

FIBRAS NATURALES COMO REFUERZO: PERSPECTIVAS EN CEMENTOS ALTERNATIVOS

NATURAL FIBERS AS REINFORCEMENT: PERSPECTIVES IN
ALTERNATIVE CEMENTS

RESUMEN

Para reducir los efectos nocivos debidos a las altas emisiones de dióxido de carbono (CO_2) generadas durante el proceso de fabricación del cemento Portland (CP), estimadas en un 8 % anual a nivel mundial, se presenta como alternativa el desarrollo de un material cementante sostenible con base en cemento de sulfoaluminato de calcio (SAC) y fibras naturales provenientes de residuos agroindustriales: cáscara de coco (CC), hojas de piña (HP) y tallo de lechuguilla de agave (LA), como refuerzo. El uso del SAC disminuye el consumo energético, fomentando un rápido desarrollo de la resistencia desde etapas tempranas del curado, así como una mayor durabilidad del material expuesto a ambientes agresivos, como los cloruros o los sulfatos. Por su parte, el uso de las fibras lignocelulósicas mejora la resistencia a la flexión y la ductilidad, actuando como elementos de control de fisuras. Los retos principales por resolver, incluyendo la alta absorción de agua y la degradación química en el medio alcalino de la matriz, se abordan mediante modificaciones superficiales y tratamientos químicos. Este nuevo material representa una solución viable que contribuye a la descarbonización y fomenta el desarrollo de la economía circular.

Palabras clave: cemento de sulfoaluminato de calcio (SAC); economía circular; fibras naturales (FN); materiales de construcción.

ABSTRACT

To reduce the environmental impact of high carbon dioxide (CO_2) emissions from Portland cement (PC) production, which accounts for 8 % of global emissions annually, the development of a sustainable cementitious material based on calcium sulfoaluminate (CSA) cement, and natural fibers (NF) derived from agro-industrial residues is presented. Three types of reinforcements were

PEÑA MONSIVÁIS, Miranda Elizabeth¹

GALLARDO HEREDIA, Marisol¹

GARCÍA LOBATO, Marco Antonio¹

MALDONADO, Yadira Guadalupe²

1. Facultad de Ciencias Químicas,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Saltillo, Coahuila,
México.
2. Centro Nacional de Metrología
CENAM. El Marqués, Querétaro,
México.

Correspondencia
marisol.gallardo@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4333-7984>

Fecha de recepción
14 de enero de 2026.
Fecha de aceptación
16 de junio de 2026.

analyzed: coconut husk (CC), pineapple leaves (PL), and agave lechuguilla stalk (LA). The use of CSA cement reduces energy consumption and promotes rapid early-age strength development and enhanced durability in aggressive environments. Simultaneously, the incorporation of lignocellulosic fibers improves flexural strength and ductility by acting as crack-control elements. Key technical challenges, such as high-water absorption and chemical degradation in the alkaline matrix, are addressed through surface chemical treatments. This material offers a viable solution for decarbonization while fostering a circular-economy model for construction materials.

Keywords: calcium sulphoaluminate cement (CSA), circular economy, natural fibers (NF), building materials.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano y la demanda de infraestructura proyectan una producción de cemento Portland (CP) de 4.4 mil millones de toneladas para 2025. Este volumen genera un impacto ambiental crítico, con emisiones de dióxido de carbono (CO_2) estimadas entre 0.8 y 0.9 toneladas por cada tonelada de cemento producido. Ante este panorama, la industria busca alternativas sostenibles que reduzcan la huella de carbono sin comprometer las propiedades mecánicas y la durabilidad de los materiales (Negrao, 2022).

La presente investigación propone el uso de cementos de sulfoaluminato de calcio (SAC) reforzados con fibras naturales (FN) provenientes de residuos agroindustriales. Se analiza cómo la incorporación de estos refuerzos lignocelulósicos puede mejorar la tenacidad del material, ofreciendo una alternativa competitiva y viable frente a los refuerzos tradicionales (Lertwattanakul & Suntijitto, 2015).

METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una revisión narrativa de la literatura científica técnica. La búsqueda de información se realizó en las bases de datos Scopus, ScienceDirect y Google Scholar, abarcando el periodo de 2015 a 2026. Los criterios de selección se centraron en estudios sobre el desarrollo de cementos



de sulfoaluminato de calcio (SAC) y el aprovechamiento de fibras naturales de coco, piña y agave como refuerzo sustentable en matrices cementantes descarbonizadas.

CONTEXTO ACTUAL Y DESAFÍOS DE LA INDUSTRIA CEMENTERA

Los problemas generados por el creciente impacto ambiental de la industria cementera han sido el detonante para el desarrollo de diversos estudios que buscan combatir esta problemática con materiales cementantes alternativos como una sustitución parcial o total del cemento Portland. Entre los objetivos principales han destacado la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, disminución de las altas demandas de energía de la industria, combate de la sobreexplotación de recursos naturales, desarrollo de buenas propiedades mecánicas, evaluación de la durabilidad, trabajabilidad, entre otros (Navarro Ferrer, 2022).

CEMENTOS ALTERNATIVOS Y LA DESCARBONIZACIÓN

Al ser un material con tan alta demanda, es importante analizar a profundidad los efectos provocados por la industria del cemento tradicional tanto en el pasado como en el presente. Se puede comprender que son necesarios cambios en el proceso de producción.

Al reestructurar los materiales usados como base, así como los procesos energéticos, se podrá reducir el impacto ambiental de manera eficiente, ya que no es posible hacer un cambio significativo sin reemplazar los dos factores de impacto más importantes:

1. El gasto energético relacionado con el proceso de clinkerización
2. Las altas emisiones de CO_2 derivadas de la descarbonatación de la caliza (CaCO_3), producidas por la reacción $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (Bizzozero et al., 2011).

De manera general, las líneas de investigación consultadas para el desarrollo de cementos alternativos pueden agruparse en tres grupos:

1. Sistemas de activación alcalina (incluyendo el desarrollo de materiales geopoliméricos). En la elaboración de estos sistemas se

incluye una diversidad de materiales como materias primas: desde subproductos industriales como las cenizas volantes, distintos tipos de desechos urbanos, e incluso fuentes naturales de silicoaluminatos como las arcillas calcinadas. Los precursores reaccionan con soluciones alcalinas a temperaturas inferiores a las necesarias para el proceso de clinkerización del CP, con reducciones potenciales de las emisiones de CO₂ hasta un 80 % y con propiedades mecánicas competitivas (Correa-Zeña et al., 2023).

2. Cementos con adiciones puzolánicas. Estos cementos se consideran como una sustitución parcial de los cementos tradicionales, el objetivo es reducir el contenido de clínker al hacer una incorporación de materiales como lo son algunos subproductos industriales, entre ellos la escoria de alto horno, o bien materiales naturales con baja calcinación. De esta forma, se reduce la huella de carbono y se aprovecha el uso de materias primas que, de no reutilizarse, podrían terminar en vertederos y aumentar la contaminación.
3. Cementos a base de sulfoaluminato de calcio (SAC). Este tipo de cementos se caracteriza por sus bajos requerimientos de carbonatos de calcio en las materias primas necesarias para su clinkerización, un rápido desarrollo de su resistencia mecánica, tiempos de fraguado cortos y temperaturas de manufactura entre 1110 °C y 1250 °C. El SAC destaca por su eficiencia térmica, ya que su síntesis requiere temperaturas significativamente menores que los 1450 °C del cemento Portland tradicional. Esta reducción térmica, junto con el menor uso de caliza, permite disminuir las emisiones de CO₂ hasta en un 40 %, lo que valida su viabilidad como material descarbonizado (tabla 1). Se pueden utilizar distintas fuentes de materias primas como minerales naturales, desechos o subproductos industriales, además de yesos, escorias o ceniza (Gallardo Heredia et al., 2016).

Tabla 1. Comparativa de propiedades mecánicas y ambientales: SAC vs. CP.

Parámetro	Cemento Portland (CP)	Cemento Sulfoaluminato de Calcio (SAC)
Temperatura de clinkerización	~1450 °C	1110 °C–1250 °C
Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂)	0.8-0.9 t/t	~0.5 (reducción del 35 %–40 %)
Fase principal	Alita y belita	Yeélimita (C ₄ A ₃ S)
Contenido de caliza (CaCO ₃)	Elevado	Bajo

CARACTERIZACIÓN Y PROPIEDADES
MECÁNICAS DEL SAC

El SAC se caracteriza por ser un material ligante de fraguado rápido, con tiempos entre los 12 y los 180 minutos. Durante este periodo alcanza un endurecimiento notable, dependiendo de la formulación y adición de retardantes. Sin embargo, se considera que su resistencia a la compresión (RC) en etapas iniciales se desarrolla entre 60 min y 24 h de fraguado (Li et al., 2025).

La RC de los SAC a 1 día de fraguado puede superar en un 25–30 % los valores presentados por un cemento Portland compuesto (CPC). Sin embargo, se ha observado que, a los 28 días de curado, este valor puede alcanzar valores de 35 y 55 Mpa.

La fase principal del clíinker del SAC es la yeélimita (C₄A₃S), cuya estructura cristalina (figura 1) es responsable del rápido fraguado y de la formación de etringita durante la hidratación. Esta configuración atómica permite una red densa que favorece la adhesión interfacial con los refuerzos lignocelulósicos,

optimizando la transferencia de esfuerzos en el material compuesto. Además presenta fases secundarias como Belita, Mayenita y Ferrita (tabla 2) (Tanguler-Bayramtan et al., 2024).

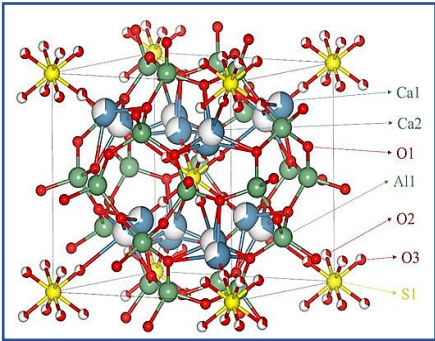


Figura 1. Esquema de la estructura cristalina de la Yeélimita.
Tomado de Wu et al. (2024).

Tabla 2. Principales fases cristalinas presentes en el SAC.

Fase cristalina	Nomenclatura	Estructura y función
Yeélimita	C_4A_3S	Responsable primaria del rápido desarrollo de propiedades y del rápido fraguado.
Belita	C_2S	Aporta principalmente la resistencia final a largo plazo.
Mayenita	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$	Determina junto con la Yeélimita, la resistencia inicial y el tiempo de fraguado.
Ferrítica	C_4AF	Fase secundaria que aporta en menor medida a la resistencia final.

APLICACIONES Y VENTAJAS DE DURABILIDAD DEL SAC

El uso del SAC presenta ventajas importantes en el desarrollo de formulaciones de cementos alternativos. Estudios señalan que, al evaluar materiales con SAC en su composición, estos muestran mayor resistencia en ambientes agresivos, principalmente frente a cloruros y sulfatos, y presentan una menor absorción de cloruros y mayor estabilidad dimensional frente a la expansión por sulfatos. Esto demuestra el potencial de este material para aplicaciones estructurales en ambientes expuestos a condiciones marinas, industriales o de ingeniería avanzada (Tan et al., 2020).

La durabilidad de las estructuras convencionales se ve severamente comprometida en estos entornos. El ataque por agentes externos en el cemento Portland convencional provoca la corrosión del refuerzo y la degradación de la matriz, lo que reduce drásticamente la vida útil de la



infraestructura (figura 2). Ante este panorama, el SAC surge como una alternativa superior debido a su capacidad para mitigar estos efectos nocivos y ofrecer una protección intrínseca frente a la degradación química (figura 2).

Figura 2. Efectos nocivos del ataque por agentes agresivos (cloruros y sulfatos) en el concreto convencional.



CLASIFICACIÓN DE LAS FIBRAS Y POTENCIAL DE USO EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

La incorporación de fibras de origen vegetal en matrices cementantes no solo responde a criterios de sostenibilidad, sino que también busca mejorar propiedades críticas como la tenacidad y la resistencia a la flexión (figura 3). Al actuar como puentes que detienen la propagación de las microfisuras en la matriz del material, la falla se vuelve más dúctil y controlada (figura 3).



Figura 3. El uso de las fibras naturales en una matriz de cemento tiene potencial dentro de la industria de la construcción.

En este sentido, estudios reportados demuestran que la incorporación óptima de fibras naturales, entre 0.5 % y 2.0 % en volumen, puede incrementar la resistencia a la flexión entre un 15 % y un 30 % en comparación con matrices sin refuerzo (Adamu et al., 2022).

Las fibras se clasifican principalmente en fibras naturales (FN), derivadas de fuentes renovables, y se subdividen según su origen en minerales (como el amianto), orgánicas de origen animal (pelo o lana) y de origen vegetal. Estas últimas se clasifican según su procedencia botánica en: de cáscara (coco), de hoja (piña) y de tallo (agave) (figura 4). Por otro lado, las fibras sintéticas provienen de la polimerización, como el poliéster, mientras que las artificiales derivan de la celulosa modificada, como el rayón. En esta categoría también se integran fibras minerales, como las de vidrio o de acero; si bien estas son fundamentales, generalmente implican mayores costos económicos y energéticos en comparación con las opciones lignocelulósicas.

Las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales dependen directamente de su composición química, específicamente de sus niveles de celulosa, hemicelulosa y lignina. Las tres variantes lignocelulósicas seleccionadas para esta revisión destacan por su disponibilidad regional y su

potencial para mejorar la ductilidad en matrices cementantes descarbonizadas (figura 4).



Figura 4. Caracterización visual de las fibras naturales: a) lechuguilla de agave, b) hoja de piña y c) cáscara de coco (CC).

Por lo tanto, la diversidad en la disponibilidad de fibras naturales se considera de alto potencial como alternativa sostenible para el desarrollo de materiales (Benites Cerna & Paredes Novoa, 2024).

Una de las ventajas significativas al utilizar las fibras naturales es la sostenibilidad y la disminución de costos en comparación con sus contrapartes de origen sintético, ya que representan una fuente renovable y, asimismo, implican una mayor seguridad en su uso (Adamu et al., 2022).

RENDIMIENTOS Y DESAFÍOS TÉCNICOS DE LAS FIBRAS NATURALES

El uso de fibras naturales en el cemento incrementa su resistencia a la flexión y su capacidad de absorber energía antes de la ruptura del material (Imran et al., 2024).



Para fundamentar el análisis, se detallan los parámetros de composición y resistencia de cada fibra, lo que permite una comparación directa de sus capacidades de refuerzo (tabla 3).

Tabla 3. Propiedades mecánicas de distintos tipos de fibras naturales.

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la Tracción (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Ductilidad (%)	Características de la Matriz
Coco	1.10–1.40	130–250	4–6	15–30	Alta tenacidad, excelente resistencia al agua y a la degradación.
Piña	1.30–1.60	400–800	12–20	3.0–5.0	Alta rigidez y resistencia; propiedades similares a las sintéticas.
Lechuguilla	1.20–1.50	300–600	8–18	2.5–4.5	Buenas propiedades mecánicas, potencial de bajo costo y regional.

La fibra de piña presenta la mayor resistencia a la tracción y módulo de elasticidad; sin embargo, la fibra de coco presenta el mayor porcentaje de alargamiento a la rotura, mientras que la lechuguilla presenta buen potencial para su uso debido a sus buenas propiedades mecánicas, bajo costo y disponibilidad a nivel regional.

Al actuar como puentes que detienen la propagación de las microfisuras en la matriz del material, la falla será más dúctil y controlada.

En este sentido, estudios reportados (Adamu et al., 2022; Imran et al., 2024) demuestran que la incorporación óptima de fibras naturales (entre 0.5 % y 2.0 % en volumen) puede incrementar la resistencia a la flexión entre un 15 % y un 30 % en comparación con matrices sin refuerzo, además de aumentar significativamente el índice de tenacidad. Otra ventaja de su incorporación es limitar la contracción plástica, un fenómeno crítico que ocurre en la etapa temprana del curado (figura 5).

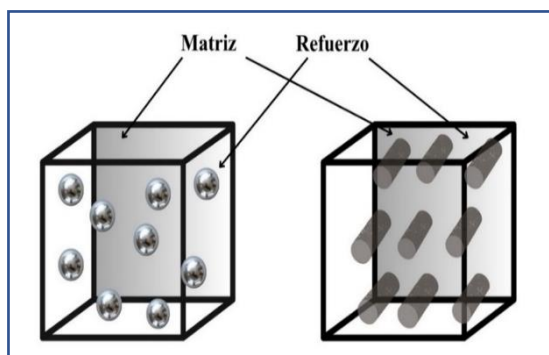
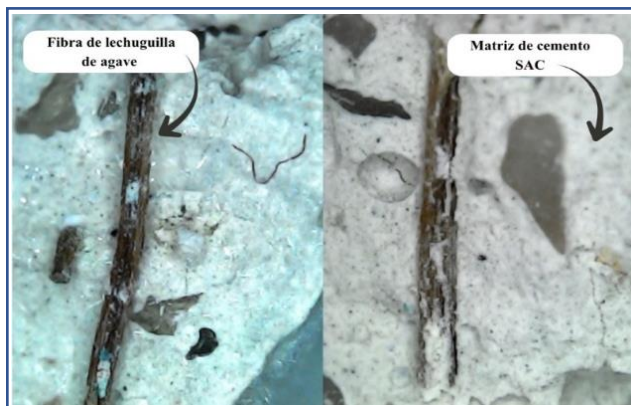


Figura 5. Representación esquemática de la adición de fibras como refuerzo en una matriz cementante.

Existen dos limitantes al trabajar fibras en cementos: la alta absorción de agua por las fibras, lo que puede provocar porosidad y debilitamiento de la matriz. La segunda es la degradación alcalina, debido a que la fibra, por su alto contenido de celulosa, puede disminuir su rendimiento con el tiempo (figura 6).

La eficiencia del refuerzo depende de la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz de SAC. Debido a que las fibras naturales son hidrofílicas y la matriz es inorgánica, se genera una zona de transición interfacial que determina la capacidad de transferencia de esfuerzos.



El uso de recubrimientos (figura 7) no solo previene la degradación, sino que también mejora el anclaje mecánico, lo que permite que la fibra actúe como un puente efectivo que detiene la propagación de microfisuras bajo cargas de flexión (Herlina Sari et al., 2024).

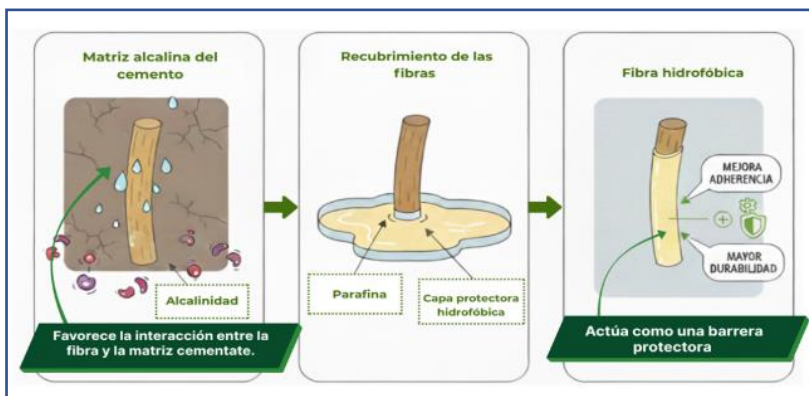


Figura 7. Mecanismo de protección de la fibra mediante recubrimiento hidrofóbico.

Las diferencias en las propiedades físicas y mecánicas de los cementos con refuerzo de fibra dependen tanto de los contenidos como del tipo de fibra empleada (Al-Zubaidi, 2018).

ECONOMÍA CIRCULAR Y FIBRAS NATURALES COMO REFUERZO EN MATRICES CEMENTICIAS

Los principios de economía circular (EC) representan un reto importante, ya que promueven la reutilización de residuos y definen las fibras como un recurso que apoya la ingeniería de materiales (figura 8). Siguiendo estos principios, se propone un diseño en el que se desarrollen materiales cementantes aptos para su uso en la industria de la construcción (Medina Leyva & Valenzuela Cayotopa, 2023).

A pesar del alto potencial técnico, la implementación industrial enfrenta barreras, como la viabilidad de las propiedades de las fibras según su origen regional y la falta de normatividad específica para el uso de SAC reforzado en aplicaciones estructurales de gran escala. Sin embargo, el análisis preliminar de ciclo de vida indica que la sustitución del CP por sistemas SAC-FN puede reducir la huella de carbono del elemento constructivo final hasta un 44 %.

La aplicación de estos compuestos en la fabricación de paneles ligeros y bloques sustentables representa una oportunidad para el sector de la vivienda de bajo costo, permitiendo sustituir los refuerzos metálicos por fibras regionales y optimizar el desempeño térmico de las edificaciones.



Figura 8. Propuesta de modelo de la economía circular en cementos SAC con refuerzo de fibras naturales.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta revisión indican que la adición de fibras naturales mejora significativamente el desempeño mecánico del compuesto, lo que permite una transferencia de esfuerzos eficiente y un control eficaz de la propagación de fisuras. Aunque persisten desafíos técnicos relacionados con la degradación en medio alcalino, el uso de tratamientos químicos y recubrimientos optimiza la sinergia entre los biomateriales y la matriz descarbonizada.

Finalmente, la integración de residuos agroindustriales valida el potencial de estos compuestos para consolidar un modelo de economía circular en la ingeniería de materiales.

REFERENCIAS

- Adamu, M., Alanazi, F., Ibrahim, Y. E., Alanazi, H., & Khed, V. C. (2022). A comprehensive review on sustainable natural fiber in cementitious composites: The date palm fiber case. *Sustainability*, 14(11), Article 6691. <https://doi.org/10.3390/su14116691>
- Imran, A. I., Siregar, J. P., Cionita, T., Hadi, A. E., Setiyo, M., Mat Rejab, M. R., Jaafar, J., Fitriyana, D. F., & Dewi, R. (2024). Advancements in sustainable material development: A comprehensive review of coir fiber and its composites. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 4(3), 415–454. <https://doi.org/10.31603/mesi.12556>

- Al-Zubaidi, A. B. (2018). Effect of natural fibers on mechanical properties of green cement mortar. *AIP Conference Proceedings*, 1968(1), 020003. <https://doi.org/10.1063/1.5039162>
- Benites Cerna, A. E., & Paredes Novoa, A. J. (2024). *Estudio teórico del impacto de fibras naturales en la mejora de las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural sostenible* [Trabajo de investigación de bachillerato, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional USS. <https://hdl.handle.net/20.500.12802/13502>
- Bizzozero, J., Gosselin, C., & Scrivener, K. L. (2011). Dimensional stability of calcium aluminate and sulfoaluminate systems. In *Novel developments and innovation in cementitious materials* (Paper No. 27). Imperial College London.
- Correa-Zeña, A., Hurtado-Bravo, A. H., & Muñoz-Pérez, S. P. (2023). Revisión sistemática de las propiedades físico-mecánicas del hormigón con incorporación de ceniza de madera. *Ingeniería y Competitividad*, 25(2), e-30111825. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i2.11825>
- Gallardo H., M., Almanza R., J. M., Cortés H., D. A., & Escobedo B., J. C. (2016). Comportamiento mecánico y químico de cementos de sulfoaluminato de calcio obtenido a partir de desechos industriales. *Revista ALCONPAT*, 6(1), 15–27. <https://doi.org/10.21041/ra.v6i1.112>
- Herlina Sari, N., Suteja, Sutaryono, Y. A., & Khan, M. A. (2024). A review: Fracture structure of natural fiber surface after treatment with various alkali chemicals. *Journal of Fibers and Polymer Composites*, 3(2), 158–180. <https://doi.org/10.55043/jfpc.v3i2.203>
- Lertwattanaruk, P., & Suntijitto, A. (2015). Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. *Construction and Building Materials*, 94, 664–669. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.154>
- Li, H., Meng, J., Liu, Y., Yang, L., Wang, Y., Xie, N., Ou, J., & Zhou, G. (2025). A review of the calcium sulphoaluminate cement mixed with seawater: Hydration process, microstructure, and durability. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(6), Article 1076. <https://doi.org/10.3390/jmse13061076>
- Medina Leyva, K. G., & Valenzuela Cayotopa, J. A. (2023). *Propiedades y patologías del concreto con fibras de coco y cenizas de hoja de piña en Ate - 2023* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/137086>
- Navarro Ferrer, F. (2022). *Cementos alternativos al cemento Portland* [Trabajo de fin de máster, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea]. ADDI Repositorio Institucional. https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/61001/TFM_NavarroFrancisco.pdf?sequence=4

- Negrão, L. B. A. (2022). *Production of CO₂-reduced eco-cements using bauxite-mining overburden Belterra Clay and bauxite washing residue from Brazilian Amazon* [Tesis doctoral, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg]. <https://opendata.uni-halle.de/handle/1981185920/80419>
- Tan, B., Okoronkwo, M. U., Kumar, A., & Ma, H. (2020). Durability of calcium sulfoaluminate cement concrete. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 21(2), 118–128. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1900588>
- Tanguler-Bayramtan, M., Aktas, C. B., & Yaman, I. O. (2024). Environmental assessment of calcium sulfoaluminate cement: A Monte Carlo simulation in an industrial symbiosis framework. *Buildings*, 14(11), Article 3673. <https://doi.org/10.3390/buildings14113673>
- Wu, S., Ren, C., Sun, Y., & Wang, W. (2024). Synthesis, structure, and hydration of stoichiometric ye'elimite and iron-bearing ye'elimite. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 13(1), 164–177. <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2258500>