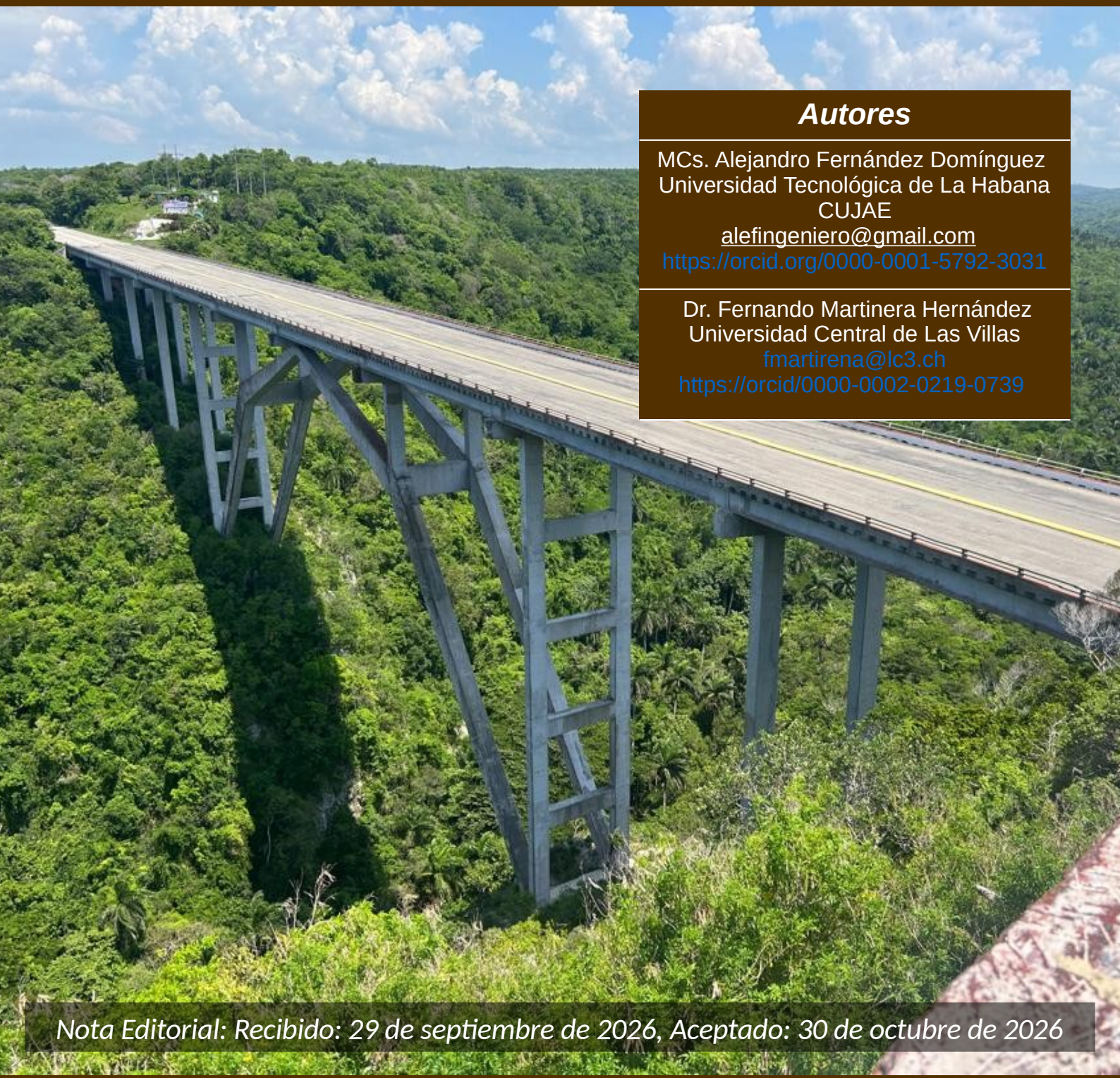
6

La Durabilidad De Hormigones De Arcilla Calcinada Y Caliza Ante Corrosión Por Cloruros

Durability Of Calcined Clay And Limestone Concretes Against Chloride-Induced Corrosion



Autores

MCs. Alejandro Fernández Domínguez
Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE
alefingeniero@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-5792-3031

Dr. Fernando Martinera Hernández
Universidad Central de Las Villas
fmartirena@lc3.ch
https://orcid/0000-0002-0219-0739

Nota Editorial: Recibido: 29 de septiembre de 2026, Aceptado: 30 de octubre de 2026

6

La Durabilidad De Hormigones De Arcilla Calcinada Y Caliza Ante Corrosión Por Cloruros



Resumen

La producción de cemento Portland es una de las mayores fuentes de emisiones de CO_2 a nivel mundial, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles. Entre ellas, el cemento de arcillas calcinadas y caliza (LC3) surge como una opción prometedora, al combinar materiales suplementarios que reducen significativamente el contenido de clínker. Esta revisión aborda la influencia del empleo de LC3 en la durabilidad de hormigones, con énfasis en su resistencia a la penetración de cloruros, principal causa de corrosión en estructuras expuestas a ambientes marinos. Se analizan los mecanismos que explican el mejor desempeño del LC3, entre ellos el refinamiento de la microestructura porosa, la formación de fases fijadoras de cloruros (como la sal de Friedel) y la reducción de la difusividad iónica. La revisión sintetiza estudios experimentales que demuestran que hormigones con LC3 presentan coeficientes de difusión de cloruros significativamente menores, mayor resistividad eléctrica y mayor capacidad de fijación química de cloruros en comparación con hormigones basados en cemento Portland, al tiempo que menores velocidades de corrosión de barras de acero en hormigones armados. Como punto bajo, se resalta los menos valores de umbral crítico de cloruros que presenta respecto a hormigones convencionales.

Palabras Clave

arcilla calcinada, cloruros, corrosión, hormigón armado.

Research Paper

6

Durability Of Calcined Clay And Limestone Concretes Against Chloride-Induced Corrosion



Abstract

Portland cement production is one of the largest global sources of CO_2 emissions, which has driven the search for sustainable alternatives. Among these, limestone-calcined clay cement (LC3) emerges as a promising option, as it incorporates supplementary materials that significantly reduce clinker content. This review examines the influence of LC3 on the durability of concrete, with an emphasis on its resistance to chloride penetration—the primary cause of corrosion in structures exposed to marine environments. The mechanisms underlying the superior performance of LC3 are analyzed, including the refinement of the porous microstructure, the formation of chloride-binding phases (such as Friedel's salt), and a reduction in ionic diffusivity. The review synthesizes experimental studies demonstrating that LC3-based concrete exhibits significantly lower chloride diffusion coefficients, higher electrical resistivity, and a greater capacity for chemical chloride binding compared to conventional Portland cement-based concrete, alongside lower corrosion rates for steel reinforcement. A notable drawback, however, is the lower critical chloride threshold value observed in LC3-based concrete compared to conventional concrete.

Keywords

calcined clay, chlorides, corrosion, reinforced concrete.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de cemento Portland (CP) es la mayor fuente de emisión de CO_2 asociada con hormigones y morteros [1]. Ante la necesidad urgente de reducir la huella de carbono del sector de la construcción, han surgido diversas estrategias, entre las que destaca el empleo de materiales cementicios suplementarios (MCS) que permiten sustituir parcialmente el clínker.

Los MCS son materiales finamente molidos con elevadas cantidades de sílice y/o aluminio, que en presencia de agua reaccionan con el hidróxido de calcio (HC) liberado durante la hidratación del cemento Portland (CP), generando silicatos y aluminatos cálcicos hidratados que contribuyen a densificar la masa del hormigón, disminuyendo la magnitud, dimensión e interconectividad de los poros de la matriz cementicia y aumentando por ende su capacidad de resistir la penetración de los iones cloruro. Estos materiales se pueden emplear en la elaboración de cementos binarios o ternarios, que remplazan parcialmente el CP con uno o dos MCS respectivamente.

En este contexto aparece el cemento de arcillas calcinadas (AC) y caliza (C) conocido como LC^3, por sus siglas en inglés (*Limestone Calcined Clay Cement*), un cemento ternario con alto nivel de remplazo de CP que se presenta como una alternativa de bajo carbono con un alto potencial de implementación a escala global [2]. El LC3 se reporta por primera vez en la literatura en 2012 por Antoni *et al.* [1], cuando remplaza parte del CP con un 35% de AC y un 5% de C. Desde 2014 se emplea la designación LC3-X, en la que X se refiere al contenido de clínker en porcentaje del peso del total del aglomerante [3].

Si bien las prestaciones de los sistemas cementicios preparados con diferentes proporciones entre CP, AC y C, dependen de las propiedades físicas y químicas de cada uno de los componentes [4], de manera general, hormigones elaborados con relaciones AC/C:2/1 en sustitución de un 50% de CP, o sea, LC3-50, han demostrado propiedades mecánicas similares a las de hormigones elaborados solo con CP [3, 5-7] al mismo tiempo que una superior resistencia a la penetración de cloruros [4, 8].

La corrosión del acero de refuerzo inducida por cloruros es la mayor causa de deterioro de estructuras de hormigón armado a nivel mundial, por lo que comprender el impacto del LC3 en el desempeño de los hormigones ante este fenómeno, resulta de gran importancia.

En consecuencia, esta revisión tiene como objetivo compilar y analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre la influencia del empleo de LC3 en la durabilidad de hormigones, con especial atención en:

a. La microestructura de los sistemas LC3 derivada de la sinergia entre sus componentes y su impacto en el transporte de cloruros en estos sistemas.

b. El efecto del contenido de caolinita en las arcillas calcinadas sobre las propiedades de sistemas LC3.

c. El impacto del LC3 en la penetración de cloruros en sistemas cementicios a partir de indicadores de durabilidad y en la fijación de cloruros.

d. El impacto del empleo del LC3 en el umbral crítico de cloruros y la corrosión del acero de refuerzo en hormigones armados.

e. La influencia del uso del LC3 en el desempeño de hormigones armados ante corrosión por cloruros en ambiente marino

2. COMPONENTES DEL CEMENTO DE ARCILLAS CALCINADAS Y CALIZA Y MECANISMOS DE HIDRATACIÓN.

2.1. ARCILLAS CALCINADAS COMO MATERIAL PUZOLÁNICO

Hace 4000 años, las AC (o activadas térmicamente) habían sido utilizadas en la construcción, mezcladas con cal para producir morteros, cuando los romanos usaron losas cerámicas trituradas como puzolanas [9]. Sin embargo, no existe documentación que reporte su uso posterior hasta la década de 1950 [10]. En Brasil, en la década de 1960 se empleó para controlar la reacción árido-álcali [3] y en la India se reporta su uso en la década de 1970 [2, 11].

Las arcillas pertenecen al grupo de los filo-silicatos, minerales que se caracterizan por tener una estructura en capas formadas por la alternancia de láminas de tetraedros de sílice (SiO_4) y octaedros de aluminio (AlO_6) [9], además de impurezas como cuarzos o feldespatos [12]. Las diferentes disposiciones y sustituciones iónicas dentro de estas láminas dan origen a diversos tipos de arcillas, entre las que destacan las caolinitas, ilitas, esmectitas y montmorillonitas.

Para su uso como puzolana, las arcillas deben ser sometidas a un tratamiento térmico (calcinación). La calcinación al aire de las arcillas, provoca por deshidroxilación, la rotura total o parcial de su estructura cristalina, creando una fase de transición con alta reactividad. La reactividad puzolánica de las AC está asociada a la eliminación del agua en su estructura cristalina, lo que genera un producto semiamorfo de elevada superficie específica y alta reactividad química [9].

Entre los diferentes tipos de arcillas, las caolinitas (con fórmula ideal $Al_2Si_2O_5(OH)_4$) han demostrado poseer el mayor potencial puzolánico tras la calcinación entre 700 y 800°C [13, 14], debido al mayor contenido de grupos hidroxilos y su posición en la estructura cristalina, lo que favorece mayor desorden y exposición de los grupos alumínicos en la superficie del material [12].

El contenido de caolín de la arcilla es el factor más importante en el desempeño mecánico de sistemas cementicios basados en AC [8]. Las arcillas caoliníticas son abundantes en la corteza terrestre, aunque la mayoría de los depósitos no son puros y contienen impurezas como cuarzo, óxidos de hierro y titanio, calcita y otros tipos de arcillas [15]. El empleo de estas arcillas con impurezas como materiales cementicios suplementarios resulta más práctico que el de arcillas de alta pureza, debido a su disponibilidad global a bajos costos y a que a menudo se encuentran como material de rechazo en minas y canteras [5, 15]. Si bien las arcillas de alta pureza (metacaolín comercial, con >90 % de caolinita) han sido ampliamente estudiadas como MCS, incluso en sistemas ternarios [16, 17], su alto costo (hasta tres veces el precio del cemento) y su uso en otras industrias limitan su viabilidad para la producción masiva de LC³ [18, 19]. Por el contrario, el éxito del concepto LC3 radica en la utilización de arcillas de «baja pureza», con contenidos de caolinita a partir del 40%, que garantizan un desempeño comparable o superior al del cemento Portland convencional [3, 20-22].

2.2.LA CALIZA COMO ADICIÓN

La caliza (C) se ha establecido en la industria del hormigón como remplazo del cemento por su bajo costo, amplia disponibilidad y bajo consumo de energía para su trituración. Cuando se emplea finamente molida, promueve la hidratación del clínker al proveer una superficie adecuada para la nucleación de los productos sólidos de la hidratación, en lo que se conoce como efecto "filler" [23]. Además, contribuye a las reacciones de hidratación en presencia de aluminatos [24]. Sin embargo, el uso de C en remplazo del clínker (por sí sola) en cantidades elevadas, provoca la dilución física del aglomerante, lo que reduce los productos de hidratación y aumenta la porosidad [8, 25].

2.3 MECANISMOS DE REACCIÓN EN EL SISTEMA LC3

En un sistema LC3, además de las reacciones de hidratación propias del cemento Portland, ocurren tres reacciones principales [26] que se esquematizan en la figura 1 :

i. Reacción puzolánica clásica: El metacaolín (AS_2) reacciona con el HC derivado de la hidratación del CP, produciendo silicatos y aluminatos cálcicos hidratados (SACH) que contribuyen a la resistencia al llenar espacios.

ii. Reacción de la alúmina del clínker: La alúmina del C_3A reacciona con el HC y el carbonato de calcio (CC) de la caliza, para formar monocarboaluminatos (Mc) y hemicarboaluminatos (Hc), conocidas como fases AFm, en lugar de monosulfoaluminatos, lo que deja mayor disponibilidad de sulfatos para formar etringita (fase AFt). Los Mc y Hc precipitan a edades tempranas en los poros que dejan los productos de hidratación del CP y se mezclan con los SACH, contribuyendo a la reducción rápida de la porosidad [26].

iii. Reacción adicional de la alúmina de la arcilla: La alúmina del AS_2 reacciona con el CC de la caliza dando lugar a la formación adicional de nuevas fases AFm (Mc y Hc) [26]. En esa reacción se evita la disolución de la etringita, por eso los sistemas LC3 a pesar de tener menor contenido de sulfatos que los basados en CP, presentan a edades tardías mayor contenido de etringita. [19] Se ha reportado que en sistemas con LC3-50, la etringita y los carboaluminatos tienen un papel similar en la reducción de la porosidad, ocupando el 25% del volumen de la pasta hidratada, mientras que los SACH ocupan el 50%, a pesar del bajo contenido de clínker [4].

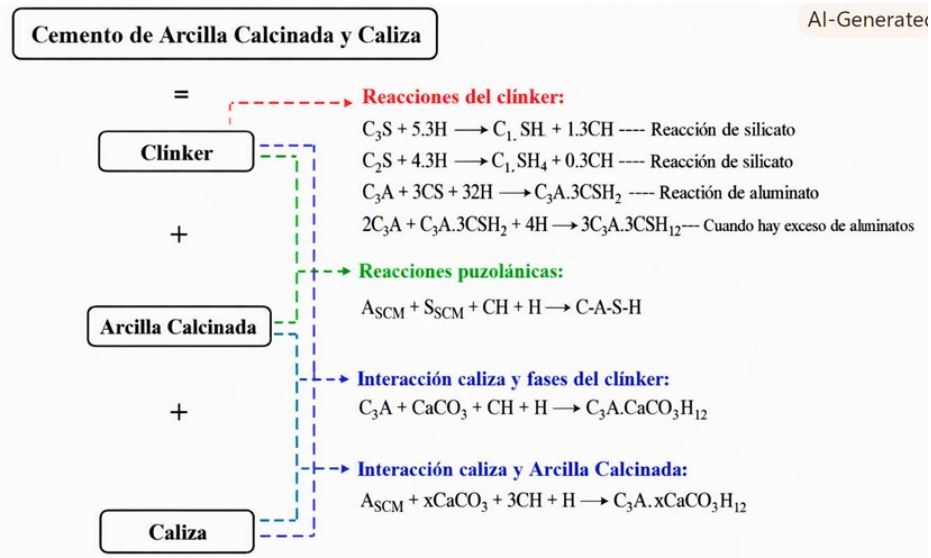


Fig. 1. Ilustración esquemática de las interacciones químicas en un sistema LC3. Adaptado de [27]

Un aspecto significativo es que para el LC3 se pueden emplear calizas que no cumplen con los estrictos requisitos químicos para la fabricación de CP convencional, como aquellas con contenidos apreciables de dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) o cuarzo (SiO_2) [5]. Esto amplía las fuentes de materia prima disponibles y reduce aún más los costos.

Como además de las reacciones químicas descritas el sistema se beneficia del efecto filler de la caliza, con una gran influencia en la hidratación a edades tempranas [28, 29], se está en presencia de un sistema donde se generan mayor cantidad de productos de hidratación que rellenan espacios y por tanto contribuyen al desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los mismos [3].

3. INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE CAOLINITA EN LAS PROPIEDADES DE SISTEMAS LC³

El contenido de caolinita en las arcillas de este tipo es el parámetro más crítico que determina la calidad y el desempeño final del LC3. La cantidad de alúmina presente en los SACH se incrementa con el aumento del contenido de caolin de la arcilla calcinada, a diferencia de la relacion Si/Ca y la densidad, que no varía significativamentre con el porcentaje de caolin [30]. Esto se manifiesta en las propiedades mecánicas, la microestructura y en la durabilidad de los sistemas con LC3.

En el ámbito de la resistencia a compresión, Scrivener y Martirena [3] demuestran una correlación positiva directa entre el contenido de caolinita y la resistencia a compresión a los 28 días en hormigones con LC3-50, a edades entre 1 y 90 días. Por su parte, Maraghechi *et al.* [15] confirmaron estos hallazgos en morteros, aunque otras investigaciones reportan que a partir de contenidos de caolin por encima del 60%, las ganacias en resistencias son bajas, debido a la poca reactividad de la belita (SC_2) con estas arcillas de alta pureza [4].

El contenido de caolinita influye profundamente en la evolución de la porosidad. Estudios de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) revelan que un mayor contenido de caolinita conduce a un mayor refinamiento de la estructura de poros. Parámetros claves de este ensayo, como el diámetro de poro crítico y el diámetro de poro mínimo disminuyen significativamente al aumentar la pureza de la arcilla [3]. Avet *et al.* [30] observaron además que, durante el ensayo MIP, la penetración del mercurio en los poros de gel (menores a 10 nm) disminuía con el incremento del contenido de caolinita, indicando una estructura de SACH más densa y menos accesible.

Este impacto en la microestructura se traduce directamente en una mayor resistencia al transporte de iones cloruro. Ensayos de difusión natural de cloruros (ASTM C1556 [31]) en morteros de LC3 expuestos hasta dos años muestran que el coeficiente de difusión aparente disminuye sistemáticamente al aumentar el contenido de caolinita de la arcilla. Incluso arcillas muy pobres (con sólo 17% de caolinita) produjeron morteros con coeficientes de difusión inferiores a los del CP, aunque el salto más significativo en el desempeño se observa a partir del 40% de caolinita [3, 15].

La capacidad de fijar cloruros también está modulada por el contenido de caolinita. Maraghechi *et al.* [15] demostraron que pastas de LC3-50 con contenidos de caolinita entre 40% y 80% presentaron las mayores capacidades de fijación total de cloruros, independientemente de la concentración de la solución expuesta. Curiosamente, para contenidos de caolinita superiores al 80%, la capacidad de fijación no aumentó proporcionalmente, lo que sugiere que otros factores, como la disponibilidad de HC o la estequiometría de las reacciones, pueden volverse limitantes.

En resumen, mientras que arcillas de alta pureza (>60% caolinita) ofrecen el máximo desempeño, el umbral del 40% de caolinita representa un punto de inflexión práctico y económico, por encima del cual el LC3 garantiza un desempeño igual o superior al CP en casi todos los aspectos clave.

4. INFLUENCIA DEL LC3 EN INDICADORES DE DURABILIDAD EVALUADOS EN MORTEROS Y HORMIGONES.

Estudios pioneros realizados en 2017 por Dhandapani y Santhanam [28] sobre la porosidad de morteros con LC3, reportan a través del análisis de MIP, que a pesar de que estos sistemas pueden presentar mayor porosidad total que otros similares con CP o cenizas volantes, el refinamiento de los poros del LC3 hace que sea más resistentes al transporte de fluidos. Estos resultados obtenidos [28] también correlacionaron con sus propias mediciones de conductividad eléctrica así como del factor de formación y además, ratificaron los obtenidos en 2013 por Antoni [32] que aplica el ensayo de migración de iones de SIMCO [33].

El hecho de que el refinamiento en la estructura de poros en los sistemas con LC3 se produzca desde edades tempranas, hace que que sea menos susceptible a presentar problemas de durabilidad por falta de curado, a diferencia de otros cementos mezclados. [4]

En 2019, Sui *et al.* [34] evaluaron diferentes propiedades en pastas y morteros de a/c=0,5 con un LC3 con 54% de CP, 30% de AC (con 48% de caolín), 15% de AC y 2% de yeso, respecto a similares con CP. Los autores obtuvieron coeficientes de difusión aparente, según las ASTM 1556 [31], diez veces inferiores para el LC3 tras 6 meses y 1 año de exposición. En cuanto al MIP, el sistema de LC3 presentó mayor porosidad total pero mucho menor diámetro crítico de poro.

En el campo de los hormigones, se reportan diversas investigaciones comparando el desempeño por durabilidad mediante indicadores, donde los resultados son notablemente consistentes a favor del LC3.

Uno de estos indicadores es la difusión natural determinada según ASTM C1556 [31]. Este ensayo fue aplicado por Pillai *et al.* [35] en hormigones con LC3-50 y CP después de un año de exposición, obteniendo coeficientes de difusión aparente (D_a) entre 5,5 y 10 veces menores para los primeros. Por su parte, Ram *et al.* [36] alcanzaron coeficientes de difusión efectivos (D_{eff}) tres veces inferiores para sus hormigones con LC3-55 y 41% de caolín, tras aplicar el ensayo de NT Build 443 [37].

La resistividad y la conductividad eléctrica son otros de los indicadores ampliamente empleados para evaluar el desempeño por durabilidad de hormigones, debido a la demostrada relación que existe entre este parámetro y la difusividad.[38].

Ram *et al.* [36] evaluaron hormigones con LC3-55 (con una arcilla con un 41% de caolín) y obtuvieron valores de conductividad en masa (según ASTM C1760) cinco veces inferiores a muestras similares de CP, mientras en el caso de la RS la diferencia fue de cuatro veces aproximadamente, mostrando un comportamiento similar.

En una línea similar, Malami *et al.* [39] evaluaron la resistividad a los 28 días de hormigones con LC3 mediante electrodos embebidos en probetas cúbicas, comparándolos con mezclas de CP para relaciones a/c de 0,40 y 0,55. Los autores reportaron que los sistemas LC3 son entre 4,3 y 8,1 veces más resistivos, dependiendo de la relación a/c, lo que confirma la formación de una microestructura especialmente densa y tortuosa que limita el movimiento iónico.

Sin embargo, en el caso de los sistemas LC3, los elevados valores de resistividad se atribuyen no solo al refinamiento de la matriz cementicia, sino también a que la solución de poros presenta menor concentración de álcalis (Na^+, K^+), los que son altamente conductivos. La evaluación del factor de formación (F), que normaliza la resistividad del hormigón respecto a la conductividad de su solución de poros, es un indicador más fiable cuando se estudia el efecto del LC3 en la difusividad de hormigones a partir de mediciones de conductividad y resistividad.

Así lo demuestran Dhandapani *et al.* [8, 40], quienes reportaron valores de resistividad superficial (RS) por el método Wenner, de hormigones con LC3-50 (menos de 60% de caolín) muy superiores a la de hormigones similares de CP en mediciones después de 28, 56 y 90 días de curado; estas diferencias se incrementaban en el tiempo y alcanzaron las 30 veces, después de 400 días de curado. Sin embargo, cuando se compara el factor de formación (*F*), las diferencias se reducen a 12 veces.

Otro de los indicadores comúnmente evaluados en el desempeño por durabilidad es la migración acelerada. Resultados reportados del ensayo NT Build 492 [41] muestra sistemáticamente coeficientes de migración no estacionarios (D_{nssm}) mucho menores para el LC3. Dhandapani *et al.* [8] encontraron valores entre 5 y 10 veces menores para hormigones con LC3 en comparación con muestras similares de CP. Por su parte, Ram *et al.* [36] también reportaron coeficientes aproximadamente dos veces menores para hormigones de LC3-55 (con 41% de caolín), mientras que Malami *et al.* [39] obtenía valores a 180 días más de 7,7 veces menores para hormigones con a/c = 0,4; y 3,8 veces para a/c = 0,55. Por otro lado, otros como Du y Pang [42] obtienen comportamientos similares al emplear el ensayo ASTM C1202 [43].

Otro de los indicadores más evaluados es la sorptividad, que mide la velocidad de absorción de agua por capilaridad en un material parcialmente seco y se relaciona con la tortuosidad y conectividad de los poros más grandes. Du y Pang [42] obtuvieron valores de sorptividad inicial, según ASTM C1585 [44], como promedio dos veces inferiores para un hormigón con LC3-55 respecto a su similar con CP, resultados similares a los reportados por Ram *et al.* [36] al emplear el protocolo descrito en [45].

Finalmente, la permeabilidad al oxígeno es un indicador que arroja resultados que pudieran parecer contradictorios respecto a los anteriormente analizados. Dhandapani *et al.* [8] encontraron que la permeabilidad al oxígeno era mayor para las mezclas con LC3 que para las de CP, debido a que los gases a presión, a diferencia de los iones en solución, pueden difundir a través de poros muy pequeños. Los sistemas LC3 tiene un mayor volumen total de poros pequeños (aunque bien refinados) como demostraron los ensayos de MIP abordados al inicio de este apartado. Este resultado subraya la importancia de seleccionar el indicador de durabilidad correcto para el mecanismo de deterioro específico.

5. INFLUENCIA DEL LC3 EN LA FIJACIÓN DE CLORUROS

La fijación de cloruros se refiere a la retención de iones Cl^- por la matriz cementicia, ya sea por adsorción física en superficies (principalmente en los SCH/SACH) o por incorporación química en fases sólidas conocidas como sales de Friedel y Kuzel. Este proceso reduce la concentración de cloruros libres, que son los que avanzan a través de la matriz de poros hasta el acero y provocan su corrosión.

En sistemas basados en CP, la fijación química ocurre principalmente por la reacción de los cloruros con las fases AFm (monosulfoaluminato) para formar cloroaluminatos: la sal de Friedel ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}CaCl_2{\cdot}10H_2O$) en altas concentraciones de Cl^-, o la sal de Kuzel ($3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}(1/2)CaCl_2{\cdot}(1/2)CaSO_4{\cdot}11H_2O$) en concentraciones más bajas o con presencia de sulfatos [15]. La fijación física por adsorción en los SCH/SACH también es significativa y depende de la relación Ca/Si de estos hidratos.

En sistemas a base de LC3, el panorama es diferente y generalmente más favorable. La alta cantidad de fases AFm generadas (principalmente carboaluminatos) proporciona más sitios disponibles para la formación de sales de Friedel/Kuzel. Maraghechi *et al.* [15] demostraron mediante análisis termogravimétrico y de difracción de rayos X que en pastas de LC3, la mayoría de los cloruros se encontraban en forma químicamente fijada (sales de Friedel), mientras que en el CP predominaba la fracción físicamente adsorbida.

Esta reducción de la capacidad de adsorción física de cloruros en los sistemas LC3 se debe a que el SACH presenta menor relación Ca/(Si+Al) que los SCH del CP [10, 15]. Sin embargo, este efecto parece ser compensado con creces por la mayor fijación química.

La mayor capacidad de fijación del LC3 es un factor clave que contribuye a su menor coeficiente de difusión aparente, ya que parte de los cloruros que ingresan quedan inmovilizados y no contribuyen al gradiente de concentración que impulsa la difusión. No obstante, su mayor vulnerabilidad a la carbonatación [46], puede provocar la liberación de cloruros fijados, un efecto que debe ser tenido en cuenta cuando se experimente el efecto de ambos factores [47, 48].

Maraguechi *et al.* [15] constataron estos elementos al demostrar en pastas de LC3-50 (con porcentajes de caolín entre 17 y 95%) la mayoría de los cloruros eran fijados químicamente a la inversa que en los patrones de CP; siendo las cantidades totales 20% superiores para los sistemas LC3-50 con porcentajes de caolín entre 40% y 80%. Estas diferencias ascendieron a un 38% en la investigación en morteros de Zhou *et al.* [49] y en un 50% en el estudio en hormigones de Ram *et al.* [36] empleando LC3-55 con un 41% de caolín. Sin embargo, S. Sui *et al.* [34] evaluaron la fijación de cloruros en pastas de CP y LC3-50 (AC/C 2/1; 49% caolín) y obtuvieron capacidades de fijación similares para ambas muestras.

6. EFECTO DEL LC3 EN LA DESPASIVACION Y CORROSIÓN DEL ACERO ANTE EL ATAQUE DE CLORUROS

La despasivación del acero en el hormigón armado se produce cuando la concentración de Cl en su superficie alcanza un valor umbral (C_{crit}). Este parámetro, depende de múltiples factores interrelacionados en el sistema acero-hormigón. El más relevante en este contexto es la concentración de iones hidroxilo (OH^+) en la solución de poros, cuya presencia retarda la despasivación del acero ante el ataque de cloruros. En los sistemas cementicios de CP, los OH^+ se producen a partir de la formación de los hidróxidos alcalinos (de Ca^+, Na^+ y K^+) durante el proceso de hidratación.

En sistemas con alto remplazo de clínker la cantidad de OH^+ es mucho menor ya que se producen menos álcalis y además los que se producen son consumidos por los MCS. Específicamente en sistemas LC3-50, el contenido de álcalis totales en la solución de poros puede disminuir hasta en un 70% [50]. En consecuencia, los valores de C_{crit} en sistemas LC3 tienden a ser inferiores a sus similares de bajo remplazo o puros y los resultados experimentales así lo han demostrado.

En 2019, Pillai *et al.* [51] diseñan un experimento para determinar el C_{crit} en muestras de hormigones de a/c 0,4 a 0,5 elaborados con LC3 y CP, con barras de acero al carbono corrugadas. Como era de esperarse, lo valores de C_{crit} para las primeras fueron un tercio de los obtenidas para las de CP; resultados similares a los reportados Rengaraju [52]. Estudios posteriores como el Dhandapani *et al.*[10] y Kijjanon *et al.*[53] obtuvieron diferencias promedio de 50% y 25% respectivamente.

Una vez despasivado el acero, la velocidad en que ocurre la propagación de la corrosión está determinada por varios factores interrelacionados que controlan las reacciones electroquímicas. Dos de los factores más críticos que la restringen es la disponibilidad de oxígeno y la humedad en la interfaz acero-hormigón, pues son necesarios para la reacción catódica de reducción y el transporte de los electrolitos. Entonces, la microestructura de la matriz es determinante en este aspecto: la densidad y la tortuosidad que esta posea, el diámetro de los poros, interconexión, y del grado de saturación de los mismos. [54]

Finalmente, la concentración de iones cloruro en la interfaz continúa influyendo durante la etapa de propagación. Los cloruros no solo despasivan el acero, sino que en esta fase pueden disminuir la resistividad de la pasta de cemento y catalizar las reacciones anódicas, manteniendo altas tasas de corrosión, especialmente en el mecanismo de picadura localizada.

Una vez iniciada la corrosión en ambientes con cloruros, la propagación en hormigones con LC3 tiende a ser más lenta ya que su microestructura más densa y tortuosa restringe el flujo de oxígeno y humedad y por tanto elevan la resistividad eléctrica del hormigón (sumado a las modificaciones en la solución de poros descritas en el apartado 4) [55, 56].

Investigaciones experimentales como la de Ejbouh et al. [56] confirman la teoría al obtener intensidades de corrosión (Icorr) un orden de magnitud menor para probetas de hormigón armado con LC3 respecto a sus similares de CP.

Nguyen y Castel [55], por su parte, en un estudio exhaustivo, obtuvieron comportamientos similares en la fase de propagación de la corrosión para muestras de LC3 y CP. Encontraron que los rangos habituales que se emplean para emitir criterios cualitativos sobre el estado de corrosión del acero a partir de medidas de diferencia de potencial, se aplicaban también a sistemas LC3. Sin embargo, demuestran que para el cálculo de I_{corr} en hormigones armados con base LC3, debe emplearse un valor de B = 46 mV, a diferencia del valor de 26 mV empleado usualmente para hormigones de CP. Este elemento tiene una incidencia directa en el cálculo I_{corr} pues introduce diferencias del 43% respecto a las prácticas habituales.

No obstante, de aplicarse esta modificación a los resultados de Ejbouh *et al.* [56] aún se seguirían obteniendo diferencias notables entre los hormigones con LC3 y CP.

En otra línea de investigación, Rengaraju *et al.* [57] concluyeron que los productos de corrosión formados en sistemas LC3 son menos expansivos que en sus similares de CP, reduciendo el daño por fisuración.

7. CASOS DE ESTUDIO EN CONDICIONES DE EXPOSICION EN AMBIENTE MARINO

La totalidad de los resultados experimentales revisados en los apartados anteriores responde a investigaciones en las que la exposición de las muestras a soluciones de cloruros se realizó en condiciones de laboratorio. Sin embargo, resulta indispensable la comprobación del desempeño de elementos de LC3 ante el ataque de cloruros en condiciones reales de exposición. Dado la novedad de estos sistemas cementicios, los estudios reportados en la literatura son muy pocos [10], resaltando el sitio de exposición ubicado en Villa Clara, Cuba [58].

En octubre de 2014, se colocaron elementos de hormigón armado fabricados con LC3-50 y CP en un sitio de exposición en Punta Matamoros, Cayo Santa María, en zona de marea, en la que dos veces al día los elementos prismáticos recibían el contacto directo del agua de mar. Campañas anuales de extracción de testigos fueron llevadas a cabo hasta 2018, a dichas muestras se le realizaron ensayos de permeabilidad al aire, resistividad superficial y perfiles de cloruros. Los resultados de estos estudios, reportados en [59], demuestran que los hormigones de LC3 presentaron menores concentraciones de cloruros en todas las profundidades, al tiempo que valores significativamente más bajos de permeabilidad al aire y mucho más altos de resistividad, confirmando el efecto de la mayor tortuosidad y refinamiento de la microestructura de las muestras de LC3 respecto a las de CP.

8. CONCLUSIONES

En la presente revisión se recopilaron y analizaron los estudios experimentales disponibles sobre la influencia del cemento de arcillas calcinadas y caliza (LC3) en la durabilidad de hormigones armados, con énfasis en los mecanismos de transporte y fijación de cloruros, así como en los indicadores electroquímicos y físicos que rigen la corrosión del acero de refuerzo.

Los estudios analizados confirman que los hormigones con LC³ presentan una resistencia a la penetración de cloruros notablemente superior a la de los hormigones convencionales con cemento Portland (CP). Esta mejora en la durabilidad es atribuible a la densificación y refinamiento de la red porosa, donde el diámetro crítico de poro se reduce significativamente, y a la elevada formación de fases AFm (carboaluminatos) que inmovilizan químicamente los cloruros mediante la precipitación de sal de Friedel, aunque en ambientes con riesgo de carbonatación, la mayor vulnerabilidad de los sistemas LC3 (por su menor alcalinidad) puede provocar la liberación de los mismos. Por esta misma causa el C_{crit} para la despasivación del acero resulta entre un 25% y un 50% inferior al de hormigones de CP.

Aunque muy pocos en cantidad, los estudios realizados en condiciones reales de exposición confirman el excelente desempeño de hormigones con LC3 ante el ataque directo de cloruros. No obstante, este tipo de estudios necesita ser ampliado para incrementar la credibilidad de la comunidad científica y técnica en el desempeño a largo plazo de este material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, and K. Scrivener, "Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone," Cement and concrete research, vol. 42, no. 12, pp. 1579-1589, 2012, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.09.006
2. K. L. Scrivener, "Options for the future of cement," Indian Concr. J, vol. 88, no. 7, pp. 11-21, 2014. [Online]. Available: https://www.giatecscientific.com/wp-content/uploads/2018/05/0851_ICJ_Article.pdf
3. F. M. Karen Scrivener, Shashank Bishnoi, Soumen Maity, "Calcined clay limestone cements (LC3)," Cement and Concrete Research, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017
4. M. Sharma, S. Bishnoi, F. Martirena, and K. Scrivener, "Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review," Cement and Concrete Research, vol. 149, p. 106564, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564
5. S. L. Avet F., and Scrivener K., "Concrete Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Compared with Conventional Cements," Advances in Civil Engineering Materials, 2019, doi: https://doi.org/10.1520/ACEM20190052
6. M. Abdulqader et al., "Physicochemical properties of limestone calcined clay cement (LC3) concrete made using Saudi clays," journal of materials research and technology, vol. 25, pp. 2769-2783, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.114
7. N. Ozbakan Orhan and D. Over, "Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Systems: Advancements in Properties, Sustainability Potential, and Emerging Research Directions," Canadian Journal of Civil Engineering, 2026, doi: https://doi.org/10.1139/cjce-2025-0601
8. Y. Dhandapani, T. Sakthivel, M. Santhanam, R. Gettu, and R. G. Pillai, "Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3)," Cement and Concrete Research, vol. 107, pp. 136-151, 2018/05/01/ 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005
9. B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, "Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review," Cement and concrete composites, vol. 23, no. 6, pp. 441-454, 2001, doi: https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5
10. Y. Dhandapani et al., "Performance of cementitious systems containing calcined clay in a chloride-rich environment: a review by TC-282 CCL," Materials and Structures, vol. 57, no. 7, p. 154, 2024, doi: https://doi.org/10.1617/s11527-024-02426-7
11. A. K. Tiwari and S. Chowdhury, "Relative evaluation of performance of limestone calcined clay cement compared with Portland pozzolana cement," Journal of Asian Concrete Federation, vol. 2, no. 2, pp. 110-116, 2016, doi: https://doi.org/10.18702/acf.2016.12.2.2.110
12. R. Fernandez, F. Martirena, and K. L. Scrivener, "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite," Cement and concrete research, vol. 41, no. 1, pp. 113-122, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013
13. R. Prashar, R. Kishor, and A. A. Jee, "LC3 systems: a review of chemistry, performance, durability, and sustainability toward market adoption," Innovative Infrastructure Solutions, vol. 11, no. 5, p. 246, 2026, doi: https://doi.org/10.1007/s41062-026-02641-x
14. E. S. Leo, M. G. Alexander, and H. Beushausen, "Optimisation of mix proportions of LC3 binders with African clays, based on compressive strength of mortars, and associated hydration aspects," Cement and Concrete Research, vol. 173, p. 107255, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107255
15. H. Maraghechi, F. Avet, H. Wong, H. Kamyab, and K. Scrivener, "Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport," Materials and structures, vol. 51, no. 5, p. 125, 2018, doi: https://doi.org/10.1617/s11527-018-1255-3
16. S. Krishnan and S. Bishnoi, "High level clinker replacement in ternary limestone-calcined clay-clinker cement," in Advances in Structural Engineering: Materials, Volume Three: Springer, 2015, pp. 1725-1731
17. Z. Shi et al., "Durability of Portland cement blends including calcined clay and limestone: interactions with sulfate, chloride and carbonate ions," in Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, 2015: Springer, pp. 133-141, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_17.
18. S. S. B. Cancio Díaz Y., Urs Heierli, Aurélie R. Favier, Inocencio R. Sánchez Machado, Karen L. Scrivener, José Fernando Martirena Hernández, Guillaume Habert, "Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies," Development Engineering, no. 2, pp. 82-91, 2017, doi: https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.deveng.2017.06.001
19. F. Avet and K. Scrivener, "Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)," Cement and Concrete Research, vol. 107, pp. 124-135, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016
20. N. Balasubramanian and C. Sarangapani, "A review on the factors influencing the performance of sustainable ternary cement composites," Environment, Development and Sustainability, vol. 26, no. 10, pp. 24569-24596, 2024, doi: https://doi.org/10.1007/s10668-023-03685-0

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

21. H. Maraghechi, F. Avet, and K. Scrivener, "Chloride transport behavior of LC3 binders," in Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, 2017: Springer, pp. 306-309, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_49.
22. T. Praveenkumar, "Reimagining construction with LC3: Enhancing sustainability through supplementary cementitious materials," Interactions, vol. 247, no. 1, p. 77, 2026, doi: https://doi.org/10.1007/s10751-026-02391-3
23. Y. Briki, F. Avet, M. Zajac, P. Bowen, M. B. Haha, and K. Scrivener, "Understanding of the factors slowing down metakaolin reaction in limestone calcined clay cement (LC3) at late ages," Cement and Concrete Research, vol. 146, p. 106477, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106477
24. K. Scrivener et al., "Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC3)," Green materials, vol. 7, no. 1, pp. 3-14, 2019, doi: https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029
25. Y. Briki, M. Zajac, M. B. Haha, and K. Scrivener, "Impact of limestone fineness on cement hydration at early age," Cement and Concrete Research, vol. 147, p. 106515, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106515
26. F. Zunino and K. Scrivener, "The reaction between metakaolin and limestone and its effect in porosity refinement and mechanical properties," Cement and Concrete Research, vol. 140, p. 106307, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106307
27. V. Renuka, S. V. Rao, and T. Tadepalli, "State-of-the-art Review on Limestone Calcined Clay Cement (LC3) and its Recent Advances," Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, pp. 1-30, 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s40996-025-01857-8
28. Y. Dhandapani and M. Santhanam, "Assessment of pore structure evolution in the limestone calcined clay cementitious system and its implications for performance," Cement and Concrete Composites, vol. 84, pp. 36-47, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.012
29. A. Tironi, A. N. Scian, and E. F. Irassar, "Blended cements with limestone filler and kaolinitic calcined clay: filler and pozzolanic effects," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 29, no. 9, p. 04017116, 2017, doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001965
30. F. Avet, E. Boehm-Courjault, and K. Scrivener, "Investigation of CASH composition, morphology and density in Limestone Calcined Clay Cement (LC3)," Cement and Concrete Research, vol. 115, pp. 70-79, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.011
31. Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion, ASTM-C1556, 2011. [Online]. Available: https://store.astm.org/c1556-11ar16.html
32. M. Antoni, "Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone," 2013. [Online]. Available: https://infoscience.epfl.ch/bitstreams/bc9e64d6-3658-4096-8443-7421143ae8d4/download
33. S. T. Inc, "STADIUM. UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS," Quebec, Canadá, 2011. [Online]. Available: https://simcotechnologies.com/what-we-do/stadium-technology-portfolio/stadium-ufgs/
34. F. G. Sui Shiyu, Hamed Maraghechi, Wei Sun, Karen Scrivener, "Towards a generic approach to durability: Factors affecting chloride transport in binary and ternary cementitious materials," Cement and Concrete Research, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105783
35. R. G. Pillai, "Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3)," Cement and Concrete Research, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019
36. K. Ram, M. Flegar, M. Serdar, and K. Scrivener, "Influence of low-to medium-kaolinite clay on the durability of limestone calcined clay cement (LC3) concrete," Materials, vol. 16, no. 1, p. 374, 2022, doi: https://doi.org/10.3390/ma16010374
37. Concrete, hardened: Accelerated chloride penetration, NT-Build-443, 1995. [Online]. Available: https://www-nordtest-info.translate.goog/wp/1995/11/22/concrete-hardened-accelerated-chloride-penetration-nt-build-443/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

38. C. Andrade, M. Castellote, and R. d'Andrea, "Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices," Journal of Nuclear Materials, vol. 412, no. 1, pp. 209-216, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.12.236
39. S. Malami, D. Val, and B. Suryanto, "Durability Assessment of Low-carbon Concretes using Electrical Resistivity, Chloride Migration and Diffusion Modelling," presented at the International Conference on Durability of Concrete Structures, 2025
40. Y. Dhandapani and M. Santhanam, "Investigation on the microstructure-related characteristics to elucidate performance of composite cement with limestone-calcined clay combination," Cement and Concrete Research, vol. 129, p. 105959, 2020/03/01/ 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105959
41. CONCRETE, MORTAR AND CEMENT-BASED REPAIR MATERIALS: CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS, NT-Build-492, 1999.
42. H. Du and S. Dai Pang, "High-performance concrete incorporating calcined kaolin clay and limestone as cement substitute," Construction and Building Materials, vol. 264, p. 120152, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120152

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

43. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM-C1202, 2012. [Online]. Available: https://store.astm.org/c1202-22.html
44. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, ASTM-C1585, 2020. [Online]. Available: https://store.astm.org/c1585-20.html
45. M. Alexander, Y. Ballim, and J. Mackechnie, "Durability Index Testing Procedure Manual Ver. 4.5. 1," Univeristy of Cape Town and University of Witwatersrand Johannesburg, vol. 2018, 2018. [Online]. Available: https://concretesocietysa.org.za/concretetools/durability-index/
46. B. Qadr, G. Aouad, M. Briffaut, and N. Gay, "A review on the influence of carbonation and chloride ingress on the durability of limestone calcined clay cement," Discover Applied Sciences, 2026, doi: https://doi.org/10.1007/s42452-026-08918-1
47. Y. Wang, Z. Xu, T. Mi, J. Yu, F. Xing, and W. Li, "Corrosion mechanism of reinforcement in LC3 cement pastes under coupled carbonation and chloride attack," Cement and Concrete Composites, vol. 140, p. 105080, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105080
48. F. Avet and K. Scrivener, "Influence of pH on the chloride binding capacity of Limestone Calcined Clay Cements (LC3)," Cement and Concrete Research, vol. 131, p. 106031, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106031
49. Y. Zhou, C. Zhang, Q. Zhou, M. Guo, and R. Hu, "Unveiling the role of LC3 in chloride penetration resistance of chloride contaminated mortar," Construction and Building Materials, vol. 458, p. 139658, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139658
50. Q. D. Nguyen, M. S. H. Khan, and A. Castel, "Engineering properties of limestone calcined clay concrete," Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 16, no. 8, pp. 343-357, 2018, doi: https://doi.org/10.3151/jact.16.343
51. R. G. Pillai et al., "Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3)," Cement and Concrete Research, vol. 118, pp. 111-119, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.019
52. S. Rengaraju, "Electrochemical response and chloride threshold of steel in highly resistive concrete systems," Indian Institute of Technology Madras, vol. 36, 2019. [Online]. Available: https://civil.iitm.ac.in/admin/civilcont/PhD-Thesis-Sripriya-R-FullText%20(3)%20(2).pdf
53. A. Kijjanon, T. Sumranwanich, W. Saengsoy, and S. Tangtermsirikul, "Chloride penetration resistance, electrical resistivity, and compressive strength of concrete with calcined kaolinite clay, fly ash, and limestone powder," Journal of Materials in Civil Engineering, vol. 35, no. 3, p. 04022462, 2023, doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004643
54. C. Chiriboga, J. Noboa, and B. Zuñiga, "Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo, y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones," MQRInvestigar, vol. 6, no. 4, pp. 396-419, 2022
55. Q. D. Nguyen and A. Castel, "Reinforcement corrosion in limestone flash calcined clay cement-based concrete," Cement And Concrete Research, vol. 132, p. 106051, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106051
56. A. Ejbouh, A. Ech-chebab, S. Hassi, M. Galai, H. Benqlilou, and M. E. Touhami, "Durability assessment of LC3-based reinforced concrete under combined chloride-sulfate environment via the EIS technique," Construction and Building Materials, vol. 366, p. 130194, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130194
57. S. Rengaraju, R. G. Pillai, L. Neelakantan, R. Gettu, and M. Santhanam, "Chloride-induced corrosion resistance of steel embedded in limestone calcined clay cement systems," in Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 3rd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, 2020: Springer, pp. 613-619, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_68
58. E. Díaz, F. Martirena, A. Alujas, and R. Torrent, "Low carbon cement: durability performance assessment with laboratory and site tests," in Calcined Clays for Sustainable Concrete: Proceedings of the 1st International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete, 2015: Springer, pp. 277-282, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_34
59. A. F. Domínguez, F. Martirena-Hernandez, R. G. López, and E. D. Caballero, "Durability of LC3 Concrete Exposed to the Cuban Marine Environment," in Biennial RILEM Youth Symposium on Building Materials and Construction, 2025: Springer, pp. 859-872, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-032-14652-6_62