión y análisis de tendencia, se obtuvo una representación continua de la evolución de la resistencia en el tiempo para ambos sistemas, permitiendo evaluar comparativamente su desempeño estructural.

La comparación entre sistemas se realizó específicamente evaluando la resistencia estimada a 28 días. Los comportamientos para el cemento ecológico y datos de entrada se atribuyen a la reacción puzolánica de la arcilla calcinada y a la interacción sinérgica con la caliza para la formación de fases carboaluminato [8] con presencia de microestructuras más densa en etapas tempranas de hidratación.

Las fórmulas empleadas se basan en la Ley de Abrams [10] para la relación agua/cemento y su influencia en la resistencia. El desarrollo de resistencia en el tiempo se modeló con expresiones empíricas utilizadas por el ACI. El incremento adoptado para el LC3 corresponde a valores promedio reportados en estudios experimentales [6], [8], [9]. Las emisiones de CO₂ se calcularon mediante el método de factor de emisión, conforme a lineamientos del Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC [6], [8].

1) *Relación agua/cemento (a/c)*: la relación a/c proviene de la Ley de Abrahams bajo los parámetros del factor de agua y ligante.

$$\frac{a}{c} = \frac{W}{C} \quad (1)$$

Donde:

W = contenido de agua (kg/m³)

C = contenido de cemento (kg/m³)

2) *Modelado de la resistencia a compresión para concretos con OPC*: la resistencia a 28 días se estimó mediante una relación empírica dependiente de la relación a/c bajo la Ley de Abrahams.

$$f'_{c28} = \frac{A}{B \left(\frac{a}{c}\right)} \quad (2)$$

Donde:

f'c28 = resistencia a la compresión a 28 días (MPa)

A, B = constantes experimentales
a/c = relación agua/cemento

3) *Modelado de la resistencia a compresión para concretos con cemento ecológico*: Para el cemento LC3 se consideró un incremento del 10% adicional según [6], [8], [9].

$$f'_{c28LC3} = (1.10)(f'_{c28}) \quad (3)$$

4) *Evolución temporal*: El desarrollo temporal de resistencia en el tiempo es un modelo empírico usado en American Concrete Institute (ACI).

$$f_{c(t)} = (f'_{c28}) \left(\frac{t}{a + (b \cdot t)} \right) \quad (4)$$

Donde:

$f_{c(t)}$ = resistencia a la edad t

f'_{c28} = resistencia a la compresión a 28 días (MPa)

t = edad del concreto en días (7, 14, 28, 50 y 90 días)

a, b = constantes empíricas

5) *Evaluación de emisiones de CO₂*: las emisiones están alineadas con metodologías del International Energy Agency, en el modelo se calcularon como:

$$CO_2 = (C)(EF) \quad (5)$$

Donde:

CO_2 = emisiones de dióxido de carbono (kgCO₂/m³)

C = contenido de cemento (kg/m³)

EF = factor de emisión (kg CO₂/kg cemento)

6) *Reducción porcentual de emisiones*: las emisiones del OPC y LC3 en esta etapa fueron normalizadas por unidad de volumen de concreto (kg CO₂/m³) según las dosificaciones obtenidas en el diseño de mezcla y referencias de la literatura [1], [8], [6] Los datos se muestran en la Tabla III.

$$Reducción (\%) = \frac{CO_{2,OPC} - CO_{2,LC3}}{CO_{2,OPC}} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

CO_2, OPC = Emisiones del OPC

$CO_2, LC3$ = Emisiones del cemento LC3

TABLA III
FACTORES DE EMISIÓN

Cita	Cemento	Producción
[6]	OPC Tipo I	0.94 kg CO ₂ /kg cemento
[32]	Cemento ecológico LC3	0.495 kg CO ₂ /kg cemento

C. Evaluación mecánico-ambiental

La comparación entre el desempeño mecánico e impacto ambiental se realizó mediante el Índice de Eficiencia Estructural-Ambiental (IEEA), definido como:

$$IEEA = \frac{f'c}{E_{CO_2}} \quad (7)$$

$f'c$ = resistencia a compresión (MPa)

E_{CO_2} = emisiones asociadas (kg CO₂-eq por m³ de concreto)

El cálculo se efectuó en Matlab bajo los parámetros de la resistencia obtenida para el diseño estructural equivalente y el Potencial de Calentamiento Global proyectado a unidad de volumen de concreto para ambos sistemas cementantes bajo condiciones equivalentes directas entre LC3 y OPC, de modo que, el IEEA exprese en una sola métrica la capacidad resistente generada por unidad de emisión de los resultados de reducción de CO₂ y el desempeño estructural modelado mediante una relación entre la resistencia a compresión estimada (MPa) y las emisiones de CO₂ asociadas a su producción.

D. Evaluación Económica

En la presente investigación se realizó la evaluación económica del cemento a partir de un análisis comparativo general de costos comerciales del producto, considerando los cementos industriales de América Latina. El contraste se estableció sobre la base del costo por tonelada métrica, permitiendo una referencia homogénea con ajustes necesarios extrapolables entre sistemas con distinta disponibilidad regional para estimar la viabilidad económica del cemento ecológico LC3 frente al cemento Portland tipo I, considerando las diferencias asociadas a escala de producción, contexto logístico y madurez tecnológica de cada mercado.

La integración de ambas fases permitió establecer una comparación técnica fundamentada entre el cemento Portland convencional y el sistema LC3, garantizando coherencia metodológica entre la revisión teórica y la modelación aplicada.

III. RESULTADOS

Los resultados derivados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la modelación matemática del diseño de mezcla y la evaluación mecánico-ambiental comparativa entre el cemento Portland Ordinario y el LC3 se exponen a continuación para permitir una valoración integral del desempeño estructural y climático bajo el alcance metodológico definido.

A. Impacto ambiental

La evaluación del Potencial de Calentamiento Global (GWP), expresado en kg CO₂-eq por tonelada de cemento producido, evidenció diferencias significativas entre el sistema de referencia correspondiente al cemento Portland tipo I (CEM

I) y el sistema alternativo LC3 dentro del ACV modelado en Open LCA.

Como se observa en la Fig. 2, el modelo de CEM I arrojó un resultado de 903.5 kg CO₂-eq/t, considerando únicamente las emisiones directas provenientes del proceso de fabricación del cemento bajo los lineamientos de materias primas, mientras que el sistema LC3 presentó un valor de 513.5 kg CO₂-eq/t para la misma unidad funcional, detallado en la Fig. 3. La diferencia absoluta entre ambos sistemas es de 390 kg CO₂-eq por tonelada de cemento producido.

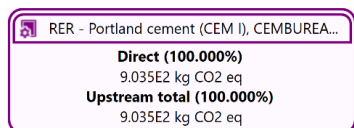


Fig. 2 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para el cemento Portland en términos de emisiones CO₂, elaboración propia mediante el software OpenLCA

Dado que el límite del sistema se restringe a las etapas del ciclo lineal del ligante, la diferencia observada se origina exclusivamente en las variaciones del inventario asociadas a la producción y transformación de materias primas. De modo que, el factor clínker/cemento constituye la variable estructural dominante en la determinación del GWP del sistema.

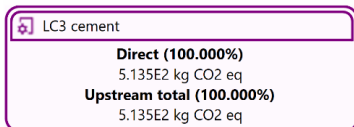


Fig. 3 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para el cemento ecológico LC3 en términos de emisiones CO₂, elaboración propia mediante el software OpenLCA

El clínker es el principal contribuyente al impacto climático del cemento debido a dos mecanismos concurrentes: las emisiones de proceso derivadas de la descarbonatación de la caliza y las emisiones energéticas asociadas a la clinkerización a altas temperaturas.

La reacción química del carbonato de calcio (CaCO₃) como responsable de las emisiones estequiométricas inevitables libera CO₂ directamente desde la materia prima, independientemente de la fuente energética utilizada, lo que convierte al clínker en un componente intrínsecamente intensivo en carbono. Paralelamente, la operación del horno rotatorio demanda elevados requerimientos energéticos, tradicionalmente cubiertos mediante combustibles fósiles, generando emisiones adicionales indirectas que se excluyeron para el análisis y cálculo.

La reducción relativa se calculó reemplazando (6).

$$\frac{903,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/t} - 513,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/t}}{903,5 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/t}} \times 100 = 43,2\%$$

El resultado implica que el LC3 conserva el 56.8% de la carga climática asociada al sistema convencional bajo las condiciones de modelación adoptadas. La Fig. 4 y la Fig. 5 presentan las cantidades emisiones de kg CO₂-eq/t de cemento de manera gráfica, corroborando la disminución de emisiones contaminantes directas en el LC3 respecto al OPC.

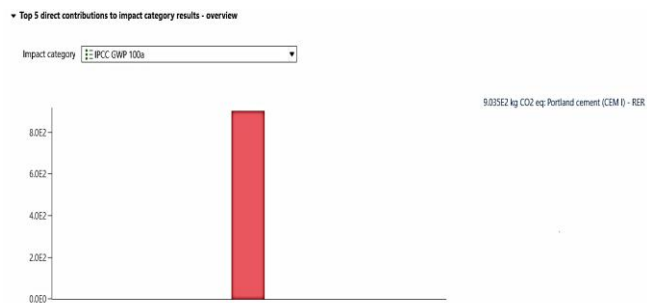


Fig. 4 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para el cemento Portland en términos de emisiones CO₂, elaboración propia mediante el software OpenLCA



Fig. 5 Resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para el cemento ecológico LC3 en términos de emisiones CO₂, elaboración propia mediante el software OpenLCA

Es relevante enfatizar que los resultados reflejan exclusivamente el efecto composicional dentro de un contexto tecnológico promedio europeo, dado que la base ELCD 3.2 fue empleada sin regionalización adicional. En consecuencia, la magnitud absoluta del GWP podría variar bajo matrices energéticas diferentes consideradas o en escenarios con mayor penetración de combustibles alternativos o tecnologías de captura de carbono aplicadas, como el CCS, CCUS o CCU. No obstante, el diferencial relativo observado entre CEM I y LC3 responde a la reducción del contenido de clínker, variable que domina estructuralmente el perfil de emisiones del cemento.

B. Comparación del diseño de mezcla y la resistencia a compresión

Para llevar a cabo la comparación del diseño de mezcla y la resistencia a la compresión, se implementaron (1), (2), (3) y (4) en la modelación numérica en MATLAB mediante códigos. Esto permitió realizar un análisis sistemático de los diseños de mezcla y evaluar cómo cada tipo de cemento influye en la resistencia a la compresión del concreto. En el estudio se emplearon dos tipos de cemento: cemento ecológico tipo LC3 y Cemento Portland Ordinario (OPC) tipo I, y la dosificación

de los materiales se estableció a partir de un diseño de mezclas, cuyos valores se detallan en la Tabla IV descrita como base para la comparación objetiva entre ambos cementos.

El diseño de mezcla se realizó conforme al método del American Concrete Institute (ACI), considerando un peso específico de 2.86 kg/cm³ para el cemento LC3 y 3.16 kg/cm³ para el OPC. La comparación de los diseños de mezcla para ambos tipos de cemento, bajo una condición equivalente a una tonelada de concreto, evidenció una variación en el contenido de agregado fino en la mezcla con cemento LC3. Esta diferencia se atribuye a su menor peso específico en comparación con el cemento Portland, lo que implica que, para una misma masa, el volumen ocupado por el cemento ecológico es mayor.

En consecuencia, el ajuste volumétrico requerido por el método ACI conduce a una reducción del agregado fino para mantener la relación agua-cemento y la trabajabilidad especificada. Este resultado confirma que las propiedades físicas del cemento influyen directamente en la proporción óptima de los componentes de la mezcla.

La Tabla IV presenta la dosificación detallada para tres escalas de referencia: una bolsa de cemento, un metro cúbico (m³) de concreto y una tonelada métrica (TM) de mezcla. La dosificación por tonelada permite estandarizar la comparación entre ambos tipos de cemento sobre una base común de masa total, facilitando la evaluación objetiva de las variaciones en los materiales constituyentes independientemente del volumen producido.

TABLA IV
PROPORCIONES DE LA MEZCLA DE CONCRETO CON CEMENTOS OPC
TIPO I Y LC3 POR BOLSA, METRO CÚBICO Y TONELADA

Material	Cemento Portland Ordinario Tipo I			Cemento Ecológico LC3		
	Bolsa de 42.5 kg	1 m ³	1 TM	Bolsa de 50 kg	1 m ³	1 TM
Cemento (kg)	42.5	386.7	1000	50	386.7	1000
Agregado fino* (kg)	107.4	977.3	2527.3	122	943.2	2438.9
Agregado grueso* (kg)	82.7	752.5	1945.7	97.3	752.5	1945.7
Agua (L)	26.6	242	626.2	31.3	241.9	626

*Las propiedades para el diseño se obtuvieron de la cantera La Poderosa

En relación con las propiedades mecánicas, la Fig. 6 muestra los resultados de resistencia a la compresión a edades de 7, 28 y 90 días. El concreto elaborado con cemento Portland alcanzó resistencias de 20.65 MPa, 29.56 MPa y 32.82 MPa, respectivamente. Por su parte, el concreto con cemento LC3 presentó resistencias superiores en todas las edades evaluadas: 22.72 MPa a los 7 días, 32.52 MPa a los 28 días y 36.10 MPa a los 90 días. Este comportamiento indica una mayor eficiencia

en el desarrollo de resistencia del LC3 atribuible a las reacciones puzolánicas adicionales derivadas de la presencia de arcilla calcinada y caliza que contribuyen a la densificación de la microestructura y a la reducción de la porosidad del material. La evolución temporal de la resistencia a lo largo del tiempo confirma esta tendencia, evidenciando un incremento progresivo de la resistencia para ambos cementos, aunque con valores consistentemente superiores en el caso del LC3. La pendiente más pronunciada en edades tempranas y el incremento sostenido hasta los 90 días sugieren un proceso de hidratación más prolongado y efectivo en el concreto con cemento ecológico.

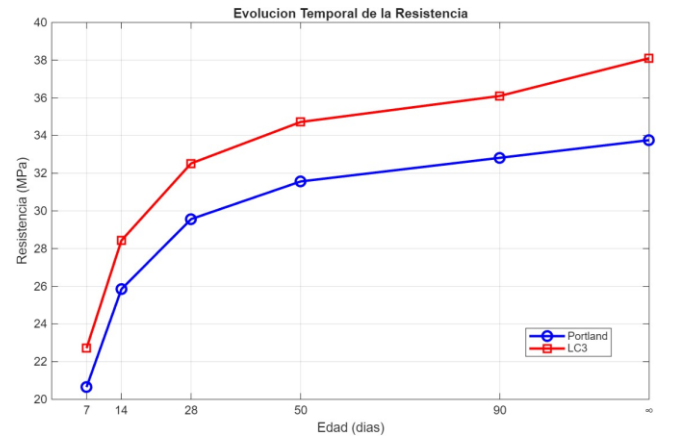


Fig. 6 Evolución temporal de la resistencia a la compresión del concreto elaborado con OPC y cemento ecológico LC3, elaboración propia mediante modelación numérica en MATLAB

Finalmente, la Fig. 7 muestra los valores simulados para una probeta de concreto sometida a compresión, evidenciando que la dosificación con LC3 supera en aproximadamente en 3 MPa a la mezcla con cemento Portland, una diferencia relevante considerando que dicha edad corresponde al criterio habitual de diseño estructural.

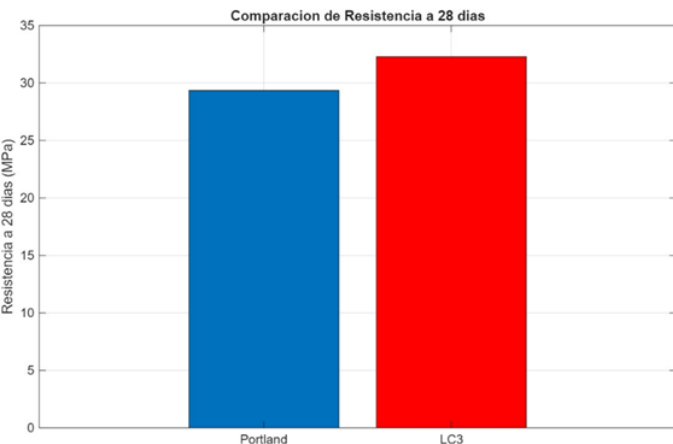


Fig. 7 Comparación de la resistencia a la compresión del diseño elaborado con OPC y el diseño elaborado con cemento ecológico LC3 a una edad de 28 días, elaboración propia mediante modelación numérica en MATLAB

C. Evaluación mecánica-ambiental

La Fig. 8 muestra el Índice de Eficiencia Estructural-Ambiental para ambos diseños de mezcla. El concreto a base de cemento Portland presenta un valor aproximado de 0.08 MPa/kg de CO₂, mientras que el LC3 alcanza cerca de 0.17 MPa/kg de CO₂, con un incremento cercano al 112 %.

Estos resultados indican que por cada kilogramo de CO₂ emitido, el LC3 proporciona aproximadamente 0.17 MPa de resistencia, en comparación con los 0.08 MPa del cemento Portland, lo que implica una mayor capacidad resistente con menor impacto climático, entendido como la huella de carbono del material. Esta mejora se atribuye principalmente a la reducción del contenido de clínker y al uso de materiales suplementarios que disminuyen las emisiones sin afectar negativamente el desempeño mecánico.

Para el análisis se utilizó el programa MATLAB con (5) y (7) como información de entrada, permitiendo calcular de manera precisa tanto la resistencia a compresión como la relación con las emisiones de CO₂ de cada tipo de cemento. Esto facilitó la cuantificación del índice de eficiencia estructural-ambiental y la comparación directa entre el concreto con LC3 y el Portland.

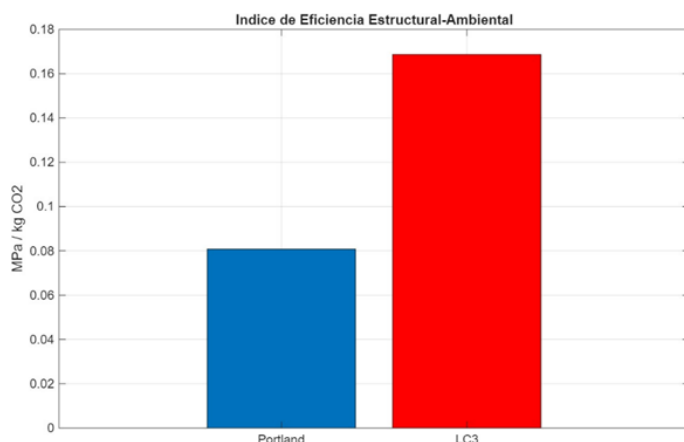


Fig. 8 Índice de eficiencia estructural - ambiental del OPC y cemento ecológico LC3, elaboración propia mediante modelación numérica en MATLAB

D. Evaluación económica

El análisis económico comparó el costo del cemento ecológico LC3 con el cemento Portland ordinario Tipo I utilizando precios reales de los mercados donde cada material está disponible, debido a que el LC3 aún no se produce de forma generalizada en América Latina.

El precio del LC3 se obtuvo del mercado mexicano, donde empresas como Holcim comercializan este tipo de cemento sostenible con un costo aproximado de US\$ 264 por tonelada. En cambio, el cemento Portland Tipo I corresponde al mercado peruano, donde su producción está consolidada, con un precio referencial de US\$ 150 por tonelada.

La comparación se justifica por las diferencias en disponibilidad y en normas técnicas entre países, ya que en Perú se emplea la clasificación ASTM Tipo I, mientras que en México se utilizan designaciones como OPC. Asimismo, aunque CEMEX es una empresa mexicana, el precio considerado del Portland corresponde al producto comercializado en Perú, el cual depende del contexto económico y logístico local.

En términos económicos y ambientales, el LC3 resulta competitivo debido a su menor contenido de clínker, lo que reduce el consumo energético y las emisiones de CO₂ durante su fabricación. No obstante, las diferencias de precio también están influenciadas por factores como transporte, impuestos y escala de producción. Por ello, los resultados constituyen una referencia económica que evidencia el potencial del LC3 como alternativa sostenible frente al cemento Portland tradicional.

IV. CONCLUSIONES

La diferencia de emisiones observada entre el sistema LC3 y el CEM I indica que la intensidad climática del cemento se encuentra condicionada principalmente por la proporción de clínker incorporada en el ligante y no por ajustes marginales del proceso. Dentro de los rangos cuantitativos evaluados, el LC3 alcanzó 513.5 kg CO₂-eq/t frente a 903.5 kg CO₂-eq/t para el cemento Portland convencional. La conservación del 56.8% de la carga climática respecto al CEM I redefine el umbral de referencia para cementos de uso estructural, situando al LC3 como una alternativa con impacto intrínsecamente menor sin alterar el marco industrial convencional. En consecuencia, la diferencia observada no constituye una variación circunstancial del inventario, sino una modificación estructural del perfil de emisiones del material, de modo que, el análisis demuestra, dentro de los límites cradle-to-gate adoptados, como la descarbonización efectiva del ligante no depende prioritariamente de la matriz energética, sino de la arquitectura composicional del cemento. La magnitud de esta reducción sugiere que la modificación composicional del cemento posee una incidencia más determinante sobre el desempeño ambiental del material que optimizaciones operativas asociadas exclusivamente al proceso de producción. Sin embargo, la evaluación ambiental se desarrolló mediante la base de datos europea ELCD 3.2 debido a la limitada disponibilidad de inventarios armonizados para materiales cementicios locales en América Latina, por lo que los resultados representan tendencias comparativas bajo condiciones controladas de modelado y no una extrapolación directa del desempeño ambiental regional.

En cuanto a las propiedades físicas, el estudio comparativo indicó que la menor densidad del LC3 modificó las proporciones volumétricas de la mezcla, particularmente en el contenido de agregado fino requerido para conservar condiciones de trabajabilidad y la relación agua-cemento.

Paralelamente, la resistencia a la compresión obtenida mediante modelación evidenció un comportamiento favorable del cemento LC3 en todas las edades analizadas, con incrementos cercanos a 3 MPa a los 28 días respecto al OPC bajo condiciones equivalentes de dosificación. El cemento LC3 mantuvo un comportamiento mecánico competitivo y, simultáneamente, registró una eficiencia estructural por unidad de huella de carbono considerablemente superior respecto al cemento convencional, que además aproximadamente duplica la eficiencia estructural contabilizada por emisiones de CO₂ asociadas a su producción. La incorporación de herramientas de modelación en MATLAB permitió cuantificar esta relación mediante un esquema analítico reproducible sustentado en parámetros reportados en literatura especializada.

Por otro lado, aunque el LC3 presentó un costo superior al cemento Portland convencional (US\$ 264/t frente a S/ US\$ 150/t), esta diferencia se encuentra condicionada por factores externos asociados a las escalas de producción, transporte, regulación y disponibilidad regional. La comparación económica se realizó considerando los mercados con mayor acceso a cada sistema cementicio, LC3 en México y OPC tipo I en Perú, por lo que los resultados sugieren que la competitividad del LC3 depende, en gran medida, de su nivel de implementación industrial y de las condiciones comerciales adoptadas en América Latina.

Bajo esta perspectiva, la sustitución parcial de clínker mediante arcilla calcinada y piedra caliza configura un mecanismo de mitigación con capacidad de reducir la carga climática del ligante sin depender de esquemas avanzados de captura de carbono o de reconversiones industriales y transformaciones tecnológicas de alta complejidad, como los métodos aplicados en los procesos de molienda, mezclado, secado y otras fases asociadas a la eficiencia de la planta. La introducción del cemento LC3 representa una línea de creciente interés científico para América Latina, particularmente en relación con futuros estudios experimentales orientados a validar su desempeño y analizar su viabilidad de implementación a escala regional en función a beneficios simultáneos en el rendimiento estructural y en la sostenibilidad ambiental con criterios técnicos y ambientales en el diseño de materiales de construcción que promuevan soluciones frente a los desafíos contemporáneos de eficiencia y sostenibilidad.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su sincero agradecimiento al Capítulo Estudiantil de ACI de la Universidad Tecnológica del Perú, campus de Arequipa, por el apoyo académico y el aliento brindados durante el desarrollo de esta investigación.

V. REFERENCIAS

- [1] J. Shao, S. Guo, and H. Wang, "A Review of the Performance, Sustainable Applications, and Research Challenges of Limestone- Calcined Clay-Cement (LC3) Systems," May 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/coatings15050611.
- [2] P. Vargas *et al.*, "Optimisation of Using Low-Grade Kaolinitic Clays in Limestone Calcined Clay Cement Production (LC3)," *Materials*, vol. 18, no. 2, Jan. 2025, doi: 10.3390/ma18020285.
- [3] F. Zunino and K. Scrivener, "Hydration and strength development of low-clinker (<50 %) factor limestone calcined clay cements (LC3): A comparative study with natural pozzolans," *Constr. Build. Mater.*, vol. 499, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144075.
- [4] M. A. Mohamed, A. Al-Fakih, and R. Assaggaf, "Comparative evaluation of limestone calcined clay cement and portland cement binders in rubberized self-compacting concrete," *Results in Engineering*, vol. 29, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.rineng.2026.109357.
- [5] N. R. Haddaway, M. J. Page, C. C. Pritchard, and L. A. McGuinness, "PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis," *Campbell Systematic Reviews*, vol. 18, no. 2, Jun. 2022, doi: 10.1002/cl2.1230.
- [6] L. K. A. Sear, J. Dews, B. Kite, F. C. Harris, and J. F. Troy, "Abrams law, air and high water-to-cement ratios," 1996.
- [7] G. M. Fortes, R. R. Lourenço, M. Montini, J. B. Gallo, and J. De Anchieta Rodrigues, "Synthesis and Mechanical Characterization of Iron Oxide Rich Sulfobelite Cements Prepared Using Bauxite Residue," *Materials Research*, vol. 19, no. 2, pp. 276–284, Mar. 2016, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0180.
- [8] R. S. Krishna *et al.*, "Waste iron ore tailings (IOTs) in limestone calcined clay cement (LC3) composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 497, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.143850.
- [9] K. S. Salama, E. A. Kishar, D. A. Ahmed, M. E. Saraya, E. El-Fadaly, and A. Allah M. Ebrahim, "Sustainable Render Mortars Using Limestone Calcined Clay Cement (LC3): Mechanical, Microstructural, and Environmental Evaluation," *Egypt. J. Chem.*, vol. 69, no. 2, pp. 541–557, Feb. 2026, doi: 10.21608/ejchem.2025.427145.12389.
- [10] Y. Pi, W. Xu, and Y. Wang, "Exploring the effect of sulfate level on the properties of limestone calcined clay cement (LC3): Mechanical performance, hydration kinetics and microstructure development," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 31, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.clet.2026.101168.
- [11] D. R. Nhuchhen, S. P. Sit, and D. B. Layzell, "Decarbonization of cement production in a hydrogen economy," *Appl. Energy*, vol. 317, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119180.
- [12] D. R. Nhuchhen, S. P. Sit, and D. B. Layzell, "Towards net-zero emission cement and power production using Molten Carbonate Fuel Cells," *Appl. Energy*, vol. 306, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.118001.
- [13] L. Proaño, A. T. Sarmiento, M. Figueredo, and M. Cobo, "Techno-economic evaluation of indirect carbonation for CO₂ emissions

- capture in cement industry: A system dynamics approach,” *J. Clean. Prod.*, vol. 263, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121457.
- [14] B. R. S. Calderón-Morales *et al.*, “Environmental and technical assessment on the application of slate waste in Portland-composite cement CEM II,” *Journal of Building Engineering*, vol. 95, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.110044.
- [15] N. P. Martínez *et al.*, “High-performance and low-cost electrochemical reactor for limestone decarbonation applied to clinker production – A validation at laboratory scale,” *J. Clean. Prod.*, vol. 468, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143112.
- [16] S. S. Narani and S. Siddiqua, “Accelerated carbonation of alkali-activated blended blast furnace slag and wood fly ash: Carbon capture kinetics, chemical and mechanical evolutions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 411, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134570.
- [17] J. Gong *et al.*, “Effect of graphene oxide on the properties of ternary limestone clay cement paste,” *Nanotechnol. Rev.*, vol. 13, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1515/ntrev-2023-0222.
- [18] J. L. Christófolli, H. F. Campos, N. S. Klein, and J. M. Filho, “Use of high-energy milling for reducing CO₂ emissions in quaternary blends of Portland cement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 459, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139470.
- [19] R. R. Z. Tarpani *et al.*, “Environmental assessment of cement production with added graphene,” *Cleaner Environmental Systems*, vol. 14, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.cesys.2024.100206.
- [20] Y. Wang, E. Halton, Y. Bao, and W. Meng, “Multifunctional high-performance cement aerogels for CO₂ sequestration and thermal insulation,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 163, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2025.106195.
- [21] H. Li, N. Zhang, J. Yang, L. Wang, T. Köberle, and V. Mechtcherine, “Synergistic reinforcement of recycled carbon fibers and biochar in high-performance, low-carbon cement composites: a sustainable pathway for construction materials,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 162, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2025.106148.
- [22] S. Lim, C. Myers, C. Chen, M. Akiyama, and T. Nakagaki, “Application of Sorel cement containing magnesium carbonate as concrete fine aggregate for sequestering CO₂: material and structural performance,” *J. Clean. Prod.*, vol. 519, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.145697.
- [23] P. R. Cunningham, L. Wang, S. Kane, A. Kim, B. M. Jenkins, and S. A. Miller, “Lifecycle implications and mechanical properties of carbonated biomass ashes as carbon-storing supplementary cementitious materials,” *Biomass Bioenergy*, vol. 197, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.107772.
- [24] H. Yu, S. Kharel, C. K. Lau, and K. Ng, “Effect of carbonation with different CO₂ phases on early-age properties of coal char-cement mixture,” *Journal of Building Engineering*, vol. 103, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.job.2025.112215.
- [25] P. M. Borges, L. A. Rother, S. R. da Silva, E. Possan, and J. J. de O. Andrade, “Environmental and technical assessment of mortars produced with recycled aggregate from construction and demolition waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 467, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.140407.
- [26] M. S. Felix, R. U. H. Zamora, M. A. A. Rubio, C. C. Gallardo, and J. M. H. Ramirez, “Sustainable Low-Carbon Cement: Performance Enhancement with Calcined Natural Pozzolans Through Compressive Strength, Porosity, and Microstructural Analysis,” *Materials*, vol. 18, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/ma18081776.
- [27] D. Kamath *et al.*, “Towards low-carbon low-energy concrete alternatives: Life cycle assessment of carbonated cementitious material-based precast panels,” *Science of the Total Environment*, vol. 976, May 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.179279.
- [28] D. O. de Lima, D. S. de Lira, L. E. V. Castillo, A. P. de L. M. Campos, M. F. Rojas, and H. S. Junior, “Development and characterization of low carbon cementitious composites reinforced with jute fabric subjected to CO₂ curing,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 450, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138527.
- [29] K. Cho, W. K. Kim, J. Moon, D. Cha, and J. Park, “Effect of in situ CO₂ mixing of cement paste on the leachability of hexavalent chromium (Cr(VI)),” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, no. 39, pp. 51582–51592, Aug. 2024, doi: 10.1007/s11356-024-34582-2.
- [30] F. M. Nishat, I. B. Borno, A. Tahsin, and W. Ashraf, “New insights into the interaction between seawater and CO₂-activated calcium silicate composites,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 157, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2025.105929.
- [31] Z. X. Chen, N. T. Zhang, and S. H. Chu, “Role of alkalinity in CO₂ sequestration of γ -belite,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 432, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136508.
- [32] A. Mostafa, H. M. Khater, M. Gharieb, and M. Anwar, “Sustainable cement production: minimizing CO₂ by optimizing efficiency with LC3,” *Discover Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.1007/s42452-025-07298-2.