

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

J. I. Escalante-García^{1*} 

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

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

Recebido: 06/05/2025 | Correções recebidas: 13/09/2025 | Aceito: 16/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

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 cimentos álcali-ativados (CAA). Examina-se também o CRP 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.

Citar como: Escalante-García, J. I. (2026), “*O legado contínuo do calcário: de pilar ancestral da construção a precursor moderno em sinergia com o 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.

Contribuição de cada autor

Nessa obra, José Iván Escalante García é o único autor, portanto, participou de todas as atividades para realizar seu conteúdo.

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 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.

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

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.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

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

1. INTRODUÇÃO

O século XXI apresenta à indústria da construção o desafio de conciliar seu desenvolvimento com a sustentabilidade ambiental. O crescimento populacional e a urbanização contínua, especialmente em regiões menos desenvolvidas economicamente (Nações Unidas, Perspectivas da Urbanização Mundial, 2018), impulsionam uma alta demanda por infraestrutura, gerando um impacto ambiental considerável. Esse impacto está amplamente associado à produção de materiais essenciais, como o cimento Portland (CP), principal aglomerante do concreto moderno e responsável por aproximadamente 8% das emissões globais antropogênicas de CO₂ (Ortega-Zavala et al., 2019; Schneider, 2019), cuja produção é intensiva no consumo de energia e recursos naturais.

Diante desse cenário, torna-se imperativo adotar materiais cimentícios e práticas construtivas com menor impacto ambiental. Nesse sentido, o calcário, um recurso geológico abundante com um legado construtivo de mais de 10.000 anos (Courland, 2011), emerge como um pilar fundamental. Seu papel atual é notavelmente multifacetado: abrange desde seu uso como agregado e matéria-prima essencial para a produção de clínquer cimentício, até seu posicionamento como um versátil material cimentício suplementar (MCS) em cimentos compostos e no inovador LC³ (Limestone Calcined Clay Cement) (Scrivener et al., 2018), culminando em seu potencial promissor como precursor reativo (individualmente ou em combinação) na tecnologia de cimento ativado por ácalis (CAA, Ortega-Zavala et al., 2019).

Em paralelo, a crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD), que globalmente atinge aproximadamente 10.000 Mt/ano (Chen et al., 2021), representa (a) um desafio ambiental considerável e (b) uma oportunidade para implementar modelos de economia circular. Dentro desses RCD, o concreto proveniente de estruturas demolidas, particularmente aquele originalmente feito com agregados calcários, é um precursor valioso para novos aglomerantes. Transformar esse concreto reciclado pulverizado (CRP) em um componente ativo (precursor cimentício) para cimentos alternativos, como o CAA, resolve problemas de descarte e reduz a exploração de recursos virgens (Rodriguez-Morales et al., 2024).

Este artigo de perspectiva analisa o papel multifacetado e em constante evolução do calcário, e a contribuição emergente do CRP à base de calcário, no desenvolvimento de cimentos ecologicamente corretos. Explora a trajetória do calcário desde seus usos históricos, passando por seu papel atual na indústria cimenteira, até sua incorporação em sistemas cimentícios inovadores e sustentáveis. Além disso, examina o potencial do CRP como precursor. Por fim, discute as vantagens inerentes desses materiais inovadores, os desafios tecnológicos e de durabilidade a serem superados e as perspectivas de pesquisa necessárias para consolidar sua integração efetiva em uma indústria da construção verdadeiramente sustentável.

2. CALCÁRIO: DE RECURSO ANCESTRAL A COMPONENTE FUNDAMENTAL EM CIMENTOS MODERNOS

A rocha calcária (CaCO_3) é um material de construção utilizado desde as civilizações antigas. Evidências arqueológicas de Göbekli Tepe (atual Turquia) sugerem que produtos derivados do calcário já eram utilizados há mais de 11.000 anos, demonstrando uma relação fundamental com o desenvolvimento da humanidade (Courland, 2011). A vasta presença dessas rochas é notável; estima-se que, globalmente, 15,2% da superfície terrestre livre de gelo (equivalente a 20,3 milhões de km²) seja composta por rochas carbonáticas, das quais 9,4% são contínuas e 5,8% são descontínuas ou misturadas com evaporitos (Goldscheider et al., 2020), veja Figura 1. Dada essa ampla disponibilidade, o calcário tem sido, consequentemente, a base para a produção de aglomerantes e materiais de construção por milênios.

2.1 Usos históricos e tradicionais: a era do calcário

O verdadeiro salto tecnológico no uso do calcário como aglomerante é atribuído à civilização romana, que aperfeiçoou o processo de calcinação a 800-900 °C para produzir óxido de cálcio (CaO , cal viva), o qual, após hidratação, gera hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 , cal hidratada). Este composto endurece ao reagir lentamente com o CO_2 atmosférico, revertendo a CaCO_3 e completando o "ciclo fechado da cal" (Figura 2, o produto final e a rocha original são CaCO_3), o que é parcialmente responsável pela durabilidade de muitas construções antigas.

A engenhosidade romana, no entanto, residia em ir um passo além, misturando essa cal hidratada com materiais pozolânicos reativos, como cinzas vulcânicas ou mesmo fragmentos cerâmicos finamente moídos. Essas adições reagiam quimicamente com o Ca(OH)_2 na presença de umidade, formando compostos hidráulicos (principalmente silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, ver Tabela 1), que conferiam às argamassas e concretos romanos uma resistência mecânica superior, estabilidade subaquática e durabilidade excepcional por séculos.

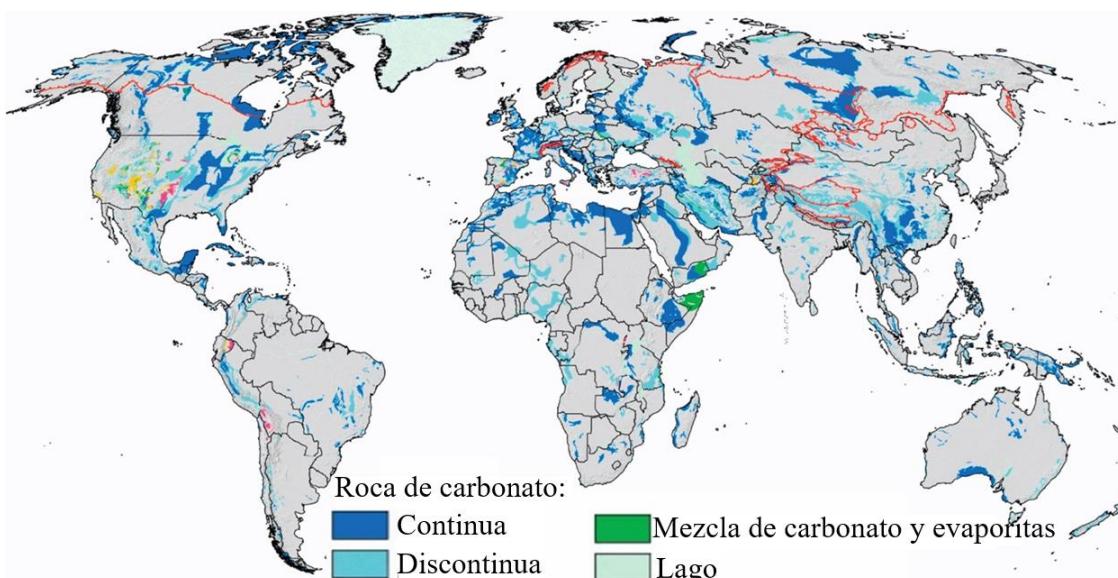


Figura 1 rochas carbonatadas. Modificado de (Goldscheider, et al., 2020).

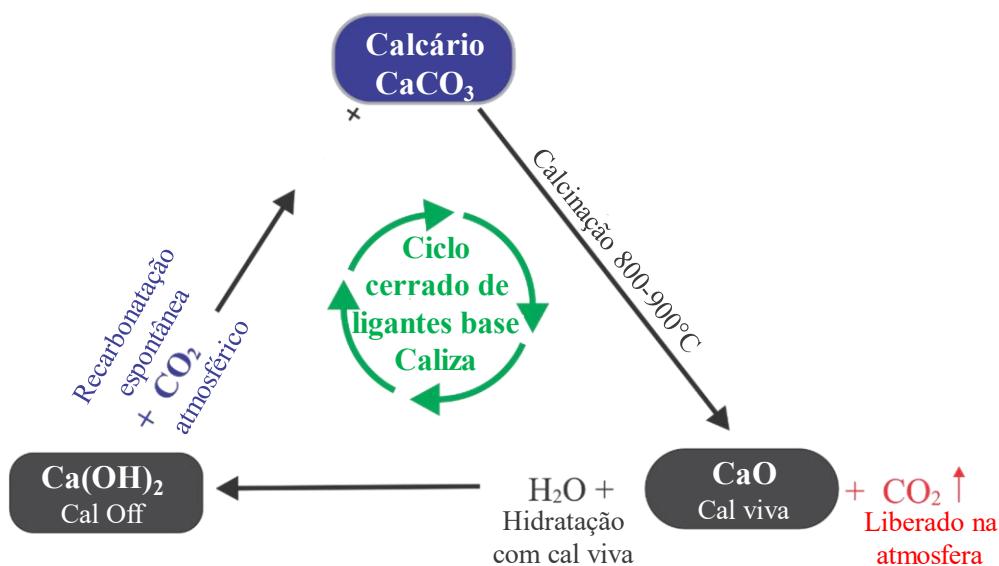


Figura 2 cimentos à base de cal (calcário)

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

Tabela 1 Reações de atividade pozolânica para a formação de produtos cimentícios

Insumos ativos da pozolana	ativador químico	Produtos de reação cimentícia	
		Fórmula	Fórmula condensada comum*
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 sem estequiometria específica.

+ O gel C-S-H é o principal composto que proporciona resistência mecânica e coesão.

Apesar do desenvolvimento de cimentos hidráulicos modernos de endurecimento rápido, os aglomerantes à base de cal continuam sendo utilizados. Sua menor resistência inicial e desenvolvimento de resistência mais lento em comparação com os cimentos convencionais limitam seu uso estrutural generalizado atualmente. No entanto, suas propriedades específicas — alta permeabilidade ao vapor de água, boa trabalhabilidade, flexibilidade e compatibilidade com sistemas construtivos mais antigos — os tornam valiosos em nichos específicos, principalmente em seu uso indispensável na restauração e conservação do patrimônio arquitetônico e cultural, onde a compatibilidade material e estética com os substratos originais é fundamental (Saba, M. et al., 2019).

2.2 Calcário na Era do Cimento Portland: Um Protagonista Multifacetado

Com a invenção e ampla adoção de materiais cimentícios CP desde o século XIX, o calcário tornou-se um mineral insubstituível, assumindo papéis diversos e fundamentais na cadeia produtiva do concreto moderno e dos materiais de construção. Sua abundância e composição química o tornaram a pedra angular da indústria cimentícia global. Suas principais aplicações nessa indústria são:

- **Matéria-prima essencial para o clínquer de cimento Portland:**
 - O calcário é a principal fonte de CaO, constituindo cerca de 80% da mistura bruta para a fabricação de clínquer de CP.
 - Durante o processo de clinquerização a ~1450°C, o CaCO₃ é descarbonatado, liberando CO₂, e o CaO resultante reage com os componentes silicoaluminosos (de argilas, margas, etc.) para formar as fases hidráulicas do clínquer: alita (C₃S), belita (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A) e ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) (usando a nomenclatura do cimento).
 - O processo consome muita energia, cerca de 3,5 GJ por tonelada de clínquer.
 - As emissões de CO₂ (provenientes da descarbonatação e da combustão de combustíveis fósseis) são de aproximadamente 0,8 a 0,9 toneladas de CO₂ por tonelada de clínquer (Juenger et al., 2019).
- **Agregado predominante em argamassas e concretos:**
 - O calcário britado é amplamente utilizado como agregado (brita e areia) na composição de argamassas e concretos.
 - Considerando a produção global massiva de concreto, em torno de 30 bilhões de toneladas por ano (Monteiro, PJM, 2017), e que os agregados podem representar até 75% do volume do concreto, a quantidade de calcário destinada a esse fim é enorme.
 - Sua ampla disponibilidade, custo relativamente baixo e propriedades físico-mecânicas adequadas o posicionam como a principal opção para agregados em diversas regiões.

- **Material cimentício suplementar (MCS) e adições ativas:**

- Nas últimas décadas, para reduzir o impacto ambiental do cimento, o calcário finamente moído ganhou destaque como MCS.
- Normas internacionais, como a europeia EN 197-1 (European Committee for Standardization, 2000), permitem a incorporação de até 35% em CP (Cembureau, 1991).
- Seu principal mecanismo de ação é físico (efeito de enchimento), otimizando a distribuição granulométrica, fornecendo sítios de nucleação para a hidratação do clínquer e melhorando a trabalhabilidade.
- Embora sua reatividade química seja considerada limitada, ele pode participar da formação de fases de carboaluminato hidratadas, contribuindo marginalmente para a resistência.
- Essa prática reduz o "fator clínquer" do cimento, diminuindo assim as emissões de CO₂ e o consumo de energia por tonelada de produto final.
- Entretanto, seu uso em altas porcentagens é objeto de debate científico em relação à durabilidade a longo prazo do concreto armado, especificamente devido à potencial redução da resistência à carbonatação e ao consequente aumento do risco de corrosão do aço de reforço (Villagrán-Zaccardi et al., 2022; Panesar & Zhang, 2020).

2.3 O calcário nas inovações cimentícias recentes: rumo à sustentabilidade.

A crescente pressão para descarbonatar a indústria da construção civil catalisou a pesquisa de novos aglomerantes com menor dependência do clínquer cimentício. Nesse contexto, o calcário contribui para a sustentabilidade com funções que vão além de ser uma simples adição:

- **Cimentos ternários de calcário e argila calcinada (LC³).** Uma inovação notável é o cimento ternário LC³ (Cimento de Calcário e Argila Calcinada). Nessas formulações, o calcário, em proporções de aproximadamente 15% em peso (para 50% de clínquer), desempenha um papel químico ativo fundamental, superando seu papel tradicional como mero material de enchimento. O calcário reage sinergicamente com os produtos de hidratação do clínquer e com a alumina reativa da argila calcinada (metacaulim, MK), levando à formação de fases de carboaluminato de cálcio hidratado (como hemicarbonato AFm-Hc e monocarbonato AFm-Mc). Esses produtos, combinados com o C-S-H convencional, densificam a microestrutura, resultando em resistências mecânicas comparáveis ou superiores às do cimento convencional (CP) e melhorias em vários aspectos da durabilidade. Os cimentos LC³ permitem uma redução no teor de clínquer de até 50% em comparação com um CP tradicional, mitigando as emissões de CO₂ em cerca de 30% (Scrivener et al., 2018).
- **Avanços em cimentos com alta substituição de calcário e outros MCSs.** Para maximizar a substituição do clínquer, outras tecnologias inovadoras, algumas já comercializadas, utilizam até 50% de calcário. Essas estratégias baseiam-se na engenharia de partículas para otimizar o empacotamento e a distribuição do tamanho das partículas, no uso de dispersantes de última geração e na combinação de calcário com outros MCSs de baixo carbono que proporcionam reatividade adicional (ECOCHEM Global, 2024). O objetivo é minimizar o teor de clínquer sem comprometer, e até mesmo aprimorando, as propriedades de engenharia do material final.
- **Calcário como precursor em cimentos ativados por álcalis (CAA).** Finalmente, o horizonte de aplicação do calcário em ligantes alternativos se expande ainda mais ao considerarmos seu potencial em sistemas que se afastam radicalmente da química do cimento Portland. Pesquisas recentes começaram a explorar o uso do calcário como precursor em cimentos ativados por álcalis (CAA), demonstrando que, sob condições de alta alcalinidade, o CaCO₃ pode apresentar reatividade e contribuir para a formação de fases cimentícias (Ortega-Zavala et al., 2019). Esse

papel fascinante do calcário em CAA, seja como único precursor ou em combinação com outros materiais minerais ou residuais, será explorado com mais detalhes na próxima seção deste trabalho.

3. CALCÁRIO E CONCRETO RECICLADO COMO PRECURSORES DO CAA

Além das otimizações em sistemas à base de CP, a busca por aglomerantes com uma pegada ambiental radicalmente menor impulsionou o desenvolvimento de tecnologias alternativas. Entre elas, os cimentos ativados por álcalis (CAA, ou geopolímeros em alguns subtipos) representam uma família de materiais com considerável potencial. Seu atrativo reside na capacidade de reduzir drasticamente as emissões de CO₂ associadas ao clínquer e de utilizar uma ampla gama de subprodutos industriais, minerais de baixa pureza e resíduos como matérias-primas, incluindo aqueles provenientes do setor da construção civil. Nesse contexto, o calcário versátil e o abundante concreto reciclado pulverizado são candidatos promissores como precursores cimentícios.

3.1 Fundamentos dos cimentos ativados por álcalis, CAA

CAA são aglomerantes inorgânicos cuja química de formação difere fundamentalmente dos materiais cimentícios CP. São produzidos pela reação química entre um precursor sólido (geralmente rico em SiO₂ ou Al₂O₃ em forma reativa, amorfa ou vítreia) e um ativador altamente alcalino, seja em solução (“duas partes”) ou sólido (“uma parte”). Embora as primeiras observações sobre a ativação alcalina de escórias datem de meados do século XX (Purdon, 1940), foi o trabalho pioneiro e sistemático de Glukhovsky e seus colegas que lançou as bases científicas para essa tecnologia (Krivenko, 2017).

Os principais componentes dos CAA são dois:

- **O precursor:** Na principal fonte de SiO₂, Al₂O₃ e CaO que formarão a estrutura do aglomerante endurecido (ver Figura 3 teor de CaO, ou minerais naturais como argilas calcinadas (MK), têm sido utilizados. No entanto, o espectro de precursores potenciais é muito mais amplo e inclui materiais menos convencionais, como resíduos de vidro e outros que são o tema deste artigo: calcário (CaCO₃) e concreto reciclado pulverizado com agregados de calcário (CaCO₃, SiO₂, Al₂O₃). A reatividade do precursor, determinada por diversos fatores como sua mineralogia, grau de amorfismo e finura, é crucial para o desenvolvimento do CAA.
- **O ativador:** Sua função é dupla: (a) tendo um pH elevado (geralmente > 12) dissolve as espécies iônicas de Si, Al e Ca do precursor; e (b) catalisa as reações de policondensação ou precipitação que formam a rede cimentícia tridimensional. Os ativadores mais comuns são soluções aquosas de hidróxido de sódio, silicato de sódio (“vidro solúvel”) ou carbonato de sódio, ou misturas destes (ver Figura 3 para cimentos “uma parte”). Em sistemas “uma parte”, o ativador é incorporado como um sólido em pó juntamente com o precursor, necessitando apenas da adição de água para iniciar a reação, o que simplifica seu manuseio na obra, tornando-o semelhante ao cimento Portland.

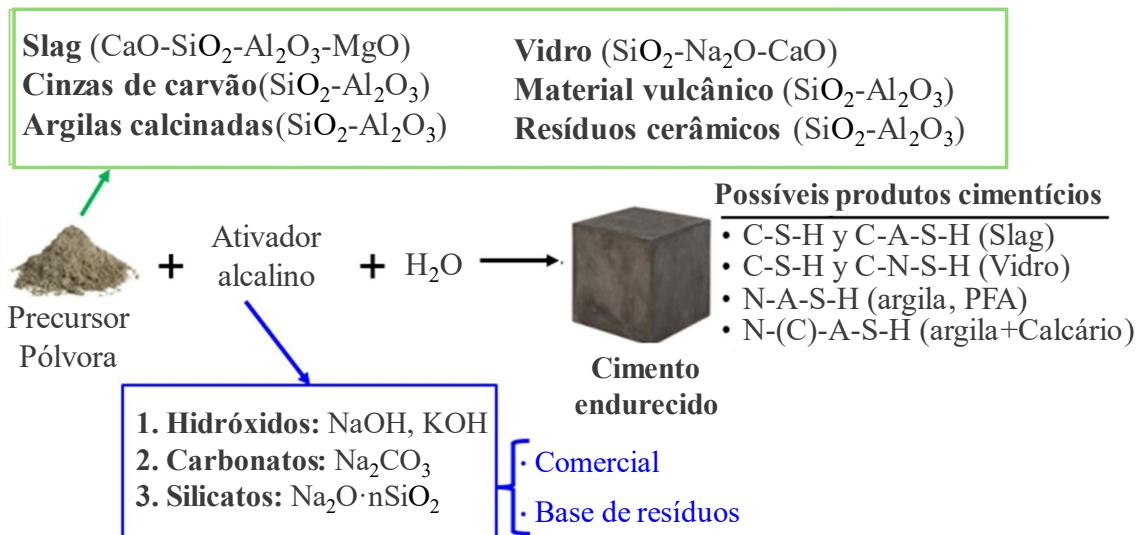


Figura 3. Esquema de reação de cimentos alcalinos "de uma parte". Em cimentos de duas partes o ativador alcalino é adicionado pré-dissolvido na água de mistura.

As reações químicas envolvidas são complexas e dependem da composição do precursor e do tipo e concentração do ativador, levando à formação de géis inorgânicos amorfos ou semicristalinos que atuam como matriz aglomerante. Em sistemas ricos em CaO (à base de escória ou com adição de calcário/CRP), o principal produto é um gel de silicato de cálcio (alumínio) hidratado, denominado C-(A)-S-H, semelhante ao gel C-S-H do CP. Em sistemas com baixo teor de CaO (com MK ou cinzas volantes), formam-se géis do tipo N-A-S-H (geopolímeros). A incorporação de CaO cálcio nesses últimos géis (por exemplo, pela adição de calcário) pode modificar a estrutura do gel para composições mistas N-(C)-A-S-H (Perez-Cortes e Escalante-Garcia, 2020c), afetando as propriedades finais.

A principal motivação para o estudo e desenvolvimento da CAA reside em suas vantagens potenciais: uma redução significativa na pegada de carbono ao evitar a clinquerização, a capacidade de valorizar grandes volumes de resíduos e subprodutos industriais e a possível obtenção de materiais com durabilidade superior em certos ambientes quimicamente agressivos, embora este último aspecto exija uma avaliação cuidadosa caso a caso.

3.2 Calcário como precursor em CAA

Embora o uso de calcário (CaCO_3) como principal precursor em CAA seja menos explorado devido à sua reatividade relativamente baixa em relação aos aluminossilicatos amorfos, seu potencial é considerável, impulsionado por sua enorme abundância global, baixo custo e ausência de necessidade de tratamento térmico. Estudos iniciais sobre CAA à base de calcário 100% revelaram que ele pode reagir em um meio fortemente alcalino, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e desenvolvendo propriedades mecânicas (ver Figura 4), embora sua cinética e grau de reação exijam investigação adicional (Ortega-Zavala et al., 2019).

Os CAA ideais dependem de matérias-primas abundantes, facilmente disponíveis e de baixo custo em escala global para seus precursores. O calcário (LS) atende a esses requisitos devido ao seu baixo custo. O metacaulim (MK), obtido da calcinação de argilas cauliniticas, também é abundante e tem a vantagem de um processo de calcinação mais simples e menos intensivo em energia (apenas ~0,35 GJ/t de argila) do que a produção de clínquer CP (Juenger et al., 2019). A confluência desses fatores torna as misturas LS-MK precursores viáveis e altamente vantajosos para CAA, cujo potencial tem sido extensivamente investigado usando otimização estatística para maximizar tanto os indicadores de resistência quanto os de sustentabilidade (Perez-Cortes & Escalante-Garcia,

2020a; Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020b). O crescente interesse no tema se reflete em diversas revisões bibliográficas recentes (Rakhimova, 2022; Ma et al., 2022; Rashad, 2022; Chan & Zhang, 2023).

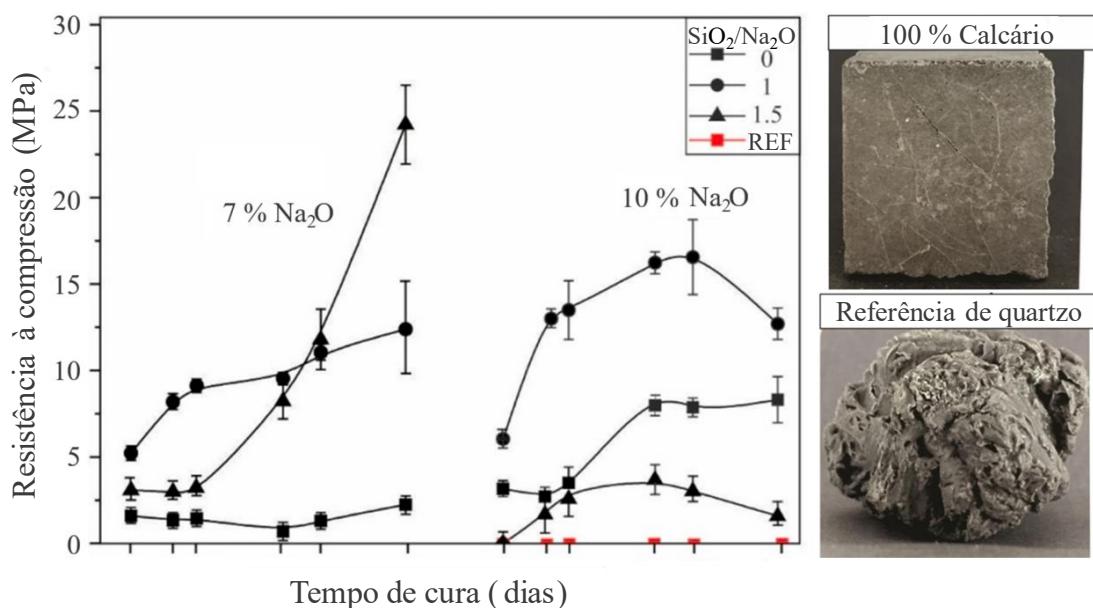


Figura 4. Resistência à compressão e fotografias de cimento endurecido de calcário e quartzo (linha vermelha) ativado por álcalis. Adaptado de (Ortega-Zavala et al., 2019).

Devido à menor reatividade intrínseca do calcário, as pesquisas têm se concentrado em combiná-lo com precursores mais reativos, principalmente o metacaulim (MK), buscando um equilíbrio ideal entre desempenho, custo e sustentabilidade. Os primeiros estudos sobre sistemas MK-calcário apresentaram resultados variáveis, refletindo a complexidade dessas interações: por exemplo, enquanto um estudo relatou um aumento na resistência aos 28 dias com 20% de calcário (de 38,4 para 45,4 MPa, Yip et al., 2008), outro mostrou aumentos marginais com 6% e uma redução com 12% de calcário (Aboulayt et al., 2017). No entanto, um avanço significativo veio da otimização estatística. Esses estudos mais recentes demonstraram que é possível projetar sistematicamente misturas com alto teor de calcário (até 60-80%), que atingem resistências à compressão notáveis (>50 MPa aos 28 dias, ver Figura 5), comparáveis a sistemas baseados em 100% MK ou 100% CP (Perez-Cortes e Escalante-Garcia, 2020a; Perez-Cortes e Escalante-Garcia, 2020b).

Uma descoberta fundamental nesses sistemas otimizados, e uma de suas maiores vantagens, é a significativa redução na demanda por ativador alcalino. Por exemplo, enquanto um sistema composto por 100% de metacaulim (MK) pode exigir até 25% de Na₂O (em relação à massa do precursor), a substituição por 80% de calcário reduz essa demanda para apenas 4%, mantendo resistências mecânicas competitivas (ver Figura 5). Esse princípio de eficiência em sistemas de baixa alcalinidade à base de calcário se estende a outros aglomerantes; cimentos “uma parte” que combinam 49% de calcário com CP e são ativados com silicato de sódio também alcançam excelentes propriedades mecânicas (Santana-Carrillo et al., 2022). Essa menor dependência de ativadores tem implicações econômicas e ambientais positivas, reduzindo a pegada de carbono, o consumo de energia e os custos associados tanto aos ativadores comerciais quanto ao processamento do metacaulim, como ilustrado na comparação da Figura 6.

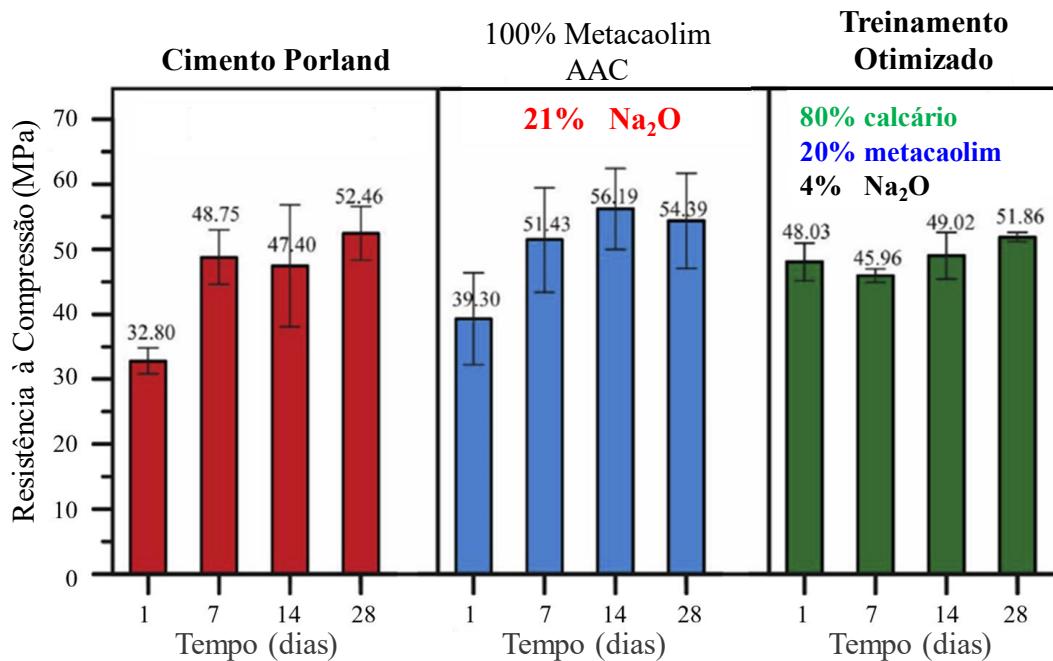


Figura 5. Comparação da resistência à compressão de pastas de CP 100%, CAA de metacaolim 100% e fórmula de CAA otimizada com 80% de calcário e 20% de metacaolim. Adaptado de (Perez-Cortes e Escalante-Garcia, 2020b).

Quimicamente, o calcário vai além de seu papel como mero diluente. O Ca^{2+} liberado por sua dissolução parcial no meio alcalino é incorporado ao gel cimentante. Em sistemas à base de MK, isso modifica a composição do gel N-A-S-H (geopolimérico) para um gel misto N-(C)-A-S-H (ver Figura 7(A)), melhorando sua estrutura tridimensional, densificando a microestrutura (ver Figura 7(B)) e contribuindo para a resistência mecânica (ver Figura 6). A presença de CaCO_3 pode formar carboaluminatos (Yip et al., 2008; Rakhimova et al., 2018). Esses sistemas otimizados com alto teor de calcário também apresentam boa durabilidade contra ácidos e sulfatos, e temperaturas moderadas (300°C) (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2023; Perez-Cortes et al., 2021). Além disso, sua aplicação em concreto também é promissora, com altas resistências (até 60 MPa aos 7 dias) com dosagens razoáveis de ligante (Escalante-Garcia & Perez-Cortes, 2018, ver Tabela 2) e com a capacidade de passivar o aço de reforço (Vázquez Leal et al., 2023).

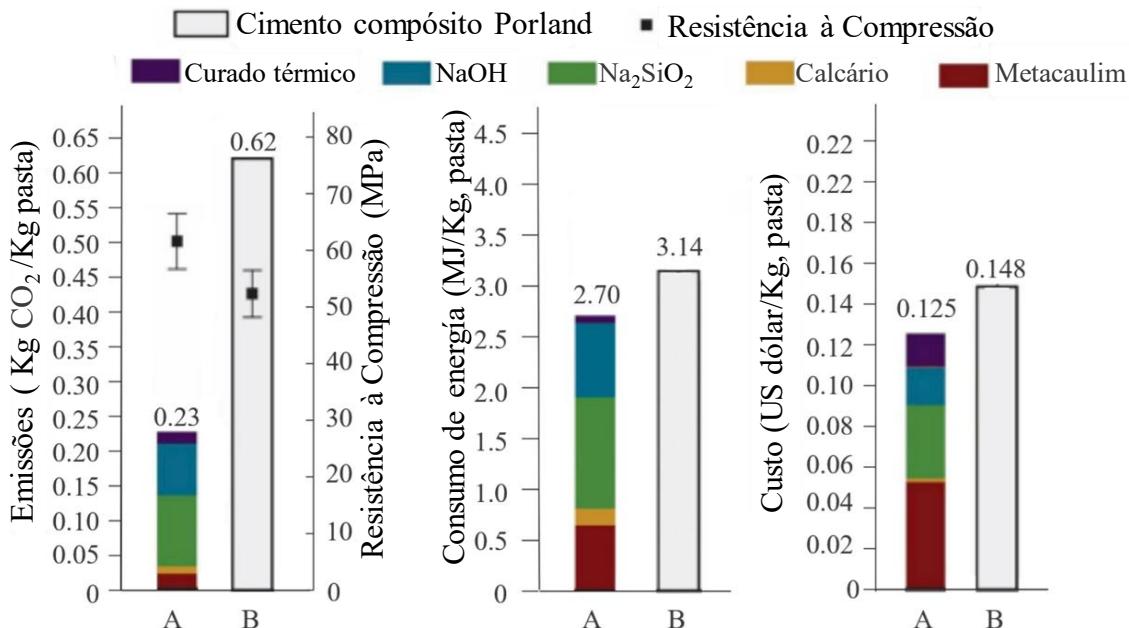


Figura 6. Comparação das emissões de CO₂, consumo de energia e custo entre: A - CAA (60% calcário, 40% metacaúlim); e B - compósito CP. Adaptado de (Pérez-Cortés & Escalante-García, 2020a)

O calcário também foi combinado, com resultados interessantes, com outros precursores, como escória de alto-forno (Sakulich et al., 2009), cinzas volantes (Gao et al., 2015) ou vidro reciclado (Menchaca-Ballinas & Escalante-García, 2020). No entanto, a disponibilidade limitada de alguns desses precursores (como a escória) em comparação com o calcário pode restringir sua aplicabilidade em larga escala.

Em resumo, o calcário não é *filler* inerte nos CAA; ele participa ativamente das reações e modifica a microestrutura. Fundamentalmente, permite uma redução significativa na quantidade de precursor de aluminossilicato (como o MK, que requer calcinação) e na demanda de ativador alcalino, tornando-se um componente essencial para a formulação de CAA mais sustentáveis e econômicos.

Tabela 2. Propriedades mecânicas de concretos preparados com 400 kg/m³ de material cimentício e agregados calcários (Escalante-Garcia e Perez-Cortes, 2018).

Formulação cimentícia (wt. %)	Temperatura de cura	Resistência à compressão (MPa)	
		7 dias	28 dias
60% de calcário, 40% de metacaúlim, 10,7% de Na ₂ O	20°C	47	57
60% de calcário, 40% de metacaúlim, 8,5% de Na ₂ O	24 h a 70 °C, depois a 20 °C.	33	40
30% de calcário, 70% de metacaúlim, 16,9% de Na ₂ O	20°C	60	68

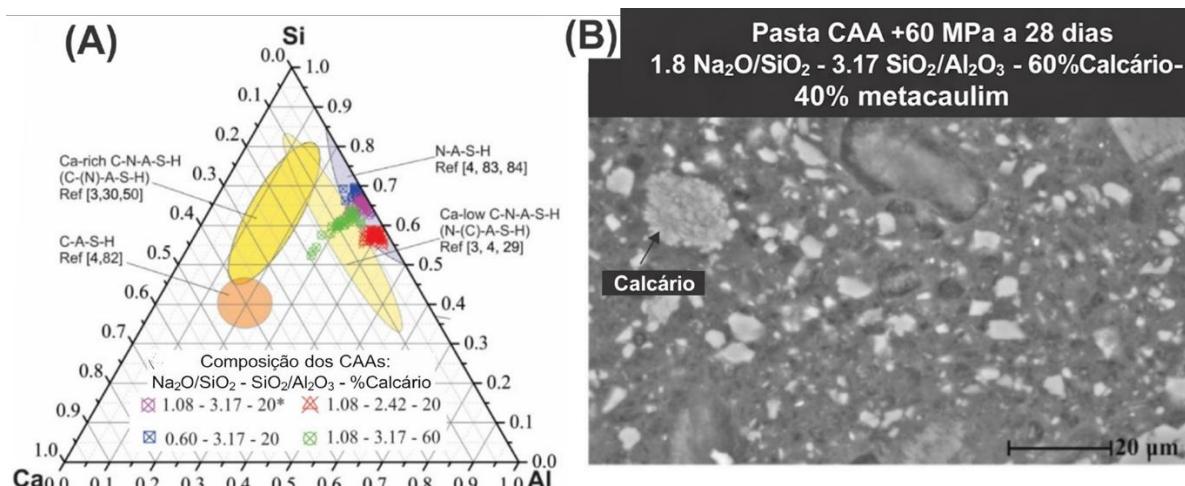


Figura 7. Diagrama composicional ternário Al-Si-Ca (normalizado para 100%) do CAA (20 e 60% de calcário e o restante para 100% é metacaulum). (B) Microestrutura da pasta de CAA com 60% de calcário e 40% de metacaulum. Adaptado de (Perez-Cortes e Escalante-Garcia, 2020c), que inclui referências às zonas de composição química.

3.3 Concreto reciclado pulverizado como precursor em CAA

A gestão de resíduos de construção e demolição (RCD) é um grande desafio ambiental global, com uma geração anual de aproximadamente 10 bilhões de toneladas, representando cerca de 30% do total de resíduos sólidos globais, dos quais cerca de 35% acabam em aterros sanitários (Chen et al., 2021). As taxas de reciclagem variam enormemente, de mais de 80% na Holanda e na Alemanha a menos de 5% em muitas outras regiões, incluindo países densamente povoados (Özalp et al., 2016; Akhtar & Sarmah, 2018). Atualmente, o uso mais comum de concreto reciclado de RCD é como agregado em concreto, substituindo parcialmente os agregados naturais.

No entanto, uma abordagem de maior valor agregado, alinhada à economia circular, consiste em utilizar concreto reciclado pulverizado (CRP), também chamado na literatura como PHC (pulverized hardened concrete) – não como material de enchimento, mas como precursor reativo em agregados alcalinos (CAA). O CRP é um material complexo composto por pasta de CP hidratada (rica em C-S-H, portlandita, etc.), CP não hidratado residual e fragmentos do agregado original (silicosos, silico-aluminosos ou, como em muitos dos estudos que fundamentam este trabalho, calcários). Essa composição confere-lhe um potencial inerente para reagir em ambiente alcalino.

Estudos exploratórios sobre a ativação alcalina do CRP como precursor único (100% CRP) demonstraram sua viabilidade, atingindo resistências à compressão de 12–20 MPa, especialmente com cura térmica inicial (ver Tabela 3, Rodriguez-Morales et al., 2024). Embora essas resistências possam ser suficientes para certas aplicações não estruturais, elas podem ser melhoradas combinando o CRP com outros precursores mais reativos ou complementares (ver Tabela 3). Resultados promissores foram relatados em misturas binárias ou ternárias.

- **Com metacaulim:** 55-75% de CRP (o restante é metacaulim), até 30 MPa em 28 dias (Tabela 3).
- **Com vidro residual:** Sistemas com 32-60% de CRP (o restante é vidro), até 46 MPa em 28 dias (ver Tabela 3)
- **Com cimento Portland (CP):** Sistemas com 45-65% de CRP e 20-40% de CP, com resistências de 30-55 MPa aos 28 dias (ver Tabela 3). Nesses sistemas, o CP pode atuar não apenas como precursor, mas também contribuindo para a alcalinidade inicial (ver Tabela 2 e Figura 5, ibid.).

Tabela 3. Resistência à compressão de pastas CAA formuladas com precursores de CRP (concreto reciclado pulverizado) e precursores complementares.

	Concreto reciclado pulverizado (% em peso)	Precursor complementar (% peso)			Tipo de ativador alcalino	%Na ₂ O em relação à massa do precursor	Resistência à compressão aos 28 dias, MPa	Regime de cura ⁺⁺
		Metacaulim	Cimento Portland	Resíduos de vidro				
1	55	45			Metassilicato de sódio comercial, Ms = 1	10	30	60-20°C
2	75	25			Metassilicato de sódio comercial, Ms = 1	12	28,5	60-20°C
3**	60			40	Metassilicato de sódio comercial, Ms = 1	7,5	32	60-20°C
4**	32			68	Metassilicato de sódio comercial, Ms = 1	7,5	46	60-20°C
5	45		40		15% de silicato de sódio comercial tipo G, Ms = 3,2	2,9	45,2	20°C
6	45		50		5% de silicato de sódio proveniente de resíduos de vidro, Ms = 3,5	1,2	55,8	20°C
7	85	-	-	-	15% de silicato de sódio comercial tipo G, Ms = 3,2	3,39	16	20
							12	60-20°C
8	80	-	-	-	20% de silicato de sódio proveniente de resíduos de vidro, Ms = 4	5%	12*	20°C
							19,8	80-20°C

Ms = módulo do silicato de sódio usado como ativador.

*Aumentou para 19 MPa após 90 dias.

** Cimentos de 2 componentes (ativador adicionado à solução).

⁺⁺ 60-20°C ou 80-20°C indica que as primeiras 24 horas de cura foram realizadas a 60 ou 80°C, e depois continuaram a 20°C.

A Figura 8 compara as emissões de CO₂, o consumo de energia e o custo entre vários CAA baseados em CRP em comparação com um CP. A vantagem dos CAA na redução de emissões é evidente. Além disso, pesquisas promissoras estão sendo conduzidas com combinações de CRP com outros precursores alternativos, como cinzas volantes, resíduos de vidro e resíduos da indústria cerâmica.

Um aspecto fundamental é o tipo de ativador utilizado. Diversos estudos em andamento no Laboratorio de Cementos y Medio Ambiente del Cinvestav Saltillo têm aprimorado as propriedades mecânicas dos CAA, por meio da otimização do tipo de ativador alcalino. Além dos ativadores

comerciais (hidróxidos, silicatos de sódio), tem-se investigado o uso de ativadores alternativos com menor impacto ambiental, como os silicatos de sódio obtidos a partir do tratamento termoquímico de resíduos de vidro. Esses ativadores alternativos podem ser tão eficazes quanto os comerciais em termos de desenvolvimento de resistência em sistemas com CRP, porém com uma pegada de carbono e custo significativamente menores (ver Tabela 3, itens 7 e 8, e Figura 8), reforçando a sustentabilidade desse método de reciclagem e promovendo a economia circular.

Microestruturalmente, os CAA baseados em CRP exibem matrizes densas com partículas de CRP incorporadas e parcialmente reagidas (ver Figura 9), o que é consistente com seu desempenho mecânico.

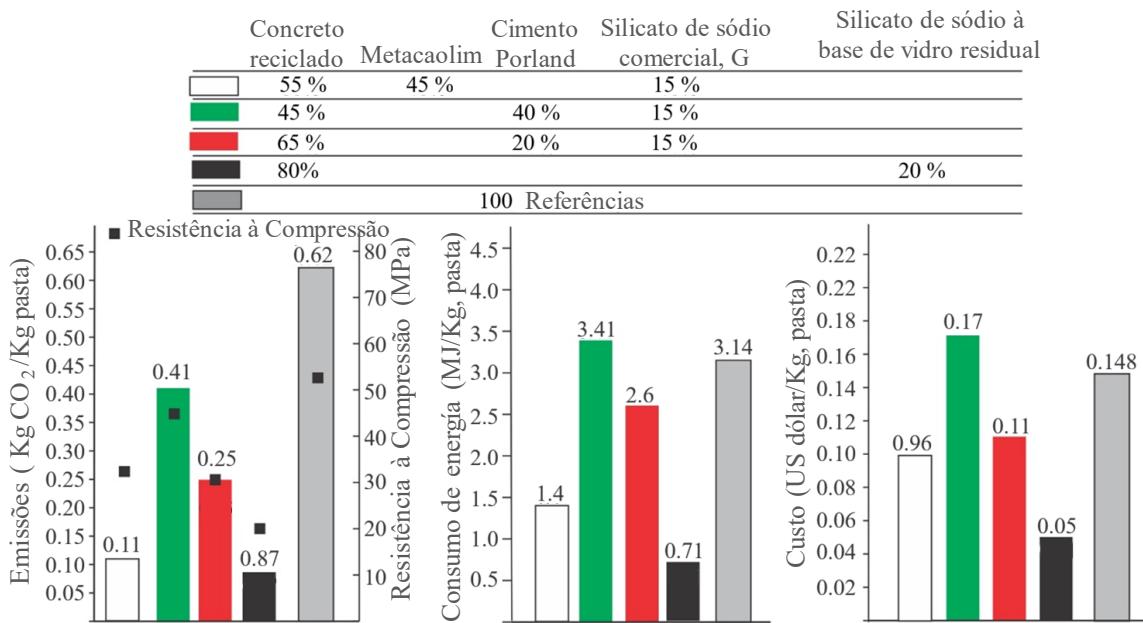


Figura 8. Comparativa a emissões de CO₂, demanda de energia e custo de alguns CAA baseados em concreto reciclado pulverizado e outros precursores suplementares, como cimento Portland e metacaolim. Inclui dados para 100% CRP com um ativador alcalino alternativo à base de vidro residual.

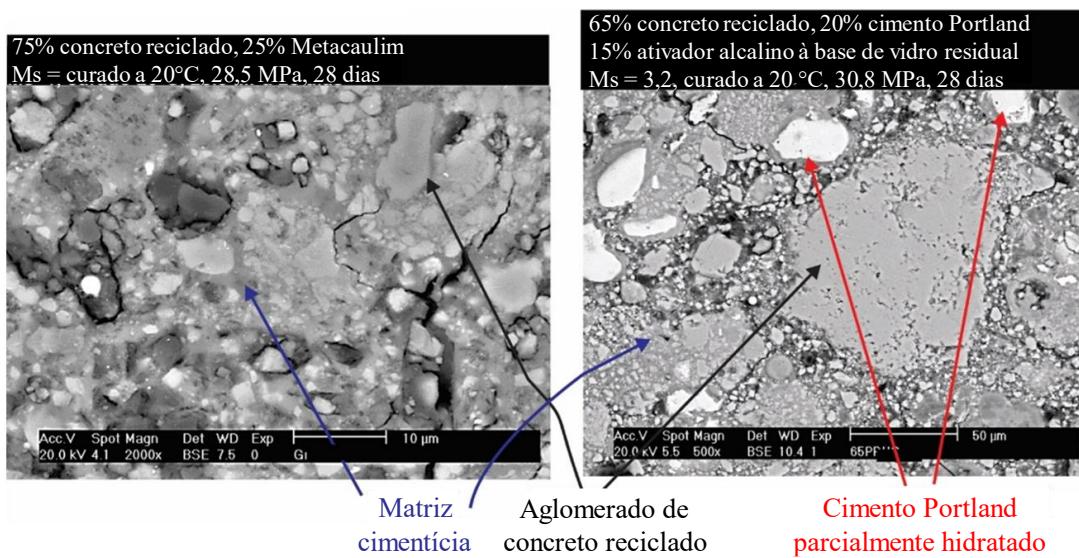


Figura 9. Microestruturas de AAC utilizando concreto reciclado como precursor. Imagens de microscopia eletrônica de varredura, elétrons retroespalhados. (Escalante-García JI, 2024).

Vantagens do CRP como precursor. O uso do CRP como precursor na CAA oferece múltiplas vantagens ambientais:

- Transforme o excesso de resíduos em um recurso valioso.
- Reduz a demanda por matérias-primas virgens (tanto para cimento quanto para agregados).
- Reduz a pressão sobre os aterros sanitários.
- Ajuda a fechar o ciclo de vida dos materiais de construção.

Além disso, o potencial de utilização de ativadores alcalinos alternativos derivados de outros fluxos de resíduos (como o vidro) abre caminhos para uma economia circular ainda mais integrada. É importante notar que o potencial de valorização de resíduos de construção e demolição (RCD) em CAA pode ir além do concreto, visto que outros componentes, como tijolos cerâmicos, telhas ou vidro, também se mostraram precursores viáveis na ativação alcalina (Borrachero et al., 2022; Ahmari et al., 2012; Komnitsas et al., 2015), embora sejam necessárias mais pesquisas para compreender completamente o comportamento dessas misturas heterogêneas.

4. PERSPECTIVAS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES

As seções anteriores descreveram a trajetória histórica e a atual contribuição multifacetada do calcário para o mundo dos materiais cimentícios, bem como o potencial emergente do concreto reciclado pulverizado (CRP) como um recurso valioso dentro da economia circular da construção, particularmente no contexto dos cimentos ativados por álcalis (CAA). Evidências demonstraram que ambos os materiais, individualmente ou em combinação, podem servir de base para o desenvolvimento de ligantes com desempenho mecânico adequado e, crucialmente, uma pegada ambiental significativamente reduzida em comparação com o cimento Portland tradicional. No entanto, a transição de pesquisas promissoras e aplicações iniciais para a adoção ampla e responsável na indústria exige uma avaliação crítica tanto das oportunidades inerentes quanto dos desafios substanciais que ainda persistem. Esta seção final concentra-se nessa perspectiva voltada para o futuro, analisando o potencial derivado da disponibilidade desses precursores, os obstáculos técnicos e de implementação que devem ser superados e as futuras linhas de pesquisa que podem pavimentar o caminho para sua consolidação como pilares da construção verdadeiramente sustentável.

4.1 Abundância e potencial dos precursores: recursos estratégicos para a sustentabilidade. Calcário: um recurso mineral com vasta disponibilidade global.

A extraordinária disponibilidade global de calcário e CRP os posiciona como componentes-chave para futuros sistemas cimentícios. O calcário, um dos minerais mais abundantes, com vastos depósitos distribuídos globalmente (Goldscheider et al., 2020), minimiza as barreiras logísticas e de transporte em comparação com precursores de disponibilidade mais localizada, como escória ou certas cinzas volantes. Além disso, sua extração e processamento primário (britagem e moagem) são processos relativamente simples e menos intensivos em energia em comparação com a complexa produção de clínquer de CP.

Concreto Reciclado Pulverizado (CRP): Um Recurso Antropogênico em Expansão.

Por outro lado, o CRP constitui um recurso antropogênico colossal e em constante crescimento, originado do imenso estoque de concreto existente que, ao final de sua vida útil ou por meio de demolição, se transforma em um fluxo massivo de resíduos. A geração anual de RCD ultrapassa 10 bilhões de toneladas, das quais 30-40% são de concreto (Chen et al., 2021). Utilizar esse fluxo de resíduos como precursor para novos cimentos não só resolve o problema ambiental de sua destinação final, como também fornece uma fonte massiva e distribuída de matérias-primas, especialmente em ambientes urbanos com alta geração de RCD. Além disso, o uso de RCR pode

oferecer vantagens econômicas, reduzindo os custos de aterro e substituindo matérias-primas virgens.

Potencial ambiental estratégico do calcário e do CRP.

Do ponto de vista ambiental, o potencial desses materiais é igualmente significativo. O uso de calcário como aditivo no CP ou como precursor em LC³ e CAA evita emissões de CO₂ ao substituir parcialmente o clínquer, incluindo aquelas provenientes da descarbonatação e do consumo de combustível. Para os CAA com alto teor de calcário, há o benefício adicional de uma menor demanda por ativadores alcalinos, reduzindo seu impacto ambiental. O CRP, por sua vez, incorpora os princípios da economia circular: transformam resíduos em recursos, conservam matérias-primas não renováveis e previnem a poluição por aterros sanitários. A substituição do CP convencional por esses materiais alternativos pode contribuir significativamente para as metas globais de redução de emissões (Shah et al., 2022). Estudos sobre CAA otimizado de calcário-metacaulim mostraram reduções de CO₂ superiores a 60% e economias de energia e custos em torno de 15% em comparação com o CP (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2020a).

Em conjunto, a vasta disponibilidade global, o baixo custo potencial e os benefícios ambientais inerentes posicionam o calcário e o concreto reciclado pulverizado como recursos estratégicos fundamentais. Seu uso inteligente e eficiente é essencial para o avanço dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e para dissociar o desenvolvimento da infraestrutura necessária do impacto ambiental historicamente associado à produção de cimento. No entanto, a plena realização desse enorme potencial exige o enfrentamento e a resolução de uma série de desafios técnicos e não técnicos, conforme discutido a seguir.

4.2 Desafios na implementação e utilização.

Apesar do inegável potencial do calcário e do concreto reciclado pulverizado (CRP) como precursores de cimentos mais sustentáveis, sua transição de aplicações laboratoriais e piloto para a adoção generalizada na indústria enfrenta desafios significativos que exigem uma abordagem abrangente.

Incerteza quanto à durabilidade a longo prazo.

Um dos obstáculos mais críticos, e tema de intenso debate, é a incerteza em torno da durabilidade a longo prazo de cimentos com alto teor desses materiais, especialmente em CAA. Embora existam preocupações documentadas sobre a durabilidade de concretos com alto teor de calcário, particularmente devido à menor resistência à carbonatação e ao risco de corrosão do aço (Panesar & Zhang, 2020), a situação para os CAA é mais complexa. Apesar de estudos específicos sobre CAA otimizados à base de calcário e metacaulim mostrarem resultados promissores em laboratório contra ataques químicos (ácidos e sulfatos) e temperaturas moderadas (Perez-Cortes & Escalante-Garcia, 2023), e até mesmo capacidade de passivação do aço (Vázquez Leal et al., 2023), faltam evidências robustas sobre seu comportamento a longo prazo (décadas) sob diversas condições de exposição em situações reais. Essa ausência de um histórico de desempenho extenso, comparável ao do cimento Portland, gera relutância em utilizá-los em aplicações estruturais críticas.

Variabilidade das matérias-primas precursoras.

A variabilidade inerente das matérias-primas é outro grande desafio. Embora a composição do calcário varie dependendo do depósito, a heterogeneidade do CRP é mais acentuada, visto que provém de concretos de diferentes idades, composições, tipos de agregados e pode estar contaminado por outros materiais de demolição (gesso, plásticos, etc.). Essa variabilidade dificulta a garantia de uma qualidade consistente do precursor e, portanto, de um desempenho previsível do CAA, exigindo métodos de caracterização robustos e possível pré-tratamento do CRP.

Desafios tecnológicos na ativação alcalina.

A própria tecnologia de ativação alcalina apresenta desafios. Os ativadores convencionais (NaOH e $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{nSiO}_2$) têm custos e impacto ambiental consideráveis, e seu manuseio, especialmente em soluções altamente alcalinas (sistemas de dois componentes), apresenta riscos à segurança ocupacional. Ativadores alternativos (por exemplo, aqueles derivados de vidro reciclado) são promissores, mas sua produção industrial e validação a longo prazo ainda estão em desenvolvimento. Além disso, o controle das propriedades dos CAA no estado fresco (reologia, pega, trabalhabilidade) pode ser mais complexo do que com o cimento Portland, exigindo ajustes cuidadosos na formulação para adequá-lo a diversas técnicas de construção, incluindo a impressão 3D (Perales-Santillán et al., 2024).

Obstáculos à padronização, aceitação e viabilidade econômica.

Por fim, existem barreiras significativas à padronização e à aceitação pela indústria. A falta de normas técnicas, especificações e códigos de projeto amplamente reconhecidos para CAA e CRP à base de calcário limita seu uso em projetos de engenharia civil. Superar a inércia da indústria e conquistar a confiança de projetistas, construtores e órgãos reguladores exige dados técnicos robustos, disseminação de estudos de caso bem-sucedidos e treinamento profissional. Soma-se a isso considerações econômicas e logísticas, como a necessidade de cadeias de suprimentos eficientes para CRP processado e ativadores, e uma avaliação abrangente do custo do ciclo de vida.

4.3 Visão futura e linhas de pesquisa.

Os desafios descritos, embora significativos, não devem desencorajar a exploração e o desenvolvimento desses materiais alternativos; pelo contrário, estabelecem o roteiro para pesquisas futuras. A urgência de mitigar as mudanças climáticas e de fazer a transição para uma economia circular na construção civil torna imperativo continuar avançando nessa direção. Para prosseguir nesse sentido, as seguintes áreas prioritárias de pesquisa e desenvolvimento foram identificadas:

- **Compreender e garantir a durabilidade a longo prazo:**

- Realizar extensos estudos de campo, monitorando o comportamento de estruturas reais construídas com esses cimentos sob diversas e representativas condições ambientais ao longo de longos períodos (décadas).
- Aprofundar a compreensão fundamental dos mecanismos específicos de degradação (carbonatação, penetração de cloretos, ataque de sulfatos, reação álcali-agregado, etc.) que operam nessas matrizes cimentícias específicas.
- Desenvolver e validar métodos de teste acelerados que sejam confiáveis, reproduzíveis e que apresentem uma forte correlação com o desempenho observado em condições reais de serviço.
- Investigar detalhadamente a interação entre esses novos aglomerantes e o aço de reforço, com foco nos mecanismos de passivação, nos limiares críticos de contaminantes e nas taxas de corrosão em ambientes alcalinos específicos.

- **Avanços na ciência dos materiais e estudos de dosagens:**

- Caracterizar com precisão a natureza e a evolução das fases formadas durante a ativação alcalina do calcário e do CRP, e seu impacto nas propriedades finais.
- Investigar como a variabilidade inerente dos precursores (especialmente o CRP) afeta a cinética da reação e a microestrutura, desenvolvendo estratégias para mitigar os efeitos negativos.
- Projetar e otimizar misturas precursoras (combinando calcário, CRP, metacaulim e outros SCMs) e sistemas ativadores (tipo, dosagem, alternativas sustentáveis) para alcançar

- propriedades de engenharia específicas e melhorar a robustez do material.
 - Estabelecer estratégias eficazes para a caracterização rápida, o pré-tratamento ou o beneficiamento do CRP, a fim de garantir sua qualidade como precursor.
- Desenvolvimento tecnológico e otimização de aplicações:**
- Promover a pesquisa, o desenvolvimento e a produção em escala industrial de ativadores alcalinos mais econômicos, seguros para manusear e com menor impacto ambiental.
 - Aprimorar o controle das propriedades reológicas (trabalhabilidade, viscosidade) e dos tempos de pega para facilitar o uso desses cimentos em uma ampla gama de aplicações na construção civil, incluindo métodos avançados como a manufatura aditiva (impressão 3D).
 - Desenvolver e adaptar técnicas de ensaios não destrutivos (END) para o controle de qualidade no local e a avaliação do estado de estruturas construídas com esses materiais.

• Padronização, implementação e avaliação abrangente:

- Promover um esforço concertado a nível nacional e internacional para o desenvolvimento de normas técnicas, especificações de produtos e diretrizes de projeto baseadas em evidências científicas sólidas, que facilitem a incorporação segura e confiável desses cimentos no mercado.
- Realizar avaliações de ciclo de vida (ACV) e avaliações de custo do ciclo de vida (ACCV) abrangentes, transparentes e comparativas para documentar completamente seus benefícios ambientais e econômicos.
- Promover a construção e o acompanhamento de projetos-piloto e estruturas de demonstração para validar seu desempenho em condições reais, construir confiança no setor e promover sua ampla aceitação.

Abordar essas linhas de pesquisa de forma coordenada e com visão de futuro é essencial. O progresso nessas frentes nos permitirá superar os obstáculos atuais e desbloquear o considerável potencial dos cimentos à base de calcário e do concreto reciclado, contribuindo significativamente para uma indústria da construção mais sustentável e eficiente em termos de recursos, alinhada aos princípios da economia circular.

5. CONCLUSÕES: RUMO A UM FUTURO SUSTENTÁVEL NA CONSTRUÇÃO COM CALCÁRIO E CONCRETO RECICLADO

Nossa jornada pelo mundo dos materiais cimentícios reafirma uma convicção: a indústria da construção civil está em um ponto de inflexão, onde a inovação inspirada em recursos tradicionais e a valorização inteligente de resíduos são imprescindíveis para a construção de um futuro mais sustentável. Nesse contexto, o calcário e o concreto reciclado emergem não como meras alternativas, mas como elementos-chave com potencial transformador.

• Calcário: um legado ancestral com relevância estratégica.

Este trabalho destacou a presença do calcário, desde seu uso fundamental no alvorecer da civilização até seu papel insubstituível na era do cimento Portland e, mais importante, sua promissora emergência como componente-chave em cimentos de ponta com baixa emissão de carbono, como os LC³ e os cimentos ativados por álcalis (CAA). Sua extraordinária abundância global, baixo custo e a valiosa possibilidade de utilizá-lo sem calcinação em diversas aplicações o estabelecem como um recurso estratégico indispensável para a sustentabilidade.

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

O renascimento dos resíduos. O enorme potencial do CRP, obtido a partir do fluxo massivo de resíduos de construção e demolição, foi evidenciado, demonstrando sua capacidade de transcender seu destino como mero dejeto. Sua conversão em um precursor viável para CAA é um exemplo claro da economia circular em ação, reinserindo resíduos na cadeia de valor e transformando-os em matéria-prima para novos aglomerantes de alto desempenho, aliviando assim a pressão sobre aterros sanitários e recursos naturais.

- **Ativação alcalina: um catalisador para a sustentabilidade.**

A tecnologia de ativação alcalina está se mostrando uma maneira particularmente eficaz de aproveitar as vantagens do calcário e do CRP. Sistemas baseados em uma alta proporção de calcário (em sinergia com metacaulim) ou em CRP (sozinho ou em combinação) não são apenas tecnicamente viáveis, mas também demonstraram propriedades mecânicas e de durabilidade promissoras em laboratório. Mais importante ainda, oferecem benefícios ambientais substanciais: uma redução drástica no fator clínquer, uma menor demanda por ativadores alcalinos (especialmente com alto teor de calcário) e valorização eficaz de resíduos. A inovação em ativadores derivados de outros fluxos de resíduos, como o vidro, promete aprimorar ainda mais a sustentabilidade dessa abordagem tecnológica.

- **Desafios no horizonte: a tarefa pendente.**

Apesar dessa perspectiva otimista, a adoção generalizada desses materiais enfrenta desafios consideráveis, os quais esta revisão destacou. É fundamental construir confiança em sua durabilidade a longo prazo em condições reais de uso. Além disso, o gerenciamento da variabilidade inerente das matérias-primas, particularmente do CRP, o desenvolvimento e a ampliação da produção de ativadores sustentáveis, seguros e economicamente viáveis, e o estabelecimento de normas e regulamentações técnicas robustas e harmonizadas são obstáculos que a comunidade científica e técnica deve abordar com prioridade e rigor.

- **Um apelo à ação conjunta:**

Em suma, o calcário — tanto como recurso natural quanto como núcleo do concreto reciclado — reafirma seu papel fundamental no presente e, sobretudo, no futuro dos materiais cimentícios sustentáveis. Sua sinergia com a tecnologia de ativação alcalina e outras estratégias de baixo carbono traça um caminho promissor rumo a uma indústria da construção mais verde, mais eficiente no uso de recursos e firmemente alicerçada nos princípios da economia circular. Para concretizar o imenso potencial desses recursos e superar os desafios remanescentes, a pesquisa contínua, o desenvolvimento tecnológico inovador e a colaboração estreita e decisiva entre todos os atores do setor — da academia à indústria e aos órgãos reguladores — serão essenciais para um planeta mais sustentável para as futuras gerações.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (atual Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, Seciht) pelo financiamento do projeto CF-2023-G-405. À Cinvestav e à SEP pelo projeto 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 geopolymers 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.,

- Gubaiddullina, 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-Garcia, 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-Garcia, 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., Martirena, 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-Garcia, 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>.