

El legado continuo de la caliza: de pilar ancestral de la construcción a precursor moderno en sinergia con el concreto reciclado.

J. I. Escalante-García^{1*} 

*Autor de Contacto: ivan.escalante@cinvestav.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.838>

Recibido: 06/05/2025 | Correcciones recibidas: 13/09/2025 | Aceptado: 16/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

RESUMEN

Ante la urgencia de reducir el impacto ambiental del cemento Portland, esta revisión explora el potencial de la piedra caliza y el concreto reciclado pulverizado (CRP) como pilares para aglomerantes sostenibles. Se analiza el rol histórico y actual de la caliza, desde su uso ancestral hasta su aplicación en cementos modernos, LC³ y, crucialmente, como precursor en cementos activados alcalinamente (CAA). Se examina también el CRP como precursor en CAA, destacando su contribución a la economía circular. Se discuten las ventajas ambientales y de desempeño de los CAA basados en estos materiales, así como los desafíos clave, incluyendo la durabilidad a largo plazo, la variabilidad de las materias primas y la necesidad de estandarización. Se concluye que ambos recursos son estratégicos, requiriendo investigación focalizada para su implementación efectiva.

Palabras clave: caliza; cemento Portland; concreto reciclado; cementos alcalinos; cementos sustentables.

Citar como: Escalante-García, J. I. (2026), “*El legado continuo de la caliza: de pilar ancestral de la construcción a precursor moderno en sinergia con el concreto reciclado*”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 1 – 22, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.838>

¹ Grupo de Ingeniería Cerámica, Cinvestav Unidad Saltillo, Ramos Arizpe, Coahuila, México.

Contribución de cada autor

En este trabajo José Iván Escalante García es el único autor, por lo tanto, el participó en todas las actividades para realizar su contenido.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2026) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2026.

The enduring legacy of limestone: from an ancestral pillar of construction to a modern precursor in synergy with recycled concrete.

ABSTRACT

Facing the urgent need to reduce the environmental impact of Portland cement, this review explores the potential of limestone and pulverized recycled concrete (PRC) as pillars for sustainable binders. The historical and current role of limestone is analyzed, from its ancestral use to its application in modern cements, LC³, and, crucially, as a precursor in alkali-activated cements (AACs). PRC as a precursor in AACs is also examined, highlighting its contribution to the circular economy. The environmental and performance advantages of AACs based on these materials are discussed, as well as key challenges, including long-term durability, raw material variability, and the need for standardization. It is concluded that both resources are strategic, requiring focused research for their effective implementation.

Keywords: limestone; Portland cement; recycled concrete; alkali-activated cements; sustainable cements.

O legado contínuo do calcário: de pilar ancestral da construção a precursor moderno em sinergia com o concreto reciclado.

RESUMO

Diante da urgência de reduzir o impacto ambiental do cimento Portland, esta revisão explora o potencial do calcário e do concreto reciclado pulverizado (CRP) como pilares para aglomerantes sustentáveis. Analisa-se o papel histórico e atual do calcário, desde seu uso ancestral até sua aplicação em cimentos modernos, LC³ e, crucialmente, como precursor em CAA, destacando sua contribuição para a economia circular. Discutem-se as vantagens ambientais e de desempenho dos CAA baseados nesses materiais, bem como os desafios-chave, incluindo a durabilidade a longo prazo, a variabilidade das matérias-primas e a necessidade de padronização. Conclui-se que ambos os recursos são estratégicos, requerendo pesquisa focada para sua implementação efetiva.

Palavras-chave: calcário; cimento Portland; concreto reciclado; cimentos álcali-ativados; cimentos sustentáveis.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

La reproducción total o parcial de los contenidos y imágenes de la publicación se realiza en apego al código COPE y a la licencia CC BY 4.0 de la Revista ALCONPAT.

1. INTRODUCCIÓN

El siglo XXI enfrenta a la industria de la construcción con el desafío de conciliar su desarrollo con la sostenibilidad ambiental. El crecimiento demográfico y la continua urbanización, especialmente en regiones de menor desarrollo económico (United Nations, World Urbanization Prospects, 2018), impulsan una alta demanda de infraestructura, generando a su vez un considerable impacto ambiental. Este impacto está asociado en gran medida asociado a la producción de sus materiales esenciales como el cemento Portland (CP), aglomerante por excelencia del concreto moderno y responsable de ≈8% de las emisiones antropogénicas globales de CO₂ (Ortega-Zavala et al., 2019; Schneider, 2019), cuya producción es intensiva en el consumo de energía y recursos naturales.

Ante este panorama, es imperante adoptar materiales cementicios y prácticas constructivas de menor huella ecológica. En esta búsqueda, la piedra caliza, un recurso geológico abundante con un legado en la construcción de más de 10,000 años (Courland, 2011), emerge como un pilar fundamental. Su rol actual es notablemente multifacético: Abarca desde su uso como agregado y materia prima esencial para producir clínker de CP, hasta su posicionamiento como un versátil material cementicio suplementario (MCS) en CPs compuestos y en los innovadores cementos LC³ (Limestone Calcined Clay Cement) (Scrivener et al., 2018), culminando en su prometedor potencial como precursor reactivo (individual o en combinación) en la tecnología de los cementos activados por álcalis (CAA, Ortega-Zavala et al., 2019).

Paralelamente, la creciente generación de residuos de construcción y demolición (RCD), que globalmente alcanzan aproximadamente 10,000 Mt/año (Chen et al., 2021), representa (a) un desafío ambiental considerable y (b) una oportunidad para implementar modelos de economía circular. Dentro de estos RCD, el concreto de estructuras demolidas, particularmente aquel elaborado originalmente con agregados calizos, es un precursor valioso para nuevos aglomerantes. La transformación de este concreto reciclado pulverizado (CRP) en un componente activo (precursor cementicio) para cementos alternativos, como los CAA, resuelve problemas de su disposición final y reduce la explotación de recursos vírgenes (Rodríguez-Morales et al., 2024).

Este artículo de perspectiva analiza el papel evolutivo y multifacético de la caliza, y la contribución emergente del CRP de base caliza, en el desarrollo de cementos de bajo impacto ambiental. Se explora la trayectoria de la caliza desde sus usos históricos, pasando por su función actual en la industria del CP, hasta su incorporación en sistemas cementicios innovadores y sustentables. Adicionalmente, se examina el potencial del CRP como precursor. Finalmente, se discuten las ventajas inherentes de estos materiales innovadores, los desafíos tecnológicos y de durabilidad por superar, y las perspectivas de investigación necesarias para consolidar su integración efectiva en una industria de la construcción verdaderamente sostenible.

2. LA CALIZA: DE RECURSO ANCESTRAL A COMPONENTE CLAVE EN CEMENTOS MODERNOS

La roca caliza (CaCO₃), es un material usado en la construcción desde civilizaciones ancestrales. Evidencias arqueológicas en Göbekli Tepe (actual Turquía), sugieren que productos derivados de la caliza ya se utilizaban hace más de 11,000 años, demostrando relación fundamental con el desarrollo constructivo humano (Courland, 2011). La vasta presencia de estas rocas es notable; se estima que globalmente el 15.2% de la superficie terrestre libre de hielo (equivalente a 20.3 millones de km²) corresponde a rocas carbonáceas, de las cuales 9.4% son continuas y 5.8% son discontinuas o mezcladas con evaporitas (Goldscheider, et. al., 2020), ver Figura 1. Dada esta amplia disponibilidad, la caliza ha sido, consecuentemente, la base para la elaboración de aglomerantes y materiales de construcción durante milenarios.

2.1 Usos históricos y tradicionales: la era de la cal

El verdadero salto tecnológico en el uso de la caliza como aglomerante se atribuye a la civilización romana, que perfeccionó el proceso de calcinación a 800-900°C para producir óxido de calcio (CaO , cal viva), la cual al hidratarse genera hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, cal apagada). Este compuesto endurece al reaccionar lentamente con el CO_2 atmosférico, revirtiendo a CaCO_3 y completando el "ciclo cerrado de la cal" (Figura 2, el producto final y la roca original son CaCO_3) lo que es en parte responsable de durabilidad de muchas construcciones antiguas.

La genialidad romana, sin embargo, fue ir un paso más allá, al mezclar la cal apagada con materiales puzolánicos reactivos, como cenizas volcánicas o incluso fragmentos cerámicos finamente molidos. Estas adiciones reaccionaban químicamente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en presencia de humedad, formando compuestos hidráulicos (principalmente silicatos y aluminatos de calcio hidratados, ver *Tabla 1*), que conferían a los morteros y concretos romanos una resistencia mecánica superior, estabilidad bajo el agua y una durabilidad excepcional por siglos.

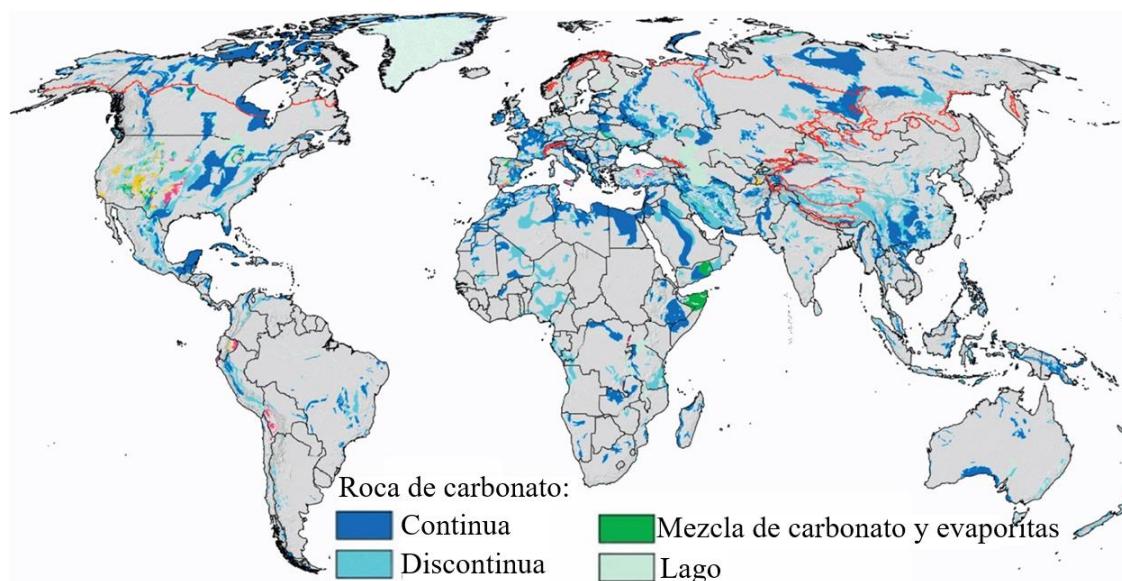


Figura 1. Distribución de rocas carbonatadas. Modificado de (Goldscheider, et. al., 2020).

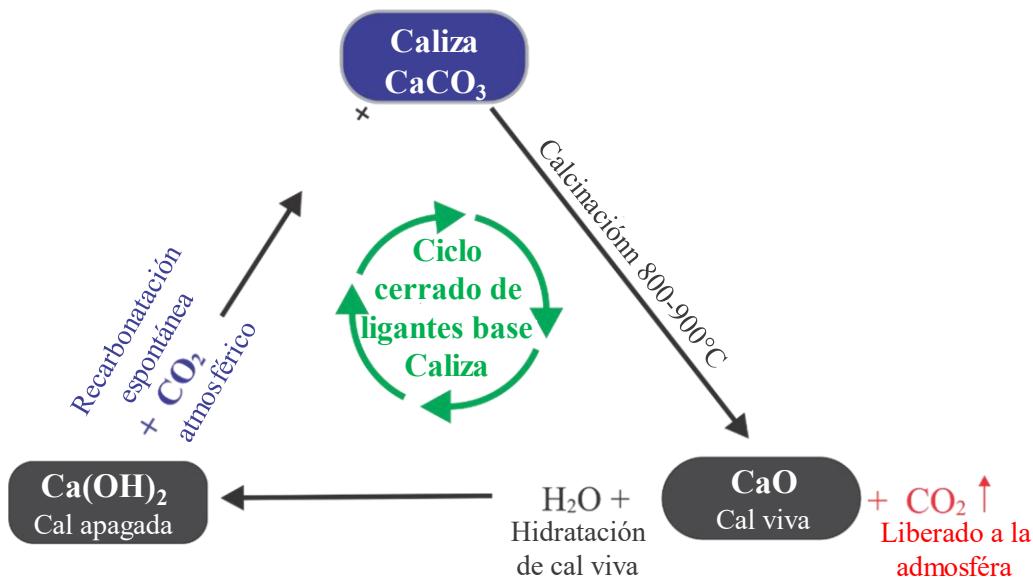


Figura 2. Ciclo cerrado de cementos a base de cal (caliza)

El legado continuo de la caliza: de pilar ancestral de la construcción a precursor moderno en sinergia con el concreto reciclado.

Tabla 1. Reacciones de actividad puzolánica de formación de productos cementosos

Ingredientes activos de la puzolana	Activador químico	Productos de reacción cementosos	
		Fórmula	Fórmula condensada común*
SiO ₂	+ Ca(OH) ₂ + H ₂ O →	CaO·SiO ₂ ·H ₂ O	C-S-H ⁺
Al ₂ O ₃		CaO·Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	C-A-H
SiO ₂ , Al ₂ O ₃		CaO·SiO ₂ ·Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	C-A-S-H

* fórmulas sin estequiometría específica.

+ El gel C-S-H es el principal compuesto que aporta resistencia mecánica y cohesión.

Pese al desarrollo de cementos hidráulicos modernos y de rápido endurecimiento, los aglomerantes a base de cal siguen en uso. Su menor resistencia inicial y su más lento desarrollo de resistencias relativos al CP limitan su uso estructural masivo hoy en día. No obstante, sus propiedades específicas --alta permeabilidad al vapor de agua, buena trabajabilidad, flexibilidad y compatibilidad con sistemas constructivos antiguos-- los hacen valiosos en nichos específicos, entre los que destaca su uso indispensable en la restauración y conservación del patrimonio arquitectónico y cultural, donde la compatibilidad material y estética con los sustratos originales es primordial (Saba, M. et al., 2019).

2.2 La caliza en la era del cemento Pórtland: Un protagonista multifacético

Con la invención y masificación del CP desde el siglo XIX, la caliza se consolidó como un mineral insustituible, adoptando roles diversos y fundamentales en la cadena de producción del concreto moderno y materiales de construcción. Su abundancia y composición química la convirtieron en la piedra angular de la industria cementera global. Sus principales aplicaciones en esta son:

- **Materia prima esencial para el clinker de cemento Portland:**
 - La caliza es la fuente principal de CaO, constituye ~80% de la mezcla cruda para la fabricación del clínker de CP.
 - Durante el proceso de clinkerización a ~1450°C, el CaCO₃ se descarbonata, liberando CO₂, y el CaO resultante reacciona con los componentes silicoaluminosos (de arcillas, margas, etc.) para formar las fases hidráulicas del clínker: alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) y ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) (usando la nomenclatura cementera).
 - El proceso es altamente intensivo en energía, consumo ~ 3.5 GJ por tonelada de clínker.
 - Las emisiones de CO₂ (provenientes de la descarbonatación y combustión de fósiles), son de ~0.8-0.9 ton CO₂ por ton clínker (Juenger et al., 2019).
- **Agregado predominante en morteros y concretos:**
 - La caliza triturada es extensamente utilizada como agregado (árido: grava y arena) en la formulación de morteros y concretos.
 - Dada la producción mundial masiva de concreto en ~30,000 millones de toneladas anuales (Monteiro, P. J.M., 2017), y que los agregados pueden representar hasta el 75% del volumen del concreto, la cantidad de caliza destinada a este fin es ingente.
 - Su amplia disponibilidad, costo relativamente bajo y propiedades físico-mecánicas adecuadas la posicionan como la opción principal para agregados en numerosas regiones.
- **Material cementicio suplementario (MCS) y adición activa:**
 - En décadas recientes, para reducir la huella ambiental del cemento, la caliza finamente molida ha ganado prominencia como MCS.

- Normativas internacionales, como la europea EN 197-1 (European Committee for Standardization, 2000), permiten incorporar hasta 35% en CP (Cembureau, 1991).
- Su mecanismo de acción principal es físico (efecto filler), optimizando la distribución granulométrica, proveyendo sitios de nucleación para la hidratación del clínker y mejorando la trabajabilidad.
- Aunque su reactividad química se considera limitada, puede participar en la formación de fases de carboaluminato hidratado, contribuyendo marginalmente a la resistencia.
- Esta práctica reduce el "factor clínker" del cemento, disminuyendo así las emisiones de CO₂ y el consumo energético por tonelada de producto final.
- No obstante, su uso en altos porcentajes es objeto de debate científico respecto a la durabilidad a largo plazo del concreto armado, específicamente por la potencial reducción de la resistencia a la carbonatación y el consecuente aumento del riesgo de corrosión del acero de refuerzo (Villagrán-Zaccardi et al., 2022; Panesar & Zhang, 2020).

2.3 La Caliza en innovaciones cementicias recientes: hacia la sostenibilidad.

La creciente presión por descarbonizar la industria de la construcción ha catalizado la investigación de nuevos aglomerantes con menor dependencia del clínker de CP. En este contexto, la caliza contribuye a la sostenibilidad con roles que van más allá de ser una simple adición:

- **Cementos ternarios de caliza y arcilla calcinada (LC³).** Una destacada innovación son los cementos ternarios LC³ (Limestone Calcined Clay Cement). En estas formulaciones, la caliza, en proporciones de ~15% en peso (para un 50% de clínker), desempeña un papel químico activo fundamental, superando su rol tradicional de mero "filler". La caliza reacciona sinéricamente con los productos de la hidratación del clínker, y con la álumina reactiva de la arcilla calcinada (metacaolín, MK), lo que conduce a la formación de fases de carboaluminato de calcio hidratado (como hemicarbonato AFm-Hc y monocarbonato AFm-Mc). Estos productos, sumados al C-S-H convencional densifican la microestructura, resultando en resistencias mecánicas (comparables o mejores que el CP) y a mejoras en varios aspectos de la durabilidad. Los cementos LC³ permiten reducir el contenido de clínker hasta en un 50% comparados con un CP tradicional, mitigando en ~30% las emisiones de CO₂ (Scrivener et al., 2018).
- **Avances en cementos con alta sustitución de caliza y otros MCSs.** Para maximizar la sustitución de clínker, otras tecnologías innovadoras, algunas ya comercializadas, usan hasta un 50% de caliza. Estas estrategias se basan en la ingeniería de partículas para optimizar el empaquetamiento y la distribución granulométrica, el uso de dispersantes de última generación, y la combinación de la caliza con otros MCS de baja huella de carbono que aporten reactividad adicional (ECOCHEM Global, 2024). El objetivo es minimizar el contenido de clínker sin comprometer, e incluso mejorando, las propiedades ingenieriles del material final.
- **Caliza como precursor en cementos activados alcalinamente (CAA).** Finalmente, el horizonte de aplicación de la caliza en aglomerantes alternativos se expande aún más al considerar su potencial en sistemas que se alejan radicalmente de la química del cemento Portland. Investigaciones recientes han comenzado a explorar el uso de la caliza como precursor en cementos activados alcalinamente (CAA), demostrando que, bajo condiciones de alta alcalinidad, el CaCO₃ puede exhibir reactividad y contribuir a la formación de fases cementantes (Ortega-Zavala et al., 2019). Este fascinante rol de la caliza en los CAA, ya sea como precursor único o en combinación con otros materiales de origen mineral o residual, será explorado con mayor detalle en la siguiente sección de este trabajo.

3. LA CALIZA Y EL CONCRETO RECICLADO COMO PRECURSORES DE CAA

Más allá de las optimizaciones en sistemas basados en CP, la búsqueda de aglomerantes con una huella ambiental radicalmente menor ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas. Entre ellas, los cementos activados por álcalis (CAA, o geopolímeros en algunos de subtipos), representan una familia de materiales con un potencial considerable. Su atractivo reside en la capacidad de reducir drásticamente las emisiones de CO₂ asociadas al clínker y en utilizar como materia prima una amplia gama de subproductos industriales, minerales de baja pureza y residuos, incluyendo aquellos provenientes del sector de la construcción. En este contexto, la versátil piedra caliza y el abundante concreto reciclado pulverizado son candidatos de interés como precursores cementicios.

3.1 Fundamentos de los cementos activados por álcalis, CAA

Los CAA son aglomerantes inorgánicos cuya química de formación difiere fundamentalmente de la del CP. Se producen por la reacción química entre precursor sólido (generalmente rico en SiO₂, Al₂O₃ en forma reactiva, amorfa o vítreo), y un activador altamente alcalino, ya sea en solución ("dos-partes") o sólido ("una-parte"). Aunque las primeras observaciones sobre la activación alcalina de escorias datan de mediados del siglo XX (Purdon, 1940), fue el trabajo pionero y sistemático de Glukhovsky y colaboradores el que sentó las bases científicas de esta tecnología (Krivenko, 2017).

Los componentes clave de los CAA son dos:

- **El precursor:** En la fuente principal de SiO₂, Al₂O₃ y CaO que conformará la estructura del aglomerante endurecido (ver Figura 3). Tradicionalmente, se han usado subproductos industriales como la escoria granulada de alto horno y las cenizas volantes de bajo CaO, o minerales naturales como las arcillas calcinadas (MK). Sin embargo, el espectro de precursores potenciales es mucho más amplio e incluye materiales menos convencionales como el desecho de vidrio y otros que son el objeto de este artículo: la piedra caliza (CaCO₃) y el concreto reciclado pulverizado con agregados de caliza (CaCO₃, SiO₂, Al₂O₃). La reactividad del precursor, determinada por diversos factores como su mineralogía, grado de amorficidad y finura, es crucial para el desarrollo de las propiedades del CAA.
- **El activador:** Su función es doble: (a) el pH elevado (generalmente > 12) que proporciona disuelve las especies iónicas de Si, Al y Ca del precursor; y (B) cataliza las reacciones de policondensación o precipitación que forman la red cementante tridimensional. Los activadores más comunes son soluciones acuosas de hidróxido de sodio, silicato de sodio ("vidrio soluble"), o carbonato de sodio, o sus mezclas (ver Figura 3 para cementos de "una parte"). En los sistemas "una-parte", el activador se incorpora como un sólido pulverulento junto con el precursor, requiriendo únicamente la adición de agua para iniciar la reacción, lo que simplifica su manejo en obra asemejándolo al cemento Portland.

Escorias ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$) **Vidrio** ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO}$)
Cenizas de carbón ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) **Material volcánico** ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$)
Arcillas calcinadas ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) **Desechos cerámicos** ($\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$)



Figura 3. Esquema de reacción de Cementos alcalinos de “una parte”. En los cementos de dos partes, el activador alcalino se añade predispuesto con el agua de la mezcla.

Las reacciones químicas involucradas son complejas y dependen de la composición del precursor y del tipo y concentración del activador, conduciendo a la formación de geles inorgánicos amorfos o semicristalinos que actúan como la matriz aglomerante. En sistemas ricos en CaO (basados en escoria o con adición de caliza/CRP), el producto principal es un gel de silicato cálcico (aluminio) hidratado denominado C-(A)-S-H, algo similar al gel C-S-H del CP. En sistemas con bajo CaO (con MK o cenizas volantes), se forman geles de tipo N-A-S-H (geopolímeros). La incorporación de CaO calcio en estos últimos (e.g. por adición de caliza), puede modificar la estructura del gel hacia composiciones mixtas N-(C)-A-S-H (Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020c), afectando las propiedades finales.

La motivación principal para estudiar y desarrollar los CAA radica en sus ventajas potenciales: una reducción significativa de la huella de carbono al evitar la clinkerización, la capacidad de valorizar grandes volúmenes de residuos y subproductos industriales, y la posible obtención de materiales con durabilidad superior en ciertos ambientes químicamente agresivos, aunque este último aspecto requiere una evaluación cuidadosa caso por caso.

3.2 Caliza como precursor en CAA

Aunque el uso de la caliza (CaCO_3) como precursor principal en CAA es menos explorado debido a su relativamente baja reactividad frente a aluminosilicatos amorfos, su potencial es considerable, motivado por su enorme abundancia global, bajo costo y nula necesidad de tratamiento térmico. Estudios iniciales sobre CAA base 100% caliza han revelado que puede reaccionar en un medio fuertemente alcalino, formando silicato cálcico hidratado (C-S-H) y desarrollando propiedades mecánicas (Ver Figura 4), si bien su cinética y grado de reacción requieren mayor investigación (Ortega-Zavala et al., 2019).

Los CAA ideales dependen de materias primas globalmente abundantes, de fácil acceso y bajo costo para sus precursores. La caliza (LS) cumple con estos requisitos al ser económica. El metacaolín (MK), obtenido de la calcinación de arcillas caoliníticas, también es abundante y con la ventaja de un proceso de calcinación sencillo y menos demandante energéticamente (solo ~0.35 GJ/t de arcilla) que la producción de clíker de CP (Juenger et.al., 2019). La confluencia de estos factores hace de las mezclas LS-MK precursores factibles y muy ventajosos para los CAA, cuyo potencial ha sido extensamente investigado mediante optimización estadística para maximizar

tanto la resistencia e indicadores de sostenibilidad (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a; Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020b). El creciente interés en el tema se refleja en diversas revisiones bibliográficas recientes (Rakhimova, 2022; Ma et.al., 2022; Rashad, 2022; Chan & Zhang, 2023).

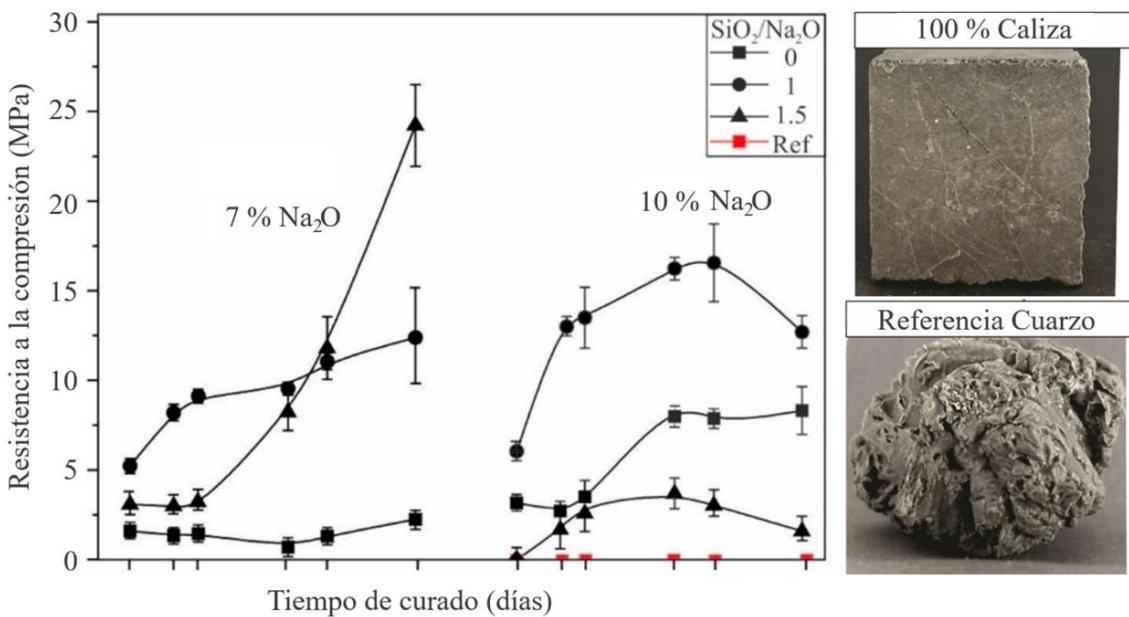


Figura 4. Resistencia a la compresión y fotografías de cemento endurecido de caliza y cuarzo (línea roja) activados por álcalis activados por álcalis. Adaptado de (Ortega-Zavala et al., 2019).

Dada la menor reactividad intrínseca de la caliza, la investigación se ha enfocado en su combinación con precursores más reactivos, principalmente el metacaolín (MK), buscando un balance óptimo entre desempeño, costo y sostenibilidad. Los primeros trabajos en sistemas MK-caliza reportaron resultados variables lo que refleja la complejidad de estas interacciones: por ejemplo, mientras un estudio reportó aumento de la resistencia a 28 días con 20% caliza (de 38.4 a 45.4 MPa, Yip et al., 2008), otro mostró aumentos marginales con 6% y reducción con 12% caliza (Aboulay et al, 2017). Sin embargo, un avance significativo provino de la optimización estadística. Estos estudios más recientes, demostraron que es posible diseñar sistemáticamente mezclas con altos contenidos de caliza (hasta 60-80%), las cuales alcanzan resistencias a compresión notables (>50 MPa a 28 días, ver Figura 5), comparables con sistemas basados en 100% MK o 100% CP (Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020a; Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020b).

Un hallazgo clave en estos sistemas optimizados, y una de sus mayores ventajas, es la significativa reducción en la demanda de activador alcalino. Por ejemplo, mientras un sistema compuesto por 100% metacaolín (MK) puede requerir hasta un 25% de Na₂O (respecto a la masa del precursor), la sustitución con un 80% de caliza disminuye esta demanda a solo un 4%, manteniendo resistencias mecánicas competitivas (ver Figura 5). Este principio de eficiencia en sistemas con caliza y baja alcalinidad se extiende a otros aglomerantes; cementos de “una parte” que combinan 49% caliza con CP y son activados con silicato de sodio, también alcanzan excelentes propiedades mecánicas (Santana-Carrillo et al., 2022). Esta menor dependencia de los activadores tiene implicaciones económicas y ambientales positivas, al reducir la huella de carbono, el consumo energético y el costo asociados tanto a los activadores comerciales como al procesamiento del metacaolín, como se ilustra en la comparativa de la Figura 6.

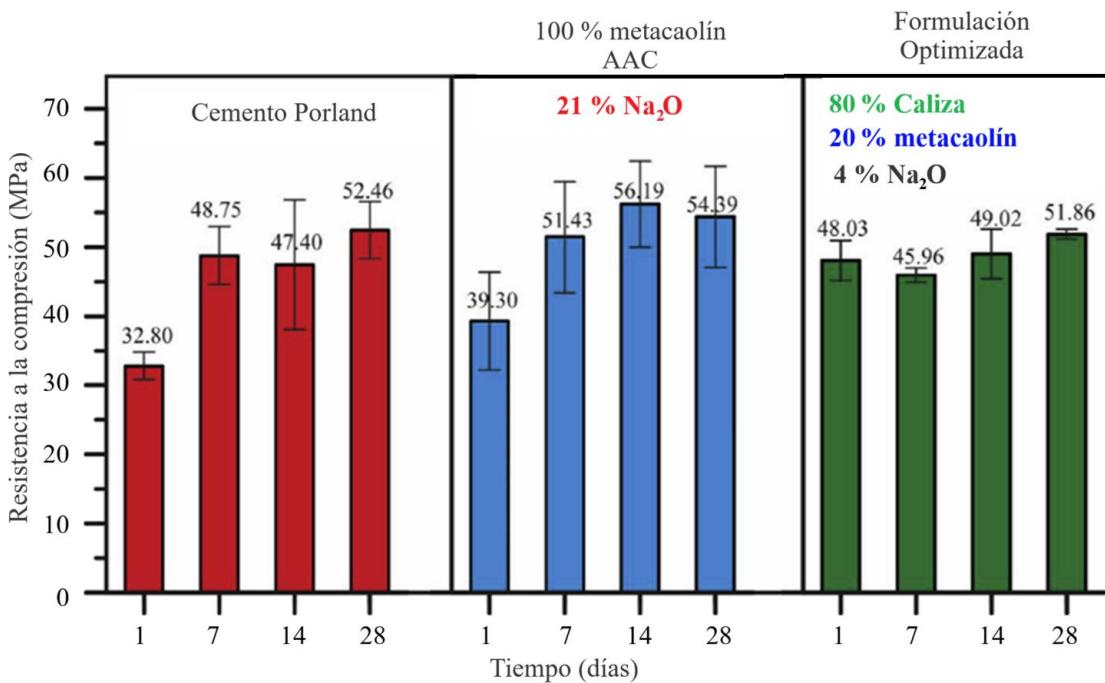


Figura 5. Comparativa de resistencia a la compresión de pastas de 100% CP, CAA de 100% metacaolín y fórmula CAA optimizada con 80% caliza y 20% metacaolín. Adaptada (Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020b).

Químicamente, la caliza supera su rol de mero diluyente. El Ca^{2+} liberado por su disolución parcial en el medio alcalino se incorpora al gel cementante. En sistemas base MK, esto modifica la composición del gel N-A-S-H (geopolimérico) hacia un gel mixto N-(C)-A-S-H (Ver Figura 7(A)), mejorando su estructura tridimensional, densificando la microestructura (Ver Figura 7(B)) y contribuyendo a la resistencia mecánica (ver Figura 6). La presencia de CaCO_3 puede formar carboaluminatos (Yip et.al., 2008; Rakhimova et.al., 2018). Estos sistemas optimizados de alta caliza también muestran buena durabilidad frente ácidos y sulfatos, y temperaturas moderadas (300°C) (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2023; Perez-Cortes et al., 2021). Por otra parte, su aplicación en concretos es también prometedora, con altas resistencias (hasta 60 MPa a 7 días), con dosificaciones razonables de aglomerante (Escalante-Garcia & Perez-Cortes, 2018, Ver Tabla 2) y con capacidad para pasivar el acero de refuerzo (Vázquez Leal et al., 2023).

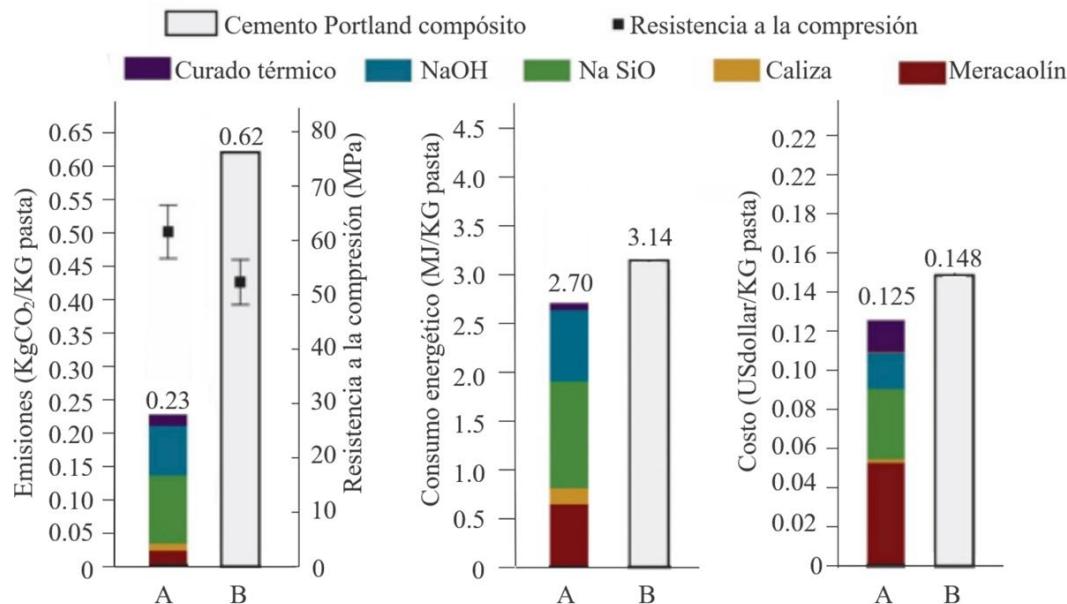


Figura 6. Comparativa de emisiones de CO₂, consumo energético y costo entre: A - CAA (60% caliza, 40% metacaolín; y B - CP compósito. Adaptado de (Pérez-Cortés & Escalante-García, 2020a)

La caliza también se ha combinado, con resultados interesantes, con otros precursores como escoria de alto horno (Sakulich, et al., 2009), cenizas volantes (Gao et al., 2015) o vidrio reciclado (Menchaca-Ballinas & Escalante-García, 2020). Sin embargo, la disponibilidad limitada de algunos de estos precursores (como la escoria) en comparación con la caliza puede restringir su aplicabilidad a gran escala.

En resumen, la caliza no es *filler* inerte en los CAA; participa activamente en las reacciones y modifica la microestructura. De manera crucial, permite reducir significativamente la cantidad de precursor aluminosilicato (como MK, que requiere calcinación) y la demanda de activador alcalino, siendo un componente clave para formular CAA más sostenibles y económicos.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de concretos preparados con 400 kg/m³ de cementante y agregados de caliza (Escalante-García and Perez-Cortes, 2018).

Formulación del cementante (wt. %)	Temperatura de curado	Resistencia a la compresión (MPa)	
		7 días	28 días
60% Caliza, 40% metacaolín, 10.7% Na ₂ O	20°C	47	57
60% Caliza, 40% metacaolín, 8.5% Na ₂ O	24h @70°C then at 20°C	33	40
30% Caliza, 70% metacaolín, 16.9% Na ₂ O	20°C	60	68

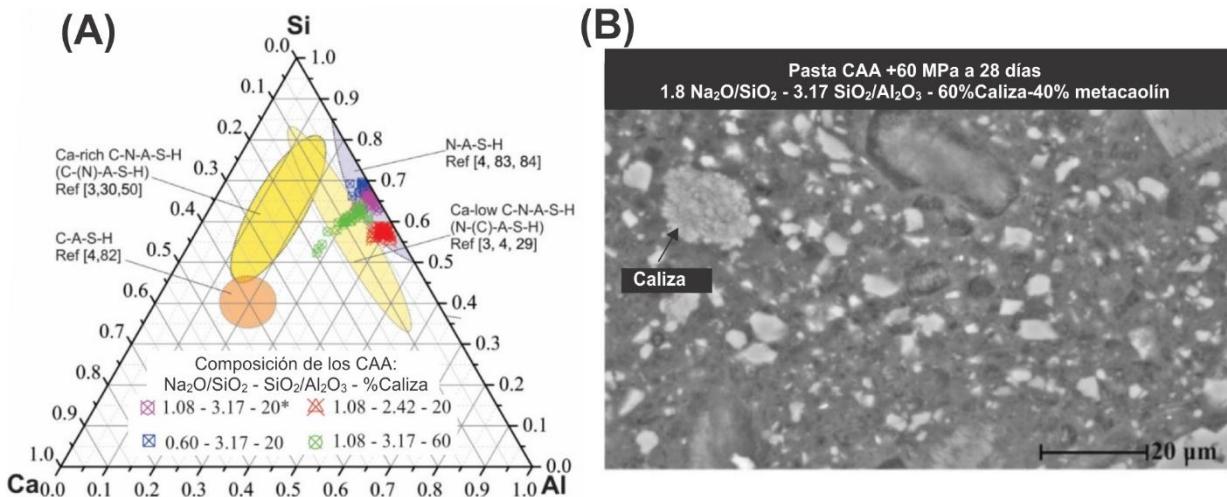


Figura 7. (A) Diagrama composicional ternario Al-Si-Ca (normalizado a 100%) de CAA (20 y 60% de caliza y el resto para 100% es metacaolín). (B) Microestructura de pasta de CAA 60% caliza y 40% metacaolín. Adaptados de (Perez-Cortes y Escalante-Garcia, 2020c), que incluye las referencias de las zonas de composición química.

3.3 Concreto reciclado pulverizado como precursor en CAA

La gestión de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) es un gran desafío ambiental global, con una generación anual de ~10,000 millones de toneladas anuales, que constituyen ~30 % del total de residuos sólidos mundiales, de los que ~35 % termina en vertederos (Chen et al., 2021). Las tasas de reciclaje varían enormemente, desde >80 % en Holanda o Alemania a <5 % en muchas otras regiones, incluyendo países densamente poblados (Özalp et al., 2016; Akhtar & Sarmah, 2018). Actualmente, el uso más común de concreto reciclado de RCD, es como agregado en concreto, reemplazando parcialmente a los agregados naturales.

Sin embargo, una vía de valorización con mayor valor agregado, alineada con la economía circular, es usar el concreto reciclado pulverizado (CRP), también referido en la literatura como PHC (pulverized hardened concrete) – no como relleno, sino como precursor reactivo en CAA. El CRP es un material complejo, compuesto por pasta de CP hidratada (rica en C-S-H, portlandita, etc.), CP sin hidratar residual, y fragmentos del agregado original (silíceos, silicoaluminosos o, como en muchos de los estudios base de este trabajo, calcáreos). Esta composición le confiere un potencial inherente para reaccionar en un medio alcalino.

Estudios exploratorios sobre la activación alcalina de CRP como único precursor (100 % CRP) han demostrado su viabilidad, alcanzando resistencias a compresión de 12-20 MPa, especialmente con un curado térmico inicial (ver Tabla 3, Rodriguez-Morales et al., 2024). Aunque las resistencias pueden ser suficientes para ciertas aplicaciones no estructurales, se pueden mejorar combinando CRP con otros precursores más reactivos o complementarios (ver Tabla 3). Se han reportado resultados prometedores en mezclas binarias o ternarias:

- **Con metacaolín:** 55-75 % de CRP (el resto metacaolín), hasta 30 MPa a 28 días (Tabla 3).
- **Con desecho de vidrio:** Sistemas con 32-60 % de CRP (el resto vidrio), hasta 46 MPa a 28 días (ver Tabla 3)
- **Con cemento Portland (CP):** Sistemas con 45-65 CRP, 20-40 CP, resistencias de 30-55 MPa a 28 días (ver Tabla 3). En estos sistemas, el CP puede actuar no solo como precursor sino también contribuyendo a la alcalinidad inicial (ver Tabla 2 y Figura 5, ibid.).

Tabla 3. Resistencia a la compresión de pastas de CAA formuladas con precursores de CRP (concreto reciclado pulverizado) y precursores complementarios.

	Concreto reciclado pulverizado (% peso)	Precursor complementario (% peso)			Tipo de activador alcalino	%Na ₂ O relativo a la masa del precursor	Resistencia a la compresión 28-días, MPa	Régimen de curado ⁺⁺
		Metacaolín	Cemento Pórtland	Desecho de vidrio				
1	55	45			Metasilicato de sodio comercial, Ms = 1	10	30	60-20°C
2	75	25			Metasilicato de sodio comercial, Ms = 1	12	28.5	60-20°C
3**	60			40	Metasilicato de sodio comercial, Ms = 1	7.5	32	60-20°C
4**	32			68	Metasilicato de sodio comercial, Ms = 1	7.5	46	60-20°C
5	45		40		15% de silicato de sodio comercial tipo G, Ms = 3.2	2.9	45.2	20°C
6	45		50		5% Silicato de sodio a partir de desechos de vidrio, Ms = 3.5	1.2	55.8	20°C
7	85	-	-	-	15% de silicato de sodio comercial tipo G, Ms = 3.2	3.39	16	20
8	80	-	-	-	20% Silicato de sodio a partir de desechos de vidrio, Ms = 4		12*	60-20°C
							19.8	20°C
								80-20°C

Ms = módulo del silicato de sodio usado como activador.

*aumentó a 19MPa después de 90 días.

** cementos de 2 partes (activador añadido en solución).

++ 60-20°C o 80-20°C indica que las primeras 24 h de curado fueron a 60 u 80°C, luego continuó a 20°C.

La Figura 8 compara emisiones de CO₂, consumo energético y costo entre varios CAA base CRP comparados con un CP. Puede notarse la ventaja de los CAA en reducción de emisiones. Adicionalmente, se desarrollan investigaciones también prometedoras con combinaciones de CRP con otros precursores alternativos como ceniza volante, desechos de vidrio y desechos de la industria cerámica.

Un aspecto relevante es el tipo de activador empleado. Diversos estudios en desarrollo en el Laboratorio de Cementos y Medio Ambiente del Cinvestav Saltillo han mejorado las propiedades mecánicas de los CAA, mediante optimizaciones en el tipo de activador alcalino. Además de los activadores comerciales (hidróxidos, silicatos de sodio), se ha investigado el uso de activadores alternativos de menor impacto ambiental, como los silicatos de sodio obtenidos a partir del

tratamiento termoquímico de vidrio de desecho. Estos activadores alternativos pueden ser tan efectivos como los comerciales en términos de desarrollo de resistencia en sistemas con CRP, pero con una huella de carbono y un costo significativamente menores (ver Tabla 3, ítems 7 y 8, y Figura 8), reforzando la sostenibilidad de esta vía de reciclaje y promoviendo la economía circular. Microestructuralmente, los CAA basados en CRP exhiben matrices densas con partículas de CRP embebidas y parcialmente reaccionadas (ver Figura 9), lo que es consistente con su desempeño mecánico.

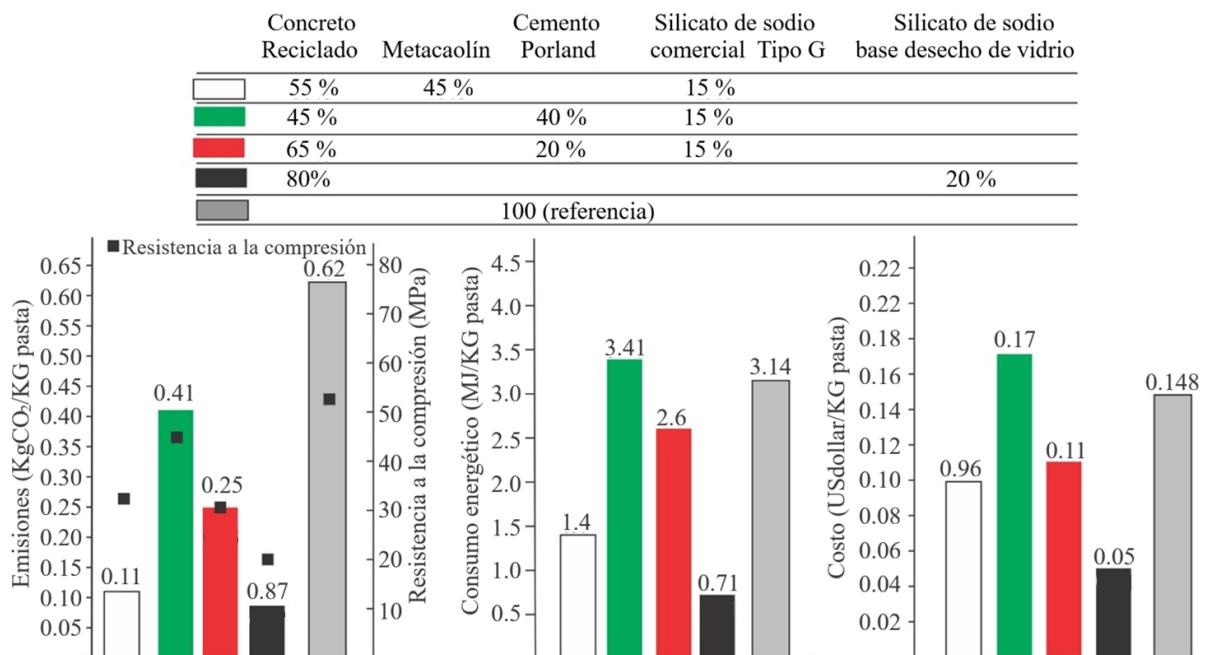


Figura 8. Comparativa de emisiones de CO₂, demanda energética y costo de algunos CAA base concreto reciclado pulverizado y otros precursores suplementarios como cemento Portland y metacaolín. Incluye datos de 100 % de CRP con activador alcalino alternativo base desecho de vidrio.

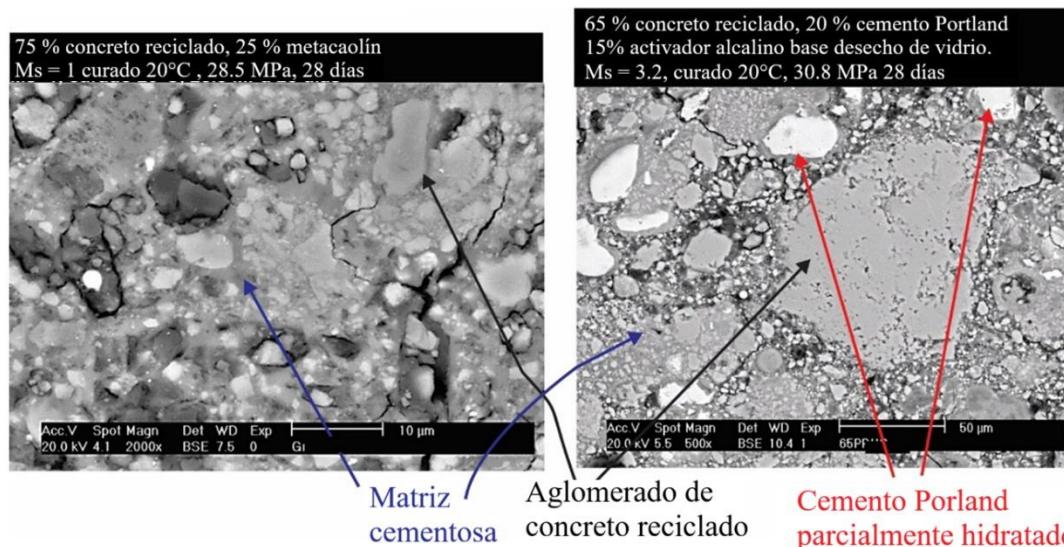


Figura 9. Microestructuras de AAC usando concreto reciclado como precursor. Imágenes por microscopía electrónica de barrido, electrones retrodispersados. (Escalante-García J. I., 2024).

Ventajas del CRP como precursor. El uso de CRP como precursor en CAA ofrece múltiples ventajas ambientales:

- Transforma un residuo abundante en un recurso valioso
- Reduce la demanda de materias primas vírgenes (tanto para cemento como para agregados)
- Disminuye la presión sobre los vertederos
- Contribuye a cerrar el ciclo de vida de los materiales de construcción.

Además, el potencial de utilizar activadores alcalinos alternativos derivados de otros flujos de residuos (como el vidrio) abre caminos hacia una economía circular aún más integrada. Es importante notar que el potencial de valorización de los residuos de construcción y demolición (RCD) en CAA podría extenderse más allá del concreto, ya que otros componentes como ladrillos cerámicos, tejas o vidrio también han demostrado ser precursores viables en activación alcalina (Borrachero et al., 2022; Ahmari et al., 2012; Komnitsas et al., 2015), aunque se requiere más investigación para entender completamente el comportamiento de mezclas tan heterogéneas.

4. PERSPECTIVAS, DESAFIOS Y OPORTUNIDADES

Las secciones anteriores han delineado el viaje histórico y la multifacética contribución actual de la piedra caliza en el mundo de los materiales cementicios, así como el potencial emergente del concreto reciclado pulverizado (CRP) como un recurso valioso dentro de la economía circular de la construcción, particularmente en el contexto de los cementos activados alcalinamente (CAA). Se ha evidenciado que ambos materiales, individualmente o en combinación, pueden ser la base para desarrollar aglomerantes con un desempeño mecánico adecuado y, crucialmente, con una huella ambiental significativamente reducida en comparación con el cemento Portland tradicional. Sin embargo, la transición desde la investigación prometedora y las aplicaciones iniciales hacia una adopción amplia y responsable en la industria requiere una evaluación crítica tanto de las oportunidades inherentes como de los desafíos sustanciales que aún persisten. Esta sección final se enfoca en esta visión prospectiva, analizando el potencial derivado de la disponibilidad de estos precursores, los obstáculos técnicos y de implementación que deben superarse, y las líneas de investigación futuras que podrían allanar el camino hacia su consolidación como pilares de una construcción verdaderamente sostenible.

4.1 Abundancia y potencial de los precursores: recursos estratégicos para la sustentabilidad. Caliza: un recurso mineral de vasta disponibilidad global.

La extraordinaria disponibilidad global de la caliza y el CRP los posiciona como componentes centrales para futuros sistemas cementicios. La piedra caliza, uno de los minerales más abundantes con vastos depósitos distribuidos globalmente (Goldscheider et al., 2020), minimiza las barreras logísticas y de transporte frente a precursores de disponibilidad más localizada, como escorias o ciertas cenizas volantes. Además, su extracción y procesamiento primario (trituración y molienda) son procesos relativamente sencillos y de menor costo energético comparados con la compleja producción de clínker de CP.

Concreto Reciclado Pulverizado (CRP): Un Recurso Antropogénico en Expansión.

Por otro lado, el CRP constituye un recurso antropogénico de magnitud colosal y en constante crecimiento, originado del inmenso stock de concreto existente que, al final de su vida útil o por demolición, se transforma en un flujo masivo de residuos. La generación anual de RCD supera los 10,000 millones de toneladas, de los cuales un 30-40% es concreto (Chen, et al., 2021). Utilizar esta corriente de residuos como precursor para nuevos cementos no solo atiende el problema ambiental de su disposición final, sino que también provee una fuente masiva y distribuida de materia prima, especialmente en entornos urbanos con alta generación de RCD. Adicionalmente,

el uso de CRP puede ofrecer ventajas económicas, reduciendo costos de vertido y sustituyendo materias primas vírgenes.

Potencial ambiental estratégico de la caliza y el CRP.

Desde la perspectiva ambiental, el potencial de estos materiales es igualmente significativo. La utilización de caliza como adición en CP o como precursor en LC³ y CAA evita las emisiones de CO₂ al reemplazar parcialmente el clínker, incluyendo las de descarbonatación y consumo de combustible. Para los CAA con alta proporción de caliza, se añade el beneficio de una menor demanda de activadores alcalinos, reduciendo su huella ambiental. El CRP, por su parte, materializa los principios de la economía circular: transforma un residuo en recurso, conserva materias primas no renovables y evita la contaminación por vertido. La sustitución del CP convencional con estos materiales alternativos puede contribuir significativamente a las metas globales de reducción de emisiones (Shah et al., 2022). Estudios en CAA optimizados de caliza-metacaolín han mostrado reducciones de CO₂ superiores al 60% y ahorros energéticos y de costo del orden del 15% frente al CP (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a).

En conjunto, la vasta disponibilidad global, el bajo costo potencial y los beneficios ambientales inherentes posicionan a la caliza y al concreto reciclado pulverizado como recursos estratégicos fundamentales. Su aprovechamiento inteligente y eficiente es clave para avanzar hacia los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y para desacoplar el necesario desarrollo de infraestructura del impacto ambiental históricamente asociado a la producción de cemento. No obstante, materializar plenamente este enorme potencial exige enfrentar y resolver una serie de desafíos técnicos y no técnicos, como se discute a continuación.

4.2 Desafíos en la implementación y uso.

A pesar del innegable potencial de la caliza y el concreto reciclado pulverizado (CRP) como precursores para cementos más sostenibles, su transición desde el laboratorio y aplicaciones piloto hacia una adopción generalizada en la industria enfrenta desafíos significativos que requieren un abordaje integral.

Incertidumbre sobre la durabilidad a largo plazo.

Uno de los obstáculos más críticos, objeto de intenso debate, es la incertidumbre sobre la durabilidad a largo plazo de cementos con altos contenidos de estos materiales, especialmente en CAA. Si bien existen preocupaciones documentadas sobre la durabilidad de concretos de CP con alta adición de caliza, particularmente por menor resistencia a la carbonatación y riesgo de corrosión del acero (Panesar & Zhang, 2020), la situación para los CAA es más compleja. Aunque estudios específicos en CAA optimizados base caliza-metacaolín muestran resultados prometedores en laboratorio frente a ataques químicos (ácidos y sulfatos) y temperaturas moderadas (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2023), e incluso capacidad de pasivación del acero (Vázquez Leal et al., 2023), falta evidencia robusta sobre su comportamiento a largo plazo (décadas) bajo condiciones reales y diversas de exposición. Esta ausencia de un historial de desempeño extenso, comparable al del cemento Portland, genera reticencia para su uso en aplicaciones estructurales críticas.

Variabilidad de las materias primas precursoras.

La variabilidad inherente de las materias primas es otro desafío mayor. Mientras la composición de la caliza varía según el yacimiento, la heterogeneidad del CRP es más pronunciada, pues proviene de concretos de distintas edades, diseños de mezcla, tipos de agregados y con potencial contaminación por otros materiales de demolición (yeso, plásticos, etc.). Esta variabilidad dificulta garantizar la consistencia en la calidad del precursor y, por ende, la predictibilidad del desempeño.

del CAA, exigiendo métodos robustos de caracterización y posible pre-tratamiento del CRP.

Desafíos tecnológicos en la activación alcalina.

La tecnología de activación alcalina en sí presenta retos. Los activadores convencionales (NaOH y $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) tienen un costo y huella ambiental considerables, y su manejo, especialmente en soluciones altamente alcalinas (sistemas de dos partes), plantea riesgos de seguridad laboral. Los activadores alternativos (ej. derivados de vidrio reciclado) son prometedores, pero su producción industrial y validación a largo plazo están en desarrollo. Además, el control de las propiedades en estado fresco de los CAA (reología, fraguado, trabajabilidad) puede ser más complejo que con el cemento Portland, requiriendo un ajuste cuidadoso de la formulación para adaptarse a diversas técnicas constructivas, incluyendo la impresión 3D (Perales-Santillán et al., 2024).

Obstáculos para la normalización, aceptación y viabilidad económica.

Finalmente, existen barreras significativas en la normalización y aceptación por el sector. La falta de normativas técnicas, especificaciones y códigos de diseño ampliamente reconocidos para CAA basados en caliza y CRP limita su uso en proyectos de ingeniería civil. Superar la inercia del sector y ganar la confianza de diseñadores, constructores y reguladores requiere datos técnicos sólidos, difusión de casos de éxito y formación profesional. A esto se suman consideraciones económicas y logísticas, como la necesidad de cadenas de suministro eficientes para el CRP procesado y los activadores, y la evaluación completa de costos del ciclo de vida.

4.3 Visión a futuro y líneas de investigación.

Los desafíos descritos, aunque significativos, no deben disuadir la exploración y el desarrollo de estos materiales alternativos; por el contrario, marcan la hoja de ruta para la investigación futura. La urgencia de mitigar el cambio climático y transitar hacia una economía circular en la construcción hace imperativo continuar avanzando en esta dirección. Para continuar avanzando en esta dirección, se identifican las siguientes líneas prioritarias de investigación y desarrollo:

- **Comprepción y aseguramiento de la durabilidad a largo plazo:**

- Realizar estudios de campo extensivos, monitorizando el comportamiento de estructuras reales elaboradas con estos cementos bajo diversas y representativas condiciones ambientales a lo largo de periodos prolongados (décadas).
- Profundizar en la comprensión fundamental de los mecanismos de degradación específicos (carbonatación, ingreso de cloruros, ataque por sulfatos, reacción álcali-agregado, etc.) que operan en estas matrices cementicias particulares.
- Desarrollar y validar métodos de ensayo acelerado que sean fiables, reproducibles y que muestren una correlación robusta con el desempeño observado en condiciones de servicio real.
- Investigar detalladamente la interacción entre estos nuevos aglomerantes y el acero de refuerzo, enfocándose en los mecanismos de pasivación, umbrales críticos de contaminantes y tasas de corrosión en entornos alcalinos específicos.

- **Avances en la ciencia de materiales y diseño de mezclas:**

- Caracterizar con precisión la naturaleza y evolución de las fases formadas durante la activación alcalina de la caliza y el CRP, y su impacto en las propiedades finales.
- Investigar cómo la variabilidad inherente de los precursores (especialmente CRP) afecta la cinética de reacción y la microestructura, desarrollando estrategias para mitigar efectos negativos.
- Diseñar y optimizar mezclas precursoras (combinando caliza, CRP, metacaolín, y otros

- SCMs) y sistemas activadores (tipo, dosis, alternativas sostenibles) para lograr propiedades ingenieriles específicas y mejorar la robustez del material.
- Establecer estrategias efectivas para la caracterización rápida, el pre-tratamiento o la beneficiación del CRP para asegurar su calidad como precursor.

• Desarrollo tecnológico y optimización de aplicaciones:

- Fomentar la investigación, desarrollo y escalado industrial de activadores alcalinos que sean más económicos, seguros en su manejo y con una menor huella ambiental.
- Refinar el control sobre las propiedades reológicas (trabajabilidad, viscosidad) y los tiempos de fraguado para facilitar el uso de estos cementos en una amplia gama de aplicaciones constructivas, incluyendo métodos avanzados como la fabricación aditiva (impresión 3D).
- Desarrollar y adaptar técnicas de ensayo no destructivo (END) para el control de calidad en obra y la evaluación del estado de las estructuras elaboradas con estos materiales.

• Estandarización, implementación y evaluación integral:

- Promover un esfuerzo concertado a nivel nacional e internacional para la elaboración de normas técnicas, especificaciones de producto y guías de diseño basadas en evidencia científica sólida, que faciliten la incorporación segura y fiable de estos cementos en el mercado.
- Realizar análisis de ciclo de vida (ACV) y de costo de ciclo de vida (ACCV) completos, transparentes y comparativos para documentar de manera integral sus beneficios ambientales y económicos.
- Impulsar la construcción y monitorización de proyectos piloto y estructuras demostrativas para validar su desempeño en condiciones reales, generar confianza en el sector y promover su aceptación generalizada.

Abordar estas líneas de investigación de manera coordinada y con visión de futuro es esencial. El avance en estos frentes permitirá superar los obstáculos actuales y desbloquear el considerable potencial de los cementos basados en caliza y concreto reciclado, contribuyendo significativamente a una industria de la construcción más sostenible, eficiente en el uso de recursos y alineada con los principios de la economía circular.

5. CONCLUSIONES: HACIA UN FUTURO SOSTENIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN CON CALIZA Y CONCRETO RECICLADO

La travesía por el mundo de los materiales cementosos nos reafirma en una convicción: la industria de la construcción se encuentra en un punto de inflexión, donde la innovación inspirada en recursos tradicionales y la valorización inteligente de residuos son imperativos para forjar un futuro más sostenible. En este horizonte, la piedra caliza y el concreto reciclado emergen, no como meras alternativas, sino como protagonistas con un potencial transformador.

• La caliza: un legado milenario con vigencia estratégica.

Este trabajo ha destacado la presencia de la caliza, desde su fundamental empleo en los albores de la civilización hasta su rol insustituible en la era del cemento Portland y, más críticamente, su promisoria incursión como componente clave en cementos de vanguardia y baja huella de carbono, como los LC³ y los cementos activados alcalinamente (CAA). Su extraordinaria abundancia global, su bajo costo y la valiosa posibilidad de emplearla sin necesidad de calcinación en diversas aplicaciones la consagran como un recurso estratégico insoslayable para la sostenibilidad.

- **Concreto Reciclado Pulverizado (CRP):**

El Renacer de un Residuo. Se ha subrayado el enorme potencial del CRP, obtenido del masivo flujo de residuos de construcción y demolición, para trascender su destino como simple desecho. Su conversión en un precursor viable para CAA es un claro ejemplo de economía circular en acción, reinsertando un residuo en la cadena de valor y transformándolo en materia prima para nuevos aglomerantes de altas prestaciones, aliviando así la presión sobre los vertederos y los recursos naturales.

- **Activación alcalina: un catalizador para la sostenibilidad.**

La tecnología de activación alcalina se revela como una vía particularmente efectiva para capitalizar las virtudes de la caliza y el CRP. Los sistemas basados en alta proporción de caliza (en sinergia con metacaolín) o en CRP (solo o combinado) no solo son técnicamente viables, sino que han demostrado en laboratorio propiedades mecánicas y de durabilidad alentadoras. Más importante aún, ofrecen ventajas ambientales sustanciales: una drástica reducción del factor clíker, una menor demanda de activadores alcalinos (especialmente con alta presencia de caliza) y una efectiva valorización de residuos. La innovación en activadores derivados de otros flujos de residuos, como el vidrio, promete potenciar aún más la sostenibilidad de esta ruta tecnológica.

- **Desafíos en el horizonte: la tarea pendiente.**

No obstante, este panorama optimista, la adopción generalizada de estos materiales enfrenta desafíos considerables que esta revisión ha puesto de manifiesto. La consolidación de la confianza en su durabilidad a largo plazo bajo condiciones reales de servicio es primordial. Asimismo, la gestión de la variabilidad inherente de las materias primas, en particular del CRP, el desarrollo y escalado de activadores que sean a la vez sostenibles, seguros y económicos, y el establecimiento de normativas y estándares técnicos robustos y armonizados, constituyen obstáculos que la comunidad científica y técnica debe abordar con prioridad y rigor.

- **Un llamado a la acción conjunta:**

En definitiva, la caliza –como recurso natural o como alma del concreto reciclado– se reafirma como una pieza clave en el presente y, sobre todo, en el futuro de los materiales cementicios sostenibles. Su sinergia con la tecnología de activación alcalina y otras estrategias de baja huella de carbono traza una ruta prometedora hacia una industria de la construcción más ecológica, eficiente en el uso de sus recursos y firmemente anclada en los principios de la economía circular. Para materializar el inmenso potencial de estos recursos y superar los retos pendientes, será esencial la investigación continua, el desarrollo tecnológico innovador y una colaboración estrecha y decidida entre todos los actores del sector, desde la academia hasta la industria y los organismos reguladores, en beneficio de un planeta más sostenible para las generaciones futuras.

6. AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (hoy, Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, Secihi) por el financiamiento con el proyecto CF-2023-G-405. Al Cinvestav y la SEP por el proyecto 154 SEP-Cinvestav 2018.

7. REFERENCIAS

Aboulayt, A., Riahi, M., Touhami, M. O., Hannache, H., Gomina, M., Moussa, R. (2017). *Properties of metakaolin-based geopolymers incorporating calcium carbonate*. Adv. Powder Technol., 28, 2393–2401. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.06.022>.

- Ahmari, S., Ren, X., Toufigh, V., Zhang, L. (2012). *Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash*. Construction and Building Materials, 35, 718-729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.044>.
- Akhtar, A., Sarmah, A. K. (2018). *Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective*. Journal of Cleaner Production, 186, 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
- Borrachero, M. V., Payá, J., Brito, S., Segura, Y. P., Soriano, L., Tashima, M. M., Monzó, J. M. (2022). *Reusing construction and demolition waste to prepare alkali-activated cement*. Materials, 15(10), 3437 <https://doi.org/10.3390/ma15103437>.
- Cembureau, The European Cement Association (1991). *Cement Standards of the World, Brussels*, Belgium. Retrieved from <http://www.cembureau.eu> (Accessed: 20 January 2024).
- Chan, C. L., Zhang, M. (2023). *Effect of limestone on engineering properties of alkali-activated concrete: A review*. Const BuildMater, 362, 129709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129709>.
- Chen, K., Wang, J., Yu, B., Wu, H., Zhang, J. (2021). *Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: A scientometric analysis*. Journal of Cleaner Production, 287, 125071. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>.
- Courland, R. (2011). *Concrete Planet*. Prometheus Books, New York. ISBN 978-1-61614-482-4.
- ECOCEM Global (2024). *ACT The next generation of low carbon cement technology*, <https://www.ecocemglobal.com/act/> (accessed 10 February 2024).
- Escalante-García, J. I., Perez-Cortes, P., (2018), *Hydraulic cement based on alkaline earth carbonates like limestone and calcined clay and process to make pastes, mortar and concretes of high performance*, Patent application MX/a/2018/ 016140
- Escalante-García J. I., Perez-Cortes P., Rodriguez-Morales J., Hernández Bielma J. M., Reyna-Perez, J. L. (2024), *Significancia histórica de la Caliza, desde cementos ancestrales hasta los cementos de hoy y perspectivas de futuro*, Memorias del XI Congreso Nacional de Alconpat México, Vol. 2024, Num. 1, Eds P. F. de J. Cano Barrita, E. M. Alonso Guzmán, T. Pérez López y P. Castro Borges. Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México
- European Committee for Standardization (2000). *Cement - part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements*. EN 197-1, Brussels. Retrieved from <http://www.rucem.ru/yabbfiles/Attachments/EN-197-1.pdf>
- Gao, X., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. (2015). *Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition*. Cem. Concr. Compos., 59, 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.007>.
- Goldscheider, N., Chen, Z., Auler, A. S., Bakalowicz, M., Broda, S., Drew, D., Veni, G. (2020). *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. Hydrogeology Journal, <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>.
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., Bernal, S. A. (2019). *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights*. Cem Concr Res, 122, 257-273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G., Galetakis, M. (2015). *Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers*. Advanced Powder Technology, 26(2), 368-376. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.11.012>.
- Krivenko, P. (2017). *Why Alkaline Activation – 60 Years of the Theory and Practice of Alkali-Activated Materials*. J. Ceram. Sci. Technol., 08(3), 323-334. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00042>.
- Ma, J., Wang, T., et al. (2022). *A state-of-the-art review on the utilization of calcareous fillers in alkali-activated cement*. Constr Build Mater, 357, 129348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129348>.

- Menchaca-Ballinas, L. E., Escalante-García, J. I. (2020). *Limestone as aggregate and precursor in binders of waste glass activated by CaO and NaOH*. Constr. Build. Mater., 262, 120013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120013>.
- Monteiro, J. M., Sabbie A, Horvath A. (2017). *Towards Sustainable Concrete*. Nature Materials, 16(7), 698–99. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.
- Ortega-Zavala, D., Santana-Carrillo, J. L., Burciaga-Díaz, O., Escalante-Garcia, J. I. (2019). *An Initial Study on Alkali Activated Limestone Binders*. Cem Concr Res, 120, 267–78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.002>.
- Özalp, F., Yılmaz, H. D., Kara, M., Kaya, Ö., Şahin, A. (2016). *Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes*. Construction and Building Materials, 110, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>.
- Panesar, D. K., Zhang, R. (2020), *Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials – A review*. Construction and Building Materials vol 251, 118866, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118866>.
- Perales-Santillan, M. E., Díaz-Aguilera, J. H., Mendoza-Rangel, J. M. (2024). *Evaluation of the rheological behavior for alkaline-activated cements of metakaolin and limestone for its potential application in 3D printing*. Iran J Sci Technol Trans Civ Eng. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01363-3>.
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J. I. (2020a). *Alkali activated metakaolin with high limestone contents – Statistical modeling of strength and environmental and cost analyses*. Cem Concr Compos, 106, 103450. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103450>.
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J. I. (2020b). *Design and optimization of alkaline binders of limestone-metakaolin: a comparison of strength, microstructure, and sustainability with Portland cement and geopolymers*. J. Clean. Prod., 273, 123118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123118>.
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J. I. (2020c). *Gel composition and molecular structure of alkali-activated metakaolin-limestone cements*. Cement Concr. Res., 137, 106211. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106211>.
- Perez-Cortes, P., Cabrera-Luna, K., Escalante-Garcia, J. I. (2021). *Alkali-activated limestone/metakaolin exposed to high temperatures: structural changes*. Cem. Concr. Compos. 122, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104147>.
- Perez-Cortes, P., Escalante-Garcia, J. I. (2023). *Effect of the Limestone Content on the Durability of Alkali-Activated Limestone-Metakaolin Subjected to Acidic and Sulfate Environments*, in Proc 75th RILEM Annual Week. RILEM Bookseries, Vol 40, Escalante-Garcia J.I. et al. (eds). Springer, ISBN 978-3-031-21734-0 ISBN 978-3-031-21735-7 (eBook), https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7_64.
- Purdon, A. (1940). *The action of alkalis on blastfurnace slag*. Journal of the Society of Chemical Industry - Transactions and Communications, 59, 191-202.
- Qian, J., Song, M. (2015). *Study on influence of limestone powder on the fresh and hardened properties of early age metakaolin-based geopolymer*. In: K. Scrivener, A. Favier (Eds.), Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proc 1st Int Conf on Calcined Clays for Sustainable Concrete, Springer, Dordrecht, pp. 253–259.
- Rakhimova, N. R., Rakhimov, R. Z., Morozov, V. P., Gaifullin, A. R., Potapova, L. I., Gubaidullina, A. M., Osin, Y. N. (2018). *Marl-based geopolymers incorporated with limestone: a feasibility study*. J. Non-Cryst. Solids, 492, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.04.015>.
- Rakhimova, N. (2022). *Calcium and/or magnesium carbonate and carbonate-bearing rocks in the development of alkali-activated cements – A review*. Constr Build Mater, 325, 126742. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126742>.

- Rashad, A. M. (2022). *Effect of limestone powder on the properties of alkali-activated materials – A critical overview.* Constr Build Maters, 356, 129188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129188>.
- Rodriguez-Morales, J., Burciaga-Díaz, O., Gómez-Zamorano, L. Y., Escalante-García, J. I. (2024). *Transforming construction and demolition waste concrete as a precursor in sustainable cementitious materials: An innovative recycling approach.* Resources, Conservation & Recycling, 204 (2024) 107474. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107474>.
- Saba, M., Hernandez-Romero, L. N., Lizarazo-Marriaga, J., Quiñones-Bolaños, E. E. (2019). *Petrographic of limestone cultural heritage as the basis of a methodology to rock replacement and masonry assessment: Cartagena de Indias case of study.* Case Studies in Construction Materials, 11, e00281. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00281>.
- Sakulich, A. R., Anderson, E., Schauer, C., Barsoum, M. W. (2009). *Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete.* Constr Build Mater, 23, 2951–2957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.022>.
- Santana-Carrillo, J. L., Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J. I. (2022). *Blended limestone-Portland cement binders enhanced by waste glass based and commercial sodium silicate - Effect on properties and CO₂ emissions.* CemConcr Compos, 126, 104364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104364>
- Schneider, M. (2019). *The cement industry on the way to a low-carbon future.* Cem Concr Res, 124, 105792. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>.
- Scrivener, K., Martírena, F., Bishnoi, S., Maity, S. (2018). *Calcined clay limestone cements (LC³).* Cem Concr Res, 114, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>.
- Shah, I. H., Miller, S. A., Jiang, D., Myers, R. J. (2022). *Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons.* Nature communications, 13(1), 5758. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33289-7>.
- United Nations (2018). *World Urbanization Prospects. Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics.* Retrieved from <https://population.un.org/wup/dataquery/2018>.
- Vázquez Leal, F. R., Mendoza-Rangel, J. M., Andrade, C., Perez-Cortes, P., Escalante-García, J. I. (2023). *Electrochemical Behaviour Of Steel Embedded In Alkali Activated Metakaolin/Limestone Based Mortar.* In RILEM Bookseries Vol 40, Escalante-García, J.I. et al. (Eds.), Proc 75th RILEM Annual Week Mérida México. ISBN 978-3-031-21734-0 ISBN 978-3-031-21735-7 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-21735-7>.
- Villagrán-Zaccardi, Y., Pareja, R., Rojas, L., Irassar, E., Torres-Acosta, A., Tobón, J., John, V. M. (2022). *Overview of cement and concrete production in Latin America and the Caribbean with a focus on the goals of reaching carbon neutrality.* RILEM Technical Letters, 7, 30-46.
- Yip, C. K., Provis, J. L., Lukey, G. C., van Deventer, J. S. J. (2008). *Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers.* Cement Concr Compos., 30, 979–985. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.07.004>.