

## Desempenho por durabilidade e sustentabilidade de cimentos Portland com substituição de calcário.

D. M. Solís-Cruz<sup>1\*</sup> , A. A. Torres-Acosta<sup>2</sup> , B. Martín-Pérez<sup>1</sup> 

\* Autor de Contato: [dsoli028@uottawa.ca](mailto:dsoli028@uottawa.ca)

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.975>.

Recebido: 01/11/2025 | Correções recebidas: 04/12/2025 | Aceito: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

### RESUMO

Este artigo revisa o desempenho mecânico, microestrutural e de durabilidade do cimento Portland-calcário (PLC) como uma alternativa sustentável ao cimento Portland tradicional. Uma análise sistemática de quase cinco décadas de literatura foi conduzida, com foco na resistência à compressão, porosidade, entrada de cloretos e carbonatação em argamassas e concretos. Os resultados indicam que o PLC geralmente proporciona resistência inicial adequada, enquanto a porosidade, a difusão de cloretos e a carbonatação aumentam com o maior teor de calcário; esses efeitos podem ser mitigados pela otimização da relação água/cimento e pela incorporação de materiais pozolânicos. As limitações incluem protocolos experimentais inconsistentes, variações nos tempos de cura e escassez de dados de longo prazo. A originalidade deste trabalho reside na síntese do desempenho do PLC considerando múltiplas métricas de durabilidade e destacando lacunas na pesquisa. De modo geral, enfatiza-se a necessidade de avaliações integradas, baseadas no desempenho, para garantir aplicações de concreto sustentáveis e de longa duração.

**Palavras-chave:** cimento Portland com calcário; resistência à compressão; porosidade; penetração de cloretos; carbonatação.

**Citar como:** Solís Cruz, D. M., Torres-Acosta, A. A., Martín-Pérez, B. (2026), “Desempenho por durabilidade e sustentabilidade de cimentos Portland com substituição de calcário.”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 60 – 98, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.975>.

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada.

<sup>2</sup> Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Santiago de Querétaro, Querétaro, México.

### Contribuição de cada autor

Neste trabalho, o autor DMSC contribuiu com as seguintes atividades: ideias originais, coleta de dados, análise de resultados, discussão dos resultados e redação do manuscrito. O autor AATA contribuiu com as seguintes atividades: ideias originais, coleta de dados, discussão dos resultados e revisão/edição do manuscrito. O autor BMP contribuiu com ideias originais, coleta de dados, discussão dos resultados e revisão/edição do manuscrito.

### 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.

## Durability and sustainability performance of Portland limestone cements.

### ABSTRACT

This paper reviews the mechanical, microstructural, and durability performance of Portland-limestone cement (PLC) as a sustainable alternative to traditional Portland cement. A systematic analysis of literature spanning almost five decades was conducted, focusing on compressive strength, porosity, chloride ingress, and carbonation in mortars and concretes. Results indicate that PLC generally provides adequate early-age strength, while porosity, chloride diffusion, and carbonation increase with higher limestone content; these effects can be mitigated by optimizing water-to-cement ratio and incorporating supplementary cementitious materials. Limitations include inconsistent experimental protocols, variable curing durations, and limited long-term data. The originality lies in synthesizing PLC performance across multiple durability metrics and highlighting research gaps. Overall, the study emphasizes the need for integrated, performance-based evaluation to ensure sustainable and durable concrete applications.

**Keywords:** Portland limestone cement; compressive strength; porosity; chloride ingress; carbonation.

## Desempeño por durabilidad y sostenibilidad de cementos Portland con remplazo de caliza.

### RESUMEN

Este trabajo hace una revisión del desempeño mecánico, microestructural y de durabilidad del cemento Portland-caliza (PLC) como alternativa sostenible al cemento Portland tradicional. Se realizó un análisis sistemático de la literatura de casi cinco décadas, centrándose en resistencia a compresión, porosidad, ingreso de cloruros y carbonatación en morteros y concretos. Los resultados indican que el PLC proporciona generalmente una resistencia adecuada a edades tempranas, mientras que la porosidad, la difusión de cloruros y la carbonatación aumentan con mayores contenidos de caliza; estos efectos pueden mitigarse optimizando la relación agua-cemento e incorporando materiales puzolánicos. Las limitaciones incluyen protocolos experimentales inconsistentes, variaciones en los tiempos de curado y escasez de datos a largo plazo. La originalidad radica en sintetizar el desempeño del PLC considerando múltiples métricas de durabilidad y en resaltar brechas de investigación. En general, se enfatiza la necesidad de evaluaciones integradas y basadas en desempeño para asegurar aplicaciones de concreto sostenibles y duraderas.

**Palabras clave:** cemento Portland con caliza; resistencia a la compresión; porosidad; penetración de cloruros; carbonatación.

### 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](mailto:alconpat.int@gmail.com), Website: [www.alconpat.org](http://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.

## 1. INTRODUÇÃO

O cimento Portland com calcário (PLC) tem sido amplamente adotado internacionalmente como uma alternativa sustentável ao Cimento Portland Comum (CPO), principalmente por sua capacidade de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> ao substituir parcialmente o clínquer por calcário finamente moído (LS). Inicialmente limitado a níveis modestos de substituição de 5 a 15% (ASTM International, 2022; CSA, 2003), diversos países e órgãos reguladores expandiram o limite de substituição permitido para 35% (ONNCCE, 2017), impulsionando ainda mais a presença do PLC no mercado. Embora os benefícios ambientais associados à redução do teor de clínquer sejam aparentemente significativos, essas avaliações frequentemente negligenciam as implicações mais amplas do desempenho do PLC em sistemas de concreto armado, onde a interação concreto/aço determina a durabilidade a longo prazo.

A eficiência do concreto deve ser avaliada não apenas no nível do cimento, mas também no contexto do material compósito completo, especialmente em aplicações de concreto armado. O aumento do teor de LS frequentemente resulta em maior porosidade e permeabilidade (Courard et al., 2005; Palm et al., 2016), o que afeta não só a matriz do concreto, mas também pode comprometer o ambiente protetor ao redor da armadura embutida. Isso é particularmente preocupante, visto que a corrosão da armadura permanece sendo um dos mecanismos de degradação mais críticos em estruturas de concreto armado em todo o mundo (Elgalud et al., 2017). Embora o PLC seja promovido por suas menores emissões de CO<sub>2</sub>, esses benefícios tornam-se incertos se comprometerem a durabilidade da armadura. Isso é especialmente relevante considerando que a produção de aço emite aproximadamente o dobro de CO<sub>2</sub> por tonelada em comparação com o clínquer (Elhacham et al., 2020). Portanto, qualquer redução nas emissões de clínquer pode ser compensada por reparos prematuros ou trabalhos de manutenção induzidos pela corrosão.

Além disso, a produção de PLC geralmente requer moagem mais fina para atingir desempenho comparável, o que aumenta a demanda de energia durante a fabricação. Adicionalmente, os sistemas PLC frequentemente requerem mais aditivos químicos para manter a mesma trabalhabilidade e o desenvolvimento de resistência, especialmente quando o teor de LS é alto. Esses fatores contribuem para custos ambientais ocultos que são frequentemente excluídos dos cálculos básicos de emissões de CO<sub>2</sub>.

Do ponto de vista da ciência dos materiais, o comportamento de envelhecimento dos sistemas PLC difere marcadamente dos sistemas à base de CPO e, ainda mais, daqueles que incorporam materiais cimentícios suplementares (MCSs). Quando submetidos a equivalentes relações água/cimento (*a/c*), os concretos PLC tipicamente exibem um desenvolvimento mais lento das propriedades mecânicas e de durabilidade ao longo do tempo. Essa tendência é particularmente evidente em sistemas com baixa relação *a/c*, onde o desenvolvimento das propriedades ocorre em um ritmo mais lento. Por outro lado, em misturas com alta relação *a/c*, as melhorias de desempenho tendem a atingir um platô ou mesmo estagnar precocemente, resultando em uma melhoria limitada a longo prazo. Essa disparidade na evolução das propriedades-chave complica a avaliação da durabilidade e sustentabilidade a longo prazo do PLC, especialmente em aplicações reais onde a exposição ambiental e a corrosão da armadura são fatores críticos.

## 2. AVALIAÇÃO HISTÓRICA DE CIMENTOS COM SUBSTITUIÇÃO DE LS

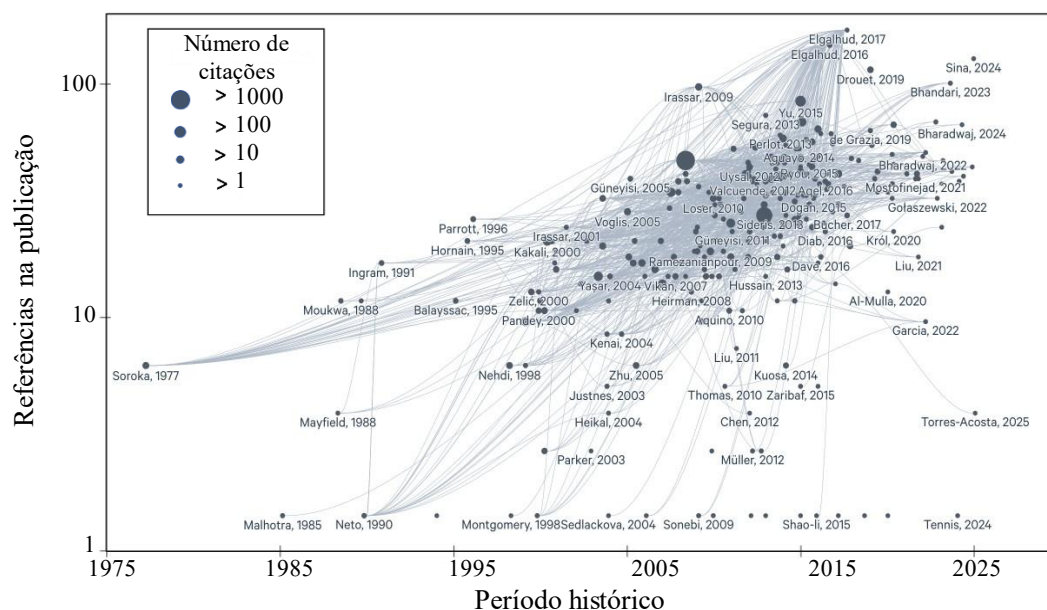
A interação entre o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) e os produtos de hidratação do cimento tem sido objeto de pesquisa por quase nove décadas. Uma das primeiras hipóteses mecanísticas foi proposta por Bessey em 1938, referente à formação de carboaluminatos de cálcio na presença de CaCO<sub>3</sub>; essa hipótese foi documentada por Soroka e Setter em 1977 (Soroka e Setter, 1977). Os autores

observaram que a formação de carboaluminatos de cálcio por meio da reação de  $\text{CaCO}_3$  com fases aluminatos, como  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$ , vinha sendo cada vez mais corroborada por dados experimentais nas décadas anteriores. Desde esse período crucial, a área experimentou avanços significativos, particularmente na caracterização das propriedades químicas e físicas dos carboaluminatos de cálcio, considerando vários níveis de substituição de LS e diferentes relações água/cimento.

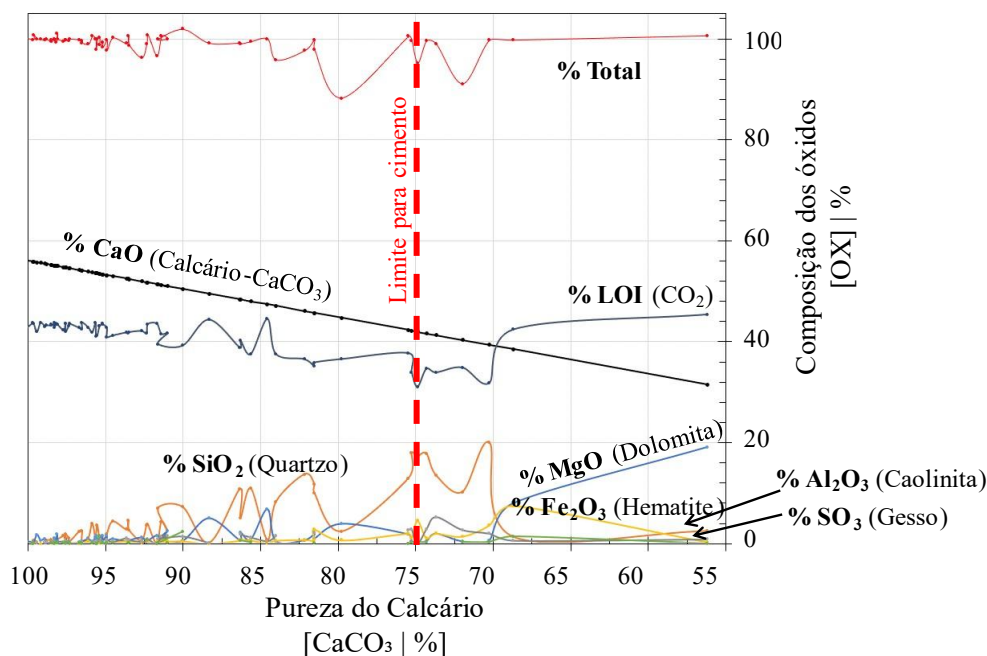
O escopo desses estudos anteriores tem se concentrado tradicionalmente na reologia do estado fresco, na cinética de hidratação e no desempenho mecânico — principalmente na resistência à compressão aos 28 dias (Soroka, I., e N. Setter, 1977; Neto, Claudio S., e Vicente C. Campiteli, 1990; Adams, Lawrence D., e Ronald M. Race, 1990; Nehdi et al., 1996). No entanto, a exploração de métricas de durabilidade a longo prazo tem sido historicamente limitada. Aspectos críticos como penetração de cloretos, resistência à carbonatação, desempenho em ciclos de congelamento e descongelamento e reações expansivas internas só começaram a receber maior atenção científica e aplicada nos últimos anos. Essa mudança de foco tornou-se especialmente relevante nos últimos cinco anos, à medida que os marcos regulatórios e as agendas de sustentabilidade em vários países aceleraram a adoção do PLC como sistema cimentício base em concreto estrutural. Apesar de terem se passado 87 anos desde as primeiras propostas mecanísticas e mais de 49 anos de pesquisa sistemática desde Soroka e Setter em 1977, a durabilidade a longo prazo dos PLCs ainda não está suficientemente estabelecida e ainda não existe um amplo consenso internacional sobre seu desempenho em idades avançadas.

Com base nessa lacuna persistente de conhecimento sobre o desempenho a longo prazo, a presente revisão busca consolidar e interpretar de forma estruturada as evidências existentes sobre sistemas cimentícios contendo LS. Para lidar com a fragmentação persistente dos resultados ao longo de décadas, misturas e protocolos de ensaio, foi compilada uma base de dados bibliométrica abrangente (Figura 1), englobando mais de 200 publicações revisadas por pares e relatórios institucionais que examinam diretamente a incorporação de LS em materiais cimentícios ou aplicações em concreto. Essa coleção inclui estudos sobre pastas, argamassas e concretos; abrange uma ampla gama de níveis de substituição, finuras e composições químicas do clínquer; e incorpora métricas de desempenho mecânico e durabilidade. Ao analisar sistematicamente os dados históricos contidos nesse conjunto de literatura, o objetivo é identificar áreas de concordância, esclarecer pontos de divergência e, em última instância, estabelecer uma interpretação coerente e objetiva do desempenho de cimentos com LS em todo o amplo espectro de aplicações estruturais modernas.

A primeira etapa do esforço geral de análise bibliométrica envolveu o estabelecimento de uma base química unificada para todas as publicações coletadas, começando com uma avaliação sistemática da composição de óxidos dos pós de LS obtida a partir de dados de XRF. Essa variável foi priorizada como ponto de partida para a análise por representar a propriedade do material relatada com maior consistência na literatura e por fornecer uma estrutura de referência fundamental para a interpretação do amplo espectro de resultados de desempenho. O mapeamento químico resultante, apresentado na Figura 2, revela uma variabilidade substancial na pureza do  $\text{CaCO}_3$ , nos perfis de impurezas e nas distribuições gerais de óxidos entre as LS estudadas — fatores que, embora frequentemente subestimados, podem influenciar os mecanismos de hidratação, o desenvolvimento microestrutural e o comportamento de durabilidade.



**Figura 1.** Representação em rede baseada nos nós da base de dados bibliométricos compilada para estudos sobre LS em sistemas cimentícios.



**Figura 2.** Composição química do banco de dados compilado para estudos sobre LS em sistemas cimentícios.

Dada a dimensão e a diversidade das publicações incluídas no conjunto bibliométrico, um exame completo de cada estudo está além do escopo de uma única revisão. Além disso, a crescente demanda global por sistemas de concreto que atendam simultaneamente aos imperativos de durabilidade e sustentabilidade ressalta a necessidade de uma síntese focada e analiticamente coerente. Consequentemente, esta revisão adota uma abordagem seletiva, porém metodologicamente rigorosa, concentrando-se em um conjunto representativo de estudos que investigam diretamente as variáveis de durabilidade mais críticas em sistemas cimentícios contendo agregados leves. Os critérios de seleção priorizam pesquisas com caracterizações de materiais claramente relatadas, parâmetros de mistura controlados e avaliações explícitas de indicadores de desempenho em escalas de tempo relevantes. Essa pesquisa representativa constitui



a base analítica para as discussões subsequentes, permitindo uma síntese estruturada do estado atual do conhecimento sobre as respostas mecânicas e de durabilidade de materiais à base de agregados leves.

Partindo dessa base, a revisão analisa criticamente três domínios inter-relacionados essenciais para avaliar o desempenho de durabilidade dos PLC: evolução da porosidade, mecanismos de transporte de cloretos e profundidade de carbonatação, incluindo abordagens de migração em regime não estacionário e difusão de massa. Esses tópicos emergiram como fundamentais para a compreensão do comportamento a longo prazo de concretos contendo LS sob exposições ambientais agressivas. No entanto, a literatura existente apresenta heterogeneidade substancial na composição química, como mostrado na Figura 2, bem como em propriedades físicas, tipos de amostra (pasta, argamassa ou concreto), regimes de cura, relações água/cimento e níveis de substituição de LS. Tal variabilidade complica a comparação direta dos resultados e apresenta desafios significativos para o desenvolvimento de conclusões amplamente aplicáveis.

Neste contexto, as seções seguintes sintetizam o estado da arte em relação à influência da substituição de LS no desenvolvimento da resistência à compressão, características de porosidade, resistência à penetração de cloretos e comportamento de carbonatação. Além de consolidar os resultados experimentais disponíveis, a revisão busca delinear inconsistências persistentes e identificar lacunas críticas na pesquisa sobre durabilidade. Em conjunto, essas análises destacam a necessidade de uma estrutura abrangente, baseada em dados, para apoiar o desenvolvimento de modelos preditivos e orientar o futuro projeto experimental para sistemas de aglomerantes à base de LS.

### 3. PUREZA DA LS NOS ESTUDOS

Como primeiro passo para estabelecer uma base química consistente, a pureza da LS nos estudos coletados foi quantificada usando as composições de óxido relatadas por fluorescência de raios X (XRF) nos seguintes trabalhos: Ahmad et al. (2020), Ali et al. (2013), Barker e Hobbs (1999), Burgos Montes (2012), Burgos Montes (2013), Cam et al. (2010), Celik et al. (2015), Chen et al. (2012), Da Silva e De Brito (2016), De Weerd et al. (2011), Dhir et al. (2007), El-Didamony et al. (1994), Elkhadiri et al. (2002), Ferreiro et al. (2018), Ghrici et al. (2007), Golaszeski (2022), Guemmadi et al. (2008), Hartshorn et al. (1999), Hartshorn et al. (2002), Heikal et al. (2000), Jin et al. (2024), Kakalis et al. (2000), Li et al. (2019), Li et al. (2020), Liu e Yan (2010), Liu et al. (2021), Lothenbach et al. (2008), Machner et al. (2017), Malhotra e Garette (1985), Marzouki et al. (2013), Meddah et al. (2014), Moir et al. (1999), Montgomery et al. (1998), Moukwa (1989), Pandey e Sharma (2000), Rahhal et al. (2012), Soroka e Setter (1976), Torresan et al. (2000), Tsivilis (1999), Tsivilis (2000), Tsivilis (2003), Yilmaz e Olgun (2008) e Zhang et al. (2000). Para fins de comparação, todos os valores de CaO % foram convertidos em conteúdo equivalente de  $\text{CaCO}_3$  % usando o balanço de massa molar, assumindo que todo o CaO % provém do carbonato de cálcio. Essa equalização permite a interpretação dos dados entre os estudos, independentemente do formato de apresentação dos resultados, e possibilita comparações diretas entre os pós de LS utilizados em cinco décadas de trabalho experimental.

Quando os valores são plotados no conjunto bibliométrico (Figura 1), a distribuição de  $\text{CaCO}_3$  resultante revela três categorias distintas de pureza na Figura 2. A primeira corresponde a LSs de alta qualidade ( $>92\% \text{CaCO}_3$ ), nas quais os óxidos de impureza não aparecem em proporções significativas; essas amostras estão alinhadas com materiais geralmente classificados na indústria como cargas de alta pureza adequadas para formulações de cimento orientadas ao desempenho. Uma segunda categoria inclui LSs cujos perfis de XRF mostram óxidos secundários reconhecíveis. Dentro desse grupo, dois tipos principais de impurezas são observados: a) LSs com teor significativo de sílica, onde níveis elevados de  $\text{SiO}_2$  sugerem a presença de quartzo, e b) LSs com teor de MgO, frequentemente associados a fases dolomíticas. Embora a dolomita seja o portador

mais plausível de MgO nesta associação, a presença de outros minerais contendo magnésio (por exemplo, magnesita) ou fases acessórias minoritárias, como a magnetita, não pode ser descartada sem uma caracterização mineralógica mais aprofundada (XRD, TGA ou SEM-EDS). Essas LSs quimicamente híbridas, juntamente com aqueles de alta pureza, representam uma proporção considerável da literatura.

Uma terceira classe, menos reconhecida, inclui LSs de baixa pureza que se aproximam do limite inferior definido na norma ASTM C150/C595, que permite 25% de minerais em compostos de carbonato de cálcio (ou seja, uma pureza mínima de ~75% de  $\text{CaCO}_3$ ).

Em conjunto, essas observações demonstram que a LS utilizada em sistemas cimentícios não pode ser considerada quimicamente uniforme. A variabilidade no teor de  $\text{CaCO}_3$ , nos perfis de impurezas e nas associações mineralógicas introduz uma fonte significativa de divergência na literatura. Portanto, estabelecer a pureza da LS por meio da quantificação de  $\text{CaCO}_3$  baseada em fluorescência de raios X (XRF) fornece não apenas um parâmetro de referência consistente para a síntese bibliométrica, mas também uma estrutura necessária para a interpretação adequada do comportamento de sistemas cimentícios que contêm LS.

#### 4. EFEITO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Esta seção apresenta uma revisão histórica do comportamento à compressão de cimentos contendo LS em função do tempo de cura e da relação água/cimento (a/c). Os estudos analisados mostram que os PLC tipicamente exibem um desenvolvimento de resistência acelerado em idades iniciais, comparados com o CPO e cimentos com adições pozolânicas. No entanto, essa vantagem inicial tende a diminuir com o envelhecimento do material. Em baixas relações a/c, os PLC podem continuar a desenvolver resistência, embora a uma taxa mais lenta do que o CPO; enquanto em relações a/c mais altas, o desenvolvimento de resistência tende a se estabilizar, exibindo um comportamento parcialmente similar ao dos sistemas tradicionais de CPO. Uma observação crítica é que, em idades de cura avançadas, o CPO frequentemente supera os PLC em resistência à compressão, sugerindo uma mudança na trajetória de desempenho após os estágios iniciais. É importante notar que, embora fatores como tamanho do agregado, finura Blaine, geometria da amostra ou ar incorporado possam influenciar a resistência, a revisão se concentra no teor de cimento, teor de água e tempo de cura como as principais variáveis.

Os estudos de Malhotra e Carrette (1985), Nedhi e Mindess (1986), Montgomery et al. (1998), Moir e Kelham (1999), Tsivilis et al. (1999), Heikal et al. (2000), Irassar et al. (2006), Dhir et al. (2007), Pourkhorshidi et al. (2008), Thomas et al. (2010), De Weerd (2011), Sezer (2012), Chen et al. (2012), Neithalath e Cam (2012), Githachauri (2012), Diab et al. (2015) e Ahmad (2022) incluem diferentes tipos de misturas: pastas, argamassas e concretos. Embora cada um desses materiais apresente características distintas de mecânica da fratura e microestrutura (devido à presença ou ausência de agregados e diferenças na zona de transição interfacial), tais distinções não são especificadas de forma consistente em todos os estudos consultados em relação à idade do material. Essa diferenciação é fundamental, especialmente na análise de propriedades mecânicas como a resistência à compressão, uma vez que a escala e o comportamento do compósito influenciam a distribuição de tensões e os mecanismos de falha.

O primeiro estudo sobre amostras de concreto com adição de LS na mistura e substituição parcial de areia foi conduzido por Malhotra e Carrette (1985). Eles relataram as fases do clínquer de OPC ( $\text{C}_3\text{S} = 53,8\%$ ,  $\text{C}_2\text{S} = 19,6\%$ ,  $\text{C}_3\text{A} = 6,5\%$ ,  $\text{C}_4\text{AF} = 8,6\%$ ), as relações a/c (0,40, 0,53 e 0,70) e a substituição de areia por LS (0 a 20%), bem como o superplastificante (0 a 1,4% em massa de cimento). As propriedades no estado fresco incluíram abatimento entre 60 e 90 mm, densidades de 2.295 a 2.340  $\text{kg/m}^3$  e teores de ar entre 4,6 e 6,2%. Os resultados para uma relação a/c de 0,40 indicam que a mistura de controle apresentou desempenho superior à mistura com 20% de LS entre 28 e 90 dias, atingindo aproximadamente 43 MPa. Para relações a/c de 0,53 e 0,70, a substituição de 20% não superou a resistência do CPO de referência. Nedhi e Mindess (1986) estudaram

argamassas formuladas com CPO, LS e sílica ativa com uma relação a/c de 0,5 durante 90 dias. A composição do clínquer era  $C_3S = 51\%$ ,  $C_2S = 23\%$ ,  $C_3A = 7\%$  e  $C_4AF = 10\%$ . A sílica ativa foi incorporada a 10%, enquanto a LS foi adicionada a 6,3% ou 18,8%. Apenas a mistura de referência foi comparada às misturas de cimento + LS. Os resultados mostraram que a mistura com maior resistência foi OPC + 10% SF + 6,3% LS, e a mistura com menor resistência foi a de CPO + 18,8% LS.

Montgomery et al. (1998) estudaram argamassas e concretos de alto desempenho com dois tipos diferentes de cimento e três tipos de LS. O cimento PC1 tinha  $C_3S = 63\%$ ,  $C_2S = 12\%$ ,  $C_3A = 2,5\%$  e  $C_4AF = 17\%$ , enquanto o PC2 tinha  $C_3S = 64\%$ ,  $C_2S = 11\%$ ,  $C_3A = 4,5\%$  e  $C_4AF = 14\%$ . Nas argamassas, o teor de LS variou de 0 a 20%. Aos 28 dias, a maior resistência foi obtida com a mistura M25 (0% LS, PC2) e a menor com a M6 (20% LS, PC1). Para o concreto de alto desempenho, a/mc (água/material cimentício) foi de 0,30 a 0,35, o teor de cimento ficou entre 439 e 488 kg/m<sup>3</sup> e o teor de LS foi de 10%, exceto no controle. A maior resistência aos 28 dias foi de 90,1 MPa (CC3A, a/c = 0,30 e 10% de LS) e a menor foi de 73,4 MPa (CC2, a/c = 0,35 e 10% de LS).

Moir e Kelham (1999) avaliaram diferentes cimentos pozolânicos e cimentos Portland com 20% de LS. O CPO tinha  $C_3S = 55\%$ ,  $C_2S = 23\%$ ,  $C_3A = 6\%$  e  $C_4AF = 11\%$ , enquanto o cimento mineralizado tinha  $C_3S = 68\%$ ,  $C_2S = 7\%$ ,  $C_3A = 7\%$  e  $C_4AF = 10\%$ . Entre 3 e 90 dias, as misturas de controle apresentaram desempenho consistentemente superior a todas as misturas com LS.

Tsivilis et al. (1999) examinaram amostras de pasta de cimento utilizando dois clínquers, cada um combinado com 5% de gesso para produzir quatro cimentos com valores de finura Blaine variando de 2.800 a 3.900 cm<sup>2</sup>/g. O clínquer C1 era composto por  $C_3S = 65,15\%$ ,  $C_2S = 13,32\%$ ,  $C_3A = 7,54\%$  e  $C_4AF = 10,92\%$ ; enquanto o clínquer C2 era composto por  $C_3S = 57,99\%$ ,  $C_2S = 18,60\%$ ,  $C_3A = 11,74\%$  e  $C_4AF = 6,26\%$ . A substituição de LS variou de 0 a 35%. Para os cimentos C1L1, a maior resistência foi observada com 5% de substituição de LS e uma finura Blaine de 3.490 cm<sup>2</sup>/g, enquanto a menor resistência foi observada com 35% de substituição e uma finura Blaine de 5.150 cm<sup>2</sup>/g. Para o cimento C1L2, a maior resistência foi observada com 10% de LS e 3.900 cm<sup>2</sup>/g, e a menor com 35% de LS e 5.080 cm<sup>2</sup>/g.

Heikal et al. (2000) estudaram pastas com finura constante de 3.100 cm<sup>2</sup>/g compostas de CPO, Homra e LS durante 100 dias. O teor de CPO foi mantido em 80%, enquanto o de Homra e LS variou entre 0 e 20%. Em todas as idades, o cimento sem LS apresentou a maior resistência, que diminuiu com o aumento da substituição.

Irassar et al. (2006) avaliaram a resistência à compressão utilizando cilindros de concreto (100×200 mm) de 3 a 360 dias. Todas as misturas utilizaram uma relação água/materiais cimentícios (a/mc) de 0,50, um teor de materiais cimentícios de  $350 \pm 10$  kg/m<sup>3</sup> e uma relação areia/agregado total de 0,45. O abatimento foi de  $70 \pm 20$  mm e os níveis de substituição por LS foram de 0%, 12% e 18%. Aos 28 dias, as resistências à compressão foram semelhantes (36,0, 34,5 e 35,2 MPa). Aos 360 dias, ambos os concretos com LS apresentaram reduções de resistência de até 8%.

Dhir et al. (2007) estudaram misturas de cimento que incluíam 100% de cimento Portland (PC) de referência (0% de LS), 85% de PC e 15% de LS (faixa Tipo II/A-L), 75% de PC e 25% de LS, 65% de PC e 35% de LS (faixa Tipo II/B-L) e 55% de PC e 45% de LS. Os agregados utilizados foram granito britado (20–10 mm e 10–5 mm) e areia natural. Os concretos de PC foram dosados para atingir teores de cimento entre 235 e 410 kg/m<sup>3</sup>, com incrementos de 40–50 kg/m<sup>3</sup>, teor de água fixo em 185 L/m<sup>3</sup> (a/c = 0,45–0,79) e abatimento de 75 mm. O teor de agregado graúdo foi mantido constante em 800 e 400 kg/m<sup>3</sup>, enquanto o teor de agregado miúdo foi ajustado para manter o desempenho. Foi utilizado um aditivo incorporador de ar para atingir  $5,0 \pm 0,5\%$  de ar. As relações água/cimento avaliadas foram 0,46, 0,54, 0,62, 0,67 e 0,79. A mistura de referência com 0% de LS apresentou a maior resistência em todas as idades e para todas as relações a/c.

Pourkhorshidi et al. (2008) estudaram o traço e as proporções de concreto com OPC e do concreto com PLC utilizando duas categorias de cimento: cimento Portland ASTM Tipo II e PLC Tipo II/A-



LL. A resistência à compressão foi medida utilizando cubos de concreto de 150 mm, e os corpos de prova foram testados após 7, 28 e 90 dias de cura. Os corpos de prova de PLC apresentavam 14% de LS. O abatimento variou de 55 a 75 mm, as densidades de 2.295 a 2.330 kg/m<sup>3</sup> e o teor de ar de 2,6 a 2,8%. A relação água/cimento variou de 0,35 a 0,55. O teor de cimento foi de 350 kg/m<sup>3</sup>, com agregados finos a 960 kg/m<sup>3</sup> e agregados graúdos a 850 kg/m<sup>3</sup>. A mistura com PLC e uma relação água/cimento de 0,35 apresentou maior resistência à compressão do que a mistura de referência com 0,45; as demais misturas (PLC com relações a/c de 0,45 e 0,55) apresentaram menor resistência em todas as idades.

Thomas et al. (2010) relataram resultados de campo de Quebec, Alberta e Nova Escócia. Como todos os cimentos usados em Nova Escócia incorporavam SCM, nenhuma análise foi realizada para esse local. Apenas os resultados das misturas de referência — incluindo aquelas contendo uma pequena quantidade de LS e o cimento GUL — são discutidos (cimentos com SCM não estão incluídos na análise). O teor total de material cimentício para todas as misturas foi de 355 kg/m<sup>3</sup>, e a relação água/cimento variou de 0,44 a 0,45. Isso corresponde a aproximadamente 91–92% de clínquer para a mistura de controle produzida com PC e sem SCM (o PC contém cerca de 3–4% de LS e 5% de gesso). O cimento Tipo GU usado em Quebec e Alberta contém 3–4% de LS e 91% de clínquer, enquanto o cimento Tipo GUL usado nas mesmas regiões contém 12% de LS e 83% de clínquer. Para o Quebec, o cimento GU apresentou uma finura Blaine de 373 m<sup>2</sup>/kg e o cimento GUL, de 453 m<sup>2</sup>/kg. Para Alberta, o cimento GU apresentou uma finura Blaine de 399 m<sup>2</sup>/kg e o cimento GUL, de 510 m<sup>2</sup>/kg. Os resultados obtidos em campo no Quebec mostraram que o cimento PLC apresentou maior resistência do que o cimento PC aos 3, 7 e 28 dias, enquanto a mistura à base de PC apresentou a maior resistência e superou a mistura PLC aos 56 dias. Em Alberta, os dados de campo mostraram que o GUL-0 apresentou melhor desempenho em todas as idades em comparação com o GU-0.

De Weerd et al. (2011) investigaram cimentos compostos nos quais o pó de LS foi moído separadamente. O clínquer moído juntamente com 3,7% de gesso em massa é denominado OPC. A matriz experimental consistiu em uma mistura de referência: 100% OPC (mistura 1) e, posteriormente, o OPC foi gradualmente substituído por pó de LS em incrementos de 5% até 35% (misturas 2 a 8). Para cada idade de ensaio e combinação de materiais, foram preparados três prismas de argamassa (40×40×160 mm). Pastas de cimento correspondentes também foram produzidas com uma relação água/material cimentício de 0,5 para todas as misturas, utilizando um misturador a vácuo Renfert. A hidratação das amostras foi interrompida aos 1, 28, 90 e 140 dias. Os resultados mostraram que a resistência à compressão dos cimentos com LS diminuiu com o aumento da substituição do pó de LS em todas as idades, de 1 a 140 dias. O maior ganho em resistência à compressão ocorreu durante os primeiros 28 dias de cura. A resistência à compressão não apresentou alterações significativas após 28 e 90 dias de cura, respectivamente.

Sezer (2012) investigou o efeito da microsílica e do LS na resistência à compressão de argamassas. Misturas de argamassa contendo LS em 5%, 20% e 35% em massa de cimento foram preparadas utilizando cimento Portland comum tipo CEM I 42,5. A área superficial Blaine da LS era de 420 m<sup>2</sup>/kg. As resistências à compressão foram medidas aos 2, 7, 28, 90 e 180 dias. Para os ensaios, os corpos de prova de argamassa foram produzidos em cubos de 50×50×50 mm utilizando 450 g de cimento, 1.350 g de areia padrão e uma relação água/material cimentício de 0,5. Apenas os resultados comparando a mistura de referência com as misturas de cimento + LS foram analisados. Comparada à mistura de controle, a inclusão de LS reduziu a resistência à compressão em todas as idades (2–180 dias), e as reduções aumentaram com o aumento do teor de LS.

Chen et al. (2012) investigaram o efeito da adição de um filler de LS finamente moído (LF) como substituto da pasta de cimento (não substituição de cimento) em concreto de alta fluidez (com abatimento entre 205 mm e 275 mm), mantendo uma relação a/c constante. O estudo utilizou OPC e explorou uma ampla gama de dosagens com relações a/c entre 0,35 e 0,60, ajustadas em pequenos incrementos. O filler de LS foi incorporado em diferentes volumes, dependendo da relação a/c. Para misturas com baixas relações a/c, o volume de LF foi limitado para evitar misturas

excessivamente secas, enquanto que, em relações a/c mais elevadas, níveis adicionais de LF foram avaliados. Em todas as misturas, o volume total de pasta (pasta de cimento + LF) permaneceu constante em 34%, o que significa que a adição de LF reduziu diretamente o volume de pasta de cimento, mas não alterou a relação a/c. O teor de agregados também foi mantido constante e um superplastificante foi adicionado para garantir alta fluidez em cada mistura. As resistências à compressão foram avaliadas em idades iniciais e posteriores. Os resultados mostraram consistentemente que a adição de filler LS aumentou a resistência tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias, apesar da relação água/cimento constante. Em geral, volumes maiores de LF produziram resistências maiores sob as mesmas condições de água/cimento. Em alguns casos, a adição de um volume moderado de LF resultou em aumentos de resistência em torno de 7–11%, enquanto aumentos maiores de LF produziram aumentos de aproximadamente 14% a mais de 22%, dependendo das proporções cimento/água.

Neithalath e Cam (2012) examinaram como a substituição de uma porção do cimento por pó de LS grosso afeta as propriedades mecânicas, mantendo uma relação água/pó constante. Suas misturas utilizaram um teor de cimento base de aproximadamente 400 kg/m<sup>3</sup>, e o cimento foi substituído por pó de LS em níveis de 10% e 20%, juntamente com uma mistura de referência sem substituição. Todas as misturas receberam uma relação água/pó fixa de 0,40, garantindo que as mudanças no desempenho pudessem ser atribuídas exclusivamente às substituições por LS e não à disponibilidade de água. Para avaliar o comportamento mecânico, o concreto foi moldado em corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura. O estudo monitorou o desenvolvimento da resistência à compressão ao longo de um período de 90 dias, tanto para o concreto de referência quanto para os concretos modificados com LS. Os resultados mostraram uma tendência clara: como o pó de LS grosso atua principalmente como um material de enchimento inerte, sua incorporação reduziu a resistência à compressão em comparação com o concreto sem LS, na mesma relação água/pó. Essa redução foi observada consistentemente em todas as idades testadas. A mistura de referência apresentou a maior resistência em cada idade de hidratação, enquanto as misturas com 10% e 20% de LS apresentaram resistências progressivamente menores, sendo que a maior substituição resultou na maior redução.

Githachuri e Alexander (2013) investigaram o desempenho de um cimento Portland-LS (PLC) produzido comercialmente em comparação com um cimento Portland convencional (OPC), com foco na resistência à compressão para dois teores de aglomerante e duas relações água/agente cimentício (a/b). Dez misturas de concreto foram preparadas com a/b = 0,40 e a/b = 0,55. O aglomerante de referência foi um OPC CEM I 42,5N proveniente da região da Cidade do Cabo. O aglomerante PLC foi um CEM II AL 32,5R contendo 20% de filler LS moído juntamente com o clínquer. Todas as misturas utilizaram os mesmos agregados: tilita de 19 mm como agregado graúdo e uma combinação de areia de rio com 10% de areia de talude como agregado miúdo. Para controlar a trabalhabilidade e isolar o efeito do tipo de cimento, as misturas foram preparadas com um teor de água fixo de 165 L/m<sup>3</sup>, resultando em teores totais de aglomerante de 412 kg/m<sup>3</sup> para a/b = 0,40 e 300 kg/m<sup>3</sup> para a/b = 0,55. O teor de agregado graúdo também foi mantido constante em 1.070 kg/m<sup>3</sup>, e um superplastificante policarboxilato foi utilizado para manter o abatimento na faixa de 65–95 mm. Em ambas as relações água/cimento, as misturas de referência com cimento Portland comum (OPC) apresentaram maiores resistências à compressão aos 28 e 91 dias em comparação com as misturas com cimento Portland policarboxilato (PLC).

Diab et al. (2016) avaliaram o desempenho mecânico de misturas de concreto incorporando pó de LS como substituto parcial do cimento. Vinte e uma misturas foram produzidas utilizando cimento Portland tipo I e pó de LS, com níveis de substituição variando de 0% a 25%. Todas as misturas apresentavam um teor de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e uma relação água/cimento fixa de 0,45. A resistência à compressão foi medida aos 3, 7, 28 e 365 dias utilizando cubos de concreto de 150 mm. Os resultados mostraram que o aumento do teor de pó de LS geralmente levou a uma diminuição da resistência à compressão. No entanto, essa redução foi mínima até aproximadamente

10% de substituição, indicando que baixos níveis de adição de LS tiveram apenas um efeito menor no desempenho mecânico. Acima de 10%, a perda de resistência tornou-se mais pronunciada, com as misturas contendo níveis mais elevados de pó de LS apresentando reduções mais acentuadas na resistência em todas as idades.

Ahmad et al. (2022) investigaram o efeito da finura do pó de LS e do nível de substituição na resistência à compressão do concreto. O estudo utilizou cimento Portland tipo I com finura Blaine de 3.523 cm<sup>2</sup>/g, juntamente com pós de LS incorporados em 10%, 15% e 20% em massa do cimento. Três níveis de finura de LS em relação ao cimento foram avaliados: fino (3.845 cm<sup>2</sup>/g), intermediário (3.215 cm<sup>2</sup>/g) e grosso (2.648 cm<sup>2</sup>/g). Todas as misturas mantiveram proporções consistentes, incluindo um teor de aglomerante de aproximadamente 490 kg/m<sup>3</sup>, 645 kg/m<sup>3</sup> de agregado fino, 1.151 kg/m<sup>3</sup> de agregado graúdo, 164 kg/m<sup>3</sup> de água e 0,6% de superplastificante policarboxilato, com uma relação água/cimento fixa de 0,33. A resistência à compressão foi medida aos 1, 3, 7 e 28 dias. Os resultados mostraram que a resistência à compressão diminuiu com o aumento do nível de substituição de LS em todas as idades dentro de cada categoria de finura.

Méndez-Páramo (2024) avaliou o efeito do teor de filler calcário (LS) na resistência à compressão de misturas de argamassa feitas com cimento Portland composto (PLC) contendo entre 3% e 35% de LS. Cubos de argamassa medindo 5 × 5 × 5 cm foram fabricados utilizando cimentos disponíveis comercialmente no México. O teor de LS foi determinado indiretamente utilizando o procedimento padronizado de perda por ignição (LOI%) (ONNCCE, 2017), empregando uma relação previamente estabelecida entre o teor de LS e o LOI%:  $LS\% = 2 \cdot LOI\%$  (Méndez-Páramo, 2024). Os cubos foram moldados e curados em água saturada com cal por 28 ou 90 dias. Dois conjuntos de cubos curados por 28 dias foram posteriormente expostos, por até um ano, a condições urbanas naturais e desprotegidas na cidade de Querétaro, México. Os resultados mostraram que a resistência à compressão das argamassas aos 28 e 90 dias foi inversamente proporcional ao teor de LS no PLC. Cubos expostos ao ambiente urbano sem proteção desenvolveram fissuras superficiais e apresentaram resistências à compressão ainda menores — reduções superiores a 25% em comparação com os valores aos 28 e 90 dias. Esse comportamento foi inesperado e corrobora a hipótese de que reações químicas com CO<sub>2</sub> ou SO<sub>3</sub> podem ter gerado microfissuras superficiais, afetando, assim, o desempenho mecânico do material a longo prazo.

## 5. EFEITO DA POROSIDADE DO MATERIAL

A porosidade é um parâmetro crítico para avaliar o desenvolvimento microestrutural e a durabilidade a longo prazo de sistemas PLC. No entanto, sua avaliação em diversos estudos (Courard et al., 2005; Matschei et al., 2007; Palm et al., 2016; Bharadwaj et al., 2022; Steiner et al., 2022) foi realizada utilizando uma ampla variedade de técnicas experimentais, tipos de amostra e abordagens analíticas, o que leva à heterogeneidade na interpretação dos dados. Esta seção sintetiza dados históricos de fontes selecionadas e classifica as pesquisas de acordo com o tipo de porosidade, o método de ensaio e a influência de parâmetros composicionais, incluindo a substituição de LS, o teor de alumina e a relação a/c.

Courard et al. (2005) analisaram amostras de argamassa com diferentes níveis de substituição de LS (0–27%) utilizando ensaios de absorção de água, que refletem indiretamente a porosidade total, mas são sensíveis à conectividade dos poros e ao refinamento capilar. Duas séries de amostras, designadas P e L, foram preparadas com uma relação água/aglomerante constante de 0,45. Enquanto as argamassas do tipo P continham apenas LS como substituto, as argamassas do tipo L também incluíam escória como aglomerante. Embora o tempo de cura não tenha sido relatado, presume-se que seja de 28 dias. Os resultados indicam que a porosidade aumenta com o aumento da substituição de LS, embora a taxa de aumento se estabilize acima de 15%.

Matschei et al. (2007) apresentaram tendências de porosidade em pastas de cimento como parte de um modelo, com foco na evolução termodinâmica das fases hidratadas em sistemas com LS. A porosidade total calculada diminuiu com o aumento do teor de LS até aproximadamente 2% em

peso, mas, a partir desse ponto, aumentou linearmente com adições maiores de LS. Essa tendência não especifica o teor da fase clínquer, que pode afetar a evolução dos produtos de hidratação, o teor de gesso e a relação a/c.

Em seu estudo de 2016, Palm et al. avaliaram a porosidade de argamassas derivadas de misturas de concreto após a remoção de partículas grossas maiores que 2 mm — aproximadamente 51% do volume do material. A porosidade total foi estimada a partir do teor de água evaporável, utilizando uma relação extrapolada do modelo de Powers e Brownyard (Crundwell et al., 2019). O excesso de água — definido como 0,27 vezes o teor de clínquer — foi plotado em função da porosidade total medida, resultando em uma relação linear. De modo geral, argamassas com maior teor de LS apresentaram maior porosidade. Embora o estudo tenha se concentrado exclusivamente em argamassas, ele relaciona o desenvolvimento da porosidade ao teor de água efetivo e ao progresso da hidratação, oferecendo uma avaliação indireta, baseada em modelo, influenciada pela cinética de hidratação presumida e pela evolução da porosidade ao longo do tempo.

Bharadwaj et al. (2022) realizaram uma análise paramétrica de pastas de cimento com diferentes níveis de LS e alumina. A porosidade foi estimada por meio de modelagem termodinâmica e inferida a partir do volume de produtos de hidratação. A relação relatada entre porosidade e teor de LS foi semelhante à descrita por Matschei et al. (2007). Os autores plotaram a porosidade em sistemas com 0, 2,5, 5 e 7,5% de alumina em função de diferentes níveis de LS. Os resultados mostraram que o ponto de porosidade mínima se desloca para teores mais altos de LS à medida que o teor de alumina aumenta, e que a porosidade mínima diminui. A menor porosidade prevista foi de 28%, ocorrendo com 4% de LS e 7,5% de alumina, correspondendo a um equilíbrio ótimo que favoreceu a formação de fases de carboaluminato e etringita que preenchem o espaço (ocupando ~28% e 8,5% do volume total, respectivamente). Quando o teor de alumina excede 7,5%, a porosidade aumenta devido à depleção de sulfato, o que limita a formação de etringita e promove a formação de monossulfato. Na faixa de  $7,5\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 9\%$  e  $4\% < \text{LS} < 10\%$ , essa alteração reduz as fases que preenchem o espaço. Em níveis de alumina  $> 9\%$ , o hidróxido de cálcio é consumido e a etringita se forma em vez de monocarboatos. Nessas condições, a porosidade mínima prevista diminui ainda mais para 26%, ocorrendo com 10% de calcário e 30% de alumina. Acima do teor crítico de LS, a porosidade aumenta para todos os níveis de alumina devido aos efeitos de diluição. Assim, a porosidade aumenta quando os sulfatos se tornam limitantes ou quando os efeitos de diluição predominam. O estudo apresenta um mapa da porosidade prevista em um espaço composicional multidimensional, mostrando os efeitos do equilíbrio de fases na microestrutura. No entanto, a falta de validação experimental direta limita sua aplicabilidade para comparações com indicadores físicos de durabilidade.

Steiner et al. (2022) realizaram uma avaliação de porosidade multitécnica em amostras de concreto utilizando picnometria a gás (deslocamento de He) e porosimetria de intrusão de mercúrio (MIP). O picnômetro a gás permitiu a determinação do volume real e da densidade real ( $\rho_T$ ), que representam a relação massa/volume da fase sólida, excluindo os vazios intragranulares. O volume aparente e a densidade aparente ( $\rho_B$ ) foram medidos utilizando um equipamento GeoPyc 1360. A porosidade efetiva foi calculada em função de  $\rho_T$  e  $\rho_B$  e é considerada comparável à porosidade acessível à água. A distribuição do tamanho dos poros foi obtida utilizando a equação de Washburn (Crundwell et al., 2019) sob um modelo de poro cilíndrico. Essa abordagem capturou a porosidade total e efetiva com alta resolução em uma ampla faixa de diâmetros de poros. Os resultados indicam que, para uma dada relação água/agente cimentício, um maior teor de LS leva a uma maior porosidade no concreto, como já observado em estudos anteriores. No entanto, o uso de corpos de prova de concreto (cubos com diagonal de 3 cm) introduz variabilidade espacial devido aos agregados graúdos, o que pode mascarar tendências específicas da matriz cimentícia, a menos que subamostras sem agregados sejam analisadas. Discrepâncias surgem na literatura dependendo do tipo de porosidade avaliada — total, efetiva ou capilar — e dos métodos utilizados, que incluem absorção de água, picnometria de gás, porosimetria de intrusão de mercúrio e modelagem



termodinâmica. A análise comparativa é ainda mais complicada pelas variações nos tipos de amostra (pasta de cimento, argamassa, concreto), relações água/cimento, níveis de substituição por LS e a falta de padronização dos tempos de cura. Além disso, poucos estudos monitoram a evolução da porosidade ao longo do tempo, limitando nossa compreensão da dinâmica entre as idades iniciais e finais. Dada essa variabilidade, a comparação direta entre os conjuntos de dados não é viável sem procedimentos de normalização. Em geral, as discrepâncias na literatura surgem devido ao tipo de porosidade avaliada — total, efetiva ou capilar — e às abordagens metodológicas empregadas, que variam desde absorção de água, picnometria de gás e MIP até modelagem termodinâmica. A análise comparativa é ainda mais complicada pelas variações nos tipos de amostra (pasta, argamassa, concreto), relações água/cimento, níveis de substituição de LS e pela falta de padronização nos tempos de cura. Além disso, poucos estudos monitoram a evolução da porosidade ao longo do tempo, limitando nossa compreensão da dinâmica entre as idades iniciais e avançadas. Dada essa variabilidade, a comparação direta entre conjuntos de dados não é viável sem procedimentos de normalização.

Méndez-Páramo (2024) apresenta resultados experimentais para argamassas de cimento Portland nas quais foram utilizados fillers inertes de calcário para substituir entre 20% e 40% do clínquer. Os resultados incluem o desempenho mecânico (resistência à compressão), físico (resistividade elétrica, teor de vazios totais, porosidade capilar) e químico (carbonatação sob exposição natural) dessas argamassas em diferentes idades, até um ano. Os resultados experimentais mostram que a adição de entre 15% e 35% de filler inerte de calcário aumentou a resistividade elétrica saturada e diminuiu a velocidade de pulso ultrassônico. Essas técnicas determinam indiretamente a porosidade de materiais à base de cimento e ambas corroboram que um maior teor de filler de calcário no cimento aumenta a porosidade das misturas de argamassa avaliadas.

## 6. EFEITO NA ABSORÇÃO DE CLORETOS NO MATERIAL

A penetração de cloretos é um indicador chave da durabilidade em sistemas de concreto armado, pois está diretamente correlacionada com o risco de início de corrosão no aço embutido. A quantificação do transporte de cloretos através de concretos com PLC tem sido abordada na literatura utilizando métodos de difusão natural e migração acelerada. A diversidade nas condições experimentais, protocolos de ensaio, procedimentos de cura e variáveis de composição (por exemplo, substituição de LS e relação a/c) contribui para a heterogeneidade nos coeficientes de difusão relatados. Esta seção compila os dados mais relevantes da literatura, destacando metodologias de ensaio, configurações de amostra e variáveis que afetam a penetração de cloretos em sistemas PLC. Os estudos revisados mostram uma ampla variação nas configurações experimentais, incluindo:

- **Tipos de ensaio:** difusão aparente (ASTM C1556), migração acelerada (NT BUILD 492, métodos de diferença de potencial) e configurações eletroquímicas modificadas.
- **Geometria de amostra:** prismas, núcleos ou discos em tamanho real com espessura variando de 25 mm a 100 mm.
- **Métodos de cura:** regimes úmidos, de secagem ao ar e combinados, com durações inconsistentes entre os estudos.
- **Idade no momento do ensaio:** desde idades precoces (35 dias) até exposições prolongadas (1 ano), introduzindo variabilidade na maturidade do cimento e no desenvolvimento da estrutura porosa.
- **Substituição de calcário:** frequentemente variável, o que limita as correlações diretas com o comportamento do transporte de cloreto.

A falta de harmonização nos procedimentos experimentais, na apresentação de detalhes composicionais e nos dados dependentes do tempo dificulta o estabelecimento de tendências generalizadas em relação ao desempenho do PLC. Apesar da variedade de abordagens experimentais, tendências consistentes indicam que o aumento do teor de LS no cimento



geralmente leva a coeficientes de difusão de cloreto aparentes mais elevados, particularmente em altas relações água/cimento (Irassar et al., 2001). No entanto, a interpretação dos efeitos cimentícios é frequentemente afetada por variações na metodologia de ensaio, duração da exposição, procedimentos de pré-condicionamento e perfis de umidade interna. Diferenças entre métodos de difusão em estado estacionário e não estacionário, entre regimes de exposição acelerada e natural e na geometria da amostra complicam ainda mais as comparações diretas entre estudos. Para avançar na compreensão do transporte de cloreto em sistemas PLC, pesquisas futuras devem se concentrar na padronização de protocolos de ensaio e na inclusão de dados de exposição de longo prazo que reflitam melhor as condições de serviço.

Irassar et al. (2001) investigaram a penetração de cloretos em concretos com diferentes níveis de substituição de LS (0%, 10% e 20%) e três relações a/c (0,4, 0,5 e 0,6). Prismas de concreto com dimensões de 100 × 150 × 530 mm foram moldados e curados em seus moldes por 24 horas. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura úmida (6 dias em água saturada com cal, seguidos de 21 dias em ambiente laboratorial) ou à cura ao ar (27 dias em ambiente laboratorial). Aos 28 dias, todas as superfícies foram seladas com epóxi, exceto uma face perpendicular à direção de moldagem, e os prismas foram saturados em água por 24 horas antes da imersão em uma solução de NaCl a 3%. Após 180 e 360 dias de exposição, uma seção de 70 mm foi cortada do topo de cada prisma; As amostras restantes foram seladas novamente com epóxi e a imersão continuou para novas medições. Amostras de pó foram coletadas em intervalos de 5 mm usando uma furadeira para determinar o teor total de cloreto. Os autores determinaram o cloreto superficial e os coeficientes de difusão aparente ajustando os dados experimentais a um modelo de regressão não linear usando a função de erro. Os resultados indicaram que uma maior substituição de LS leva a coeficientes de difusão aparente de cloreto mais elevados.

Thomas e Hooton (2010) realizaram um estudo semelhante com resultados menos conclusivos; no entanto, os dados foram obtidos após apenas 35 dias de imersão.

Dhir et al. (2007) investigaram a difusão de cloretos em seções de concreto (com relações água/cimento entre 0,45 e 0,65) utilizando uma técnica acelerada em uma célula de dois compartimentos, aplicando um gradiente de concentração de cloretos e um potencial elétrico de 7,5 V através do conjunto. Os níveis de substituição de LS avaliados foram 0%, 15%, 25%, 35% e 45%. Os resultados mostraram que os coeficientes de difusão de cloretos aumentaram com níveis mais elevados de LS, particularmente acima de 25%. Esse efeito foi amplificado em concretos com maiores relações água/cimento.

Cam e Neithalath (2010) realizaram um ensaio de migração em regime não estacionário, de acordo com a norma NT BUILD 492 (Nordtest, 1999), para misturas de concreto com diferentes relações a/c (0,34, 0,37 e 0,40) e níveis de substituição de LS (10% e 15%). Os corpos de prova de concreto com 50 mm de espessura foram inicialmente saturados com uma solução de hidróxido de cálcio a 2% e, em seguida, colocados em uma célula de ensaio contendo NaCl 2 N na câmara catódica e NaOH 0,3 N na câmara anódica. A tensão aplicada foi determinada a partir da resposta inicial da corrente quando um potencial de 30 V foi imposto entre os eletrodos. Esse potencial elétrico impulsionou a migração de íons cloreto da célula para o corpo de prova. Após 24 horas de ensaio, cada corpo de prova foi seccionado axialmente e as superfícies expostas foram pulverizadas com uma solução de nitrato de prata 0,1 N para revelar a profundidade de penetração do cloreto. O coeficiente de difusão de cloretos aumentou quando o pó de LS foi incorporado à mistura de concreto, embora o aumento tenha sido ligeiramente menor para tempos de cura mais longos (56 dias vs. 28 dias). A substituição de 15% do clínquer por LS e a adição de 5% de microsílica a uma mistura com baixa relação água/cimento (a/c) de 0,34 resultaram em um coeficiente de difusão de cloretos semelhante ao de uma mistura de OPC com a mesma a/c. Isso sugere que a otimização da relação a/c e a incorporação de SCM ao PLC podem mitigar os efeitos adversos associados ao uso de LS isoladamente.

Meddah et al. (2014) mediram a penetração de cloretos em seções de concreto (100 mm de

diâmetro, 25 mm de espessura) extraídas de cilindros de 150×300 mm. As variáveis avaliadas foram as mesmas utilizadas por Dhir et al. (2007). Os corpos de prova foram submetidos a dois regimes de cura — úmido e seco ao ar — durante os primeiros 28 dias, e os resultados para ambas as condições foram relatados. Cada seção foi colocada em uma célula de difusão padrão de dois compartimentos, com a câmara interna preenchida com uma solução de hidróxido de cálcio e a face externa exposta a uma solução de cloretos por imersão parcial. O ensaio eletroquímico aplicou um potencial de 7,5 V à amostra para induzir a migração de cloretos. O transporte de cloretos foi monitorado por análises periódicas dos líquidos em ambos os compartimentos, e o coeficiente de difusão foi calculado utilizando a primeira lei de Fick. Para qualquer relação ar/cimento dada, os concretos com maior substituição de LS apresentaram coeficientes de difusão significativamente maiores do que as misturas de CPO, demonstrando que o aumento do teor de LS reduz a resistência à difusão de cloretos.

Celik et al. (2015) avaliaram a resistência à penetração de cloretos em amostras de concreto com um ano de idade, utilizando o método de migração não estacionária NT BUILD 492 (Nordtest, 1999). Seções cilíndricas (100 × 200 mm) foram cortadas em discos de  $50 \pm 2$  mm e armazenadas em câmara de nuvens até o momento do ensaio. Além de misturas de CPO com 0%, 15% e 25% de LS, misturas binárias e ternárias com MCS também foram testadas. Antes do ensaio, as amostras foram imersas a vácuo em uma solução saturada de hidróxido de cálcio e, em seguida, colocadas entre um católito (NaCl a 10%) e um ânólito (NaOH 0,3 N). Um potencial elétrico de 30 V foi aplicado por 24 horas. Após o ensaio, cada amostra foi cortada axialmente e pulverizada com uma solução de nitrato de prata 0,1 M para identificar as zonas contaminadas por cloretos. O coeficiente de migração para misturas com 25% de LS foi aproximadamente o dobro do de CPO. Esse efeito foi substancialmente reduzido em misturas binárias e ternárias.

Palm et al. (2016) realizaram ensaios de migração acelerada de cloreto de acordo com as diretrizes BAW- Merkblatt. Chlorideindringwiderstand von Beton (Bundesanstalt) para Wasserbau, 2012) em misturas de concreto com relações água/cimento de 0,35, 0,45 e 0,50 aos 35 e 98 dias. Foram utilizados corpos de prova na forma de discos de 100×50 mm, com KOH 0,2 N como ânólito e KOH 0,2 N com 10% de NaCl como católito. Observou-se que as misturas com enchimentos de LS (dois tipos) apresentaram grande variabilidade. Algumas combinações mostraram desempenho consideravelmente pior, especialmente aos 35 dias, enquanto outras se aproximaram do desempenho da mistura de controle, indicando que o tipo e a proporção de LS têm um impacto notável na resistência inicial aos cloretos. Os maiores coeficientes foram encontrados em misturas com alto teor de LS e relação água/cimento de 0,5, enquanto os menores foram observados em misturas com relação água/cimento de 0,35 aos 98 dias, destacando que tanto o traço da mistura quanto a idade são fatores-chave na limitação da penetração de cloretos.

Da Silva e De Brito (2016) determinaram o coeficiente de difusão de cloreto seguindo o procedimento estabelecido na norma NT BUILD 492 (Nordtest, 1999). Para cada mistura (com teores de LS de 0%, 30%, 60% e 70%) e cada idade avaliada (28, 91 e 182 dias), foram preparados três corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 50 mm de espessura. Após cura úmida a  $20 \pm 2$  °C e umidade relativa acima de 95%, os corpos de prova foram pré-condicionados sob vácuo e, posteriormente, imersos em uma solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) preparada com água destilada. Os resultados mostram que o coeficiente de migração de cloreto aumenta significativamente com o aumento do teor de LS, embora esse efeito diminua aos 182 dias. As misturas de LS e cinzas volantes, com níveis de substituição combinados de 30% e 60%, apresentam coeficientes de migração comparáveis aos da mistura de OPC, especialmente nas idades de 91 e 182 dias.

Elgalhud et al. (2022) analisaram a penetração de cloretos em concreto PLC utilizando um amplo conjunto de dados internacionais. Os autores relataram que a penetração de cloretos aumenta com o teor de LS, embora o efeito seja menos pronunciado quando as misturas de PLC são formuladas para igualar a resistência de concretos CPO equivalentes, em vez de utilizar a mesma relação água/cimento. Os resultados sugerem que os requisitos europeus de durabilidade à exposição a

cloretos podem precisar ser reconsiderados quando o LS é incorporado ao cimento Portland.

## 7. EFEITO NA CARBONATAÇÃO DO MATERIAL

A carbonatação é um mecanismo crítico de deterioração no concreto armado, particularmente em sistemas PLC, onde um maior teor de LS pode modificar a microestrutura, reduzir a capacidade de tamponamento do pH e influenciar a profundidade da carbonatação. A extensão da carbonatação depende de diversos fatores, incluindo o tipo de cimento, as condições de cura, a relação água/cimento, a porosidade e as condições ambientais (concentração de CO<sub>2</sub>, umidade relativa e temperatura). Esta seção revisa estudos importantes sobre carbonatação em concretos e argamassas PLC, identificando diferenças nas condições de ensaio e nas configurações experimentais que afetam a comparabilidade e a interpretação. Os estudos revisados apresentam considerável heterogeneidade em suas configurações experimentais, incluindo:

- Concentração de CO<sub>2</sub>: desde condições naturais (0,035%) até condições altamente aceleradas (até 20%), afetando o avanço da frente de carbonatação e a comparabilidade entre estudos.
- Umidade relativa: geralmente mantida entre 55 e 65%, embora existam variações que alteram o equilíbrio entre difusão e reação.
- Tipos e tamanhos de amostras: desde pequenos corpos de prova de argamassa até grandes prismas e células de difusão, que influenciam os gradientes de umidade e a cinética de carbonatação.
- Protocolos de pré-condicionamento: os períodos de secagem e as estratégias de selagem variam bastante, afetando a microestrutura da superfície e o realismo dos ensaios.
- Duração da exposição: de 28 dias a exposições naturais de vários anos, refletindo tanto a cinética de curto prazo quanto o comportamento de durabilidade a longo prazo.

Apesar da diversidade de abordagens, os resultados concordam que a profundidade de carbonatação geralmente aumenta com maior teor de LS (Courard et al., 2005; Dhir et al., 2007; Meddah et al., 2014; Bucher et al., 2017; Palm et al., 2016; Steiner et al., 2022), especialmente em condições de cura insuficiente ou alta porosidade. No entanto, o efeito da relação água/cimento, da qualidade da cura e da configuração do ensaio geralmente supera o impacto da composição do aglomerante na determinação da resistência à carbonatação. Pesquisas futuras devem buscar harmonizar os protocolos de ensaio e estender os tempos de exposição para melhor simular as condições de serviço e permitir comparações confiáveis entre os diferentes tipos de aglomerante.

Dhir et al. (2007) realizaram duas séries de ensaios de carbonatação: (i) amostras de concreto expostas à carbonatação natural utilizando o método EN 12390-10:2018 (armazenamento em ambiente com 0,035% de CO<sub>2</sub> por 365 dias a 20°C e 65% de UR) e (ii) cubos de 100 mm expostos à carbonatação acelerada (armazenamento em atmosfera com 4% de CO<sub>2</sub> por 20 semanas a 20°C e 65% de UR). A substituição de LS variou de 15% a 45%. Independentemente da relação água/cimento (a/c), os corpos de prova expostos à carbonatação natural apresentaram um aumento na profundidade de carbonatação com o aumento do teor de LS, um efeito que foi amplificado em valores elevados de a/c. Resultados semelhantes foram observados nos corpos de prova expostos ao regime acelerado.

Meddah et al. (2014) realizaram ensaios de carbonatação acelerada em cubos de concreto de 100 mm que foram curados em ambiente úmido durante os primeiros 28 dias. Posteriormente, os corpos de prova foram pré-condicionados por secagem em laboratório durante 14 dias. Antes do ensaio na câmara de carbonatação, todas as faces dos corpos de prova foram seladas com tinta betuminosa, exceto a face superior, que foi exposta a uma atmosfera com 4% de CO<sub>2</sub> a 20°C e 55% de umidade relativa. Após 20 semanas de exposição, as profundidades de carbonatação foram maiores nos corpos de prova com níveis mais elevados de substituição de LS (10–45%). O efeito foi mais pronunciado em amostras com uma relação água/aglomerante de 0,65 do que naquelas com uma relação de 0,5.

Bucher et al. (2016) realizaram ensaios de carbonatação acelerada em amostras prismáticas de concreto com diferentes teores de LS (0%, 15%, 20% e 25%) após 28 e 365 dias de cura. Entre o final da cura e o início do ensaio, as amostras foram armazenadas por 14 dias em atmosfera com  $50 \pm 5\%$  de UR a  $20^\circ\text{C}$ . A carbonatação acelerada foi realizada em câmara a  $20^\circ\text{C}$ , 55% de UR e concentração de  $\text{CO}_2$  de  $4 \pm 0,5\%$ . As profundidades de carbonatação foram medidas aos 56, 63 e 70 dias por meio de pulverização com fenolftaleína. Um conjunto adicional de amostras foi exposto à carbonatação natural após 28 dias de cura, armazenadas ao ar livre em Toulouse, onde a temperatura média variou de  $8$  a  $18^\circ\text{C}$  e a umidade relativa média foi de 75%. A profundidade de carbonatação foi medida após 1 e 2 anos.

Os resultados da carbonatação acelerada mostram que a adição de LS aumenta consistentemente a profundidade de carbonatação, sendo a magnitude dependente do nível de substituição e do tipo de aglomerante (misturas CEM I ou CEM II). Em sistemas CEM I, a resistência à carbonatação diminui progressivamente com o aumento da LS, com uma perda de desempenho acentuada em altas dosagens ( $>20\%$ ), onde as profundidades de carbonatação são mais que o dobro daquelas do controle rico em clínquer — mesmo após 365 dias de cura. Embora a cura prolongada reduza significativamente a profundidade de carbonatação em todas as misturas, ela não elimina a diferença de desempenho criada pela LS. Em misturas CEM II, a influência da LS é mais sutil: sistemas com escória apresentam alterações mínimas, enquanto formulações com cinzas volantes são altamente suscetíveis, e a LS exacerba ainda mais suas já elevadas profundidades de carbonatação. De forma consistente, os corpos de prova submetidos à carbonatação natural apresentaram maiores profundidades com o aumento do teor de LS em misturas CEM I, com uma tendência mais pronunciada à medida que o nível de substituição aumentava. Em contrapartida, as misturas CEM II apresentaram aumentos modestos, indicando menor sensibilidade à incorporação de LS.

Palm et al. (2016) expuseram prismas de concreto de  $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$  a um ambiente de carbonatação acelerada com 2% de  $\text{CO}_2$  a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  de UR durante 28 dias. Os autores também relataram maiores profundidades de carbonatação em concretos com níveis mais elevados de substituição de LS.

Steiner et al. (2022) empregaram um sistema de difusão de  $\text{CO}_2$  constituído por uma célula cilíndrica selada contendo um espécime em forma de disco, colocado dentro de uma câmara de carbonatação. A célula é um cilindro de acrílico ( $h = 210 \text{ mm}$ ;  $\varnothing = 100/94 \text{ mm}$ ; espessura da parede =  $6 \text{ mm}$ ) dividido em três seções. Sua seção inferior, com  $50 \text{ mm}$  de altura, contém uma solução saturada de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  para manter uma umidade relativa interna de 65%. Após a selagem da amostra com cera, o conjunto foi condicionado a  $20^\circ\text{C}$  e 65% de UR até o endurecimento da cera. Antes do ensaio, a célula foi purgada com nitrogênio por aproximadamente 10 segundos, reduzindo a concentração inicial de  $\text{CO}_2$  para  $\sim 0,08\%$ . Em seguida, foi colocada em uma câmara contendo 20% de  $\text{CO}_2$ . O acúmulo de  $\text{CO}_2$  dentro da célula ocorreu exclusivamente por difusão através do espécime. Substituições de LS em 20%, 40%, 50% e 60% em peso foram avaliadas. Os resultados mostraram que níveis mais elevados de LS aumentaram significativamente a difusividade de  $\text{CO}_2$  e a profundidade de carbonatação, indicando uma diminuição na resistência à carbonatação com o aumento do teor de LS.

Méndez-Páramo (2024) incluiu em seu programa experimental a avaliação da resistência à carbonatação de misturas de argamassa feitas com PLC contendo entre 4% e 35% de filler calcário, expostas por um ano às condições externas em Querétaro, México. Os resultados mostraram que um teor de filler calcário de 15% produziu aproximadamente 50% mais carbonatação do que uma argamassa com CPO, enquanto teores de 20% e 35% dobraram e quadruplicaram, respectivamente, a profundidade de carbonatação da argamassa com CPO.

Além dos efeitos de redução do pH mencionados anteriormente, a incorporação de enchimentos LS em materiais à base de cimento Portland induz mecanismos adicionais de carbonatação que vão além da perda de alcalinidade (Torres-Acosta, 2024a, 2024b). Nos estágios iniciais de exposição, o  $\text{CO}_2$  reage preferencialmente com a portlandita (CH), formando carbonato de cálcio e reduzindo



o pH da solução porosa. No entanto, uma vez que a CH se esgota — um fenômeno que ocorre mais cedo em sistemas com alto teor de LS devido à menor fração de clínquer e maior porosidade capilar — a frente de carbonatação atinge o gel de silicato de cálcio hidratado (CSH). A carbonatação do CSH produz descalcificação progressiva, reduzindo sua relação Ca/Si e gerando géis ricos em sílica com baixa capacidade cimentícia (Thiery et al., 2007; Chen et al., 2021). Essa transformação está associada à densificação estrutural dos carbonatos formados e ao colapso da nanoestrutura CSH, produzindo retração induzida pela carbonatação (Houst & Wittmann, 2002; Saetta et al., 1995). Ao contrário da estabilidade volumétrica observada quando apenas os carbonatos CH se formam, a carbonatação do CSH gera tensões de tração internas suficientes para iniciar microfissuras na matriz cimentícia, mesmo sem carga externa. Essas microfissuras, por sua vez, aceleram a entrada de CO<sub>2</sub> e vapor de água, criando um ciclo de retroalimentação que acelera tanto a alteração química quanto a deterioração mecânica (Drouet et al., 2019; Suda et al., 2021).

Em sistemas modificados com LS, esse fenômeno pode ser mais pronunciado devido a uma combinação de consumo mais rápido de CH, maior nucleação de carbonato de cálcio nas superfícies de calcita e uma microestrutura porosa modificada que facilita o transporte de CO<sub>2</sub>. Em altos teores de LS, o início precoce da carbonatação do CSH significa que o fissuramento pode ocorrer mais cedo e em profundidades menores em comparação com matrizes com cimento CPO (De Weerd et al., 2011). Consequentemente, embora a redução do pH e a despassivação do aço sejam os riscos tradicionalmente destacados, as consequências mecânicas associadas à retração por carbonatação e à descalcificação do CSH representam uma via de deterioração ainda mais severa. Esse duplo impacto — químico (perda de alcalinidade) e mecânico (fissuramento por retração) — é essencial para avaliar a durabilidade a longo prazo de sistemas cimentícios com filler de LS, especialmente sob altas exposições a CO<sub>2</sub> ou em estruturas com capacidade limitada de tamponamento de umidade (Torres-Acosta, 2024a, 2024b).

## 8. LACUNAS NA PESQUISA

O PLC tem sido amplamente estudado há quase 50 anos por seu potencial de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> mantendo propriedades mecânicas e de durabilidade comparáveis às do cimento Portland tradicional. No entanto, as pesquisas existentes apresentam algumas limitações importantes:

- **Existe uma correlação limitada entre a porosidade e os indicadores de desempenho.** Embora numerosos estudos tenham avaliado propriedades mecânicas (como resistência à compressão, flexão e tração) e propriedades relacionadas ao transporte (como resistividade, velocidade de pulso ultrassônico, permeabilidade rápida ao cloreto, difusão e carbonatação), a relação entre a porosidade e essas métricas de desempenho permanece pouco explorada. Compreender essa relação é crucial para avaliar a durabilidade a longo prazo e otimizar o projeto de misturas asfálticas.
- **Inconsistências nos cronogramas de pesquisa e nas estruturas experimentais.** A evolução das propriedades mecânicas e de transporte do PLC é frequentemente avaliada em períodos de tempo variáveis, influenciada por diferenças nos padrões de ensaio e nas metodologias experimentais. Essa falta de uniformidade dificulta a obtenção de conclusões confiáveis a longo prazo e o consenso sobre o desempenho do PLC em diferentes condições.
- **Desempenho a longo prazo do PLC com diferentes níveis de substituição de LS.** Muitos estudos se concentram no desenvolvimento inicial da resistência, mas poucos examinam sistematicamente os efeitos a longo prazo (além de 28 dias) de diferentes teores de LS no PLC. Uma avaliação estruturada, com duração de pelo menos um ano, é necessária para quantificar o impacto de diferentes níveis de substituição na resistência à compressão, nas propriedades de transporte e na porosidade ao longo do tempo.
- **Validação da sustentabilidade do PLC como uma alternativa ecologicamente correta.** Embora o PLC seja amplamente promovido como um cimento sustentável devido ao seu



menor teor de clínquer e à redução da pegada de carbono, seu desempenho real a longo prazo em relação ao seu impacto ambiental permanece uma questão em aberto. Uma avaliação mais abrangente é necessária para determinar se o PLC realmente oferece um equilíbrio ideal entre sustentabilidade, resistência e durabilidade.

- **Transição de normas prescritivas para normas baseadas em desempenho.** As normas atuais para cimento e concreto são predominantemente prescritivas, especificando composições de materiais em vez de critérios baseados em desempenho. No entanto, a indústria está gradualmente migrando para normas baseadas em desempenho, que exigem dados validados para embasar sua implementação. O desafio reside em como o PLC pode atender a essas normas quando ainda faltam informações prescritivas fundamentais sobre seu comportamento. Sem uma compreensão sólida de suas propriedades mecânicas, de durabilidade e de transporte, não está claro como calibrar efetivamente os critérios baseados em desempenho para o PLC.
- **Falta de calibração sistemática do PLC em métodos de ensaio convencionais.** A calibração do PLC em métodos de ensaio tradicionais permanece em grande parte empírica, baseada em ajustes de lote ou ensaios experimentais, em vez de uma abordagem estruturada e orientada por dados. Essa metodologia de tentativa e erro introduz inconsistências nas avaliações de desempenho do PLC em comparação com o cimento Portland tradicional. A avaliação sistemática do comportamento do PLC é necessária para desenvolver modelos preditivos e estruturas de calibração mais confiáveis para métodos de ensaio padrão.

## 9. CONCLUSÕES

### Resistência à compressão

Pesquisas mostram que, quando a LS é usada como substituta cimentícia do clínquer ou do CPO, o PLC pode atingir níveis de resistência semelhantes ao CPO, oferecendo benefícios de sustentabilidade. Em geral, o PLC mantém resistência à compressão comparável à do CPO em idades iniciais (28 dias), especialmente para substituições moderadas de calcário (<15%). No entanto, os ganhos de resistência ou sua comparabilidade com o CPO podem diminuir em idades mais avançadas se as dosagens não forem ajustadas adequadamente para manter o desempenho, particularmente em sistemas com maior teor de LS, altas relações a/c ou sem MCSs. Quando a LS não é usada como substituta do clínquer (mas apenas como agregado ultrafino), não se obtêm benefícios de sustentabilidade, embora a resistência à compressão possa permanecer comparável ou até ligeiramente superior.

### Porosidade

A porosidade total e efetiva do PLC aumenta com níveis mais elevados de substituição por LS. Tanto modelos termodinâmicos quanto medições experimentais indicam que essa tendência é influenciada pela composição do cimento (alumina, gesso) e pela relação a/c. O aumento da porosidade pode afetar a durabilidade a longo prazo, ressaltando a importância do controle da microestrutura por meio de cura adequada, incorporação de MCS e limites apropriados na substituição por LS.

### Ingresso de cloreto

A difusão de cloretos aumenta com o teor de LS, especialmente em concretos com maiores relações a/c. Estudos experimentais utilizando métodos acelerados e naturais mostram que a incorporação de MCS e a otimização do traço podem mitigar esse efeito, permitindo que o PLC atenda aos critérios de durabilidade para corrosão do aço em ambientes expostos a cloretos.

## Carbonatação

O PLC apresenta maiores profundidades de carbonatação em comparação com o CPO, particularmente em misturas com alto teor de LS e cura insuficiente. A resistência à carbonatação depende fortemente do tempo de cura, da relação a/c e da presença de MCS, sendo os sistemas contendo escória mais resistentes e os contendo cinzas volantes mais suscetíveis. Ao contrário da resposta volumétrica relativamente estável observada quando apenas o CH carbonata, a carbonatação do CSH induz tensões de tração internas que podem gerar microfissuras na matriz cimentícia mesmo na ausência de cargas externas. A formação dessas microfissuras aumenta subsequentemente o influxo de CO<sub>2</sub> e vapor de água, estabelecendo um mecanismo de retroalimentação que acelera tanto a transformação química do aglomerante quanto a degradação mecânica progressiva do material.

## Conclusão geral

De modo geral, o PLC representa uma alternativa sustentável ao CPO, reduzindo as emissões de CO<sub>2</sub> e proporcionando desempenho estrutural aceitável. No entanto, as propriedades relacionadas à durabilidade — porosidade, transporte de cloretos e carbonatação — são fortemente influenciadas pela composição e pelas condições de cura. Essas descobertas destacam a necessidade de uma abordagem contínua e integrada que relacione microestrutura, transporte iônico e comportamento mecânico para projetar misturas de PLC confiáveis e duráveis, apoiando a transição para normas de cimento baseadas em desempenho.

## 10. AGRADECIMENTOS

DMSC e BMP agradecem o apoio financeiro fundamental do Consejo de Investigación en Ciencias Naturales e Ingeniería de Canadá. AATA, por sua vez, expressa sua gratidão à CH Arquitectura y Construcción pelo apoio financeiro concedido para a elaboração deste manuscrito, no âmbito do projeto de pesquisa “Caracterización por durabilidad de concretos fabricados con agregados calcáreos y cementos con contenidos de caliza > 15%”, desenvolvido em colaboração com o Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Campus Querétaro.

## 11. REFERÊNCIAS

- Abd-El-Aziz, M. A., and M. Heikal. (2009). “*Characteristics and Durability of Cements Containing Fly Ash and Limestone Subjected to Caron’s Lake Water.*” *Advances in Cement Research* 21 (3): 91–99. <https://doi.org/10.1680/adcr.2007.00025>.
- Achour, Taoufik, André Lecomte, Mongi ben Ouezdou, Rachid Mensi, and Imène Joudi. (2008). “*Contribution Des Fillers Calcaires à l’adhérence Pâte-Granulat. Exemples Tunisiens.*” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 41 (5): 815–30. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9287-0>.
- Adams, Lawrence D., and Ronald M. Race. (1990). “*Effect of Limestone Additions Upon Drying Shrinkage of Portland Cement Mortar.*” [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Aguayo, Matthew, Pu Yang, Kirk Vance, Gaurav Sant, and Narayanan Neithalath. (2014). “*Electrically Driven Chloride Ion Transport in Blended Binder Concretes: Insights from Experiments and Numerical Simulations.*” *Cement and Concrete Research* 66 (August): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.022>.
- Ahmad, Shamsad, Saheed Kolawole Adekunle, Mohammed Maslehuddin, and Abul Kalam Azad. (2014). “*Properties of Self-Consolidating Concrete Made Utilizing Alternative Mineral Fillers.*” *Construction and Building Materials* 68 (October): 268–76.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.096>.

Ahmad, Shamsad, and Saheed Kolawole Adekunle. (2020). “Utilization of Limestone Powder and Metakaolin as Mineral Fillers in High-Performance Self-Compacting Concrete.” In RILEM Bookseries, 25:701–12. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4\\_78](https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_78).

Ahmad, I., Shen, D., Khan, K.A., Jan, A., Ahmad, T. (2022), “Evaluation of mechanical properties and environmental impact of using limestone powder in high-performance concrete,” Magazine of Concrete Research, V.74, No. 24), pp. 1280-1295.

Ali, A. H., A. M. Kandeel, and A. S. Ouda. (2013). “Hydration Characteristics of Limestone Filled Cement Pastes.” Chemistry and Materials Research. Vol. 5. <http://www.hbrc.edu.eg>.

Allahverdi, Ali, and Shiva Salem. (2010). “Simultaneous influences of microsilica and limestone powder on properties of portland cement paste.” Original Papers Ceramics-Silikáty. Vol. 54.

Al-Mulla, Ikram F., Ammar S. Al-Rihimy, and Maitham S. Abd Alameer. (2020). “Properties of Engineered Cementitious Composite Concrete (Bendable Concrete) Produced Using Portland Limestone Cement.” In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 671. Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012131>.

Anagnostopoulos, N., K. K. Sideris, and A. Georgiadis. (2009). “Mechanical Characteristics of Self-Compacting Concretes with Different Filler Materials, Exposed to Elevated Temperatures.” Materials and Structures/Materiaux et Constructions 42 (10): 1393–1405. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9459-6>.

Antoni, M., J. Rossen, F. Martirena, and K. Scrivener. (2012). “Cement Substitution by a Combination of Metakaolin and Limestone.” Cement and Concrete Research 42 (12): 1579–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006>.

Aqel, M., and D. K. Panesar. (2016). “Hydration Kinetics and Compressive Strength of Steam-Cured Cement Pastes and Mortars Containing Limestone Filler.” Construction and Building Materials 113 (June): 359–68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.031>.

Aqel, Mohammad, and Daman Panesar. (2020). “Physical and Chemical Effects of Limestone Filler on the Hydration of Steam Cured Cement Paste and Mortar.” Revista ALCONPAT 10 (2): 191–205. <https://doi.org/10.21041/ra.v10i2.481>.

Assié, Stéphan, Gilles Escadeillas, and Vincent Waller. (2007). “Estimates of Self-Compacting Concrete ‘potential’ Durability.” Construction and Building Materials 21 (10): 1909–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.034>.

ASTM International. (2022), ASTM C150/C150M-22: Standard Specification for Portland Cement. [https://www.astm.org/c0150\\_c0150m-22.html](https://www.astm.org/c0150_c0150m-22.html)

ASTM International. (2022), ASTM C1556-22: Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion. <https://www.astm.org/c1556-22.html>

Atiemo, Eugene, Charles Kwame Kankam, Francis Momade, and Kwabena Appiah Boakye. (2014). “Hydration Properties of Calcined Clay Pozzolan and Limestone Mineral Admixtures in Binary and Ternary Cements.” Journal of Physical Science and Application. Vol. 4.

Attari, Azadeh, Ciaran McNally, and Mark G. Richardson. (2016). “A Probabilistic Assessment of the Influence of Age Factor on the Service Life of Concretes with Limestone Cement/GGBS Binders.” Construction and Building Materials 111 (May): 488–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.113>.

Audenaert, K., Q. Yuan, and G. de Schutter. (2010). “On the Time Dependency of the Chloride Migration Coefficient in Concrete.” Construction and Building Materials 24 (3): 396–402. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.07.003>.

Badogiannis, Efstratios G., Ioannis P. Sfikas, Dimitra v. Voukia, Konstantinos G. Trezos, and Sotirios G. Tsivilis. (2015). “Durability of Metakaolin Self-Compacting Concrete.” Construction and Building Materials 82 (May): 133–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.023>.

Balayssac, J. P., Ch H D&rich6, and J. Grandet. (1995). “Of Curing upon Carbonation of Concrete.” Construction and Building Materials. Vol. 9.

- Barkera, A. P., and D. W. Hobbsb. (1999). “*Performance of Portland Limestone Cements in Mortar Prisms Immersed in Sulfate Solutions at 5°C.*” *Cement and Concrete Composites*. Vol. 21.
- Barluenga, Gonzalo, Irene Palomar, and Javier Puentes. (2013). “*Early Age and Hardened Performance of Cement Pastes Combining Mineral Additions.*” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 46 (6): 921–41. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9944-9>.
- Barrett, Timothy J., Hongfang Sun, Tommy Nantung, and W. Jason Weiss. (2014). “*Performance of Portland Limestone Cements.*” *Transportation Research Record*. National Research Council. <https://doi.org/10.3141/2441-15>.
- Barrett, Timothy, Hongfang Sun, and W. Jason Weiss. (2013). “*Performance of Portland Limestone Cements: Cements Designed to Be More Sustainable That Include up to 15% Limestone Addition.*” <https://doi.org/10.5703/1288284315335>.
- Beeralingegowda, B., and V. D. Gundakalle. (2007). “*The effect of addition of limestone powder on the properties of self-compacting concrete.*” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* (An ISO. Vol. 3297. [www.ijirset.com](http://www.ijirset.com).
- Benachour, Y., C. A. Davy, F. Skoczylas, and H. Houari. (2008). “*Effect of a High Calcite Filler Addition upon Microstructural, Mechanical, Shrinkage and Transport Properties of a Mortar.*” *Cement and Concrete Research* 38 (6): 727–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.007>.
- Bentz, D. P., Edgardo Fabian Irassar, and William Jason Weiss. (2014). “*Limestone Fillers Conserve Cement Part I: An Anaysis Based on Powers’ Model.*” <https://www.researchgate.net/publication/234838632>.
- Bentz, Dale P., Ahmad Ardani, Tim Barrett, Scott Z. Jones, Didier Lootens, Max A. Peltz, Taijiro Sato, Paul E. Stutzman, Jussara Tanesi, and W. Jason Weiss. (2015). “*Multi-Scale Investigation of the Performance of Limestone in Concrete.*” *Construction and Building Materials* 75 (January): 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.042>.
- Bertolini, Luca, Federica Lollini, and Elena Redaelli. (n.d.). “*Experimental Data for the Application of Performance-Based Methods for the Design of Reinforced Concrete Structures Subjected to Carbonation.*”
- Bhandari, Ishan, Rajesh Kumar, A. Sofi, and Nikhil Sanjay Nighot. (2023). “*A Systematic Study on Sustainable Low Carbon Cement – Superplasticizer Interaction: Fresh, Mechanical, Microstructural and Durability Characteristics.*” *Heliyon*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19176>.
- Bharadwaj, Keshav, O. Burkan Isgor, and W. Jason Weiss. (2022). “*Supplementary Cementitious Materials in Portland- Limestone Cements.*” *ACI Materials Journal* 119 (2): 141–54. <https://doi.org/10.14359/51734356>.
- Bharadwaj, Keshav, O. Burkan Isgor, and W. Jason Weiss. (2024). “*Optimizing the Carbon Footprint of Performance-Engineered Concrete Mixtures.*” *Transportation Research Record* 2678 (10): 1422–40. <https://doi.org/10.1177/03611981241236792>.
- Bizzozero, Julien, and Karen L. Scrivener. (2015). “*Limestone Reaction in Calcium Aluminate Cement-Calcium Sulfate Systems.*” *Cement and Concrete Research* 76 (June): 159–69. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.019>.
- Bodard, Claude, and Marc Bergeron. (1990). “*The Effect of Steam Curing on High-Early Strength Portland Cement Containing Carbonate Addition.*” [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Boel, V., K. Audenaert, G. de Schutter, G. Heirman, L. Vandewalle, B. Desmet, and J. Vantomme. (2007). “*Transport Properties of Self Compacting Concrete with Limestone Filler or Fly Ash.*” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 40 (5): 507–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9159-z>.
- Bonavetti, V., H. Donza, G. Menéndez, O. Cabrera, and E. F. Irassar. (2003). “*Limestone Filler Cement in Low w/c Concrete: A Rational Use of Energy.*” *Cement and Concrete Research* 33 (6): 865–71. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01087-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01087-6).



- Bonavetti, V., H. Donza, V. Rahhal, and E. Irassar. (2000). *"Influence of Initial Curing on the Properties of Concrete Containing Limestone Blended Cement."*
- Bosiljkov, Violeta Bokan. (2003). *"SCC Mixes with Poorly Graded Aggregate and High Volume of Limestone Filler."* Cement and Concrete Research 33 (9): 1279–86. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00013-9).
- Bouasker, M., P. Mounanga, P. Turcry, A. Loukili, and A. Khelidj. (2008). *"Chemical Shrinkage of Cement Pastes and Mortars at Very Early Age: Effect of Limestone Filler and Granular Inclusions."* Cement and Concrete Composites 30 (1): 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.004>.
- Bouasker, Marwen, Nour El Houda Khalifa, Pierre Mounanga, and Nabil ben Kahla. (2014). *"Early-Age Deformation and Autogenous Cracking Risk of Slag-Limestone Filler-Cement Blended Binders."* Construction and Building Materials 55 (March): 158–67. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.037>.
- Boubekur, Toufik, Karim Ezziane, and El Hadj Kadri. (2014). *"Estimation of Mortars Compressive Strength at Different Curing Temperature by the Maturity Method."* Computers and Chemical Engineering 71 (November): 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.084>.
- Briki, Yosra, Maciej Zajac, Mohsen ben Haha, and Karen Scrivener. (2021). *"Impact of Limestone Fineness on Cement Hydration at Early Age."* Cement and Concrete Research 147 (September). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106515>.
- Bucher, Raphaël, Paco Diederich, Gilles Escadeillas, and Martin Cyr. (2017). *"Service Life of Metakaolin-Based Concrete Exposed to Carbonation: Comparison with Blended Cement Containing Fly Ash, Blast Furnace Slag and Limestone Filler."* Cement and Concrete Research 99 (September): 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.04.013>.
- Burgos-Montes, O., M. M. Alonso, and F. Puertas. (2013). *"Viscosity and Water Demand of Limestone- and Fly Ash-Blended Cement Pastes in the Presence of Superplasticisers."* Construction and Building Materials 48: 417–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.008>.
- Burgos-Montes, Olga, Marta Palacios, Patricia Rivilla, and Francisca Puertas. (2012). *"Compatibility between Superplasticizer Admixtures and Cements with Mineral Additions."* Construction and Building Materials 31 (June): 300–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.092>.
- Bundesanstalt für Wasserbau. (2012), BAW-Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton. Karlsruhe: BAW.
- Cam, Hieu T., and Narayanan Neithalath. (2010). *"Moisture and Ionic Transport in Concretes Containing Coarse Limestone Powder."* Cement and Concrete Composites, 32 (7), 486–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.04.002>.
- Camiletti, J., A. M. Soliman, and M. L. Nehdi. (2013). *"Effects of Nano- and Micro-Limestone Addition on Early-Age Properties of Ultra-High-Performance Concrete."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 46 (6), 881–98. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9940-0>.
- Canadian Standards Association (CSA). (2003), CSA A3001: Cementitious Materials for Use in Concrete.
- Carlos, Aquino, Inoue Masumi, Miura Hiroaki, Mizuta Maki, and Okamoto Takahisa. (2010). *"The Effects of Limestone Aggregate on Concrete Properties."* Construction and Building Materials, 24 (12), 2363–68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.008>.
- Carrasco, M. F., G. Menéndez, V. Bonavetti, and E. F. Irassar. (2005). *"Strength Optimization of 'Tailor-Made Cement' with Limestone Filler and Blast Furnace Slag."* Cement and Concrete Research, 35 (7), 1324–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.023>.
- Catinaud, S., J. J. Beaudoin, and J. Marchand. (2000). *"Influence of Limestone Addition on Calcium Leaching Mechanisms in Cement-Based Materials."*



- Celik, K., M. D. Jackson, M. Mancio, C. Meral, A. H. Emwas, P. K. Mehta, and P. J. M. Monteiro. (2014). "High-Volume Natural Volcanic Pozzolan and Limestone Powder as Partial Replacements for Portland Cement in Self-Compacting and Sustainable Concrete." *Cement and Concrete Composites*, 45, 136–47. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003>.
- Celik, Kemal. (2015). "Development and Characterization of Sustainable Self-Consolidating Concrete Containing High Volume of Limestone Powder and Natural or Calcined Pozzolan Materials."
- Celik, Kemal, Cagla Meral, Mauricio Mancio, P. Kumar Mehta, and Paulo J. M. Monteiro. (2014). "A Comparative Study of Self-Consolidating Concretes Incorporating High-Volume Natural Pozzolan or High-Volume Fly Ash." *Construction and Building Materials*, 67, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.065>.
- Celik, Kemal, Cagla Meral, A. Petek Gursel, P. Kumar Mehta, Arpad Horvath, and Paulo J. M. Monteiro. (2015). "Mechanical Properties, Durability, and Life-Cycle Assessment of Self-Consolidating Concrete Mixtures Made with Blended Portland Cements Containing Fly Ash and Limestone Powder." *Cement and Concrete Composites*, 56, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>.
- Chen, Chun Tao, Jiang Jhy Chang, Wei Chung Yeh, and Shun Ting Chang. (2012). "Sustainable Performance of Limestone Cement." In *Advanced Materials Research*, 476–478, 1692–96. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.476-478.1692>.
- Chen, J. J., A. K. H. Kwan, and Y. Jiang. (2014). "Adding Limestone Fines as Cement Paste Replacement to Reduce Water Permeability and Sorptivity of Concrete." *Construction and Building Materials*, 56 (April), 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.066>.
- Chen, J. J., Hong, S., & Glasser, F. P. (2021). Decalcification of CSH: Mechanisms and consequences. *Cement and Concrete Research*, 147, 106511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127988>
- Chiker, T., S. Aggoun, H. Houari, and R. Siddique. (2016). "Sodium Sulfate and Alternative Combined Sulfate/Chloride Action on Ordinary and Self-Consolidating PLC-Based Concretes." *Construction and Building Materials*, 106 (March), 342–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.123>.
- Chung, Hung Wen, Harvey DeFord, Mang Tia, and Frank Mi Way Ni. (2023). "Developing Sustainable Pavement Concrete Mix Using Portland Limestone Cement and Blended Aggregates Techniques." *Transportation Research Record*, 2677 (7), 209–21. <https://doi.org/10.1177/03611981231152244>.
- Cooper, Michelle, and Robert Spragg. (2023). "Portland Limestone Cement FHWA Publication No.: FHWA-HRT-23-104 FHWA Contact." <https://highways.dot.gov/research>.
- Cost, V., Isaac Howard, and Jay Shannon. (2013). "Improving Concrete Sustainability and Performance with Use of Portland-Limestone Cement Synergies." *Transportation Research Record*, (2342), 26–34. <https://doi.org/10.3141/2342-04>.
- Courard, Luc, and Frédéric Michel. (2014). "Limestone Fillers Cement Based Composites: Effects of Blast Furnace Slags on Fresh and Hardened Properties." *Construction and Building Materials*, 51 (January), 439–45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.076>.
- Courard, Luc, Frédéric Michel, L. Courard, R. Degeimbre, A. Darimont, X. Willem, F. Michel, S. Flamant, and Stéphanie Flamant. (2005). "Some Effects of Limestone Fillers as a Partial Substitute for Cement in Mortar Composition." <https://www.researchgate.net/publication/267830988>.
- Courard, Luc, Frédéric Michel, Sylwia Perkowicz, and Andrzej Garbacz. (2014). "Effects of Limestone Fillers on Surface Free Energy and Electrical Conductivity of the Interstitial Solution of Cement Mixes." *Cement and Concrete Composites*, 45, 111–16. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.014>.
- Craeye, B., G. De Schutter, B. Desmet, J. Vantomme, G. Heirman, L. Vandewalle, Ö. Cizer, S. Aggoun, and E. H. Kadri. (2010). "Effect of Mineral Filler Type on Autogenous Shrinkage of Self-

- Compacting Concrete.* Cement and Concrete Research, 40 (6), 908–13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.01.014>.
- Crundwell, F. K., Higgins, D., Crundwell, G., & Lea, F. M.** (2019). *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (5th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- D Tennis, P., M. D. A. Thomas, and W. J. Weiss. (2011). *"State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%."*
- Darweesh, H. H. M. (2004). *"Limestone as an Accelerator and Filler in Limestone-Substituted Alumina Cement."* Ceramics International, 30 (2), 145–50. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(03\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(03)00073-7).
- Dave, Niragi, Anil Kumar Misra, Amit Srivastava, and Surendra Kumar Kaushik. (2016). *"Experimental Analysis of Strength and Durability Properties of Quaternary Cement Binder and Mortar."* Construction and Building Materials, 107 (March), 117–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.195>.
- Da Silva, P.R., De Brito, J. (2016), "Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler," Materials and Structures, V.49, pp. 2749-2766.
- De Weerd, K., Ben Haha, M., Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H., Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research, 41(3), 279-291. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>
- Dhir, R. K., M. C. Limbachiya, M. J. McCarthy, and A. Chaipanich. (2007). *"Evaluation of Portland Limestone Cements for Use in Concrete Construction."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 40 (5), 459–73. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9143-7>.
- Diab, Ahmed M., Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty, and Ayman A. Aly. (2016). *"Long Term Study of Mechanical Properties, Durability and Environmental Impact of Limestone Cement Concrete."* Alexandria Engineering Journal, 55 (2), 1465–82. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.01.031>.
- Diab, Ahmed M., Ismail A. Mohamed, and Ali A. Aliabdo. (2016). *"Impact of Organic Carbon on Hardened Properties and Durability of Limestone Cement Concrete."* Construction and Building Materials, 102 (January), 688–98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.182>.
- Diamantonis, N., I. Marinos, M. S. Katsiotis, A. Sakellariou, A. Papathanasiou, V. Kaloidas, and M. Katsioti. (2010). *"Investigations about the Influence of Fine Additives on the Viscosity of Cement Paste for Self-Compacting Concrete."* Construction and Building Materials, 24 (8), 1518–22. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.005>.
- Dogan, U. Anil, and M. Hulusi Ozkul. (2015). *"The Effect of Cement Type on Long-Term Transport Properties of Self-Compacting Concretes."* Construction and Building Materials, 96 (August), 641–47. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.097>.
- Douglas Hooton, R., P. Klieger, and R. D. Hooton. (1990). *"Effects of Carbonate Additions on Heat of Hydration and Sulfate Resistance of Portland Cements 'Effects of Carbonate Additions on Heat of Hydration and Sulfate Resistance of Portland Cements,' Carbonate Additions to Cement, ASTM STP 1064."* [www.astm.org](http://www.astm.org).
- Drouet, Emeline, Stéphane Poyet, Patrick Le Bescop, Jean Michel Torrenti, and Xavier Bourbon. (2019). *"Carbonation of Hardened Cement Pastes: Influence of Temperature."* Cement and Concrete Research, 115 (January), 445–59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.019>.
- El-Didamony, Hamdy, Thanana Salem, Nazek Gabr, and Taher Mohamed. (1994). *"Limestone as a retarder and filler in limestone blended cement."*
- Elgalhud, Abdurrahman A., Ravindra K. Dhir, and Gurmeh Ghataora. (2016). *"Limestone Addition Effects on Concrete Porosity."* Cement and Concrete Composites, 72 (September), 222–34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.006>.
- Elgalhud, Abdurrahman A., Ravindra K. Dhir, and Gurmeh Ghataora. (2018). *"Chloride Ingress in Concrete: Limestone Addition Effects."* Magazine of Concrete Research, 70 (6), 292–313. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00177>.

- El-Hassan, Hilal, and Yixin Shao. (2015). "Early Carbonation Curing of Concrete Masonry Units with Portland Limestone Cement." *Cement and Concrete Composites*, 62 (August), 168–77. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.004>.
- Elkhadiri, I., A. Diouri, A. Boukhari, J. Aride, and F. Puertas. (2002). "Mechanical Behaviour of Various Mortars Made by Combined Fly Ash and Limestone in Moroccan Portland Cement." *European Committee for Standardization*. (2018). Testing hardened concrete – Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of concrete (EN 12390-10:2018). CEN.
- Fanghui, Han, Wang Qiang, Liu Mutian, and Mei Yingjun. (2016). "Early Hydration Properties of Composite Binder Containing Limestone Powder with Different Finenesses." *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123 (2), 1141–51. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5088-9>.
- Felekoğlu, B., and K. Tosun. (2009). "A Comparative Study on the Performance of Limestone-Blended Cement Mortars Exposed to Cold Curing Conditions." *Advances in Cement Research*, 21 (2), 45–57. <https://doi.org/10.1680/adcr.2008.00003>.
- Felekoğlu, Burak, Kamile Tosun, Bülent Baradan, Akin Altun, and Bahadır Uyulgan. (2006). "The Effect of Fly Ash and Limestone Fillers on the Viscosity and Compressive Strength of Self-Compacting Repair Mortars." *Cement and Concrete Research*, 36 (9), 1719–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>.
- Ferreiro, S., D. Herfort, and J. S. Damtoft. (2017). "Effect of Raw Clay Type, Fineness, Water-to-Cement Ratio and Fly Ash Addition on Workability and Strength Performance of Calcined Clay – Limestone Portland Cements." *Cement and Concrete Research*, 101 (November), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.003>.
- Gao, Yun, Geert de Schutter, Guang Ye, Zhuqing Yu, Zhijun Tan, and Kai Wu. (2013). "A Microscopic Study on Ternary Blended Cement Based Composites." *Construction and Building Materials*, 46, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.021>.
- Garcia, Jose E., Nicolas B. Tiburzi, Kevin J. Folliard, and Thanos Drimalas. (2022). "Mechanical Properties and Electrical Resistivity of Portland Limestone Cement Concrete Systems Containing Greater than 15% Limestone and Supplementary Cementitious Materials." *Cement*, 8 (June), 100026. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100026>.
- Gesoğlu, Mehmet, Erhan Güneyisi, Mustafa E. Kocabağ, Veysel Bayram, and Kasim Mermerdaş. (2012). "Fresh and Hardened Characteristics of Self Compacting Concretes Made with Combined Use of Marble Powder, Limestone Filler, and Fly Ash." *Construction and Building Materials*, 37 (December), 160–70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092>.
- Ghafoori, Nader, Rebecca Spitek, and Meysam Najimi. (2016). "Influence of Limestone Size and Content on Transport Properties of Self-Consolidating Concrete." *Construction and Building Materials*, 127 (November), 588–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.051>.
- Ghiasvand, E., A. A. Ramezaniapour, and A. M. Ramezaniapour. (2015). "Influence of Grinding Method and Particle Size Distribution on the Properties of Portland-Limestone Cements." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48 (5), 1273–83. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0232-0>.
- Ghrici, M., S. Kenai, and M. Said-Mansour. (2007). "Mechanical Properties and Durability of Mortar and Concrete Containing Natural Pozzolana and Limestone Blended Cements." *Cement and Concrete Composites*, 29 (7), 542–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009>.
- Githachuri, Kung'u, and Mark G. Alexander. (2013). "Durability Performance Potential and Strength of Blended Portland Limestone Cement Concrete." *Cement and Concrete Composites*, 39, 115–21. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.027>.
- Gołaszewski, Jacek, Małgorzata Gołaszewska, and Grzegorz Cygan. (2022). "Performance of Ordinary and Self-Compacting Concrete with Limestone after Freeze–Thaw Cycles." *Buildings*, 12 (11). <https://doi.org/10.3390/buildings12112003>.
- Gonnon, Pascal, and Didier Lootens. (2023). "A Model Linking Compressive Strength and Porosity in Ternary System: Metakaolin, Limestone, Cement." *Minerals*, 13 (4).



<https://doi.org/10.3390/min13040454>.

González, M. A., and E. F. Irassar. (1998). "Effect of limestone filler on the sulfate resistance of low  $c/a$  portland cement." *Cement and Concrete Research*, p. 11.

Guemmadi, Z'hor, Musa Resheidat, Hacène Houari, and Belkacem Toumi. (2008). "Optimal Criteria of Algerian Blended Cement Using Limestone Fines." *Journal of Civil Engineering and Management*, 14 (4), 269–75. <https://doi.org/10.3846/1392-3730.2008.14.26>.

Güneyisi, Erhan, and Mehmet Gesoğlu. (2011). "Properties of Self-Compacting Portland Pozzolana and Limestone Blended Cement Concretes Containing Different Replacement Levels of Slag." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (8), 1399–1410. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9706-0>.

Güneyisi, Erhan, Turan Özturan, and Mehmet Gesoğlu. (2005). "A Study on Reinforcement Corrosion and Related Properties of Plain and Blended Cement Concretes under Different Curing Conditions." *Cement and Concrete Composites*, 27 (4), 449–61. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.05.006>.

Güneyisi, Erhan, Turan Özturan, and Mehmet Gesoğlu. (2007). "Effect of Initial Curing on Chloride Ingress and Corrosion Resistance Characteristics of Concretes Made with Plain and Blended Cements." *Building and Environment*, 42 (7), 2676–85. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.008>.

Harmandeep, S., and S. Lovneesh. (2023). "Effect of Limestone Waste Powder and Marble Waste over the Strength Properties of the Conventional Concrete." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1110. Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012077>.

Hartshorn, S. A., J. H. Sharp, and R. N. Swamy. (1999). "Thaumasite Formation in Portland-Limestone Cement Pastes." *Cement and Concrete Research*, Vol. 29.

Hartshorn, S. A., J. H. Sharp, and R. N. Swamy. (2002). "The Thaumasite Form of Sulfate Attack in Portland-Limestone Cement Mortars Stored in Magnesium Sulfate Solution." [www.elsevier.com/locate/cemconcomp](http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp).

Heikal, M, H El-Didamony, and M. S. Morsy. (2000). "Limestone-Filled Pozzolanic Cement." *Cement and Concrete Research* 30

Heikal, Mohamed, Hamdy Eldidamony, and Fawzia Abd EL-Raoof. (2014). "Electrical Properties, Physico-Chemical and Mechanical Characteristics of Fly Ash-Limestone-Filled Pozzolanic Cement." <https://www.researchgate.net/publication/258819705>.

Heirman, G., R. Hendrickx, L. Vandewalle, D. van Gemert, D. Feys, G. de Schutter, B. Desmet, and J. Vantomme. (2009). "Integration Approach of the Couette Inverse Problem of Powder Type Self-Compacting Concrete in a Wide-Gap Concentric Cylinder Rheometer. Part II. Influence of Mineral Additions and Chemical Admixtures on the Shear Thickening Flow Behaviour." *Cement and Concrete Research* 39 (3): 171–81. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.006>.

Heirman, G., L. Vandewalle, D. van Gemert, V. Boel, K. Audenaert, G. de Schutter, B. Desmet, and J. Vantomme. (2008). "Time-Dependent Deformations of Limestone Powder Type Self-Compacting Concrete." *Engineering Structures* 30 (10): 2945–56. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.04.009>.

Helal, M. A. (2002). "Effect of Curing Time on the Physico-Mechanical Characteristics of the Hardened Cement Pastes Containing Limestone." *Cement and Concrete Research* 32 (3): 447–50. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00700-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00700-1).

Hooton, Doug, and Michelle Nokken. (2007). "Portland-Limestone Cement: State-of-the-Art Report and Gap Analysis For CSA A 3000." <https://www.researchgate.net/publication/242297652>.

Hornain, H., J. Marchand, V. Duhot, and M. Moranville-Regourd. (1995). "Diffusion of Chloride Ions in Limestone Filler Blended Cement Pastes and Mortars." *Cement and Concrete Research* 25 (8): 1667–78. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00163-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00163-8).

Houst, Y.F. and Wittmann, F.H. (2002) Depth Profiles of Carbonates Formed during Natural Carbonation. *Cement and Concrete Research*, 32, 1923-1930. <https://doi.org/10.1016/S0008->

[8846\(02\)00908-0](#)

- Hu, Yueyang, Weifeng Li, Suhua Ma, Qianqian Wang, Huiru Zou, and Xiaodong Shen. (2018). "The Composition and Performance of Alite-Ye'elime Clinker Produced at 1300 °C." *Cement and Concrete Research* 107 (May): 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.009>.
- Huang, Wei, Hadi Kazemi-Kamyab, Wei Sun, and Karen Scrivener. (2017). "Effect of Cement Substitution by Limestone on the Hydration and Microstructural Development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)." *Cement and Concrete Composites* 77 (March): 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.009>.
- Hussain, Kinaanath, Pongsak Choktaweekarn, Warangkana Saengsoy, Theerati Srichan, and Somnuk Tangtermsirikul. (2013). "Effect of Cement Types, Mineral Admixtures, and Bottom Ash on the Curing Sensitivity of Concrete." *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 20 (1): 94–105. <https://doi.org/10.1007/s12613-013-0699-2>.
- Ingram, Kevin D., and Kenneth E. Daugherty. (1991). "A Review of Limestone Additions to Portland Cement and Concrete." *Cement & Concrete Composites*. Vol. 13.
- Irassar, E. F. (2009). "Sulfate Attack on Cementitious Materials Containing Limestone Filler - A Review." *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.007>.
- Irassar, E. F., V. L. Bonavetti, G. Menéndez, H. Donza, and M. F. Carrasco. (2006). "Durability of Ternary Blended Cements Containing Limestone Filler and GBFS." *ACI Special Publication*. Vol. 234.
- Itim, Ahmed, Karim Ezziane, and El Hadj Kadri. (2011). "Compressive Strength and Shrinkage of Mortar Containing Various Amounts of Mineral Additions." *Construction and Building Materials* 25 (8): 3603–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055>.
- Jiang, Chao, and Xianglin Gu. (2016). "Discussion of 'Assessing Concrete Carbonation Resistance through Air Permeability Measurements' by R. Neves et al. [*Construction and Building Materials* 82(2015): 304–309]." *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.168>.
- Jin, Weizhun, Xiaodan Tang, Zhipeng Bai, Hu Yang, Zhiyou Chen, Lei Wang, Lei Zhang, and Linhua Jiang. (2024). "Effect of Curing Temperature on Mechanical Strength and Thermal Properties of Hydraulic Limestone Powder Concrete." *Journal of Materials Engineering and Performance* 33 (20): 11214–30. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08766-9>.
- Justnes, Harald. (2003). "Thaumasite Formed by Sulfate Attack on Mortar with Limestone Filler." In *Cement and Concrete Composites*, 25:955–59. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00120-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00120-3).
- Kakali, G., S. Tsivilis, E. Aggeli, and M. Bati. (2000). "Hydration Products of C3A, C3S and Portland Cement in the Presence of CaCO<sub>3</sub>." *Cement and Concrete Research* 30 (7): 1073–77. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00292-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00292-1).
- Kathirvel, P., V. Saraswathy, S. P. Karthik, and A. S. S. Sekar. (2013). "Strength and Durability Properties of Quaternary Cement Concrete Made with Fly Ash, Rice Husk Ash and Limestone Powder." *Arabian Journal for Science and Engineering* 38 (3): 589–98. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0331-1>.
- Katsioti, M., D. Gkanis, P. Pipilikaki, A. Sakellariou, A. Papathanasiou, Ch. Teas, E. Chaniotakis, P. Moundoulas, and A. Moropoulou. (2009). "Study of the Substitution of Limestone Filler with Pozzolanic Additives in Mortars." *Construction and Building Materials* 23 (5): 1960–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.034>.
- Kenai, Said, Wolé Soboyejo, and Alfred Soboyejo. (2004). "Some Engineering Properties of Limestone Concrete." In *Materials and Manufacturing Processes*, 19:949–61. <https://doi.org/10.1081/AMP-200030668>.
- Khokhar, M. I. A., E. Roziere, P. Turcry, F. Grondin, and A. Loukili. (2010). "Mix Design of Concrete with High Content of Mineral Additions: Optimisation to Improve Early Age Strength." *Cement and Concrete Composites* 32 (5): 377–85.



<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.01.006>.

Kijjanon, A., T. Sumranwanich, W. Saengsoy, and S. Tangtermsirikul. (2024). "Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Resistances of Mortar with Multi-Binder Systems of Calcined Kaolinite Clay, Fly Ash, and Limestone Powder." *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 13 (7): 1015–31. <https://doi.org/10.1080/21650373.2024.2346886>.

Klemm, Waldemar A., and Lawrence D. Adams. (1990). "An Investigation of the Formation of Carboaluminates." [www.astm.org](http://www.astm.org).

Klinger, James, Joseph F. Neuber, Jeffrey Ondo, and Bruce A. Suprenant. (2024). "Minimizing the Risk for Portland-Limestone Cement Concrete Slabs Best Practices and Strategies to Reduce Floor Slab Finishing and Early-Age, Strength-Critical Challenges." [www.concreteinternational.com/Ci/JANUARY202433](http://www.concreteinternational.com/Ci/JANUARY202433).

Król, Anna, Zbigniew Giergiczny, and Justyna Kuteraskinska-Warwas. (2020). "Properties of Concrete Made with Low-Emission Cements CEM II/C-M and CEM VI." *Materials* 13 (10). <https://doi.org/10.3390/ma13102257>.

Krstulović, P., N. Kamenk, and K. Popović. (1994). "A New Approach in Evaluation of Filler Effect in Cement: Effect on Strength and Workability of Mortar and Concrete." *Cement and Concrete Research*. Vol. 24.

Kumar, Aditya, Tandre Oey, Seohyun Kim, Davis Thomas, Sondas Badran, Jialin Li, Fabio Fernandes, Narayanan Neithalath, and Gaurav Sant. (2013). "Simple Methods to Estimate the Influence of Limestone Fillers on Reaction and Property Evolution in Cementitious Materials." *Cement and Concrete Composites* 42: 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.002>.

Kuosa, H., R. M. Ferreira, E. Holt, M. Leivo, and E. Vesikari. (2014). "Effect of Coupled Deterioration by Freeze-Thaw, Carbonation and Chlorides on Concrete Service Life." *Cement and Concrete Composites* 47 (March): 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.008>.

Kuosa, Hannele. (2007). "Concrete Durability Field Testing in DuraInt-Project." Research Report VIT

Lawrence, Philippe, Martin Cyr, and Erick Ringot. (2005). "Mineral Admixtures in Mortars Effect of Type, Amount and Fineness of Fine Constituents on Compressive Strength." *Cement and Concrete Research* 35 (6): 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.004>.

Lee, Seung Tae, Robert Doug Hooton, Ho Seop Jung, Du Hee Park, and Chang Sik Choi. (2008). "Effect of Limestone Filler on the Deterioration of Mortars and Pastes Exposed to Sulfate Solutions at Ambient Temperature." *Cement and Concrete Research* 38 (1): 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.003>.

Leemann, Andreas, Roman Loser, and Beat Münch. (2010). "Influence of Cement Type on ITZ Porosity and Chloride Resistance of Self-Compacting Concrete." *Cement and Concrete Composites* 32 (2): 116–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.007>.

Leemann, Andreas, Peter Nygaard, Josef Kaufmann, and Roman Loser. (2015). "Relation between Carbonation Resistance, Mix Design and Exposure of Mortar and Concrete." *Cement and Concrete Composites* 62 (July): 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.020>.

Li, Beixing, Jiliang Wang, and Mingkai Zhou. (2009). "Effect of Limestone Fines Content in Manufactured Sand on Durability of Low- and High-Strength Concretes." *Construction and Building Materials* 23 (8): 2846–50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.033>.

Li, Chenzhi. (2022). "Relationship between Water Absorption and Porosity in Concrete with Limestone Powder Addition." *Structural Concrete* 23 (5): 3284–93. <https://doi.org/10.1002/suco.202100546>.

Li, Chenzhi, Linhua Jiang, and Shanshan Li. (2020). "Effect of Limestone Powder Addition on Threshold Chloride Concentration for Steel Corrosion in Reinforced Concrete." *Cement and Concrete Research* 131 (May). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106018>.

Li, Jiaqi, Wenxin Zhang, Chen Li, and Paulo J.M. Monteiro. (2019). "Green Concrete Containing Diatomaceous Earth and Limestone: Workability, Mechanical Properties, and Life-Cycle Assessment." *Journal of Cleaner Production* 223 (June): 662–79.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.077>.

Li, Leo G., and Albert K.H. Kwan. (2015). "Adding Limestone Fines as Cementitious Paste Replacement to Improve Tensile Strength, Stiffness and Durability of Concrete." *Cement and Concrete Composites* 60 (July): 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.006>.

Li, P. P., H. J.H. Brouwers, W. Chen, and Qingliang Yu. (2020). "Optimization and Characterization of High-Volume Limestone Powder in Sustainable Ultra-High Performance Concrete." *Construction and Building Materials* 242 (May). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118112>.

Liu, Kuisheng, and Yong Cui. (2021). "Effects of Different Content of Phosphorus Slag Composite Concrete: Heat Evolution, Sulphate-Corrosion Resistance and Volume Deformation." *Crystals* 11 (11). <https://doi.org/10.3390/cryst11111293>.

Liu, Shuhua, Zhiyang Gao, and Meijuan Rao. (2011). "Study on the Ultra High Performance Concrete Containing Limestone Powder." In *Advanced Materials Research*, 250–253: 686–89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.686>.

Liu, Shuhua, and Peiyu Yan. (2010). "Effect of Limestone Powder on Microstructure of Concrete." *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition* 25 (2): 328–31. <https://doi.org/10.1007/s11595-010-2328-5>.

L.L. Mayfield. (1988). "Limestone Additions to Portland Cement-An Old Controversy Revisited." Lollini, Federica, Elena Redaelli, and Luca Bertolini. (2014). "Effects of Portland Cement Replacement with Limestone on the Properties of Hardened Concrete." *Cement and Concrete Composites* 46 (February): 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.016>.

Lollini, Federica, Elena Redaelli, and Luca Bertolini.. (2016). "Investigation on the Effect of Supplementary Cementitious Materials on the Critical Chloride Threshold of Steel in Concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 49 (10): 4147–65. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0778-0>.

Loser, R., and A. Leemann. (2009). "Shrinkage and Restrained Shrinkage Cracking of Self-Compacting Concrete Compared to Conventionally Vibrated Concrete." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 42 (1): 71–82. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9367-9>.

Loser, Roman, Barbara Lothenbach, Andreas Leemann, and Martin Tuchschnid. (2010). "Chloride Resistance of Concrete and Its Binding Capacity - Comparison between Experimental Results and Thermodynamic Modeling." *Cement and Concrete Composites* 32 (1): 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.001>.

Lothenbach, Barbara, Gwenn le Saout, Emmanuel Gallucci, and Karen Scrivener. (2008). "Influence of Limestone on the Hydration of Portland Cements." *Cement and Concrete Research* 38 (6): 848–60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.002>.

Lundgren, Monica. (2004). "Limestone Filler as Addition in Cement Mortars: Influence on the Early-Age Strength Development at Low Temperature." <https://www.researchgate.net/publication/228512666>.

Ma, Jian, Zhuqing Yu, Chenxin Ni, Hu Shi, and Xiaodong Shen. (2019). "Effects of Limestone Powder on the Hydration and Microstructure Development of Calcium Sulphoaluminate Cement under Long-Term Curing." *Construction and Building Materials* 199 (February): 688–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.054>.

Machner, Alisa, Maciej Zajac, Mohsen ben Haha, Knut O. Kjellsen, Mette R. Geiker, and Klaartje de Weerd. (2017). "Portland Metakaolin Cement Containing Dolomite or Limestone – Similarities and Differences in Phase Assemblage and Compressive Strength." *Construction and Building Materials* 157 (December): 214–25. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.056>.

Malhotra, V. M., and G. G. Carrette. (1985). "Performance of Concrete Incorporating Limestone Dust as Partial Replacement for Sand."

Marques, Pedro Faustino, Carlos Chastre, and Ângela Nunes. (2013). "Carbonation Service Life Modelling of RC Structures for Concrete with Portland and Blended Cements." *Cement and*

- Concrete Composites 37 (1): 171–84. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.007>.
- Martin, Lukas H.J., Frank Winnefeld, Christian J. Müller, and Barbara Lothenbach. (2015). "Contribution of Limestone to the Hydration of Calcium Sulfoaluminate Cement." *Cement and Concrete Composites* 62 (August): 204–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.07.005>.
- Marzouki, A., A. Lecomte, A. Beddey, C. Diliberto, and M. ben Ouezdou. (2013). "The Effects of Grinding on the Properties of Portland-Limestone Cement." *Construction and Building Materials* 48: 1145–55. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.053>.
- McNally, Ciaran, and Emma Sheils. (2012). "Probability-Based Assessment of the Durability Characteristics of Concretes Manufactured Using CEM II and GGBS Binders." *Construction and Building Materials* 30: 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.029>.
- M.D.A. Thomas, K. Cail, B. Blair, A. Delagrave, P. Masson, and K. Kazanis. (2010). "Use of Low-CO<sub>2</sub> Portland Limestone Cement for Pavement Construction in Canada." *International Journal of Pavement Research and Technology*, September.
- Meddah, Mohammed Seddik, Mukesh C. Lmbachiya, and Ravindra K. Dhir. (2014). "Potential Use of Binary and Composite Limestone Cements in Concrete Production." *Construction and Building Materials* 58 (May): 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.012>.
- Menadi, B., S. Kenai, J. Khatib, and A. Aït-Mokhtar. (2009). "Strength and Durability of Concrete Incorporating Crushed Limestone Sand." *Construction and Building Materials* 23 (2): 625–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.005>.
- Méndez-Páramo, R.A. (2024). "Performance of Portland-Limestone Cement Pastes and Mortars with Inert Limestone Filler Additions," Master in Science in Engineering Thesis, Tecnológico de Monterrey, Santiago de Querétaro, Querétaro, November.
- Mikanovic, N., and Carmel J. (2008). "Influence of Superplasticizers on the Rheology and Stability of Limestone and Cement Pastes." *Cement and Concrete Research* 38 (7): 907–19. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.015>.
- Mohammadi, Iman, and Warren South. (2015). "Decision-Making on Increasing Limestone Content of General Purpose Cement." *Journal of Advanced Concrete Technology* 13 (11): 528–37. <https://doi.org/10.3151/jact.13.528>.
- Mohammadi, James, and Warren South. (2016). "Effect of up to 12% Substitution of Clinker with Limestone on Commercial Grade Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials." *Construction and Building Materials* 115 (July): 555–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.071>.
- Moir, Graeme K., and Steven Kelham. (1999). "Developments in the Manufacture and Use of Portland Limestone Cement."
- Montgomery, D. G., B. K. Van, I. Hinczak, and K. Turner. (1998). "Limestone Modified Cement for High-Performance Concretes."
- Moon, Gyu Don, Sungwoo Oh, Sang Hwa Jung, and Young Cheol Choi. (2017). "Effects of the Fineness of Limestone Powder and Cement on the Hydration and Strength Development of PLC Concrete." *Construction and Building Materials* 135 (March): 129–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189>.
- Mostofinejad, Davood, Mahshid Khademolmomenin, and Bahareh Tayebani. (2021). "Evaluating Durability Parameters of Concrete Containing Limestone Powder and Slag under Bacterial Remediation." *Journal of Building Engineering* 40 (August). <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102312>.
- Moukwa, M. (1989). *Penetration of chloride ions from sea water into mortars under different exposure conditions.* Vol. 19.
- Moukwa, M., and P.C. Aïtcin. (1988). "The effect of drying on cement pastes pore structure as determined by mercury porosimetry." Vol. 18.
- Mounanga, Pierre, Muhammad Irfan Ahmad Khokhar, Rana el Hachem, and Ahmed Loukili. (2011). "Improvement of the Early-Age Reactivity of Fly Ash and Blast Furnace Slag Cementitious Systems Using Limestone Filler." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44 (2): 437–



53. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9637-1>.

Müller, Christoph. (2012). "Use of Cement in Concrete According to European Standard EN 206-1." *HBRC Journal* 8 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2012.08.001>.

Muthu, Murugan, Boddapati Ganesh Kumar, V. Govindaraj, and Łukasz Sadowski. (2025). "Performance and Life Cycle of Portland Limestone Cement Mixes Admixed with Gypsum." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 29 (5): 966–82. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2423239>.

Mwaiuwinga, Shaaban, Toshiki Ayano, and Kenji Sakata. (1997). "Influence of urea in concrete." *Cement and Concrete Research*. Vol. 27.

Nehdi, Moncef, Sidney Mindess, and Pierre-Claude Altcin. (1996). "Optimization of high strength limestone filler cement mortars." *Cement and Concrete Research*, Vol. 26.

Neto, Claudio S., and Vicente C. Campiteli. (1990). "The Influence of Limestone Additions on the Rheological Properties and Water Retention Value of Portland Cement Slurries." *ASTM*.

Neves Junior, Alex, Saulo Rocha Ferreira, Romildo Dias Toledo Filho, Eduardo de Moraes Rego Fairbairn, and Jo Dweck. (2019). "Effect of Early Age Curing Carbonation on the Mechanical Properties and Durability of High Initial Strength Portland Cement and Lime-Pozolan Composites Reinforced with Long Sisal Fibres." *Composites Part B: Engineering*, 163 (April): 351–362. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.006>.

Neves, R., B. Sena da Fonseca, F. Branco, J. de Brito, A. Castela, and M. F. Montemor. (2015). "Assessing Concrete Carbonation Resistance through Air Permeability Measurements." *Construction and Building Materials*, 82 (May): 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.075>.

Noui, Ammar, and Leila Zeghichi. (2017). "The Effect of Limestone Fineness on Ternary Cement Fresh-State and Early-Age Properties." *Mining Science*, 24: 195–208. <https://doi.org/10.5277/msc172412>.

Péraay, Jean, Sophie Hussonb, and Bernard Guilhot'. (1999). "Influence of Finely Ground Limestone on Cement Hydration." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21.

Palm, Sebastian, Tilo Proske, Moien Rezvani, Stefan Hainer, Christoph Müller, and Carl Alexander Graubner. (2016). "Cements with a High Limestone Content - Mechanical Properties, Durability and Ecological Characteristics of the Concrete." *Construction and Building Materials*, 119 (August): 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.009>.

Pandey, S. P., and R. L. Sharma. (2000). "The Influence of Mineral Additives on the Strength and Porosity of OPC Mortar." *Cement and Concrete Research*, Vol. 30.

Panesar, Daman K., and James Francis. (2014). "Influence of Limestone and Slag on the Pore Structure of Cement Paste Based on Mercury Intrusion Porosimetry and Water Vapour Sorption Measurements." *Construction and Building Materials*, 52 (February): 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.022>.

Parrott, L. J. (1996). "Some Effects of Cement and Curing upon Carbonation and Reinforcement Corrosion in Concrete." Vol. 29.

Pavía, S., and M. Aly. (2019). "Sustainable, Hydraulic-Lime-Limestone Binders for Construction." *Advances in Civil Engineering Materials*, 8 (3). <https://doi.org/10.1520/ACEM20180124>.

Pavoine, Alexandre, David Harbec, and Thierry Chaussadent. (2014). "Impact of Alternative Cementitious Material on the Mechanical and Transfer Properties of Concrete." *Materials Journal*, 111 (3). <https://doi.org/10.14359/51686828i>.

Pelletier-Chaignat, Laure, Frank Winnefeld, Barbara Lothenbach, and Christian Jörg Müller. (2012). "Beneficial Use of Limestone Filler with Calcium Sulphoaluminate Cement." *Construction and Building Materials*, 26 (1): 619–627. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.065>.

Perlot, Céline, Patrick Rougeau, and Sylvain Dehaut. (2013). "Slurry of Metakaolin Combined



- with Limestone Addition for Self-Compacted Concrete. Application for Precast Industry.” **Cement and Concrete Composites**, 44: 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.07.003>.
- Persson, B. (2004). “Chloride Migration Coefficient of Self-Compacting Concrete.” Vol. 37.
- Persson, Bertil. (2001). “Assessment of the chloride migration coefficient, internal frost resistance, salt frost scaling and sulphate resistance of self-compacting concrete - with some interrelated properties.” [www.byggnadsmaterial.lth.se](http://www.byggnadsmaterial.lth.se).
- Petit, Jean Yves, and Eric Wirquin. (2010). “Effect of Limestone Filler Content and Superplasticizer Dosage on Rheological Parameters of Highly Flowable Mortar under Light Pressure Conditions.” **Cement and Concrete Research**, 40 (2): 235–241. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.013>.
- Pham, Van Toan, Phalkong Meng, Phuong Trinh Bui, Yuko Ogawa, and Kenji Kawai. (2020). “Effects of Shirasu Natural Pozzolan and Limestone Powder on the Strength and Aggressive Chemical Resistance of Concrete.” **Construction and Building Materials**, 239 (April). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117679>.
- Phung, Quoc Tri, Norbert Maes, Diederik Jacques, Els Bruneel, Isabel van Driessche, Guang Ye, and Geert de Schutter. (2015). “Effect of Limestone Fillers on Microstructure and Permeability Due to Carbonation of Cement Pastes under Controlled CO<sub>2</sub> Pressure Conditions.” **Construction and Building Materials**, 82 (May): 376–390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.093>.
- Pipilikaki, P., and M. Beazi-Katsioti. (2009). “The Assessment of Porosity and Pore Size Distribution of Limestone Portland Cement Pastes.” **Construction and Building Materials**, 23 (5): 1966–1970. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.028>.
- Pipilikaki, P., and M. Katsioti. (2009). “Study of the Hydration Process of Quaternary Blended Cements and Durability of the Produced Mortars and Concretes.” **Construction and Building Materials**, 23 (6): 2246–2250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.015>.
- Pipilikaki, P., M. Katsioti, and J. L. Gallias. (2009). “Performance of Limestone Cement Mortars in a High Sulfates Environment.” **Construction and Building Materials**, 23 (2): 1042–1049. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.001>.
- Poppe, Anne Mieke, and Geert de Schutter. (2005). “Cement Hydration in the Presence of High Filler Contents.” **Cement and Concrete Research**, 35 (12): 2290–2299. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.008>.
- Poudyal, Lochana, Kushal Adhikari, and Moon Won. (2021). “Mechanical and Durability Properties of Portland Limestone Cement (PLC) Incorporated with Nano Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>).” **Materials**, 14 (4): 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma14040905>.
- Pourkhorshidi, Alireza, Masoud Jamshidi, Meisam Najimi, A. Pourkhorshidi, M. Jamshidi, and M. Najimi. (2010). “Effects of w/c Ratio on Portland Limestone Cement Concrete.” <https://doi.org/10.1680/coma.2010.163>.
- Proske, Tilo, Stefan Hainer, Moien Rezvani, and Carl Alexander Graubner. (2013). “Eco-Friendly Concretes with Reduced Water and Cement Contents - Mix Design Principles and Laboratory Tests.” **Cement and Concrete Research**, 51: 38–46. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.011>.
- Proske, Tilo, Stefan Hainer, Moien Rezvani, and Carl Alexander Graubner.. (2014). “Eco-Friendly Concretes with Reduced Water and Cement Content - Mix Design Principles and Application in Practice.” **Construction and Building Materials** 67 (PART C): 413–21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.066>.
- Rabehi, Mohamed, Bouzidi Mezghiche, and Salim Guettala. (2013). “Correlation between Initial Absorption of the Cover Concrete, the Compressive Strength and Carbonation Depth.” **Construction and Building Materials** 45: 123–29. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.074>.
- Rahhal, V. F., E. F. Irassar, M. A. Trezza, and V. L. Bonavetti. (2012). “Calorimetric Characterization of Portland Limestone Cement Produced by Intergrinding.” **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry** 109 (1): 153–61. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1575-9>.

- Ramezaniapour, A. M., Kh Esmaeili, S. A. Ghahari, and A. A. Ramezaniapour. (2014). "Influence of Initial Steam Curing and Different Types of Mineral Additives on Mechanical and Durability Properties of Self-Compacting Concrete." *Construction and Building Materials* 73 (December): 187–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.072>.
- Ramezaniapour, Ali A., E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani, and F. Moodi. (2009). "Influence of Various Amounts of Limestone Powder on Performance of Portland Limestone Cement Concretes." *Cement and Concrete Composites* 31 (10): 715–20. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.08.003>.
- Ramezaniapour, Amir Mohammad, and R. Douglas Hooton. (2013). "Sulfate Resistance of Portland-Limestone Cements in Combination with Supplementary Cementitious Materials." *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 46 (7): 1061–73. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9953-8>.
- Río, Olga, Viet Duc Nguyen, and Khan Nguyen. (2015). "Exploring the Potential of the Functionally Graded SCCC for Developing Sustainable Concrete Solutions." *Journal of Advanced Concrete Technology* 13 (3): 193–204. <https://doi.org/10.3151/jact.13.193>.
- Rizwan, Syed Ali, and Thomas A. Bier. (2012). "Blends of Limestone Powder and Fly-Ash Enhance the Response of Self-Compacting Mortars." *Construction and Building Materials* 27 (1): 398–403. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.030>.
- Rozière, E., and A. Loukili. (2011). "Performance-Based Assessment of Concrete Resistance to Leaching." *Cement and Concrete Composites* 33 (4): 451–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.002>.
- Ryou, Jaesuk, Seungtae Lee, Daewook Park, Seongsoo Kim, and Hoseop Jung. (2015). "Durability of Cement Mortars Incorporating Limestone Filler Exposed to Sodium Sulfate Solution." *KSCE Journal of Civil Engineering* 19 (5): 1347–58. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0457-4>.
- Saca, Nastasia, and Maria Georgescu. (2014). "Behavior of Ternary Blended Cements Containing Limestone Filler and Fly Ash in Magnesium Sulfate Solution at Low Temperature." *Construction and Building Materials* 71 (November): 246–53. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.037>.
- Saetta, A. V., Schrefler, B. A., & Vitaliani, R. V. (1995). Carbonation of concrete and the mechanism of moisture and heat transfer. *Cement and Concrete Research*, 25(4), 771–782. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90030-D](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90030-D).
- Sakai, Etsuo, Keisuke Masuda, Yasuo Kakinuma, and Yutaka Aikawa. (2009). "Effects of Shape and Packing Density of Powder Particles on the Fluidity of Cement Pastes with Limestone Powder." *Journal of Advanced Concrete Technology*. Vol. 7.
- Sanish, K. B., Narayanan Neithalath, and Manu Santhanam. (2013). "Monitoring the Evolution of Material Structure in Cement Pastes and Concretes Using Electrical Property Measurements." *Construction and Building Materials* 49: 288–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.038>.
- Sato, T., and J. J. Beaudoin. (2011). "Effect of Nano-CaCO<sub>3</sub> on Hydration of Cement Containing Supplementary Cementitious Materials." *Advances in Cement Research* 23 (1): 33–43. <https://doi.org/10.1680/adcr.9.00016>.
- Schöler, Axel, Barbara Lothenbach, Frank Winnefeld, and Maciej Zajac. (2015). "Hydration of Quaternary Portland Cement Blends Containing Blast-Furnace Slag, Siliceous Fly Ash and Limestone Powder." *Cement and Concrete Composites* 55: 374–82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.10.001>.
- Segura, I., M. Molero, S. Aparicio, J. J. Anaya, and A. Moragues. (2013). "Decalcification of Cement Mortars: Characterisation and Modelling." *Cement and Concrete Composites* 35 (1): 136–50. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.015>.
- Senhadji, Y., G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi, and Benosman. (2014). "Influence of Natural Pozzolan, Silica Fume and Limestone Fine on Strength, Acid Resistance and Microstructure of

- Mortar.” Powder Technology 254 (March): 314–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.046>.
- Sezer, G.I. (2012). “Compressive Strength and Sulfate Resistance of Limestone and/or Silica Fume Mortars.” Construction and Building Materials 26 (1): 613–18.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.064>.
- Shaikh, Faiz U.A., and Steve W.M. Supit. (2014). “Mechanical and Durability Properties of High Volume Fly Ash (HVFA) Concrete Containing Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>) Nanoparticles.” Construction and Building Materials 70 (November): 309–21.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.099>.
- Shaker, Fatma, Ahmed Rashad, and Mohamed Allam. (2018). “Properties of Concrete Incorporating Locally Produced Portland Limestone Cement.” Ain Shams Engineering Journal 9 (4): 2301–9. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.04.005>.
- Shen, Linghua, Qinghua Li, Wei Ge, and Shilang Xu. (2020). “The Mechanical Property and Frost Resistance of Roller Compacted Concrete by Mixing Silica Fume and Limestone Powder: Experimental Study.” Construction and Building Materials 239 (April).  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117882>.
- Siad, H., H. A. Mesbah, M. Mouli, G. Escadeillas, and H. Khelafi. (2014). “Influence of Mineral Admixtures on the Permeation Properties of Self-Compacting Concrete at Different Ages.” Arabian Journal for Science and Engineering 39 (5): 3641–49. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1055-1>.
- Siad, Hocine, Ahmed Alyousif, Ozlem Kasap Keskin, Suleyman Bahadir Keskin, Mohamed Lachemi, Mustafa Sahmaran, and Khandaker M. Anwar Hossain. (2015). “Influence of Limestone Powder on Mechanical, Physical and Self-Healing Behavior of Engineered Cementitious Composites.” Construction and Building Materials 99 (November): 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.007>.
- Sideris, Kosmas K., and Nikolaos S. Anagnostopoulos. (2013). “Durability of Normal Strength Self-Compacting Concretes and Their Impact on Service Life of Reinforced Concrete Structures.” Construction and Building Materials 41: 491–97.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.042>.
- Silva, P. R. da, and J. de Brito. (2015). “Experimental Study of the Porosity and Microstructure of Self-Compacting Concrete (SCC) with Binary and Ternary Mixes of Fly Ash and Limestone Filler.” Construction and Building Materials 86 (July): 101–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.110>.
- Silva, Pedro Raposeiro da, and Jorge de Brito. (2016). “Durability Performance of Self-Compacting Concrete (SCC) with Binary and Ternary Mixes of Fly Ash and Limestone Filler.” Materials and Structures/Materiaux et Constructions 49 (7): 2749–66. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0683-6>.
- Sina, Alain Tèebwaoga, Jamal Ait Brahim, Bilal ben Ali, Brahim Achiou, Nils Haneklaus, and Redouane Beniazza. (2024). “Securing Gypsum Demand in Cement Industry by Gypsum By-Products: Current Challenges and Prospects.” Materials Today Sustainability. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.101034>.
- Skaropoulou, A., G. Kakali, and S. Tsivilis. (2012). “Thaumasite Form of Sulfate Attack in Limestone Cement Concrete: The Effect of Cement Composition, Sand Type and Exposure Temperature.” Construction and Building Materials 36 (November): 527–33.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.048>.
- Skaropoulou, A., S. Tsivilis, G. Kakali, J. H. Sharp, and R. N. Swamy. (2009). “Thaumasite Form of Sulfate Attack in Limestone Cement Mortars: A Study on Long Term Efficiency of Mineral Admixtures.” Construction and Building Materials 23 (6): 2338–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.11.004>.
- Sonebi, M. (2009). “Transport Properties of Self-Consolidating Concrete.” <https://www.researchgate.net/publication/258421410>.
- Soroka, I., and N. Setter. (1977). “The Effect of Fillers on Strength of Cement Mortars.” Cement



and Concrete Research. Vol. 7. Pergamon Press, Inc.

Soroka, I., and N. Stern. (1978). "*Calcareous Fillers and the Compressive Strength of Portland Cement*." Vol. 6. Pergamon Press, Inc.

Steiner, Sarah, Tilo Proske, Frank Winnefeld, and Barbara Lothenbach. (2022). "Effect of Limestone Fillers on CO<sub>2</sub> and Water Vapour Diffusion in Carbonated Concrete." *Cement* 8 (June): 100027. <https://doi.org/10.1016/j.cement.2022.100027>.

Sua-Iam, Gritsada, and Natt Makul. (2013). "*Utilization of Limestone Powder to Improve the Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Untreated Rice Husk Ash as Fine Aggregate*." *Construction and Building Materials* 38 (January): 455–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.016>.

Sua-Iam, Gritsada, and Natt Makul. (2013b). "*Use of Increasing Amounts of Bagasse Ash Waste to Produce Self-Compacting Concrete by Adding Limestone Powder Waste*." *Journal of Cleaner Production* 57 (October): 308–19. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.009>.

Suda, Y., Tomiyama, J., Saito, T., and Saeki, T. (2021). Phase assemblage, microstructure and shrinkage of cement paste during carbonation at different relative humidities. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19, 687–699. <https://doi.org/10.3151/jact.19.687>.

Sun, Hongfang, Brian Hohl, Yizheng Cao, Carol Handwerker, Todd S. Rushing, Toney K. Cummins, and Jason Weiss. (2013). "*Jet Mill Grinding of Portland Cement, Limestone, and Fly Ash: Impact on Particle Size, Hydration Rate, and Strength*." *Cement and Concrete Composites* 44: 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.023>.

T. de Grazia, Mayra, Leandro F. M. Sanchez, Roberto C. O. Romano, and Rafael G. Pileggi. (2019). "*Investigation of the Use of Continuous Particle Packing Models (PPMs) on the Fresh and Hardened Properties of Low-Cement Concrete (LCC) Systems*." *Construction and Building Materials* 195 (January): 524–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.051>.

Tantawy, M A, M A I Saraya, T el Sokkary, and H El-Didamony. (2010). "*Physico-mechanical properties of ultra-fine filled cement pastes part i: limestone*."

Thomas Benn, Bernard, Daksh Baweja, Julie E Mills, and B T Benn. (2012). "*Increased Limestone Mineral Addition in Cement the Affect on Chloride Ion Ingress of Concrete-A Literature Review*." <https://www.researchgate.net/publication/344800638>.

Thomas, Michael D A, and R Doug Hooton. (2010). "*The Durability of Concrete Produced with Portland-Limestone Cement: Canadian Studies*."

Thongsanitgarn, Pailyn, Watcharapong Wongkeo, Arnon Chaipanich, and Chi Sun Poon. (2014). "*Heat of Hydration of Portland High-Calcium Fly Ash Cement Incorporating Limestone Powder: Effect of Limestone Particle Size*." *Construction and Building Materials* 66 (September): 410–17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.060>.

Thongsanitgarn, Pailyn, Watcharapong Wongkeo, Sakprayut Sinthupinyo, and Arnon Chaipanich. (2012). "*Effect of Limestone Powders on Compressive Strength and Setting Time of Portland-Limestone Cement Pastes*." In *Advanced Materials Research*, 343–344:322–26. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.343-344.322>.

Thiery, M., Villain, G., Dangla, P., and Platret, G. (2007). Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.002>.

Tobón, Jorge Iván, and Rebeca Gomez. (2008). "*Behavior of Portland Cement Blended with Limestones of Different Purity Degrees*." <https://www.researchgate.net/publication/262464343>.

Torres, S. M., C. J. Lynsdale, R. N. Swamy, and J. H. Sharp. (2006). "*Microstructure of 5-Year-Old Mortars Containing Limestone Filler Damaged by Thaumasite*." *Cement and Concrete Research* 36 (2): 384–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.02.007>.

Torres Acosta, A.A. (2024a). "Evidence of Damage in Newly Inaugurated Concrete Structures: What Decisions Are We Still Making That Prevent Us from Avoiding These Failures? – 1ª Parte," *Vías Terrestres*, Número 91, Año 15, septiembre-octubre, Asociación Mexicana de Vías Terrestres



- A.C., pp. 30-37. ISSN: 2448-5292. (In Spanish)
- Torres Acosta, A.A. (2024b). "Evidence of Damage in Newly Inaugurated Concrete Structures: What Decisions Are We Still Making That Prevent Us from Avoiding These Failures? – 2ª Parte," Vías Terrestres, Número 92, Año 15, noviembre-diciembre, Asociación Mexicana de Vías Terrestres A.C., pp. 17-23. ISSN: 2448-5292. (In Spanish).
- Torres-Acosta, Andrés A., Rafael A. Méndez-Páramo, Celene Arista-Perrusquía, Eduardo S. Herrera-Sosa, and Samantha Reyes-Rodríguez. (2025). *"Portland Cement Paste Performance When Inert Limestone Filler Is Added as Clinker Replacement."* AIMS Materials Science 12 (2): 224–44. <https://doi.org/10.3934/matserci.2025012>.
- Torresan, I, R Magarotto, and N Zeminian. (2000). *"Interaction Between Superplasticizers and Limestone Blended Cements-Rheological Study."*
- Truc, O, J P Ollivier, and M Carcassès. (2000). *"A New Way for Determining the Chloride Diffusion Coefficient in Concrete from Steady State Migration Test."* Cement and Concrete Research. Vol. 30.
- Tsivilis, S, G Batis, E Chaniotakis, Gr Grigoriadis, and D Theodossis. (2000). *"Properties and Behavior of Limestone Cement Concrete and Mortar."*
- Tsivilis, S, E Chaniotakis, E Badogiannis, G Pahoulasa, and A Ilias. (1999). *"A Study on the Parameters Affecting the Properties of Portland Limestone Cements."* Cement and Concrete Composites. Vol. 21.
- Tsivilis, S., G. Kakali, A. Skaropoulou, J. H. Sharp, and R. N. Swamy. (2003). *"Use of Mineral Admixtures to Prevent Thaumasite Formation in Limestone Cement Mortar."* In Cement and Concrete Composites, 25:969–76. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00153-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00153-7).
- Tsivilis, S., J. Tsantilas, G. Kakali, E. Chaniotakis, and A. Sakellariou. (2003). *"The Permeability of Portland Limestone Cement Concrete."* Cement and Concrete Research 33 (9): 1465–71. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00092-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00092-9).
- Uk, Selç, T " Urkel, Yi " Git, and Altuntasçivil Altuntas,. (2009). *"The Effect of Limestone Powder, Fly Ash and Silica Fume on the Properties of Self-Compacting Repair Mortars."* S Adhan a. Vol. 34.
- Uysal, Mucteba. (2012). *"Self-Compacting Concrete Incorporating Filler Additives: Performance at High Temperatures."* Construction and Building Materials 26 (1): 701–6. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.077>.
- Uysal, Mucteba, and Mansur Sumer. (2011). *"Performance of Self-Compacting Concrete Containing Different Mineral Admixtures."* Construction and Building Materials 25 (11): 4112–20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032>.
- Uysal, Mucteba, Kemalettin Yilmaz, and Metin Ipek. (2012). *"The Effect of Mineral Admixtures on Mechanical Properties, Chloride Ion Permeability and Impermeability of Self-Compacting Concrete."* Construction and Building Materials 27 (1): 263–70. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.049>.
- Valcuende, M., E. Marco, C. Parra, and P. Serna. (2012). *"Influence of Limestone Filler and Viscosity-Modifying Admixture on the Shrinkage of Self-Compacting Concrete."* Cement and Concrete Research 42 (4): 583–92. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.01.001>.
- Vance, Kirk, Matthew Aguayo, Tandre Oey, Gaurav Sant, and Narayanan Neithalath. (2013). *"Hydration and Strength Development in Ternary Portland Cement Blends Containing Limestone and Fly Ash or Metakaolin."* Cement and Concrete Composites 39: 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.028>.
- Vikan, Hedda, and Harald Justnes. (2007). *"Rheology of Cementitious Paste with Silica Fume or Limestone."* Cement and Concrete Research 37 (11): 1512–17. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.012>.
- Voglís, N., G. Kakali, E. Chaniotakis, and S. Tsivilis. (2005). *"Portland-Limestone Cements. Their Properties and Hydration Compared to Those of Other Composite Cements."* Cement and Concrete Composites 27 (2): 191–96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.006>.

- Vuk, T, V Tinta, R Gabrovs ĩek, and V Kauc ĩic. (2001). *"The Effects of Limestone Addition, Clinker Type and Fineness on Properties of Portland Cement."*
- Weerdt, K. de, M. ben Haha, G. le Saout, K. O. Kjellsen, H. Justnes, and B. Lothenbach. (2012). *"The Effect of Temperature on the Hydration of Composite Cements Containing Limestone Powder and Fly Ash."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions 45 (7): 1101–14. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9819-5>.
- Weerdt, K. de, K. O. Kjellsen, E. Sellevold, and H. Justnes. (2011). *"Synergy between Fly Ash and Limestone Powder in Ternary Cements."* Cement and Concrete Composites 33 (1): 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.006>.
- Weerdt, Klaartje de, Erik Sellevold, Knut O. Kjellsen, and Harald Justnes. (2011). *"Fly Ash-Limestone Ternary Cements: Effect of Component Fineness."* Advances in Cement Research 23 (4): 203–14. <https://doi.org/10.1680/adcr.2011.23.4.203>.
- Wu, Kai, Huisheng Shi, Linglin Xu, Guang Ye, and Geert de Schutter. (2016). *"Microstructural Characterization of ITZ in Blended Cement Concretes and Its Relation to Transport Properties."* Cement and Concrete Research 79 (January): 243–56. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.018>.
- Wu, Shao Li, Yu Min Liu, Jin Hu, and Hai Chao Mao. (2016). *"Effect of Gradation of Mineral Admixtures on Chloride Permeability of Concrete."* In Proceedings - 2015 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data and Smart City, ICITBS 2015, 362–65. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ICITBS.2015.96>.
- Xuan, Mei yu, Sung Chul Bae, Seung Jun Kwon, and Xiao Yong Wang. (2022). *"Sustainability Enhancement of Calcined Clay and Limestone Powder Hybrid Ultra-High-Performance Concrete Using Belite-Rich Portland Cement."* Construction and Building Materials 351 (October). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128932>.
- Yahia, A., M. Tanimura, and Y. Shimoyama. (2005). *"Rheological Properties of Highly Flowable Mortar Containing Limestone Filler-Effect of Powder Content and W/C Ratio."* Cement and Concrete Research 35 (3): 532–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.008>.
- Yan, Peiyu, Guidong Mi, and Qiang Wang. (2014). *"A Comparison of Early Hydration Properties of Cement-Steel Slag Binder and Cement-Limestone Powder Binder."* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 115 (1): 193–200. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3360-4>.
- Yaşar, Ergül, Yasin Erdogan, and Alaettin Kiliç. (2004). *"Effect of Limestone Aggregate Type and Water-Cement Ratio on Concrete Strength."* Materials Letters 58 (5): 772–77. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.06.004>.
- Ye, G., X. Liu, A. M. Poppe, G. de Schutter, and K. van Breugel. (2007). *"Numerical Simulation of the Hydration Process and the Development of Microstructure of Self-Compacting Cement Paste Containing Limestone as Filler."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions 40 (9): 865–75. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9189-6>.
- Ye, G., X. Liu, G. de Schutter, A. M. Poppe, and L. Taerwe. (2007). *"Influence of Limestone Powder Used as Filler in SCC on Hydration and Microstructure of Cement Pastes."* Cement and Concrete Composites 29 (2): 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>.
- Yilmaz, Bülent, and Asim Olgun. (2008). *"Studies on Cement and Mortar Containing Low-Calcium Fly Ash, Limestone, and Dolomitic Limestone."* Cement and Concrete Composites 30 (3): 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.07.002>.
- Younsi, A., Ph Turcry, A. Ait-Mokhtar, and S. Staquet. (2013). *"Accelerated Carbonation of Concrete with High Content of Mineral Additions: Effect of Interactions between Hydration and Drying."* Cement and Concrete Research 43 (1): 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.10.008>.
- Yu, R., Spiesz, P., H. J. H. Brouwers. (2015). *"Development of an Eco-Friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with Efficient Cement and Mineral Admixtures Uses."* Cement and Concrete Composites 55: 383–94. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024>.

- Yüksel, Cihat, Ali Mardani-Aghabaglou, Ahsanollah Beglarigale, Halit Yazıcı, Kambiz Ramyar, and Özge Andiç-Çakır. (2016). *"Influence of Water/Powder Ratio and Powder Type on Alkali-Silica Reactivity and Transport Properties of Self-Consolidating Concrete."* Materials and Structures/Materiaux et Constructions 49 (1–2): 289–99. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0497-y>.
- Zajac, Maciej, Anne Rossberg, Gwenn le Saout, and Barbara Lothenbach. (2014). *"Influence of Limestone and Anhydrite on the Hydration of Portland Cements."* Cement and Concrete Composites 46 (February): 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007>.
- Zaribaf, Behnaz H., Burak Uzal, and Kimberley Kurtis. (2015). *"Compatibility of Superplasticizers with Limestone-Metakaolin Blended Cementitious System."* RILEM Bookseries 10: 427–34. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3\\_53](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_53).
- Zeli, J, R Krstulovi, E Tkal Ec, and P Krolo. (2000). *"The Properties of Portland Cement-Limestone-Silica Fume Mortars."* Cement and Concrete Research. Vol. 30.
- Zhang, Runxiao, Allan N. Scott, and Daman K. Panesar. (2024). *"Carbonation and CO2 Reabsorption of Cement-Based Materials: Influence of Limestone Filler and Ground-Granulated Blast-Furnace Slag."* Construction and Building Materials 416 (February). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135166>.
- Zhang, Xiong, and Jihong Han. (2000). *"The Effect of Ultra-Fine Admixture on the Rheological Property of Cement Paste."*
- Zhang, Yongjuan, and Xiong Zhang. (2008). *"Research on Effect of Limestone and Gypsum on C3A, C3S and PC Clinker System."* Construction and Building Materials 22 (8): 1634–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.013>.
- Zhang, Zengqi, Qiang Wang, and Honghui Chen. (2016). *"Properties of High-Volume Limestone Powder Concrete under Standard Curing and Steam-Curing Conditions."* Powder Technology 301 (November): 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.054>.
- Zhu, Wenzhong, and John C. Gibbs. (2005). *"Use of Different Limestone and Chalk Powders in Self-Compacting Concrete."* Cement and Concrete Research 35 (8): 1457–62. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.001>.