

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

D. M. Solís-Cruz^{1*} , A. A. Torres-Acosta² , B. Martín-Pérez¹ 

*Autor de Contacto: dsoli028@uottawa.ca

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

Recibido: 01/11/2025 | Correcciones recibidas: 04/12/2025 | Aceptado: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

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.

Citar como: Solís Cruz, D. M., Torres-Acosta, A. A., Martín-Pérez, B. (2026), “Desempeño por durabilidad y sostenibilidad de cementos Portland con remplazo de caliza.”, Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 60 – 98, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.975>.

¹ Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Ottawa, ON, Canada.

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

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor DMSC contribuyó con las siguientes actividades: ideas originales, recolección de datos, obtención de resultados, discusión de resultados y redacción del trabajo. El autor AATA contribuyó con las actividades de ideas originales, recolección de datos, discusión de resultados y revisión/edición de la redacción. El autor BMP contribuyó con ideas originales, recolección de datos, discusión de resultados y revisión/edición de la redacción.

Licencia Creative Commons

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

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

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

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.

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

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 pozzolânicos. 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.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

El Cemento Portland con Caliza (PLC, por sus siglas en inglés) ha experimentado una amplia adopción internacional como alternativa sostenible al Cemento Portland Ordinario (CPO), principalmente porque puede reducir las emisiones de CO₂ al sustituir parcialmente el clínker con piedra caliza finamente molida (LS). Inicialmente limitado a niveles modestos de sustitución del 5–15% (ASTM International, 2022; CSA, 2003), varios países y organismos reguladores han ampliado el nivel permitido de sustitución hasta 35% (ONNCCE, 2017), lo que ha impulsado aún más la presencia del PLC en el mercado. Si bien los beneficios ambientales asociados con la disminución del contenido de clínker son relevantes, estas evaluaciones a menudo pasan por alto las implicaciones más amplias del desempeño del PLC en sistemas de concreto reforzado, donde la interacción concreto/acero gobierna la durabilidad a largo plazo.

La eficiencia del concreto debe evaluarse no solo a nivel del cementante, sino también dentro del contexto del material compuesto completo, especialmente en aplicaciones de concreto reforzado. El incremento del contenido de LS suele resultar en una mayor porosidad y permeabilidad (Courard et al., 2005; Palm et al., 2016), lo que no solo afecta la matriz del concreto, sino que puede comprometer el entorno protector alrededor del acero de refuerzo embebido. Esto es especialmente preocupante, ya que la corrosión del refuerzo continúa siendo uno de los mecanismos de degradación más críticos en las estructuras de concreto reforzado a nivel mundial (Elgalhud et al., 2017). Aunque el PLC se promueve por sus menores emisiones de CO₂, dichos beneficios se vuelven inciertos si compromete la durabilidad del acero de refuerzo. Esto es particularmente relevante considerando que la producción de acero emite aproximadamente el doble de CO₂ por tonelada en comparación con el clínker (Elhacham et al., 2020). Por lo tanto, cualquier reducción en las emisiones de clínker podría quedar contrarrestada por reparaciones prematuras o labores de mantenimiento inducidas por corrosión.

Además, la producción de PLC generalmente requiere una molienda más fina para lograr un desempeño comparable, lo que incrementa la demanda de energía durante la manufactura. Asimismo, los sistemas con PLC suelen depender en mayor medida de aditivos químicos para mantener la trabajabilidad y el desarrollo de resistencia, especialmente cuando el contenido de LS es elevado. Estos factores contribuyen a costos ambientales ocultos que frecuentemente se excluyen de los cálculos básicos de emisiones de CO₂.

Desde el punto de vista de la ciencia de materiales, el comportamiento en envejecimiento de los sistemas con PLC difiere notablemente del de los sistemas basados en CPO, y aún más de aquellos que incorporan materiales cementantes suplementarios (MCSs). Cuando se someten a diferentes relaciones agua/cemento (a/c), los concretos con PLC suelen mostrar un desarrollo más lento de las propiedades mecánicas y de durabilidad a lo largo del tiempo. Esta tendencia es particularmente evidente en sistemas con baja relación a/c, donde el desarrollo de propiedades ocurre a un ritmo más lento. Por el contrario, en mezclas con alta relación a/c, las mejoras en el desempeño tienden a estabilizarse tempranamente o incluso estancarse, lo que resulta en una limitada mejora a largo plazo. Esta disparidad en la evolución de propiedades clave complica la evaluación de la durabilidad y la sostenibilidad a largo plazo del PLC, especialmente en aplicaciones reales donde las exposiciones ambientales y la corrosión del refuerzo son factores críticos.

2. EVALUACIÓN HISTÓRICA DE LOS CEMENTOS CON SUSTITUCIÓN DE LS

La interacción entre el carbonato de calcio (CaCO₃) y los productos de hidratación del cemento ha sido objeto de investigación durante casi nueve décadas. Una de las primeras hipótesis mecanicistas fue propuesta por Bessey en 1938 sobre la formación de carboaluminatos de calcio en presencia de CaCO₃; esta hipótesis fue documentada por Soroka y Setter en 1977 (Soroka and Setter, 1977). Los

autores señalaron que la formación de carboaluminatos de calcio mediante la reacción del CaCO_3 con fases aluminato, como C_3A y C_4AF , había sido cada vez más respaldada por datos experimentales en las décadas anteriores. Desde ese periodo fundamental, el campo ha experimentado avances significativos, particularmente en la caracterización de las propiedades químicas y físicas de los PLC, considerando diversos niveles de sustitución de LS y diferentes relaciones agua/cemento.

El alcance de estos estudios previos se ha centrado tradicionalmente en la reología en estado fresco, la cinética de hidratación y el desempeño mecánico—principalmente la resistencia a compresión a 28 días (Soroka, I., y N. Setter, 1977; Neto, Claudio S., y Vicente C. Campiteli, 1990; Adams, Lawrence D., y Ronald M. Race, 1990; Nehdi et al., 1996). Sin embargo, la exploración de métricas de durabilidad a largo plazo ha sido históricamente limitada. Aspectos críticos como la penetración de cloruros, la resistencia a la carbonatación, el desempeño frente a ciclos de congelación–deshielo y las reacciones internas expansivas solo han empezado a recibir mayor atención científica y aplicada en años recientes. Este cambio de enfoque se ha vuelto especialmente relevante en los últimos cinco años, conforme marcos regulatorios y agendas de sostenibilidad en varios países han acelerado la adopción del PLC como sistema de cementante base en concretos estructurales. A pesar de los 87 años desde las primeras propuestas mecanicistas y más de 49 años de investigación sistemática desde Soroka y Setter en 1977, la durabilidad a largo plazo de los PLC aún no está suficientemente establecida y todavía no existe un consenso internacional amplio sobre su desempeño a edades avanzadas.

Basándose en esta brecha persistente en el conocimiento sobre el desempeño a largo plazo, la presente revisión realiza un esfuerzo estructurado para consolidar e interpretar la base de evidencia existente sobre sistemas cementantes que contienen LS. Para abordar la fragmentación persistente de resultados a lo largo de décadas, mezclas y protocolos de ensayo, se recopiló una base de datos bibliométrica integral (Figura 1), que abarca más de 200 publicaciones arbitradas y reportes institucionales que examinan directamente la incorporación de LS en cementantes o aplicaciones en concreto. Esta colección incluye estudios sobre pastas, morteros y concretos; cubre una amplia gama de niveles de sustitución, finuras y químicas de clínker; e incorpora tanto métricas de desempeño mecánico como de durabilidad. Al analizar sistemáticamente los datos históricos contenidos en este cuerpo de literatura, el objetivo es identificar áreas de coincidencia, clarificar puntos de divergencia y, en última instancia, establecer una interpretación coherente y objetiva del desempeño de los cementos con LS en el amplio espectro de aplicaciones estructurales modernas. La primera etapa del esfuerzo global de análisis bibliométrico consistió en establecer una línea base química unificada para todas las publicaciones recopiladas, comenzando con una evaluación sistemática de la composición de óxidos de los polvos de LS obtenida a partir de datos de XRF. Esta variable se priorizó como el punto inicial de análisis porque representa la propiedad del material reportada con mayor consistencia en la literatura y proporciona un marco de referencia fundamental para interpretar el amplio espectro de resultados de desempeño. El mapeo químico resultante, presentado en la Figura 2, revela una variabilidad sustancial en la pureza del CaCO_3 , en los perfiles de impurezas y en las distribuciones generales de óxidos entre las LS estudiadas—factores que, aunque frecuentemente subestimados, pueden influir en los mecanismos de hidratación, el desarrollo microestructural y el comportamiento de durabilidad.

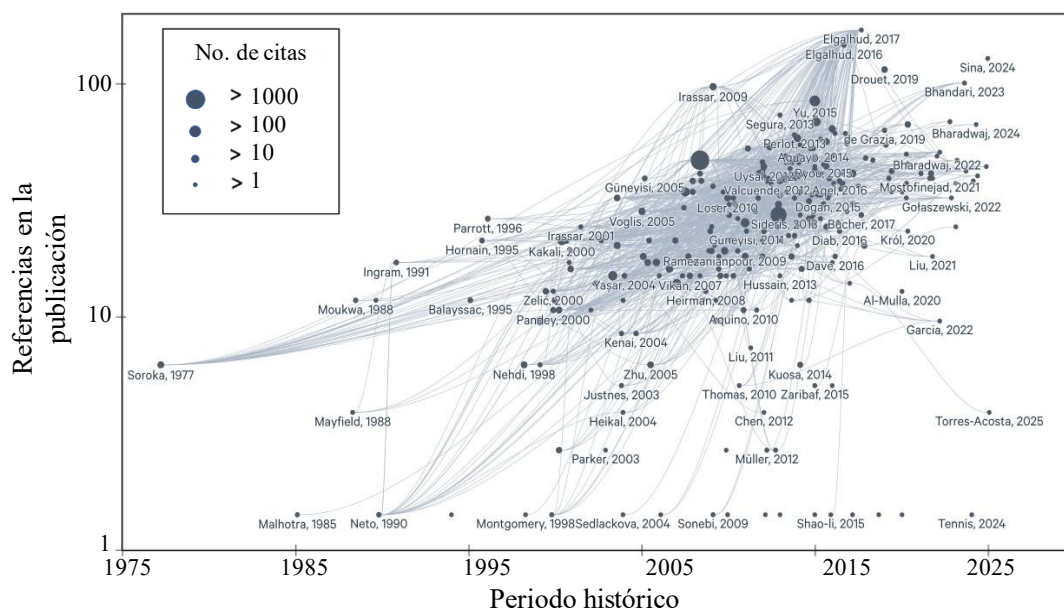


Figura 1. Representación en red basada en nodos de la base de datos bibliométrica integral compilada para estudios sobre la LS en sistemas cementosos.

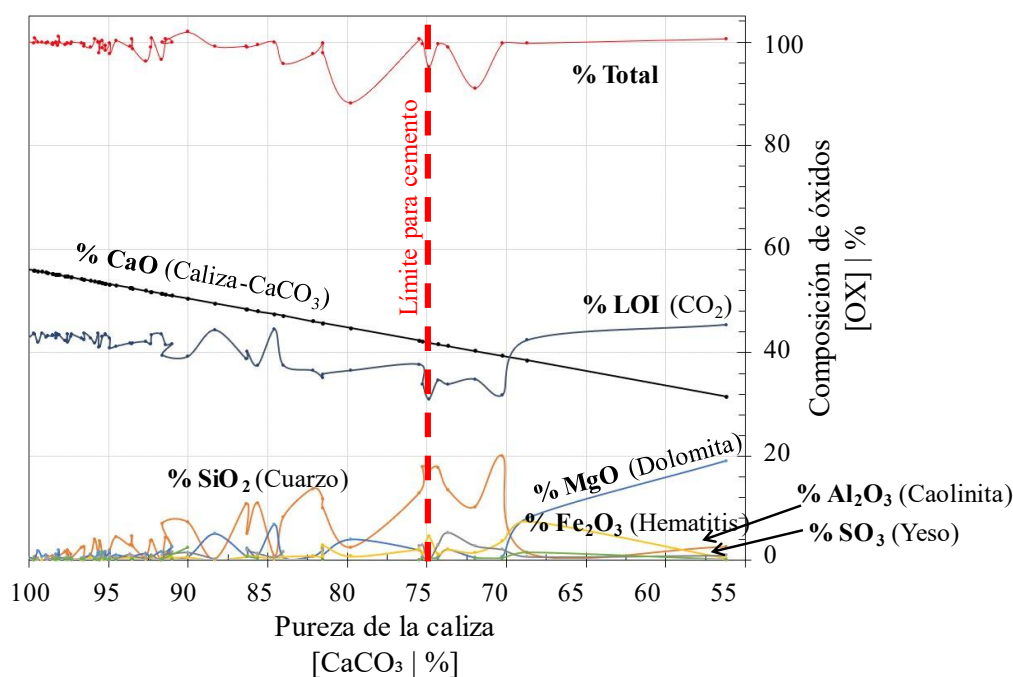


Figura 2. Composición química de la base de datos compilada para estudios sobre la LS en sistemas cementosos.

Dada la magnitud y diversidad de publicaciones incluidas en el conjunto bibliométrico, un examen completamente exhaustivo de cada estudio queda fuera del alcance de una sola revisión. Además, la creciente demanda global de sistemas de concreto que satisfagan simultáneamente los imperativos de durabilidad y sostenibilidad subraya la necesidad de una síntesis focalizada y analíticamente coherente. En consecuencia, esta revisión adopta un enfoque selectivo, pero metodológicamente guiado, concentrándose en un conjunto de estudios representativos que investigan directamente las variables más críticas para la durabilidad en sistemas cementosos que contienen LS. Los criterios de selección priorizan investigaciones con caracterizaciones de materiales claramente reportadas, parámetros de mezcla controlados y evaluaciones explícitas de

indicadores de desempeño a escalas de tiempo relevantes. Estas investigaciones representativas constituyen la base analítica para las discusiones que se presentan a continuación, permitiendo una síntesis estructurada del estado actual del conocimiento sobre las respuestas mecánicas y de durabilidad en materiales basados en PLC.

A partir de esta base, la revisión analiza críticamente tres dominios interrelacionados esenciales para evaluar el desempeño en durabilidad de los PLC: la evolución de la porosidad, los mecanismos de transporte de cloruros y la profundidad de carbonatación, incluidos los enfoques de migración en estado no estacionario y de difusión en masa. Estos temas han surgido como elementos centrales para comprender el comportamiento a largo plazo de concretos que contienen LS bajo exposiciones ambientales agresivas. Sin embargo, el cuerpo existente de literatura presenta una heterogeneidad sustancial en la composición química, como se muestra en la Figura 2, así como en las propiedades físicas, tipos de muestra (pasta, mortero o concreto), regímenes de curado, relaciones agua/cemento y niveles de sustitución de LS. Tal variabilidad complica la comparación directa de resultados y presenta desafíos significativos para desarrollar conclusiones de aplicabilidad amplia.

En este contexto, las siguientes secciones sintetizan el estado del arte sobre la influencia de la sustitución de LS en el desarrollo de resistencia a compresión, las características de porosidad, la resistencia a la penetración de cloruros y el comportamiento frente a la carbonatación. Además de consolidar los hallazgos experimentales disponibles, la revisión busca delimitar las inconsistencias persistentes e identificar brechas críticas en la investigación sobre durabilidad. En conjunto, estos análisis destacan la necesidad de un marco integral basado en datos que apoye el desarrollo de modelos predictivos y oriente el diseño experimental futuro para sistemas de ligantes basados en LS.

3. PUREZA DE LA LS EN LOS ESTUDIOS

Como primer paso para establecer una línea base química consistente, la pureza de la LS en los estudios recopilados se cuantificó mediante las composiciones de óxidos reportadas por fluorescencia de rayos X (XRF) en los siguientes trabajos: Ahmad et al. (2020), Ali et al. (2013), Barker y Hobbs (1999), Burgos Montes (2012), Burgos Montes (2013), Cam et al. (2010), Celik et al. (2015), Chen et al. (2012), Da Silva y De Brito (2016), De Weerd et al. (2011), Dhir et al. (2007), El-Didamony et al. (1994), Elkhadiri et al. (2002), Ferreira 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 y Yan (2010), Liu et al. (2021), Lothenbach et al. (2008), Machner et al. (2017), Malhotra y Garette (1985), Marzouki et al. (2013), Meddah et al. (2014), Moir et al. (1999), Montgomery et al. (1998), Moukwa (1989), Pandey y Sharma (2000), Rahhal et al. (2012), Soroka y Setter (1976), Torresan et al. (2000), Tsivilis (1999), Tsivilis (2000), Tsivilis (2003), Yilmaz y Olgun (2008) y Zhang et al. (2000). Para efectos de comparabilidad, todos los valores de CaO% fueron convertidos a contenido equivalente de CaCO₃% mediante balance de masas molares, asumiendo que todo el CaO% proviene del carbonato de calcio. Esta normalización permite interpretar los datos entre estudios, independientemente del formato de reporte, y posibilita comparaciones directas entre los polvos de LS usados en cinco décadas de trabajos experimentales.

Al graficarse los valores dentro del conjunto bibliométrico (Figura 1), la distribución resultante de CaCO₃ revela tres categorías distinguibles de pureza en la Figura 2. La primera corresponde a LSs de alta calidad (> 92% CaCO₃), en las cuales no aparecen óxidos de impurezas en proporciones significativas; estas muestras se alinean con materiales generalmente clasificados en la industria como rellenos de alta pureza adecuados para formulaciones de cemento orientadas al desempeño. Una segunda categoría incluye LSs cuyos perfiles XRF muestran óxidos secundarios reconocibles. Dentro de este grupo se observan dos tipos principales de impurezas: a) LSs con contenido significativo de sílice, donde niveles elevados de SiO₂ sugieren la presencia de cuarzo, y b) LSs

con contenido de MgO, frecuentemente asociado con fases dolomíticas. Aunque la dolomita es el portador más plausible de MgO en este conjunto, la presencia de otros minerales con magnesio (por ejemplo, magnesita) o fases accesorias menores como magnetita no puede descartarse sin caracterización mineralógica complementaria (XRD, TGA o SEM-EDS). Estas LSs químicamente híbridas, junto con las de alta pureza, representan una proporción considerable de la literatura.

Una tercera clase, menos reconocida, incluye LSs de baja pureza que se aproximan al límite inferior definido en ASTM C150/C595, el cual permite hasta 25% de minerales no compuestos por carbonato de calcio (es decir, una pureza mínima de ~75% CaCO_3).

En conjunto, estas observaciones demuestran que la LS utilizada en sistemas cementosos no puede considerarse químicamente uniforme. La variabilidad en el contenido de CaCO_3 , los perfiles de impurezas y las asociaciones mineralógicas introduce una fuente significativa de divergencia dentro de la literatura. Establecer la pureza de la LS mediante la cuantificación de CaCO_3 basada en XRF, por tanto, proporciona no solo un referente consistente para la síntesis bibliométrica, sino también un marco necesario para interpretar adecuadamente el comportamiento de los sistemas cementantes con LS.

4. EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Esta sección presenta la revisión histórica del comportamiento a compresión en cementos con contenido de LS en función del tiempo de curado y de la relación a/c. Los estudios analizados muestran que los PLC suelen exhibir un desempeño acelerado en resistencia a edades tempranas en comparación con el CPO y cementos con adiciones puzolánicas. Sin embargo, esta ventaja inicial tiende a disminuir a medida que el material envejece. A relaciones a/c bajas, los PLC pueden continuar desarrollando resistencia, aunque a un ritmo más lento que el CPO; mientras que a relaciones a/c más altas, el desarrollo resistente tiende a estabilizarse, mostrando un comportamiento parcialmente similar al de los sistemas tradicionales con CPO. Una observación crítica es que, a edades avanzadas de curado, el CPO frecuentemente supera al PLC en resistencia a compresión, lo cual sugiere un cambio en la trayectoria de desempeño después de las primeras etapas. Es importante señalar que, aunque factores como el tamaño del agregado, la finura Blaine, la geometría de la muestra o el aire incorporado pueden influir en la resistencia, la revisión se centra en el contenido de cemento, el contenido de agua y el tiempo de curado como variables principales. Los estudios de Malhotra y Carette (1985), Nedhi y Mindess (1986), Montgomery et al. (1998), Moir y 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 y Cam (2012), Githachauri (2012), Diab et al. (2015) y Ahmad (2022) incluyen diferentes tipos de muestra: pastas, morteros y concretos. Aunque cada uno de estos materiales presenta mecánicas de su fractura y características microestructurales distintas (debidas a la presencia o ausencia de agregados y a diferencias en la zona de transición interfacial) tales distinciones no se especifican consistentemente en todos los estudios consultados en relación con la edad del material. Esta diferenciación es fundamental, especialmente al analizar propiedades mecánicas como la resistencia a compresión, dado que la escala y el comportamiento compuesto influyen en la distribución de esfuerzos y los mecanismos de falla.

El estudio más antiguo sobre muestras de concreto con adición de LS en la mezcla y reemplazo parcial de arena fue realizado por Malhotra y Carette (1985). Se reportaron las fases del clinker del OPC ($\text{C}_3\text{S} = 53.8\%$, $\text{C}_2\text{S} = 19.6\%$, $\text{C}_3\text{A} = 6.5\%$, $\text{C}_4\text{AF} = 8.6\%$), las relaciones a/c (0.40, 0.53 y 0.70), y el reemplazo de arena por LS (0 a 20%), así como el superplastificante (0 a 1.4% en masa de cemento). Las propiedades en estado fresco incluyeron revenimientos entre 60 y 90 mm, densidades de 2,295 a 2,340 kg/m^3 y contenidos de aire entre 4.6 y 6.2%. Los resultados para a/c = 0.40 indican que la mezcla control superó la resistencia de la mezcla con 20% de LS entre los 28 y los 90 días, alcanzando aproximadamente 43 MPa. Para relaciones a/c de 0.53 y 0.70, el reemplazo del 20% no superó la resistencia del CPO de referencia.

Nedhi y Mindess (1986) estudiaron morteros formulados con CPO, LS y humo de sílice a una relación a/c de 0.5 durante 90 días. La composición del clinker fue $C_3S = 51\%$, $C_2S = 23\%$, $C_3A = 7\%$ y $C_4AF = 10\%$. El humo de sílice se incorporó al 10%, mientras que la LS se añadió al 6.3% o 18.8%. Solo se compara la mezcla de referencia con las mezclas cemento + LS. Sus resultados muestran que la mezcla con mayor resistencia fue OPC + 10% SF + 6.3% LS y la de menor resistencia fue CPO + 18.8% LS.

Montgomery et al. (1998) estudiaron morteros y concretos de alto desempeño con dos cementos diferentes y tres tipos de LS. El cemento PC1 presentaba $C_3S = 63\%$, $C_2S = 12\%$, $C_3A = 2.5\%$ y $C_4AF = 17\%$, mientras que PC2 tenía $C_3S = 64\%$, $C_2S = 11\%$, $C_3A = 4.5\%$ y $C_4AF = 14\%$. En morteros, el contenido de LS varió entre 0 y 20%. A 28 días, la mayor resistencia se obtuvo con la mezcla M25 (0% LS, PC2) y la menor con M6 (20% LS, PC1). Para concreto de alto desempeño, la relación a/material cementante (a/mc) fue de 0.30 a 0.35, el contenido de cemento entre 439 y 488 kg/m³, y la LS al 10% excepto en el control. La mayor resistencia a 28 días fue de 90.1 MPa (CC3A, a/c = 0.30 y 10% LS), y la menor de 73.4 MPa (CC2, a/c = 0.35 y 10% LS).

Moir y Kelham (1999) evaluaron diferentes cementos puzolánicos y cementos Portland con 20% de LS. El CPO tenía $C_3S = 55\%$, $C_2S = 23\%$, $C_3A = 6\%$ y $C_4AF = 11\%$, mientras que el cemento mineralizado tenía $C_3S = 68\%$, $C_2S = 7\%$, $C_3A = 7\%$ y $C_4AF = 10\%$. Entre 3 y 90 días, las mezclas control superaron sistemáticamente a todas las mezclas con LS.

Tsivilis et al. (1999) examinaron muestras de pasta de cemento utilizando dos clínteres, cada uno combinado con 5% de yeso para producir cuatro cementos con valores de finura Blaine que iban de 2,800 a 3,900 cm²/g. El clínter C1 consistió en $C_3S = 65.15\%$, $C_2S = 13.32\%$, $C_3A = 7.54\%$, y $C_4AF = 10.92\%$; mientras que el clínter C2 consistió en $C_3S = 57.99\%$, $C_2S = 18.60\%$, $C_3A = 11.74\%$, y $C_4AF = 6.26\%$. La sustitución con LS varió de 0 a 35%. Para los cementos C1L1, la mayor resistencia ocurrió con 5% de sustitución de LS y una finura Blaine de 3,490 cm²/g, mientras que la menor resistencia ocurrió con 35% de sustitución y una finura Blaine de 5,150 cm²/g. Para C1L2, la mayor resistencia se presentó con 10% de LS y 3,900 cm²/g, y la menor con 35% de LS y 5,080 cm²/g.

Heikal et al. (2000) estudiaron pastas con finura constante de 3,100 cm²/g compuestas por CPO, Homra y LS durante 100 días. El CPO se mantuvo en 80%, mientras que Homra y LS variaron entre 0 y 20%. En todas las edades, el cemento sin LS mostró la mayor resistencia, disminuyendo conforme aumentó el reemplazo.

Irassar et al. (2006) evaluaron la resistencia a compresión usando cilindros de concreto (100×200 mm) desde los 3 hasta los 360 días. Todas las mezclas utilizaron una relación agua/materiales cementantes (w/cm) de 0.50, un contenido de material cementante de 350 ± 10 kg/m³ y una relación arena/agregado total de 0.45. El revenimiento fue de 70 ± 20 mm, y los niveles de sustitución con LS fueron 0%, 12% y 18%. A los 28 días, las resistencias a compresión fueron similares (36.0, 34.5 y 35.2 MPa). A los 360 días, ambos concretos con LS mostraron reducciones de resistencia de hasta 8%.

Dhir et al. (2007) estudiaron combinaciones de cemento que incluían un cemento Portland (PC) de referencia al 100% (0% LS), 85% PC–15% LS (rango Tipo II/A-L), 75% PC–25% LS, 65% PC–35% LS (rango Tipo II/B-L) y 55% PC–45% LS. Los agregados fueron granito triturado (20–10 mm y 10–5 mm) y arena natural. Los concretos con PC se proporcionaron para lograr contenidos de cemento entre 235 y 410 kg/m³ en incrementos de 40–50 kg/m³, con un contenido de agua fijo de 185 L/m³ (w/c = 0.45–0.79) y un revenimiento de 75 mm. El contenido de agregado grueso se mantuvo fijo en 800 y 400 kg/m³, mientras que el agregado fino se ajustó para mantener el rendimiento. Se utilizó un aditivo inclusor de aire para alcanzar 5.0 ± 0.5% de aire. Las relaciones agua/cemento evaluadas fueron 0.46, 0.54, 0.62, 0.67 y 0.79. La mezcla de referencia con 0% LS presentó la mayor resistencia a todas las edades y para todas las relaciones w/c.

Pourkhorshidi et al. (2008) estudiaron el diseño y las proporciones de mezcla del concreto con OPC y del concreto con PLC usando dos categorías de cemento: cemento Portland Tipo II según ASTM

y PLC Tipo II/A-LL. La resistencia a compresión se midió usando cubos de concreto de 150 mm, y los especímenes se ensayaron después de 7, 28 y 90 días de curado. Los especímenes con PLC tenían 14% de LS. El revenimiento varió de 55 a 75 mm, las densidades de 2,295 a 2,330 kg/m³, y el contenido de aire de 2.6 a 2.8%. La relación agua/cemento varió de 0.35 a 0.55. El contenido de cemento fue 350 kg/m³, con agregados finos a 960 kg/m³ y agregados gruesos a 850 kg/m³. La mezcla con PLC y una relación a/c de 0.35 tuvo mayor resistencia a compresión que la mezcla de referencia con 0.45; el resto de las mezclas (PLC con relaciones a/c de 0.45 y 0.55) presentaron menor resistencia a todas las edades.

Thomas et al. (2010) reportaron resultados de campo de Quebec, Alberta y Nueva Escocia. Dado que todos los cementos utilizados en Nueva Escocia incorporaban SCM, no se realizó análisis para esa ubicación. Solo se discuten los resultados de las mezclas de referencia—incluyendo aquellas que contenían una pequeña cantidad de LS y el cemento GUL— (los cementos con SCM no se incluyen en el análisis). El contenido total de materiales cementantes para todas las mezclas fue de 355 kg/m³, y la relación w/cm varió de 0.44 a 0.45. Esto corresponde aproximadamente a 91–92% de clinker para la mezcla de control producida con PC y sin SCM (el PC contiene alrededor de 3–4% de LS y 5% de yeso). El cemento Tipo GU usado en Quebec y Alberta contiene 3–4% de LS y 91% de clinker, mientras que el cemento Tipo GUL usado en las mismas regiones contiene 12% de LS y 83% de clinker. Para Quebec, el cemento GU tenía una finura Blaine de 373 m²/kg y el GUL de 453 m²/kg. Para Alberta, el GU tenía una finura Blaine de 399 m²/kg y el GUL de 510 m²/kg. Los resultados en el sitio de Quebec mostraron que el PLC tuvo una resistencia mayor que el PC a los 3, 7 y 28 días, mientras que la mezcla basada en PC tuvo la mayor resistencia y superó a la mezcla con PLC a los 56 días. Para los datos de campo en Alberta, el GUL-0 tuvo un mejor desempeño a todas las edades en comparación con el GU-0.

De Weerd et al. (2011) investigaron cementos compuestos en los que el polvo de LS se molió por separado. El clinker molido conjuntamente con 3.7% de yeso en masa se denomina OPC. La matriz experimental consistió en una mezcla de referencia: 100% OPC (mezcla 1), y posteriormente, el OPC se sustituyó gradualmente por polvo de LS en incrementos de 5% hasta llegar a 35% (mezclas 2–8). Para cada edad de ensayo y combinación de materiales, se prepararon tres prismas de mortero (40×40×160 mm). Además, se produjeron pastas de cemento correspondientes con una relación agua/agente cementante de 0.5 para todas las mezclas, utilizando un mezclador al vacío Renfert. La hidratación de las muestras se detuvo a los 1, 28, 90 y 140 días. Los resultados mostraron que la resistencia a compresión de los cementos con LS disminuyó con el incremento en la sustitución de polvo de LS a todas las edades, de 1 a 140 días. La mayor ganancia de resistencia a compresión ocurrió durante los primeros 28 días de curado. La resistencia a compresión no pareció cambiar significativamente después de 28 y 90 días de curado, respectivamente.

Sezer (2012) investigó el efecto de la microsílíce y el LS en la resistencia a compresión de morteros. Se prepararon mezclas de mortero que contenían LS al 5%, 20% y 35% en peso del cemento, utilizando cemento Portland normal tipo CEM I 42.5. El área superficial Blaine del LS fue de 420 m²/kg. Las resistencias a compresión se midieron a los 2, 7, 28, 90 y 180 días. Para los ensayos, se produjeron especímenes de mortero en cubos de 50×50×50 mm usando 450 g de cemento, 1,350 g de arena estándar y una relación agua/agente cementante de 0.5. Solo se analizan los resultados que comparan la mezcla de referencia con las mezclas de cemento + LS. En comparación con la mezcla de control, la inclusión de LS redujo la resistencia a compresión a todas las edades (2–180 días), y las reducciones aumentaron conforme aumentó el contenido de LS.

Chen et al. (2012) investigaron el efecto de agregar un filler de LS finamente molido (LF) como sustitución de la pasta de cemento (no sustitución de cemento) en concreto de alta fluidez (con revenimientos entre 205 mm y 275 mm), manteniendo constante la relación a/c. El estudio utilizó OPC y exploró un amplio rango de diseños de mezcla con relaciones a/c entre 0.35 y 0.60, ajustadas en pequeños incrementos. El filler de LS se incorporó en diferentes volúmenes según la relación a/c. Para mezclas con relaciones a/c bajas, el volumen de LF se limitó para evitar mezclas demasiado secas, mientras que a relaciones agua/cemento mayores se evaluaron niveles adicionales

de LF. En todas las mezclas, el volumen total de pasta (pasta de cemento + LF) se mantuvo constante en 34%, lo que significa que agregar LF reducía directamente el volumen de pasta de cemento, pero no cambiaba la relación a/c. Los contenidos de agregados también se mantuvieron constantes, y se añadió un superplastificante de manera incremental para garantizar la alta fluidez en cada mezcla. Las resistencias a compresión se evaluaron a edades tempranas y posteriores. Los resultados mostraron consistentemente que la adición de filler de LS incrementó tanto la resistencia a 7 días como a 28 días, a pesar de la relación a/c constante. En general, mayores volúmenes de LF produjeron mayores resistencias bajo la misma condición de a/c. En algunos casos, agregar un volumen moderado de LF resultó en incrementos de resistencia de alrededor de 7–11%, mientras que aumentos mayores de LF generaron incrementos de aproximadamente 14% hasta más de 22%, dependiendo de las proporciones de cemento y agua.

Neithalath y Cam (2012) examinaron cómo la sustitución de una parte del cemento por polvo de LS grueso afecta las propiedades mecánicas, manteniendo constante la relación agua/polvo. Sus mezclas utilizaron un contenido base de cemento de aproximadamente 400 kg/m³, y el cemento fue reemplazado en masa por polvo de LS en niveles de 10% y 20%, junto con una mezcla de referencia sin sustitución. Todas las mezclas se proporcionaron con una relación agua/polvo fija de 0.40, asegurando que los cambios en el desempeño pudieran atribuirse únicamente a las sustituciones de LS y no a la disponibilidad de agua. Para evaluar el comportamiento mecánico, se coló concreto en especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. El estudio monitoreó el desarrollo de la resistencia a compresión durante un periodo de 90 días tanto para el concreto de referencia como para los concretos modificados con LS. Los resultados mostraron una tendencia clara: debido a que el polvo de LS grueso actúa principalmente como un filler inerte, su incorporación redujo la resistencia a compresión en comparación con el concreto sin LS bajo la misma relación agua/polvo. Esta reducción se observó de manera consistente en todas las edades evaluadas. La mezcla de referencia presentó la mayor resistencia en cada edad de hidratación, mientras que las mezclas con 10% y 20% de LS mostraron resistencias progresivamente menores, con la sustitución más alta produciendo la mayor reducción.

Githachuri y Alexander (2013) investigaron el desempeño de un cemento Portland–LS (PLC) producido comercialmente en comparación con un cemento Portland convencional (OPC), enfocándose en la resistencia a compresión para dos contenidos de aglomerante y dos relaciones agua/agente cementante (a/b). Se prepararon diez mezclas de concreto con a/b = 0.40 y a/b = 0.55. El aglomerante de referencia fue un OPC CEM I 42.5N obtenido en la región de Ciudad del Cabo. El aglomerante PLC fue un CEM II A-L 32.5R que contiene 20% de filler de LS molido conjuntamente con el clínker. Todas las mezclas utilizaron los mismos agregados: tillita de 19 mm como agregado grueso y una combinación de arena de río con 10% de arena de banco como agregado fino. Para controlar la trabajabilidad y aislar el efecto del tipo de cemento, las mezclas se proporcionaron con un contenido de agua fijo de 165 L/m³, lo que resultó en contenidos totales de aglomerante de 412 kg/m³ para a/b = 0.40 y de 300 kg/m³ para a/b = 0.55. El contenido de agregado grueso también se mantuvo constante en 1,070 kg/m³, y se utilizó un superplastificante policarboxilato para mantener el revenimiento en el rango de 65–95 mm. En ambas relaciones agua/agente cementante, las mezclas de referencia con OPC mostraron mayores resistencias a compresión a 28 y 91 días en comparación con sus contrapartes con PLC.

Diab et al. (2016) evaluaron el desempeño mecánico de mezclas de concreto que incorporaban polvo de LS como sustitución parcial del cemento. Se produjeron veintiuna mezclas utilizando cemento Portland Tipo I y polvo de LS, con niveles de reemplazo que variaron de 0% a 25%. Todas las mezclas se proporcionaron con un contenido de cemento de 400 kg/m³ y una relación agua/agente cementante fija de 0.45. La resistencia a compresión se midió a los 3, 7, 28 y 365 días utilizando cubos de concreto de 150 mm. Los resultados mostraron que aumentar el contenido de polvo de LS generalmente condujo a una disminución en la resistencia a compresión. Sin embargo, esta reducción fue mínima hasta aproximadamente 10% de reemplazo, lo que indica que niveles

bajos de adición de LS tuvieron solo un efecto menor en el desempeño mecánico. Más allá del 10%, la pérdida de resistencia se volvió más evidente, y las mezclas con mayores contenidos de LS presentaron reducciones más pronunciadas en la resistencia a todas las edades.

Ahmad et al. (2022) investigaron el efecto de la finura del polvo de LS y del nivel de reemplazo en la resistencia a compresión del concreto. El estudio utilizó cemento Portland Tipo I con una finura Blaine de $3,523 \text{ cm}^2/\text{g}$, junto con polvos de LS incorporados al 10%, 15% y 20% en masa del cemento. Se evaluaron tres niveles de finura del LS en relación con el cemento: fino ($3,845 \text{ cm}^2/\text{g}$), intermedio ($3,215 \text{ cm}^2/\text{g}$) y grueso ($2,648 \text{ cm}^2/\text{g}$). Todas las mezclas mantuvieron proporciones consistentes, incluyendo un contenido de aglomerante de aproximadamente $490 \text{ kg}/\text{m}^3$, $645 \text{ kg}/\text{m}^3$ de agregado fino, $1,151 \text{ kg}/\text{m}^3$ de agregado grueso, $164 \text{ kg}/\text{m}^3$ de agua y 0.6% de superplastificante policarboxilato, con una relación a/c fija de 0.33. La resistencia a compresión se midió a los 1, 3, 7 y 28 días. Los resultados mostraron que la resistencia a compresión disminuyó al aumentar el nivel de reemplazo con LS en todas las edades dentro de cada categoría de finura.

Méndez-Páramo (2024) evaluó el efecto del contenido de relleno calizo (LS) en la resistencia a compresión de mezclas de mortero elaboradas con cemento portland compuesto (PLC) que contenía entre 3% y 35% de LS. Se fabricaron cubos de mortero de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}$ utilizando cementos comerciales disponibles en México. El contenido de LS se determinó de manera indirecta mediante el procedimiento estandarizado de pérdida por ignición (LOI%) (ONNCCE, 2017), empleando una relación previamente establecida entre el contenido de LS y el LOI%: $\text{LS\%} = 2 \cdot \text{LOI\%}$ (Méndez-Páramo, 2024). Los cubos fueron moldeados y curados en agua saturada con cal durante 28 o 90 días. Dos conjuntos de cubos curados durante 28 días fueron posteriormente expuestos, por hasta un año, a condiciones urbanas naturales y sin resguardo en la ciudad de Querétaro, México. Los resultados mostraron que la resistencia a compresión de los morteros a 28 y 90 días fue inversamente proporcional al contenido de LS en el PLC. Los cubos expuestos al ambiente urbano sin resguardo desarrollaron fisuras superficiales y presentaron resistencias a compresión aún más bajas—reducciones superiores al 25% en comparación con sus valores a 28 y 90 días. Este comportamiento fue inesperado y respalda la hipótesis de que reacciones químicas con CO_2 o SO_3 pudieron haber generado microfisuración superficial, afectando así el desempeño mecánico a largo plazo del material.

5. EFECTO DE LA POROSIDAD DEL MATERIAL

La porosidad es un parámetro crítico para evaluar el desarrollo microestructural y la durabilidad a largo plazo de los sistemas con PLC. Sin embargo, su evaluación en distintos estudios (Courard et al., 2005; Matschei et al., 2007; Palm et al., 2016; Bharadwaj et al., 2022; Steiner et al., 2022) se ha realizado utilizando una amplia variedad de técnicas experimentales, tipos de muestra y enfoques analíticos, lo que genera heterogeneidad en la interpretación de los datos. Esta sección sintetiza los datos históricos de fuentes seleccionadas y clasifica las investigaciones según el tipo de porosidad, el método de ensayo y la influencia de parámetros composicionales, incluyendo el reemplazo de LS, el contenido de alúmina y la relación a/c.

Courard et al. (2005) analizaron especímenes de mortero con diferentes niveles de reemplazo de LS (0–27%) mediante ensayos de absorción de agua, los cuales reflejan de manera indirecta la porosidad total, pero son sensibles a la conectividad de los poros y al refinamiento capilar. Se prepararon dos series de muestras, denominadas P y L, con una relación agua-aglomerante constante de 0.45. Mientras que los morteros tipo P contenían únicamente reemplazos con LS, los morteros tipo L incluían además escoria como SCM. Aunque la duración del curado no fue reportada, se asume que corresponde a 28 días. Los resultados indican que la porosidad aumenta conforme incrementa el reemplazo de LS, aunque la tasa de incremento se estabiliza por encima del 15%.

Matschei et al. (2007) presentaron tendencias de porosidad en pastas de cemento como parte de un marco de modelación, enfocándose en la evolución termodinámica de las fases hidratadas en

sistemas con LS. La porosidad total calculada disminuyó a medida que el contenido de LS aumentó hasta alrededor del 2% en peso, pero más allá de ese punto aumentó linealmente con mayores adiciones de LS. Esta tendencia no especifica el contenido de fases del clinker, lo cual puede afectar la evolución de los productos de hidratación, el contenido de yeso y la relación a/c.

En su estudio de 2016, Palm et al. evaluaron la porosidad en morteros derivados de mezclas de concreto después de eliminar las partículas gruesas mayores de 2 mm—aproximadamente 51% en volumen del material. La porosidad total se estimó a partir del contenido de agua evaporable utilizando una relación extrapolada del modelo de Powers y Brownyard (Crundwell et al., 2019). El agua en exceso—definida como 0.27 veces el contenido de clinker—se graficó contra la porosidad total medida, obteniendo una relación lineal. En general, morteros con mayor contenido de LS mostraron mayor porosidad. Aunque el estudio se centró únicamente en morteros, vincula el desarrollo de la porosidad con el contenido de agua efectiva y el progreso de la hidratación, ofreciendo una evaluación indirecta basada en modelos influenciada por la cinética de hidratación asumida y la evolución de la porosidad en el tiempo.

Bharadwaj et al. (2022) realizaron un análisis paramétrico de pastas de cemento con diferentes niveles de LS y alúmina. La porosidad se estimó mediante modelación termodinámica e inferida del volumen de productos de hidratación. La relación reportada entre porosidad y contenido de LS fue similar a la descrita por Matschei et al. (2007). Los autores graficaron la porosidad en sistemas con 0, 2.5, 5 y 7.5% de alúmina frente a niveles variables de LS. Los resultados mostraron que el punto de mínima porosidad se desplaza hacia mayores contenidos de LS conforme aumenta la alúmina, y que la porosidad mínima disminuye. La porosidad más baja predicha fue de 28%, ocurriendo a 4% de LS y 7.5% de alúmina, lo que corresponde a un equilibrio óptimo que favoreció la formación de fases carboaluminato y etringita que rellenan espacio (ocupando ~28% y 8.5% del volumen total, respectivamente). Cuando la alúmina supera 7.5%, la porosidad aumenta debido al agotamiento de sulfatos, lo cual limita la formación de etringita y promueve en su lugar la formación de monosulfato. En el rango $7.5\% < \text{Al}_2\text{O}_3 < 9\%$ y $4\% < \text{LS} < 10\%$, este cambio reduce las fases que rellenan espacio. A niveles de alúmina $> 9\%$, el hidróxido de calcio se agota y se forma esträtlingita en lugar de monocarbatos. Bajo estas condiciones, la porosidad mínima predicha disminuye aún más hasta 26%, ocurriendo a 10% de caliza y 30% de alúmina. Más allá del contenido crítico de LS, la porosidad aumenta para todos los niveles de alúmina debido a efectos de dilución. Así, la porosidad aumenta cuando los sulfatos se vuelven limitantes o cuando dominan los efectos de dilución. El estudio presenta un mapa de porosidad predicha a través de un espacio composicional multidimensional, mostrando los efectos del equilibrio de fases sobre la microestructura. Sin embargo, la ausencia de validación experimental directa limita su aplicabilidad para comparaciones con indicadores físicos de durabilidad.

Steiner et al. (2022) realizaron una evaluación de porosidad mediante múltiples técnicas en especímenes de concreto utilizando picnometría de gas (desplazamiento de He) y porosimetría por intrusión de mercurio (MIP). El picnómetro de gas permitió determinar el volumen verdadero y la densidad verdadera (ρ_T), que representan la relación masa/volumen de la fase sólida, excluyendo los vacíos intragranulares. El volumen aparente y la densidad aparente (ρ_B) se midieron con un dispositivo GeoPyc 1360. La porosidad efectiva se calculó como función de ρ_T y ρ_B y se considera comparable a la porosidad accesible al agua. La distribución de tamaños de poro se obtuvo usando la ecuación de Washburn (Crundwell et al., 2019) bajo un modelo de poros cilíndricos. Este enfoque capturó tanto la porosidad total como la efectiva con alta resolución a lo largo de un amplio rango de diámetros de poro. Los resultados indican que, para una relación agua/agente cementante dada, mayores contenidos de LS conducen a una mayor porosidad en el concreto, como ya se había observado en estudios previos. Sin embargo, el uso de especímenes de concreto (cubos con diagonal de 3 cm) introduce variabilidad espacial debido a los agregados gruesos, lo que puede ocultar tendencias específicas de la matriz cementante a menos que se analicen submuestras libres de agregados. En la literatura, surgen discrepancias según el tipo de porosidad evaluada —total,

efectiva o capilar— y los métodos utilizados, que incluyen absorción de agua, picnometría de gas, porosimetría por intrusión de mercurio y modelación termodinámica. El análisis comparativo se complica aún más por variaciones en los tipos de muestras (pasta de cemento, mortero, concreto), relaciones a/c, niveles de reemplazo de LS y la falta de duraciones de curado estandarizadas. Además, pocos estudios monitorean la evolución de la porosidad a lo largo del tiempo, lo que limita el entendimiento de la dinámica entre edades tempranas y edades avanzadas. Dada esta variabilidad, la comparación directa entre conjuntos de datos no es viable sin procedimientos de normalización. En general, en la literatura surgen discrepancias debido al tipo de porosidad evaluada—total, efectiva o capilar—y a los enfoques metodológicos empleados, que van desde absorción de agua, picnometría de gas y MIP, hasta modelación termodinámica. El análisis comparativo se complica aún más por variaciones en los tipos de muestra (pasta, mortero, concreto), las relaciones a/c, los niveles de reemplazo de LS y la falta de estandarización en las duraciones de curado. Además, pocos estudios monitorean la evolución de la porosidad en el tiempo, lo que limita la comprensión de las dinámicas entre edades tempranas y largo plazo. Ante esta variabilidad, la comparación directa entre conjuntos de datos no es viable sin procedimientos de normalización.

Méndez-Páramo (2024) presenta resultados experimentales de morteros de cemento Pórtland en los que se utilizaron rellenos inertes de caliza para reemplazar entre el 20% y el 40% del clinker. Los resultados incluyen el desempeño mecánico (resistencia a compresión), físico (resistividad eléctrica, contenido total de vacíos, porosidad capilar) y químico (carbonatación bajo exposición natural) de estos morteros a diferentes edades, hasta un año. Los hallazgos experimentales muestran que la adición de entre 15% y 35% de relleno calizo inerte incrementó la resistividad eléctrica saturada y disminuyó la velocidad del pulso ultrasónico. Estas técnicas determinan indirectamente la porosidad de materiales a base de cemento, y ambas corroboran que un mayor contenido de relleno calizo en el cemento incrementa la porosidad de las mezclas de mortero evaluadas.

6. EFECTO EN EL INGRESO DE CLORUROS EN EL MATERIAL

La penetración de cloruros es un indicador clave de durabilidad en sistemas de concreto reforzado, ya que se correlaciona directamente con el riesgo de iniciación de la corrosión en el acero embebido. La cuantificación del transporte de cloruros a través del concreto con PLC se ha abordado en la literatura mediante métodos tanto de difusión natural como de migración acelerada. La diversidad en las condiciones experimentales, protocolos de ensayo, procedimientos de curado y variables composicionales (por ejemplo, reemplazo de LS y relación a/c) contribuye a la heterogeneidad en los coeficientes de difusión reportados. Esta sección compila los datos más relevantes de la literatura, destacando las metodologías de ensayo, configuraciones de muestra y variables que afectan la penetración de cloruros en sistemas PLC. Los estudios revisados muestran una amplia variación en los esquemas experimentales, incluyendo:

- **Tipos de ensayo:** difusión aparente (ASTM C1556), migración acelerada (NT BUILD 492, métodos de diferencia de potencial) y montajes electroquímicos modificados.
- **Geometría de las muestras:** prismas de tamaño completo, núcleos o discos que varían entre 25 mm y 100 mm de espesor.
- **Métodos de curado:** húmedo, secado al aire y regímenes combinados, con duraciones poco consistentes entre estudios.
- **Edad al momento del ensayo:** desde edades tempranas (35 días) hasta exposiciones prolongadas (1 año), introduciendo variabilidad en la madurez del cementante y en el desarrollo de la estructura porosa.
- **Reemplazo de caliza:** a menudo variable, lo cual limita correlaciones directas con el comportamiento de transporte de cloruros.

La falta de armonización en los procedimientos experimentales, en el reporte de los detalles de la composición y en los datos dependientes del tiempo dificulta el establecimiento de tendencias

generalizadas sobre el desempeño del PLC. A pesar de la variedad de aproximaciones experimentales, las tendencias consistentes indican que el incremento del contenido de LS en el cemento generalmente conduce a mayores coeficientes aparentes de difusión de cloruros, particularmente en relaciones a/c elevadas (Irassar et al., 2001). Sin embargo, la interpretación de los efectos del cementante suele verse afectada por variaciones en la metodología de ensayo, duración de la exposición, procedimientos de pre-acondicionamiento y perfiles internos de humedad. Las diferencias entre métodos de difusión en estado estable y no estable, entre regímenes de exposición acelerada y natural, y en la geometría de las muestras complican aún más las comparaciones directas entre estudios. Para avanzar en la comprensión del transporte de cloruros en sistemas PLC, la investigación futura debería enfocarse en estandarizar los protocolos de prueba e incluir datos de exposición a largo plazo que reflejen mejor las condiciones de servicio.

Irassar et al. (2001) investigaron la penetración de cloruros en concretos con diversos niveles de reemplazo de LS (0%, 10% y 20%) y tres relaciones a/c (0.4, 0.5 y 0.6). Se moldearon prismas de concreto de 100×150×530 mm, los cuales se curaron en sus moldes durante 24 horas. Tras el desmolde, los especímenes fueron sometidos a curado húmedo (6 días en agua saturada con cal seguidos de 21 días en ambiente de laboratorio) o curado al aire (27 días en ambiente de laboratorio). A los 28 días, todas las superficies se sellaron con epoxi excepto una cara perpendicular a la dirección de colado, y los prismas se saturaron en agua durante 24 horas antes de la inmersión en una solución de NaCl al 3%. Después de 180 y 360 días de exposición, se cortó una sección de 70 mm desde la parte superior de cada prisma; los especímenes restantes se volvieron a sellar con epoxi y la inmersión continuó para mediciones posteriores. Se recolectaron muestras de polvo a intervalos de 5 mm mediante un taladro para determinar el contenido total de cloruros. Los autores determinaron el cloruro superficial y los coeficientes aparentes de difusión ajustando los datos experimentales a un modelo de regresión no lineal usando la función error. Los resultados indicaron que un mayor reemplazo de LS conduce a coeficientes aparentes de difusión de cloruros más altos.

Thomas y Hooton (2010) realizaron un estudio similar con resultados menos concluyentes; sin embargo, los datos se obtuvieron después de solo 35 días de inmersión.

Dhir et al. (2007) investigaron la difusión de cloruros en secciones de concreto (con relaciones a/c entre 0.45 y 0.65) utilizando una técnica acelerada en una celda de dos compartimentos, aplicando un gradiente de concentración de cloruros y un potencial eléctrico de 7.5 V a través del conjunto. Los niveles de reemplazo con LS evaluados fueron 0%, 15%, 25%, 35% y 45%. Los resultados mostraron que los coeficientes de difusión de cloruros aumentaron con niveles más altos de LS, particularmente por encima de 25%. Este efecto se amplificó en concretos con relaciones a/c más elevadas.

Cam y Neithalath (2010) realizaron un ensayo de migración en estado no estacionario de acuerdo con NT BUILD 492 (Nordtest, 1999) para mezclas de concreto con diferentes relaciones a/c (0.34, 0.37 y 0.40) y niveles de reemplazo con LS (10% y 15%). Los especímenes de concreto, de 50 mm de espesor, se saturaron primero con una solución de hidróxido de calcio al 2% y luego se colocaron en una celda de ensayo que contenía 2 N de NaCl en la cámara catódica y 0.3 N de NaOH en la cámara anódica. El voltaje aplicado se determinó a partir de la respuesta inicial de corriente cuando se impuso un potencial de 30 V entre los electrodos. Este potencial eléctrico impulsó la migración de iones cloruro desde la celda hacia el espécimen. Después de las 24 horas de ensayo, cada espécimen se partió axialmente y las superficies expuestas se rociaron con una solución de nitrato de plata 0.1 N para revelar la profundidad de penetración de cloruros. El coeficiente de difusión de cloruros aumentó al incorporar polvo de LS en la mezcla de concreto, aunque el incremento fue ligeramente menor para tiempos de curado más largos (56 días frente a 28 días). La sustitución de 15% de clínker con LS y la adición de 5% de microsílíce en una mezcla con baja relación a/c de 0.34 resultó en un coeficiente de difusión de cloruros similar al de una mezcla OPC con la misma a/c. Esto sugiere que optimizar la relación a/c e incorporar SCM al PLC puede mitigar los efectos

adversos asociados con el uso de LS por sí solo.

Meddah et al. (2014) midieron la penetración de cloruros en secciones de concreto (100 mm de diámetro, 25 mm de espesor) extraídas de cilindros de 150×300 mm. Las variables evaluadas fueron las mismas que en Dhir et al. (2007). Los especímenes se sometieron a dos regímenes de curado—húmedo y aire seco—durante los primeros 28 días, y se reportaron los resultados de ambas condiciones. Cada sección se colocó en una celda de difusión estándar de dos compartimentos, con la cámara interna llena con una solución de hidróxido de calcio y la cara externa expuesta a una solución de cloruros mediante inmersión parcial. El ensayo electroquímico aplicó un potencial de 7.5 V a través de la muestra para impulsar la migración de cloruros. El transporte de cloruros se monitoreó mediante análisis periódicos de los líquidos en ambos compartimentos, y el coeficiente de difusión se calculó usando la primera ley de Fick. Para cualquier relación a/c dada, los concretos con mayor reemplazo de LS mostraron coeficientes de difusión notablemente más altos que las mezclas CPO, demostrando que incrementar el contenido de LS reduce la resistencia a la difusión de cloruros.

Celik et al. (2015) evaluaron la resistencia a la penetración de cloruros de muestras de concreto de un año de edad usando el método de migración no estacionaria de NT BUILD 492 (Nordtest, 1999). Secciones cilíndricas (100×200 mm) se cortaron en discos de 50±2 mm y se almacenaron en cámara de niebla hasta el ensayo. Además de mezclas CPO con 0%, 15% y 25% de LS, también se probaron mezclas binarias y ternarias con MCS. Antes del ensayo, las muestras se sometieron a vacío en una solución saturada de hidróxido de calcio y luego se colocaron entre un catolito (10% NaCl) y un anolito (0.3 N NaOH). Se aplicó un potencial eléctrico de 30 V durante 24 horas. Tras el ensayo, cada muestra se partió axialmente y se roció una solución de nitrato de plata 0.1 M para identificar zonas contaminadas por cloruros. El coeficiente de migración para mezclas con 25% de LS fue aproximadamente el doble que el de CPO. Este efecto se redujo sustancialmente en las mezclas binarias y ternarias.

Palm et al. (2016) realizaron ensayos acelerados de migración de cloruros conforme a las guías BAW-Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (Bundesanstalt für Wasserbau, 2012) en mezclas de concreto con relaciones a/c de 0.35, 0.45 y 0.50 a los 35 y 98 días. Se utilizaron especímenes en forma de discos de 100×50 mm, con 0.2 N KOH como anolito y 0.2 N KOH con 10% NaCl como catolito. Se observó que las mezclas con rellenos de LS (dos tipos) exhiben una amplia variabilidad. Algunas combinaciones mostraron un desempeño considerablemente peor, especialmente a los 35 días, mientras que otras se aproximaron al desempeño de la mezcla control, indicando que el tipo y la proporción de LS tienen un impacto notable en la resistencia temprana a los cloruros. Los coeficientes más altos se presentaron en mezclas con alto contenido de LS y a/c de 0.5, mientras que los más bajos se observaron en mezclas con a/c de 0.35 a 98 días, resaltando que tanto el diseño de mezcla como la edad son factores clave para limitar la penetración de cloruros.

Da Silva y De Brito (2016) determinaron el coeficiente de difusión de cloruros siguiendo el procedimiento establecido en NT BUILD 492 (Nordtest, 1999). Para cada mezcla (con contenidos de LS del 0%, 30%, 60% y 70%) y cada edad evaluada (28, 91 y 182 días), se prepararon tres especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor. Tras un curado húmedo a 20±2 °C y una humedad relativa superior al 95%, los especímenes fueron preacondicionados bajo vacío y posteriormente sumergidos en una solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) preparada con agua destilada. Los resultados muestran que el coeficiente de migración de cloruros aumenta significativamente a medida que se incrementa el contenido de LS, aunque este efecto se atenúa a los 182 días. Las mezclas de LS y ceniza volante, con niveles combinados de reemplazo del 30% y 60%, presentan coeficientes de migración comparables a los de la mezcla OPC, especialmente a edades de 91 y 182 días.

Elgalhud et al. (2022) analizaron la penetración de cloruros en concreto PLC usando un amplio conjunto de datos internacionales. Los autores reportaron que la penetración de cloruros aumenta con el contenido de LS, aunque el efecto es menor cuando las mezclas PLC se proporcionan para

igualar la resistencia de concretos CPO equivalentes en lugar de usar la misma relación a/c. Los hallazgos sugieren que los requisitos europeos de durabilidad para exposición a cloruros podrían necesitar ser reconsiderados cuando se incorpora LS al cemento Portland.

7. EFECTO EN LA CARBONATACION DEL MATERIAL

La carbonatación es un mecanismo crítico de deterioro en el concreto reforzado, particularmente en sistemas PLC, donde un mayor contenido de LS puede modificar la microestructura, reducir la capacidad amortiguadora de pH e influir en la profundidad de carbonatación. La magnitud de la carbonatación depende de varios factores, incluidos el tipo de cemento, las condiciones de curado, la relación a/c, la porosidad y las condiciones ambientales (concentración de CO₂, humedad relativa y temperatura). Esta sección revisa los estudios clave de carbonatación en concretos y morteros PLC, identificando diferencias en las condiciones de ensayo y configuraciones experimentales que afectan la comparabilidad y la interpretación. Los estudios revisados presentan una heterogeneidad considerable en sus configuraciones experimentales, incluyendo:

- Concentración de CO₂: desde condiciones naturales (0.035%) hasta altamente aceleradas (hasta 20%), afectando el avance del frente de carbonatación y la comparabilidad entre estudios.
- Humedad relativa: generalmente mantenida entre 55–65%, aunque existen variaciones que alteran el equilibrio difusión–reacción.
- Tipos y tamaños de muestra: desde pequeños especímenes de mortero hasta prismas grandes y celdas de difusión, lo que influye en los gradientes de humedad y la cinética de carbonatación.
- Protocolos de pre-acondicionamiento: los periodos de secado y las estrategias de sellado varían ampliamente, afectando la microestructura superficial y el realismo del ensayo.
- Duración de exposición: desde 28 días hasta exposiciones naturales de varios años, reflejando tanto la cinética a corto plazo como el comportamiento de durabilidad a largo plazo.

A pesar de la diversidad de enfoques, los resultados coinciden en que la profundidad de carbonatación generalmente aumenta con mayores contenidos 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 bajo curado insuficiente o elevada porosidad. Sin embargo, el efecto de la relación a/c, la calidad del curado y la configuración del ensayo suele superar el impacto de la composición del aglomerante en la determinación de la resistencia a la carbonatación. Las investigaciones futuras deberían buscar la armonización de los protocolos de ensayo y ampliar las duraciones de exposición para simular mejor las condiciones en servicio y permitir comparaciones confiables entre tipos de aglomerantes.

Dhir et al. (2007) llevaron a cabo dos series de ensayos de carbonatación: (i) muestras de concreto expuestas a carbonatación natural mediante el método EN 12390-10:2018 (almacenamiento en un ambiente con 0.035% de CO₂ durante 365 días a 20°C y 65% HR) y (ii) cubos de 100 mm expuestos a carbonatación acelerada (almacenamiento en una atmósfera con 4% CO₂ durante 20 semanas a 20°C y 65% HR). El reemplazo de LS varió entre 15% y 45%. Independientemente de la relación a/c, los especímenes expuestos a carbonatación natural mostraron un aumento en la profundidad de carbonatación conforme aumentó el contenido de LS, efecto que se amplificó a valores elevados de a/c. Se observaron resultados similares en los especímenes expuestos al régimen acelerado.

Meddah et al. (2014) realizaron ensayos acelerados de carbonatación en cubos de concreto de 100 mm que fueron curados en húmedo durante los primeros 28 días. Posteriormente, los especímenes se pre-acondicionaron mediante secado en laboratorio durante 14 días. Antes del ensayo en la cámara de carbonatación, todas las caras de los especímenes se sellaron con pintura bituminosa, excepto la cara superior, que quedó expuesta a una atmósfera con 4% de CO₂ a 20°C y 55% HR.

Después de 20 semanas de exposición, las profundidades de carbonatación fueron mayores en los especímenes con mayores niveles de reemplazo con LS (10–45%). El efecto fue más pronunciado en las muestras con una relación agua-aglomerante de 0.65 que en las correspondientes a 0.5.

Bucher et al. (2016) realizaron ensayos acelerados de carbonatación en muestras prismáticas de concreto con diferentes contenidos de LS (0%, 15%, 20% y 25%) después de 28 y 365 días de curado. Entre el final del curado y el inicio del ensayo, las muestras se almacenaron durante 14 días en una atmósfera con $50 \pm 5\%$ HR a 20°C . La carbonatación acelerada se efectuó en una cámara a 20°C , 55% HR y una concentración de CO_2 de $4 \pm 0.5\%$. Las profundidades de carbonatación se midieron a los 56, 63 y 70 días mediante aspersión de fenolftaleína. Un conjunto adicional de especímenes se expuso a carbonatación natural después de 28 días de curado, almacenándose en exteriores, donde la temperatura media en Toulouse varió entre 8 y 18°C y la HR promedio fue de 75%. La profundidad de carbonatación se midió después de 1 y 2 años.

Los resultados de carbonatación acelerada muestran que la incorporación de LS incrementa consistentemente la profundidad de carbonatación, con una magnitud dependiente del nivel de reemplazo y del tipo de aglomerante (CEM I o mezclas CEM II). En sistemas CEM I, la resistencia a la carbonatación disminuye progresivamente conforme aumenta la LS, con una pérdida pronunciada de desempeño a dosificaciones elevadas ($> 20\%$), donde las profundidades de carbonatación más que se duplican respecto al control rico en clínker— incluso después de 365 días de curado. Aunque el curado prolongado reduce significativamente la profundidad de carbonatación en todas las mezclas, no elimina la brecha de desempeño generada por la LS. En mezclas CEM II, la influencia de la LS es más matizada: los sistemas con escoria muestran cambios menores, mientras que las formulaciones con ceniza volante son altamente susceptibles, y la LS agrava aún más sus ya elevadas profundidades de carbonatación. De modo consistente, los especímenes sometidos a carbonatación natural mostraron mayores profundidades con el incremento del contenido de LS en mezclas CEM I, con una tendencia más acusada a medida que se eleva el nivel de reemplazo. En contraste, las mezclas CEM II exhibieron incrementos modestos, lo que indica una menor sensibilidad a la incorporación de LS.

Palm et al. (2016) expusieron prismas de concreto de $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ a un ambiente de carbonatación acelerada con 2% de CO_2 a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $65 \pm 5\%$ HR durante 28 días. Los autores también reportaron mayores profundidades de carbonatación en concretos con niveles más elevados de reemplazo con LS.

Steiner et al. (2022) emplearon un sistema de difusión de CO_2 compuesto por una celda cilíndrica sellada con un espécimen en forma de disco, colocada dentro de una cámara de carbonatación. La celda consiste en un cilindro acrílico ($h = 210 \text{ mm}$; $\varnothing = 100/94 \text{ mm}$; espesor de pared = 6 mm) en tres secciones. Su sección inferior, de 50 mm de altura, contiene una solución saturada de NH_4NO_3 para mantener una HR interna del 65%. Una vez sellada la muestra con cera, el conjunto se acondicionó a 20°C y 65% HR hasta el endurecimiento de la cera. Antes del ensayo, la celda se purgó con nitrógeno durante unos 10 segundos, reduciendo la concentración inicial de CO_2 a $\sim 0.08\%$. Luego se colocó en una cámara con 20% de CO_2 . La acumulación de CO_2 dentro de la celda ocurrió exclusivamente por difusión a través del espécimen. Se evaluaron reemplazos de LS de 20%, 40%, 50% y 60% en peso. Los resultados demostraron que mayores niveles de LS incrementan significativamente la difusividad de CO_2 y la profundidad de carbonatación, indicando una disminución de la resistencia a la carbonatación conforme aumenta el contenido de LS.

Méndez-Páramo (2024) incluyó en su programa experimental la evaluación de la resistencia a la carbonatación de mezclas de mortero elaboradas con PLC que contenían entre 4% y 35% de relleno calizo, expuestas durante un año a condiciones exteriores en Querétaro, México. Los resultados mostraron que un contenido de relleno calizo del 15% produjo aproximadamente 50% más carbonatación que un mortero con CPO, mientras que contenidos del 20% y 35% duplicaron y cuadruplicaron, respectivamente, la profundidad de carbonatación del mortero con CPO.

Más allá de los efectos de reducción del pH mencionados anteriormente, la incorporación de relleno de LS en materiales basados en cemento Portland induce mecanismos adicionales asociados a la

carbonatación que van más allá de la pérdida de alcalinidad (Torres-Acosta, 2024a, 2024b). En las primeras etapas de exposición, el CO₂ reacciona preferentemente con la portlandita (CH), formando carbonato de calcio y reduciendo el pH de la solución porosa; sin embargo, una vez que la CH se agota—fenómeno que ocurre antes en sistemas con alto contenido de LS debido a la menor fracción de clínker y mayor porosidad capilar—el frente de carbonatación alcanza el gel de silicato de calcio hidratado (CSH). La carbonatación del CSH produce una descalcificación progresiva, reduciendo su relación Ca/Si y generando geles ricos en sílice con baja capacidad cementante (Thiery et al., 2007; Chen et al., 2021). Esta transformación se asocia con la densificación estructural de los carbonatos formados y con el colapso de la nanoestructura del CSH, produciendo una contracción inducida por carbonatación (Houst & Wittmann, 2002; Sietta et al., 1995). A diferencia de la estabilidad volumétrica observada cuando solo carbonata CH, la carbonatación del CSH genera tensiones internas de tracción suficientes para iniciar microfisuración en la matriz cementosa incluso sin carga externa. Estas microfisuras, a su vez, aceleran el ingreso de CO₂ y vapor de agua, creando un ciclo de retroalimentación que acelera tanto la alteración química como el deterioro mecánico (Drouet et al., 2019; Suda et al., 2021).

En sistemas modificados con LS, este fenómeno puede ser más pronunciado debido a una combinación de consumo más rápido de CH, mayor nucleación de carbonato de calcio sobre superficies de calcita y una microestructura porosa modificada que facilita el transporte de CO₂. A altos contenidos de LS, el inicio más temprano de la carbonatación del CSH implica que la fisuración puede ocurrir antes y a profundidades menores respecto a matrices con cemento CPO (De Weerd et al., 2011). En consecuencia, aunque la reducción del pH y la despasivación del acero son los riesgos tradicionalmente destacados, las consecuencias mecánicas asociadas a la contracción por carbonatación y la descalcificación del CSH representan una vía de deterioro aún más severa. Este doble impacto—químico (pérdida de alcalinidad) y mecánico (fisuración por contracción)—es esencial para evaluar la durabilidad a largo plazo de sistemas cementosos con relleno de LS, especialmente bajo exposiciones elevadas de CO₂ o en estructuras con limitada capacidad de amortiguación de humedad (Torres-Acosta, 2024a, 2024b).

8. BRECHAS EN LA INVESTIGACIÓN

PLC ha sido estudiado extensamente durante casi 50 años por su potencial para reducir las emisiones de CO₂ mientras mantiene propiedades mecánicas y de durabilidad comparables a las del cemento Portland tradicional. Sin embargo, la investigación existente presenta varias limitaciones importantes:

- **Correlación limitada entre la porosidad y los indicadores de desempeño.** Aunque numerosos estudios han evaluado propiedades mecánicas (por ejemplo, resistencia a compresión, flexión y tensión) y propiedades relacionadas con el transporte (por ejemplo, resistividad, velocidad de pulso ultrasónico, permeabilidad rápida al cloruro, difusión y carbonatación), la relación entre la porosidad y estas métricas de desempeño aún no está suficientemente explorada. Comprender este vínculo es crucial para evaluar la durabilidad a largo plazo y optimizar los diseños de mezcla.
- **Inconsistencias en las líneas de tiempo y en los marcos experimentales de investigación.** La evolución de las propiedades mecánicas y de transporte del PLC suele evaluarse en periodos de tiempo variables, influenciados por diferencias en normas de ensayo y metodologías experimentales. Esta falta de uniformidad dificulta obtener conclusiones confiables a largo plazo y alcanzar consenso sobre el desempeño del PLC bajo diferentes condiciones.
- **Desempeño a largo plazo del PLC con distintos niveles de reemplazo de LS.** Muchos estudios se enfocan en el desarrollo de resistencia a edades tempranas, pero pocos examinan sistemáticamente los efectos a largo plazo (más allá de 28 días) de diferentes contenidos de

LS en el PLC. Se necesita una evaluación estructurada, de al menos un año, que cuantifique el impacto de los distintos niveles de reemplazo en la resistencia a compresión, las propiedades de transporte y la porosidad a lo largo del tiempo.

- **Validación de la sostenibilidad del PLC como alternativa ecológica.** Aunque el PLC se promueve ampliamente como un cemento sostenible debido a su menor contenido de clínker y su reducida huella de CO₂, su desempeño real a largo plazo en relación con su impacto ambiental sigue siendo una cuestión abierta. Se requiere una evaluación más integral que determine si el PLC realmente ofrece un equilibrio óptimo entre sostenibilidad, resistencia y durabilidad.
- **Transición de normas prescriptivas a normas basadas en desempeño.** Las normas actuales de cemento y concreto son principalmente prescriptivas, especificando composiciones de materiales en lugar de criterios basados en desempeño. Sin embargo, la industria se está moviendo gradualmente hacia normas basadas en desempeño, que requieren datos validados para respaldar su implementación. El desafío radica en cómo el PLC puede cumplir con estos estándares cuando aún falta información prescriptiva fundamental sobre su comportamiento. Sin una comprensión sólida de sus propiedades mecánicas, de durabilidad y de transporte, no está claro cómo calibrar de manera efectiva los criterios basados en desempeño para el PLC.
- **Falta de calibración sistemática del PLC en métodos de ensayo convencionales.** La calibración del PLC dentro de los métodos de prueba tradicionales sigue siendo en gran medida empírica, basada en ajustes por lotes o pruebas experimentales en lugar de un enfoque estructurado y basado en datos. Esta metodología de prueba y error introduce inconsistencias en la evaluación del desempeño del PLC en comparación con el cemento Portland tradicional. Se requiere una evaluación sistemática del comportamiento del PLC para desarrollar modelos predictivos y marcos de calibración más confiables para los métodos de ensayo estándar.

9. CONCLUSIONES

Resistencia a la compresión

Las investigaciones muestran que, cuando la LS se utiliza como reemplazo cementoso del clínker o del CPO, el PLC puede alcanzar niveles de resistencia similares al CPO, al tiempo que ofrece beneficios de sostenibilidad. En general, el PLC mantiene una resistencia a la compresión comparable a la del CPO a edades tempranas (28 días), especialmente para reemplazos moderados de caliza (<15%). Sin embargo, la ganancia de resistencia o su comparación con el CPO puede disminuir a edades más avanzadas si los diseños de mezcla no se ajustan adecuadamente para mantener el desempeño, particularmente en sistemas con mayor contenido de LS, relaciones a/c elevadas o sin MCSs. Cuando la LS no se utiliza como reemplazo de clínker (sino únicamente como agregado ultrafino) no se obtiene ningún beneficio de sostenibilidad, aunque la resistencia a compresión puede mantenerse comparable o incluso ligeramente superior.

Porosidad

La porosidad total y efectiva del PLC aumenta con mayores niveles de reemplazo de LS. Tanto los modelos termodinámicos como las mediciones experimentales indican que esta tendencia está influenciada por la composición del cemento (alúmina, yeso) y la relación a/c. El aumento de la porosidad puede afectar la durabilidad a largo plazo, lo que resalta la importancia de controlar la microestructura mediante un curado adecuado, la incorporación de MCS y límites apropiados al reemplazo de LS.

Ingreso de cloruros

La difusión de cloruros incrementa con el contenido de LS, especialmente en concretos con relaciones a/c más altas. Estudios experimentales utilizando métodos acelerados y naturales

muestran que la incorporación de MCS y la optimización del diseño de mezcla pueden mitigar este efecto, permitiendo que el PLC cumpla con los criterios de durabilidad frente a la corrosión del acero en ambientes expuestos a cloruros.

Carbonatación

El PLC presenta mayores profundidades de carbonatación en comparación con el CPO, particularmente en mezclas con alto contenido de LS y curado insuficiente. La resistencia a la carbonatación depende fuertemente del tiempo de curado, la relación a/c y la presencia de MCS, siendo los sistemas con escoria más resistentes y aquellos con ceniza volante más susceptibles. A diferencia de la respuesta volumétrica relativamente estable observada cuando solo se carbonata el CH, la carbonatación del CSH induce tensiones internas de tracción que pueden generar microfisuración en la matriz cementosa incluso en ausencia de cargas externas. La formación de estas microfisuras aumenta posteriormente el ingreso de CO₂ y vapor de agua, estableciendo un mecanismo de retroalimentación que acelera tanto la transformación química del aglomerante como la degradación mecánica progresiva del material.

Conclusión general

En conjunto, el PLC representa una alternativa sostenible al CPO, reduciendo las emisiones de CO₂ y proporcionando un desempeño estructural aceptable. Sin embargo, las propiedades relacionadas con la durabilidad—porosidad, transporte de cloruros y carbonatación—están fuertemente influenciadas por la composición y las condiciones de curado. Estos hallazgos resaltan la necesidad de un enfoque continuo e integrado que vincule microestructura, transporte iónico y comportamiento mecánico para diseñar mezclas de PLC confiables y duraderas, apoyando la transición hacia normas de cemento basadas en desempeño.

10. AGRADECIMIENTOS

DMSC y BMP agradecen encarecidamente el apoyo financiero del Consejo de Investigación en Ciencias Naturales e Ingeniería de Canadá. A su vez, AATA expresa su agradecimiento a CH Arquitectura y Construcción por el apoyo financiero proporcionado para la preparación de este manuscrito, en el marco del proyecto de investigación “Caracterización por durabilidad de concretos fabricados con agregados calcáreos y cementos con contenidos de caliza > 15%”, desarrollado en colaboración con el Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Departamento de Tecnologías Sostenibles y Civil, Campus Querétaro.

11. REFERENCIAS

- 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 Oueddou, 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.
- 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.
- 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
- 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.
- 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.
- 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>.
- Boubekeur, 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 Yeih, 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.

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>.
- Ghrichi, 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_3a 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.

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](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’elimite 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 CaCO₃.*” *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 Pozzolan 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.
- 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.
- Król, Anna, Zbigniew Giergiczny, and Justyna Kuterassinska-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, Sondos 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-CO₂ 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.hbrj.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>.
- Péray, 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 Dehaudt. (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.
- 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 CO₂ 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 (CaCO₃).*” 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-CaCO₃ 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 (CaCO₃) 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 CO₂ 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/matersci.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 Chaniotakisb, 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>.
- Voglis, 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."*
- Weerd, 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>.
- Weerd, 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>.
- Weerd, 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>.
- Yařar, Ergöl, 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.
- 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>.