

Evaluación experimental de aditivos cristalinos para la durabilidad del concreto en ambientes marinos: Una interpretación desde LEAN Construction

Experimental Assessment of Crystalline Admixtures for Concrete Durability in Marine Environments: A Lean Construction Perspective

Justo Vladimir Mora Cedeño

Universidad Bolivariana del Ecuador
jvmorac@ube.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0003-7827-6349>
Guayas - Ecuador

Jorge José Arroyo Orozco

Universidad Bolivariana del Ecuador
jjarroyoo@ube.edu.ec
Universidad de Guayaquil
jorge.arroyoo@ug.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4785-368X>
Guayas - Ecuador

Wellington Isaac Maliza Cruz

Universidad Bolivariana del Ecuador
wimalizac@ube.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0005-1426-583X>
Guayas – Ecuador

Formato de citación APA

Mora, J., Arroyo, J. & Maliza, W. (2026). Evaluación experimental de aditivos cristalinos para la durabilidad del concreto en ambientes marinos: Una interpretación desde LEAN Construction. Revista REG, Vol. 5 (Nº. 3), 6444 – 6465.

CONOCIMIENTO SIN FRONTERAS

Vol. 5 (Nº. 3). julio – septiembre 2026.

ISSN: 3073-1259

Fecha de recepción: 15-09-2026

Fecha de aceptación :17-09-2026

Fecha de publicación:30-09-2026



RESUMEN

La exposición del concreto a ambientes marinos acelera los procesos de deterioro debido principalmente al ingreso de cloruros, la humedad, la salinidad y otros agentes agresivos, generando pérdidas de desempeño, intervenciones correctivas y mayores requerimientos de mantenimiento durante la vida útil de las infraestructuras. El objetivo de esta investigación fue evaluar experimentalmente el efecto de la incorporación de aditivos cristalinos sobre la durabilidad del concreto expuesto a condiciones marinas simuladas y cuantificar sus beneficios potenciales desde los principios de Lean Construction, particularmente en términos de prevención de defectos, reducción de desperdicios y generación de valor. Se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño experimental mediante cuatro tratamientos: una mezcla de referencia sin aditivo cristalino (C0-REF) y tres mezclas modificadas con dosificaciones del 1 %, 2 % y 3 % respecto de la masa de cemento (CA-1, CA-2 y CA-3). Después del curado inicial, los especímenes fueron sometidos durante 90 días a ciclos acelerados de humectación y secado con una solución de NaCl al 3,5 %. Se evaluaron resistencia a compresión, absorción capilar, transporte de cloruros, autocatrización y deterioro superficial. El tratamiento CA-3 redujo la absorción capilar en 53,45 % y la penetración de cloruros en 56,97 %, mientras que CA-2 y CA-3 alcanzaron niveles de autocatrización del 73 % y 76 %, respectivamente. La resistencia a compresión presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($F = 14,63$; $p < 0,001$), con el mayor valor en CA-2. A partir de los coeficientes aparentes de difusión de cloruros se calculó un factor relativo del tiempo de iniciación de la corrosión de 1,39 para CA-1, 2,19 para CA-2 y 2,32 para CA-3 respecto del control, equivalentes a incrementos potenciales de 38,8 %, 119,0 % y 132,2 %, respectivamente, bajo condiciones equivalentes. Estos indicadores cuantifican la prevención de defectos y muestran una estabilización del beneficio entre 2 % y 3 % de aditivo. Se concluye que los aditivos cristalinos mejoran significativamente el desempeño del concreto y que la cuantificación relativa de la iniciación de la corrosión aporta evidencia para interpretar su contribución a la generación de valor y reducción de desperdicios desde Lean Construction.

PALABRAS CLAVE: Aditivos cristalinos, durabilidad del concreto, ambientes marinos, Lean Construction, autocatrización, cloruros.

ABSTRACT

Exposure of concrete to marine environments accelerates deterioration processes, mainly due to chloride ingress, moisture, salinity, and other aggressive agents, leading to performance loss, corrective interventions, and increased maintenance requirements over the service life of infrastructure. This study experimentally evaluated the effect of crystalline admixtures on the durability of concrete exposed to simulated marine conditions and quantified their potential benefits from a Lean Construction perspective, particularly in terms of defect prevention, waste reduction, and value generation. A quantitative experimental design was used with four treatments: a reference mix without crystalline admixture (CO-REF) and three modified mixes containing 1%, 2%, and 3% admixture by cement mass (CA-1, CA-2, and CA-3). After initial curing, specimens were subjected to 90 days of accelerated wetting-drying cycles in a 3.5% NaCl solution. Compressive strength, capillary absorption, chloride transport, self-healing capacity, and surface deterioration were evaluated. CA-3 reduced capillary absorption by 53.45% and chloride penetration by 56.97%, while CA-2 and CA-3 achieved self-healing levels of 73% and 76%, respectively. Compressive strength differed significantly among treatments ($F = 14.63$; $p < 0.001$), with the highest value in CA-2. Based on the apparent chloride diffusion coefficients, relative corrosion-initiation time factors of 1.39, 2.19, and 2.32 were calculated for CA-1, CA-2, and CA-3, respectively, corresponding to potential increases of 38.8%, 119.0%, and 132.2% relative to the control under equivalent conditions. These indicators quantify defect prevention and show that the marginal benefit tends to stabilize between the 2% and 3% dosages. The results confirm that crystalline admixtures significantly improve concrete performance and that relative quantification of corrosion initiation provides evidence for interpreting value generation and waste reduction within Lean Construction.

KEYWORDS: Crystalline admixtures, concrete durability, marine environments, Lean Construction, self-healing concrete, chlorides.

INTRODUCCIÓN

En la última década la medición del rendimiento, eficiencia y comportamiento del concreto en ambientes marino ha sido ampliamente analizado, ya que su composición fisicoquímica requiere tanto de baja permeabilidad como alta densidad que resista la corrosión por cloruros y el ataque de sulfatos que asegure la durabilidad en entornos desafiantes (Tibbetts et al., 2021). En tal sentido, López et al., (2025) sostienen que la construcción en ambientes marinos presenta desafíos particulares por la combinación de sulfatos, humedad, agua salada, erosión mecánica entre otras, que implican mayores riesgos que en las construcciones estructurales. Asimismo, Golewski (2022) consolida este paradigma donde se debe priorizar tanto el diseño del concreto como la densificación de la matriz cementante que logre el control adecuado de los agentes agresivos.

Por otra parte, la exposición en ambientes marinos asocia la introducción de condiciones altamente agresivas que se caracterizan por la humedad continua, alta salinidad y variaciones térmicas donde el principal factor de corrosión del acero de refuerzo es la difusión de cloruros. Asimismo, en estudios realizados en Chile, Perú, Colombia y Brasil destacan que existen reacciones entre aluminatos y sulfatos los cuales desencadenan expansiones internas que inducen tanto a fisuras como al deterioro sinérgico en las estructuras (Giaretton et al., 2022; Cappellesso et al., 2023). Por lo que, es de suma importancia que se realicen evaluaciones del desempeño del concreto que permitan disminuir los riesgos producidos por las condiciones climáticas de las zonas costeras.

Según lo establecido por Jemimah et al, (2021) por los diversos parámetros de medición para controlar agentes agresivos no se puede evaluar la durabilidad como un atributo aislado del material sino como una propiedad integral de las diversas especificaciones técnicas de las infraestructuras dependiendo de las condiciones severas a las que son expuestas. Desde el punto de vista microestructural se evidencia que los aditivos cristalinos mejoran de manera significativa tanto la resistencia como la impermeabilidad del concreto ya que se disminuye la penetración de cloruros que aumentan la vida útil de las estructuras (Wang et al., 2022; Giaretton et al., 2024). Por consiguiente, el análisis de durabilidad del concreto tiene como base los principios multiescalar que integran la mecánica estructural, química del cemento y la física de materiales (Cuenca et al., 2021).

Estudios recientes señalan la importancia de orientar esfuerzos en la modificación de la estructura fisicoquímica del concreto a través del uso de aditivos y otro tipo de adiciones que permitan lograr la optimización de su composición interna ya que existen diversos compuestos químicos que pueden estimular las reacciones que benefician la matriz hidratada del concreto logrando de este modo el potencial máximo de resistencia y durabilidad (Cuenca et al., 2020). Esto, lo afirma Feng et

al., (2021) quienes aseguran que el uso de aditivos de tipo mineral o químico mejoran de manera significativa la resistencia y trabajabilidad del concreto ya que logra que se densifique la estructura internamente, reducen la porosidad y ajustan el fraguado. Cabe destacar que, la acción de los aditivos que pueden ser PRAH (Aditivo Reductor De Permeabilidad para condiciones Hidrostáticas – Permeability Reducing Admixture For Hydrostatic Conditions), retardantes, acelerantes, modifica la interfaz del líquido-sólido y al actuar como dispersante mejora la viscosidad mejorando así el desempeño mecánico.

De forma complementaria, para lograr la durabilidad del concreto se debe disminuir la permeabilidad efectiva ya que esta reduce el tiempo del deterioro de la estructura; a su vez, la creación de tecnologías del curado y sellado del concreto permite que mediante diversos mecanismos se logre una ventilación controlada, acelere el secado y aumente la resistencia química del concreto asegurando un sellado profundo (Wu et al., 2023). Por lo que, en la actualidad la tendencia impulsa tratamientos profundos que otorguen soluciones integrales que logren la auto obturación de poros.

A pesar de los diversos estudios científicos donde muestran resultados heterogéneos con relación al impacto significativo del uso de aditivos en el concreto, existen vacíos de conocimiento con relación a la ingeniería en ambientes costeros. La constante exposición al ambiente salino favorece la penetración de cloruros, acelera la corrosión del acero de refuerzo y reduce de manera progresiva la resistencia y funcionalidad de las obras civiles. Este deterioro se ve agravado por la utilización de mezclas convencionales sin aditivos impermeabilizantes, la limitada implementación de tecnologías de protección y el escaso desarrollo de estudios locales orientados a la durabilidad. Como consecuencia, las infraestructuras presentan altos costos de mantenimiento, disminución de su vida útil y riesgos en su desempeño estructural.

En tal sentido, y por lo expuesto en los epígrafes anteriores la problemática central está en conocer el efecto que produce el uso de aditivos cristalinos en la durabilidad del concreto en condiciones de ambientes marinos, esta incertidumbre se genera con la finalidad de establecer los beneficios potenciales frente a la exposición salina. Se plantea como hipótesis (H_1) que el uso de aditivos cristalinos aumenta de manera significativa la durabilidad del concreto en ambientes marinos.

Se considera de gran relevancia la presente investigación ya que contribuye a comprender los mecanismos microestructurales que son responsables de la durabilidad del concreto y amplía la concepción de materiales cementicios. Desde la perspectiva práctica, se justifica ya que con los resultados se puede lograr la optimización y/o mejora sustancial en las especificaciones técnicas y criterios en el diseño de infraestructuras marítimas o costeras generando de este modo disminución

de costos por concepto de mantenimiento y la prolongación de la vida útil del bien estructuralmente hablando. Desde el punto de vista social el estudio brinda aportes significativos en el conocimiento aplicado a puentes costeros, obras portuarias, fortificaciones costeras, entre otras cuyas fallas afectarían en el ámbito económico y en la seguridad de una región. Finalmente, la investigación responde a las necesidades globales de las infraestructuras construidas en ambientes altamente agresivos.

Por lo que, los principios de Lean Construction aportan una perspectiva complementaria al estudio de la durabilidad del concreto, al priorizar la prevención de defectos, la reducción de desperdicios y la generación de valor durante el ciclo de vida de las infraestructuras. Desde este enfoque, incrementar la resistencia del concreto frente a la penetración de cloruros no solo constituye una mejora del material, sino una estrategia para disminuir intervenciones correctivas, retrabajos y costos de mantenimiento, contribuyendo a una gestión más eficiente y sostenible de los proyectos de infraestructura costera.

Para efectos del estudio, el objetivo general es evaluar el efecto de la adición de aditivos cristalinos sobre la durabilidad del concreto expuesto en ambientes marinos con la finalidad de determinar su efectividad y aplicabilidad en proyectos de infraestructura costera, disminuyendo el retrabajo y los defectos de obra.

MÉTODOS MATERIALES

La investigación científica se estructuró bajo un enfoque cuantitativo y un diseño experimental ya que se evaluó la incorporación de aditivos cristalinos en la durabilidad del concreto expuesto en ambientes marinos otorgando un análisis integral de diversos aspectos relacionados al tema que anteponen la rigurosidad, calidad, exactitud, transparencia y sistematicidad para construir hallazgos que establezcan conclusiones fiables y aclarar resultados contradictorios enfocados al tema. El análisis se realizó durante el período de marzo a junio del 2026, en condiciones experimentales controladas que permitieron modelar el comportamiento del concreto frente a la acción de agentes agresivos propios de ambientes costeros. El diseño consistió en cuatro tratamientos: una mezcla patrón sin aditivo cristalino (C0-REF) y tres mezclas modificadas con adiciones del 1 %, 2 % y 3 % del aditivo sobre la masa de cemento (CA-1, CA-2 y CA-3). Para que los tratamientos fueran comparables entre sí, se mantuvo constante la proporción agua/cemento (0.45), la cantidad de cemento, la granulometría de los agregados y las características de elaboración de las mezclas. La variable independiente fue la dosificación del aditivo cristalino, y las variables dependientes fueron las características del material

concreto a temperatura fresca, la resistencia mecánica y los índices de durabilidad relacionados al transporte de agentes agresivos.

Se emplearon como materiales para la mezcla: cemento hidráulico tipo GU conforme a la especificación ASTM CA-150, agregado fino silíceo de origen natural y agregado grueso triturado con tamaño máximo nominal de 19 mm, definidos previamente de acuerdo con los requerimientos señalados en ASTM CA-33. Como material modificador se empleó un aditivo cristalino comercial de base cementicia, formado por elementos químicos activos que reaccionan con los productos de hidratación del cemento para producir cristales insolubles en la red capilar del concreto, disminuyendo su permeabilidad y promoviendo procesos de auto cicatrización. Las mezclas fueron dosificadas según los criterios del método ACI 211.1 para el diseño de mezclas de concreto convencional. Para cada tratamiento experimental se elaboraron nueve especímenes cilíndricos de 150×300 mm para la evaluación de la resistencia a la compresión y nueve probetas prismáticas para los ensayos de durabilidad, lo que permitió garantizar la repetibilidad de las determinaciones experimentales y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Con el propósito de garantizar la confiabilidad y validez de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados, se elaboraron un total de nueve probetas cilíndricas de concreto. La cantidad de especímenes fue definida considerando la necesidad de evaluar las condiciones experimentales planteadas en la investigación, incluyendo el concreto de control y las mezclas con incorporación del aditivo (1%, 2% y 3%), y contar con réplicas para cada ensayo. La utilización de múltiples probetas permitió disminuir las posibles variaciones inherentes al proceso de fabricación, curado y ensayo, incrementando así la autenticidad estadística de los resultados, facilitando una comparación objetiva de la reacción estructural del concreto frente a la exposición en ambientes salinos.

El concreto se preparó por mezclado mecánico, incorporando sucesivamente los agregados, el cemento, el agua y el aditivo cristalino hasta lograr una mezcla homogénea. Luego se aplicó el concreto en moldes normalizados y se compactó por medio de vibración mecánica, a fin de reducir la presencia de vacíos y garantizar una apropiada densificación de la matriz cementicia. Los especímenes se dejaron en los moldes durante 24 horas y se curaron por inmersión en agua saturada con hidróxido de calcio durante 28 días a una temperatura de 23 ± 2 °C, de acuerdo con la norma ASTM CA-192. Con este procedimiento se pudo asegurar un adecuado desarrollo de las reacciones de hidratación antes de iniciar la etapa de exposición acelerada al ambiente marino.

Una vez transcurrido el tiempo de curado, los especímenes se expusieron a un programa acelerado de exposición por un período de 90 días, el cual fue concebido para evaluar las condiciones de servicio de estructuras de hormigón ubicadas en áreas costeras. El método experimental se basó en ciclos alternados de inmersión en mezcla de cloruro de sodio (NaCl) al 3,5 %, durante 24 horas, seguidos de 24 horas de secado en atmósfera controlada a temperatura de 23 ± 2 °C y humedad relativa de 60 ± 5 %. Esta repetición continua de ciclos propició una introducción progresiva de iones cloruro hacia el interior de la matriz cementosa, replicando de forma acelerada los mecanismos físicos y químicos que conducen a la degradación del hormigón en entornos marinos. Este protocolo de prueba permitió valorar la conducta del material en circunstancias representativas de exposición, sin requerir recurrir a ensayos prolongados en campo.

A través de un amplio programa de pruebas físicas, mecánicas y de durabilidad se evaluaron las propiedades del concreto: ASTM CA-143 para el asentamiento, ASTM CA-138 para la densidad, ASTM CA-231 para el contenido de aire y ASTM CA-1064 para la temperatura de la mezcla, todas ellas en estado fresco. Después de fraguar el concreto, se estableció la resistencia a la compresión (ASTM CA-39), valoración de la durabilidad abarcó pruebas de absorción capilar (ASTM CA-1585), absorción del agua y volumen de vacíos permeables (ASTM C642), coeficiente de difusión aparente de cloruros (ASTM CA-1556), resistencia a la penetración rápida de cloruros (ASTM CA-1202), determinación de la profundidad de penetración de cloruros por medio de aspersión con nitrato de plata, valoración de la pérdida de masa, análisis visual del deterioro superficial y estimación de la capacidad de autocicatrización de fisuras mediante monitoreo óptico de la evolución del ancho de grieta durante el periodo de exposición. En conjunto, estas metodologías facilitaron describir el comportamiento del hormigón desde el enfoque mecánico, microestructural y de durabilidad frente a entornos extremadamente agresivos.

Los datos provenientes de los experimentos se fueron registrando en matrices creadas para cada experimento y luego se procesaron mediante el software IBM SPSS. En primer lugar, se comprobó la distribución de las variables con la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, luego se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para comprobar si había diferencias significativas entre los tratamientos experimentales, con un nivel de confianza del 95 %. Si se encontraron diferencias estadísticamente significativas, se utilizó la prueba post hoc de Tukey para realizar comparaciones múltiples entre las mezclas estudiadas. Por último, los resultados se presentaron mediante estadísticas de tendencia central y dispersión, como medias, desviaciones estándar y coeficientes de variación, permitiendo

determinar la repercusión de la aplicación del aditivo cristalino sobre las características mecánicas y durabilidad del concreto sometido a condiciones marinas simuladas.

Validación cuantitativa de la propuesta Lean Construction

Para cuantificar la interpretación Lean Construction y evitar que los beneficios se limitaran a una valoración cualitativa, se definieron indicadores derivados directamente del desempeño experimental frente al transporte de cloruros. Debido a que el coeficiente aparente de difusión de cloruros (D) controla la rapidez de ingreso del agente agresivo, se empleó como indicador proxy del tiempo de iniciación de la corrosión bajo condiciones equivalentes de exposición, concentración superficial, concentración crítica y profundidad de recubrimiento. En este marco comparativo, el tiempo requerido para alcanzar una condición crítica es inversamente proporcional al coeficiente de difusión; por ello, se calculó el factor relativo del tiempo de iniciación $F_{t,i}$ para cada tratamiento con respecto al concreto de referencia.

$$F_{t,i} = \frac{D_{REF}}{D_i}$$

A partir de este factor se calculó el incremento potencial del período de iniciación de la corrosión mediante $\Delta t_i (\%) = (F_{t,i} - 1) \times 100$. Adicionalmente, se definió un índice relativo de necesidad potencial de intervención $I_{rel,i}$

$$I_{rel,i} = \frac{1}{F_{t,i}} = \frac{D_i}{D_{REF}}$$

donde el valor 1,00 representa la condición de referencia y valores menores indican menor exposición relativa a intervenciones correctivas asociadas al ingreso de cloruros. Este índice también se empleó como proxy normalizado de presión de costo de mantenimiento, únicamente bajo el supuesto de igual costo unitario por intervención y sin incorporar descuento financiero.

La cuantificación económica absoluta del costo del ciclo de vida no fue realizada debido a que el diseño experimental no incluyó precios del aditivo, costos unitarios de reparación, periodicidad real de mantenimiento ni tasa de descuento. En consecuencia, los indicadores obtenidos deben interpretarse como medidas relativas de desempeño y no como predicciones determinísticas de vida útil, número real de reparaciones o ahorro monetario en campo. Para una aplicación económica futura, el costo del ciclo de vida (CCV) puede expresarse como:

$$CCV = C_0 + C_A + \sum_{j=1}^n \frac{C_{M,j}}{(1+r)^{t_j}}$$

Donde C_0 es el costo inicial, C_A el costo incremental del aditivo, $C_{M,j}$ el costo de la intervención j , r la tasa de descuento y t_j el año de realización de la intervención.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La prueba experimental tuvo como objetivo evaluar el efecto de un aditivo cristalino añadido en diversas proporciones sobre el funcionamiento del concreto sometido a circunstancias ambientales marinas simuladas. Se estudiaron cuatro composiciones: una combinación control sin aditivo y tres mezclas modificadas con distintas dosificaciones del agente cristalino. Tal como se muestra en la **Tabla 1**, se mantuvo constante la relación agua/cemento (0,45) en todas las mezclas para evaluar únicamente la influencia del aditivo sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad. Los especímenes se sometieron a una fase de curado inicial por un período de 28 días en condiciones supervisadas de humedad y temperatura. Posteriormente, durante 90 días se expusieron a ciclos acelerados de humectación y secado con una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3,5 %, simulando condiciones equivalentes de estructuras de hormigón en ambientes marinos.

Tabla 1.

Condiciones de exposición del concreto

Tratamiento	Tipo de concreto	de Aditivo cristalino (% masa cemento)	Relación A/C	Curado inicial	Exposición	Número de especímenes
CO-REF	Convencional	0,0	0,45	28 días	Ciclos húmedo-seco	9
CA-1	Con aditivo cristalino	1,0	0,45		NaCl 3,5% durante 90 días	9
CA-2	Con aditivo cristalino	2,0	0,45			9
CA-3	Con aditivo cristalino	3,0	0,45			9

Fuente: Autores (2026).

Propiedades físicas del concreto en estado fresco

La prueba inicial permitió analizar la repercusión del aditivo cristalino sobre las propiedades de durabilidad y estabilidad de la mezcla, antes del proceso de endurecimiento, dicha caracterización se detalla en la

Tabla 2.

Tabla 2.

Caracterización del concreto en estado fresco

Tratamiento	Asentamiento (mm) ASTM CA-143	Densidad (kg/m ³) ASTM CA-138	Contenido de aire (%) ASTM CA-231	Temperatura (°C) ASTM CA-1064
CO-REF	106	2385	1.7	23.5
CA-1	97	2392	1.8	23.6
CA-2	95	2401	1.9	23.7
CA-3	91	2405	2.0	23.8

Fuente: Autores (2026).

Los resultados que se muestran en la

Tabla 2 evidencian una modesta disminución del asentamiento a medida que aumentaba la cantidad de aditivo cristalino, relacionada con la interacción de partículas finas en el interior de la mezcla cementosa. Sin embargo, los parámetros se mantuvieron dentro de condiciones adecuadas de fabricación, lo que indica que la incorporación del aditivo no afectó de manera negativa la estabilidad del concreto fresco.

Prueba de resistencia del concreto

Para la medición de la resistencia mecánica se determinó el curado en 28 días logrando establecer la influencia del aditivo cristalino con relación a la evolución de la matriz cementicia que se describe en la **Tabla 3**.

Tabla 3.

Resistencia mecánica del concreto

Tratamiento	Resistencia (MPa) ASTM CA-39	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
CO-REF	38.61	1.81	4.67
CA-1	42.20	1.51	3.65
CA-2	44.60	1.71	3.83
CA-3	43,70	1.91	4.35

Fuente: Autores (2026).

Como se observa en la **Tabla 3**, la incorporación del aditivo produjo una mejora progresiva de la resistencia mecánica, obteniéndose el mayor desempeño en la formulación CA-2. Este comportamiento está relacionado con la formación de productos secundarios cristalinos que pueden ocupar espacios capilares, promoviendo una estructura interna más compacta y una mayor efectividad en la transferencia de esfuerzos.

Prueba de absorción capilar y permeabilidad

En la **Tabla 4** se detalla la resistencia al transporte de fluidos que se determinó mediante ensayos de soportabilidad tras concluir el periodo de exposición marina simulada.

Tabla 4.

Absorción capilar del concreto posexposición

Tratamiento	Absorción capilar (kg/m².h^{0.5}) ASTM CA-1585	Reducción
CO-REF	0.83	-
CA-1	0.62	26.61%
CA-2	0.44	48.57 %
CA-3	0.39	53.45 %

Fuente: Autores (2026).

Análisis de la penetración del ion cloruro

Tabla 5.

Coefficientes de transporte de cloruros

Tratamiento	Coefficiente difusión de cloruros (x10⁻¹²m²/s) ASTM CA-1556	Penetración (mm)	Reducción
CO-REF	15.81	18.50 mm	-
CA-1	11.39	13.20 mm	27.86 %
CA-2	7.22	8.70 mm	54.44 %
CA-3	6.81	8.10 mm	56.97 %

Fuente: Autores (2026).

Tal como se muestra en la **Tabla 5**, la conducta observada demuestra que el aditivo cristalino disminuye de forma significativa los mecanismos de transporte iónico, restringiendo la difusión de cloruros que inician procesos corrosivos en estructuras de concreto armado. Los resultados demuestran que la aplicación de los tratamientos (CA-1, CA-2 y CA-3) produjo una disminución progresiva y significativa en los parámetros de transporte del ion cloruro. La muestra de referencia (CO-REF) exhibió el coeficiente de difusión más elevado y la mayor profundidad de penetración 18,50 mm. En contraste, el tratamiento CA-3 mostró el desempeño más eficiente, reduciendo el coeficiente de difusión a 6.81×10^{-12} y la penetración a 8.10 mm, lo que representa una atenuación del 56.97% en comparación con el control.

Ensayo de permeabilidad rápida a los cloruros (RCPT)

Tabla 6.

Permeabilidad rápida a los cloruros

Tratamiento	Carga eléctrica acumulada (Coulomb)	Coefficiente de migración (x10-12m2/s)	Clasificación ASTM CA-1202
C0-REF	4200	16.10	Alta penetración
CA-1	3100	11.50	Penetración moderada
CA-2	1800	7.30	Baja penetración
CA-3	1600	6.90	Baja penetración

Fuente: Autores (2026).

Desde el punto de vista electroquímico, el comportamiento observado mostró que la incorporación del aditivo cristalino fue progresivamente reduciendo la conductividad iónica del concreto, a medida que se reducía la continuidad de los poros capilares. Como se muestra en la **Tabla 6** la estabilización entre CA-2 y CA-3 sugiere un umbral de eficiencia, más allá del cual no hay mejoras significativas por mayores dosificaciones, lo que concuerda con la saturación de los mecanismos de cristalización secundaria, como se ha reportado para este tipo de materiales.

Evaluación de la capacidad de auto cicatrización

Tabla 7.

Evaluación de la capacidad de auto cicatrización de fisuras en muestras de concreto bajo diferentes tratamientos.

Tratamiento	Ancho inicial de fisura (μm)	Ancho final (μm)	Recuperación	Nivel de auto cicatrización
C0-REF	250 μm	206 μm	19%	Baja
CA-1	250 μm	137 μm	47%	Moderada
CA-2	250 μm	71 μm	73%	Alta
CA-3	250 μm	63 μm	76%	Alta

Fuente: Autores (2026).

Los resultados del ensayo de sellado de fisuras de 250 μm se presentan en la **Tabla 7**. La muestra de control (C0-REF) exhibió una recuperación autógena limitada del 19%, reduciendo la apertura residual a 206 μm. En contraste, la aplicación de los tratamientos mejoró de forma progresiva la capacidad de cierre del material. El espécimen CA-1 alcanzó una recuperación moderada del 47% (ancho final de 137 μm), mientras que las series CA-2 y CA-3 demostraron la mayor eficiencia, con tasas de recuperación del 73% (71 μm) y 76% (63 μm), respectivamente. La mayor optimización en el desempeño se registró en la transición entre CA-1 y CA-2, donde la eficiencia de sellado se incrementó en 28 puntos porcentuales. Sin embargo, el comportamiento entre CA-2 y CA-3 tendió a la estabilización, mostrando una variación marginal de apenas el 3%. Cabe destacar que los tratamientos CA-2 y CA-3 lograron mitigar la apertura de la fisura por debajo del umbral crítico de 100 μm, lo cual

restringe el ingreso de agentes agresivos y guarda una correlación directa con la reducción del coeficiente de difusión de cloruros detallado en la sección previa.

Evaluación del deterioro superficial del concreto

La evaluación de la degradación física y morfológica del concreto resulta fundamental para cuantificar el grado de afectación estructural inducido por el entorno agresivo. Para ello, se determinó de forma simultánea la pérdida de masa y el índice de deterioro cuantitativo, complementando el análisis con una caracterización cualitativa del estado superficial de las muestras. La **Tabla 8** resume los parámetros obtenidos para cada tratamiento al concluir el periodo de exposición programado.

Tabla 8.

Medición del deterioro del concreto según el tratamiento tras el periodo de exposición.

Tratamiento	Pérdida de masa (%)	Profundidad de penetración de cloruros (mm)	Índice de deterioro superficial	Evaluación del daño
C0-REF	3.9%	18.6 mm	0.83	Mayor afectación superficial
CA-1	2.5%	13.2 mm	0.62	Deterioro moderado
CA-2	1.6%	8.7 mm	0.40	Bajo deterioro
CA-3	1.4%	8.1 mm	0.35	Alta estabilidad

Fuente: Autores (2026).

Se evidencian en los resultados que el espécimen (C0-REF) experimentó la mayor degradación, registrando una pérdida de masa del 3.9% y un índice de deterioro de 0.83, lo que se tradujo en una afectación alta caracterizada por micro fisuras y erosión. La aplicación de los tratamientos mitigó este daño de forma progresiva. El tratamiento CA-1 disminuyó la pérdida de masa al 2.5% con un nivel de afectación moderado.

Por su parte, las series CA-2 y CA-3 exhibieron el mejor desempeño protector al clasificar el daño en un nivel bajo; CA-2 limitó la pérdida de masa al 1.6% manteniendo una superficie estable, mientras que CA-3 maximizó la integridad del material al registrar una pérdida de apenas el 1,4 y un índice de 0.35. En concordancia con los ensayos previos de difusividad y auto cicatrización, la mayor optimización se concentró en la transición de CA-1 a CA-2, mientras que el comportamiento entre CA-2 y CA-3 evidenció una clara tendencia a la estabilización.

Integración del enfoque Lean Construction

La integración del enfoque Lean Construction se realizó mediante indicadores cuantitativos vinculados con prevención de defectos, optimización de recursos, reducción potencial de intervenciones y generación de valor. La evidencia experimental utilizada incluyó el coeficiente aparente de difusión de cloruros, la penetración de cloruros, la absorción capilar, la autocicatrización

y el deterioro superficial. A partir del coeficiente de difusión se estimaron el factor relativo del tiempo de iniciación de la corrosión $F_{t,i}$, su incremento porcentual respecto del control y el índice relativo de necesidad potencial de intervención $I_{rel,i}$. De esta manera, la propuesta Lean se vinculó con magnitudes medibles obtenidas en laboratorio, manteniendo explícita la limitación de que se trata de indicadores relativos bajo condiciones equivalentes y no de una predicción absoluta de vida útil o costo en servicio.

Tabla 9.

Validación cuantitativa de indicadores asociados a Lean Construction

Tratamiento	D ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Reducción de D	$F_{t,i}$ / incremento potencial	$I_{rel,i}$ / reducción relativa
CO-REF	15,81	—	1,00 / —	1,000 / —
CA-1	11,39	27,96 %	1,39 / 38,8 %	0,720 / 28,0 %
CA-2	7,22	54,33 %	2,19 / 119,0 %	0,457 / 54,3 %
CA-3	6,81	56,93 %	2,32 / 132,2 %	0,431 / 56,9 %

Fuente: Elaboración de los autores a partir de los resultados experimentales (2026).

Los factores $F_{t,i}$ muestran que, bajo condiciones equivalentes, CA-1 requeriría aproximadamente 1,39 veces el tiempo del concreto de referencia para alcanzar una condición crítica asociada con el ingreso de cloruros, mientras que CA-2 y CA-3 alcanzarían factores de 2,19 y 2,32. Esto equivale a incrementos potenciales del período de iniciación de 38,8 %, 119,0 % y 132,2 %, respectivamente. Paralelamente, $I_{rel,i}$ disminuyó a 0,720, 0,457 y 0,431, lo que representa una reducción relativa de la presión potencial de intervención del 28,0 %, 54,3 % y 56,9 % frente al control. La mejora de CA-3 respecto de CA-2 en $F_{t,i}$ fue cercana al 6 %, confirmando una tendencia de estabilización del beneficio con el aumento de la dosificación.

Desde Lean Construction, esta cuantificación permite asociar la reducción del transporte de cloruros con prevención de defectos y menor exposición relativa a reparaciones y retrabajos. La autocicatrización de 73 % en CA-2 y 76 % en CA-3 refuerza esta lectura. No obstante, I_{rel} es un indicador normalizado y no representa un número observado de intervenciones ni un ahorro monetario real; la estimación absoluta del costo del ciclo de vida requiere datos económicos y de servicio no incluidos en el experimento.

Análisis inferencial

Para comprobar si las diferencias observadas entre los tratamientos experimentales eran estadísticamente significativas, se realizó un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA). Como se observa en la Tabla 10, se pudo evaluar la influencia de la dosificación del aditivo cristalino sobre las

propiedades del concreto, comprobando que las variaciones registradas obedecieron al efecto del tratamiento experimental y no a fluctuaciones fortuitas.

Tabla 10.

Análisis inferencial - ANOVA.

ANOVA	Suma cuadrados	de gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	129.46	3	43.818	14.63	0
Dentro de grupos	94.66	33	2.928		
Total	224.12	36			

Resistencia a compresión (Mpa)

El estudio de varianza (ANOVA) que se detalla en la Tabla 10 se demostró diferencias estadísticamente significativas entre los métodos analizados ($F = 14.630$; $p < 0,001$), permitiendo así rechazar la hipótesis nula de igualdad de promedios y confirmar que la incorporación del aditivo cristalino tuvo un efecto significativo sobre el desempeño del concreto sometido a condiciones marinas simuladas. El indicador del estadístico F mostró que la variabilidad observada entre las mezclas experimentales es mucho mayor que la variabilidad debida al error experimental, demostrando que los cambios observados son efecto de las diversas dosificaciones del aditivo y no oscilaciones aleatorias del proceso de ensayo.

En tal sentido, el funcionamiento mecánico y los parámetros de durabilidad evaluados fueron directamente controlados por la modificación de la microestructura cementosa inducida por el aditivo cristalino, lo que respalda su eficacia como estrategia para aumentar la resistencia del concreto frente a mecanismos de deterioro asociados con la penetración de cloruros y la exposición a ambientes marinos.

DISCUSIÓN

El análisis integrado de investigación hace hincapié en que la durabilidad del concreto expuesto en ambientes marinos se asocia directamente con factores controlados como la incorporación de tecnologías de auto reparación y aditivos cristalinos (sulfatos / cloruros) los cuales reducen de manera significativa tanto la permeabilidad como la porosidad de la mezcla bloqueando la entrada de agentes agresivos. Esto es afirmado por los autores Wu et al., (2023) quienes sostienen que la disminución de la permeabilidad es un factor clave para disminuir y retrasar la corrosión la cual responde al bloque físico y la precipitación biogénica de carbonato de calcio (CaCO_3) que genera un efecto protector inducido microbiológicamente.

En concordancia con el párrafo anterior los autores López et al., (2025) y Giaretton et al., (2022) demuestran que los aditivos cristalinos representan una solución altamente eficaz en la inducción de cambios en la microestructura de la matriz cementicia ya que disminuye la conectividad de poros pero requiere un control dosificado para soslayar la variabilidad.

En cuanto a la densificación de la matriz cementicia y la modificación microestructural Tibbetts et al., (2021) coinciden en que limitar el transporte de agentes agresivos retrasa el proceso de corrosión mediante la micro ceniza cuya reacción puzolánica ayuda reduciendo de manera significativa la permeabilidad y aumenta la vida útil del concreto. Asimismo, Golewski (2022) destacan el uso de materiales suplementarios y el curado con CO₂ mejoran la densificación de la matriz cementicia y disminuye la huella ambiental del concreto convirtiéndose en una alternativa técnica, viable y sostenible que mejora tanto la resistencia mecánica como la capacidad de las estructuras extendiendo la vida útil de las mismas. En lo que respecta a la aplicación de aditivos cristalinos Cuenca et al., (2021) establecen que no actúan tan solo como rellenos sino como un sistema químico activo (cementicio) que reacciona con el agua y subproductos de hidratación del cemento formando cristales insolubles convirtiéndose en una barrera permanente que sella el concreto y bloquea la penetración del agua. Este bloqueo permanente, Jemimah et al., (2021) lo atribuye al uso de componente como el aluminato de sodio, silicatos de sodio, EDTA tetrasódico y carbonato de sodio que se activan mediante un proceso osmótico en presencia del agua sellando microfisuras que mejoran la resistencia contra ataques químicos como el sulfato y cloruros.

Cabe destacar que, el funcionamiento de los aditivos cristalinos debe considerarse como un proceso de reacción interna sostenida que obstruyen los poros capilares principalmente en estructuras sometidas a altos ciclos de humectación en ambientes marinos (Almashakbeh et al., 2022). En tal sentido, Cappellesso et al., (2023) sostienen que un concreto modificado obtiene la capacidad de auto reparación que prolonga la vida útil de las estructuras.

En esta misma línea físicoquímica, Wang et al., (2022) destacan la incorporación de enfoque híbridos combinando aditivos cristalinos con nanotecnología (SiO₂, Al₂O₃, CNTs, TiO₂, CaCO₃) como núcleos de hidratación que aceleran la formación de gel CSH logrando la densificación de la pasta de cemento y mejorando su resistencia inicial ya que la inclusión de nano partículas mejorar la resistencia, durabilidad y sostenibilidad de este material, posicionándolo como una opción avanzada para los proyectos modernos.

Por otro lado, la evidencia científica descrita por Zhang et al. (2023), enmarca una brecha entre el desempeño en sitio y el comportamiento observado en laboratorio donde en situaciones

reales, la combinación de cargas mecánicas, gradientes de temperatura y la exposición simultánea a diversos agentes dañinos producen circunstancias más complejas que pueden restringir la eficacia de los mecanismos de auto reparación. Este punto concuerda con los descubrimientos de Cappelleso et al. (2023), quienes subrayan que, a pesar de que la saturación hídrica favorece algunos procesos de precipitación, puede también limitar la difusión de reactivos requeridos para que el proceso de sellado continúe. Finalmente, se observa una tendencia hacia enfoques que integren sostenibilidad y durabilidad en la creación de materiales cementicios; por lo que, Feng et al., (2021) y Zhan et al., (2022) subrayan la capacidad de tácticas como el curado con CO₂ y la aplicación de materiales suplementarios para optimizar la densificación de la matriz y disminuir el impacto ambiental del hormigón. En este contexto, no solo los aditivos cristalinos son una opción técnica factible para optimizar el rendimiento en servicio, sino que también se ajustan a la necesidad de crear soluciones constructivas más sostenibles, que puedan alargar la vida útil de las estructuras y disminuir los gastos relacionados con su rehabilitación y mantenimiento.

Los resultados experimentales permiten cuantificar la durabilidad como un mecanismo de generación de valor dentro del enfoque Lean Construction. A partir de los coeficientes aparentes de difusión, CA-2 y CA-3 alcanzaron factores relativos del tiempo de iniciación de la corrosión de 2,19 y 2,32, respectivamente, frente al valor 1,00 del concreto de referencia. En términos relativos, estos resultados representan incrementos potenciales del 119,0 % y 132,2 % del período de iniciación bajo condiciones equivalentes. A su vez, los índices Irel de 0,457 y 0,431 indican una disminución normalizada de la exposición potencial a intervenciones correctivas del 54,3 % y 56,9 %. En términos Lean, este comportamiento cuantifica la prevención de defectos y la reducción potencial de desperdicios asociados con reparaciones prematuras, consumo adicional de materiales, mano de obra y tiempo. Asimismo, la comparación entre CA-2 y CA-3 evidencia un aspecto relevante para la optimización de recursos. Aunque CA-3 presentó el menor coeficiente de difusión y el mayor factor F_t , la mejora de este factor respecto de CA-2 fue cercana al 6 %, mientras que la resistencia a compresión máxima se registró en CA-2 (44,60 MPa frente a 43,70 MPa en CA-3) y la autocatrización aumentó solo de 73 % a 76 %. Esta convergencia indica una zona de rendimiento marginal decreciente entre las dosificaciones de 2 % y 3 %, por lo que la decisión Lean no debería basarse exclusivamente en maximizar la dosificación, sino en equilibrar desempeño, consumo de material y costo incremental. La determinación del punto económicamente óptimo requiere un análisis de costo del ciclo de vida con precios, tasas de descuento y escenarios de mantenimiento reales, variables que no formaron parte del presente experimento.

CONCLUSIONES

Esta investigación permitió demostrar que la introducción de agentes químicos o aditivos cristalinos representan una estrategia técnica, viable y significativa para incrementar la durabilidad del concreto que se expone a ambientes marinos dependiendo de manera crucial de su habilidad para regular los mecanismos de transporte de agentes agresivos, en especial de sulfatos y cloruros, que afectan directamente las reacciones corrosivas del acero de refuerzo. Por lo que, la utilización de aditivos cristalinos se presenta como una táctica viable, ya que fomenta la densificación de la microestructura y disminuye la conectividad capilar logrando mejoras significativas en el rendimiento del material cuando se encuentra expuesto a condiciones severas.

Desde un punto de vista aplicado, los resultados evidencian que los aditivos cristalinos funcionan no solamente como barreras pasivas, sino también como sistemas reactivos que tienen la capacidad de producir productos insolubles en condiciones de humedad. Esto propicia procesos de sellado interno y auto reparación de micro fisuras; siendo este, un aporte significativo para la ingeniería civil, ya que ayuda a aumentar la duración de las estructuras, disminuir los gastos de mantenimiento y hacer más confiables las obras en ambientes muy hostiles, como el marino.

Además, el estudio comparativo con otras tecnologías, como la utilización de materiales suplementarios y métodos de auto reparación a nivel nanoestructurado o biológico, muestra que se llega a un acuerdo sobre lo fundamental que es modificar la microestructura para aumentar la durabilidad. No obstante, se descubren diferencias en el rendimiento en situaciones reales, donde condiciones como la variabilidad del medio ambiente y las solicitudes mecánicas pueden reducir la eficacia de los sistemas analizados; esto contrasta con los resultados que se logran en el laboratorio.

Por ello, la investigación incluye como un elemento novedoso la combinación crítica de diversos enfoques tecnológicos desde el punto de vista del desempeño en entornos marinos, resaltando el potencial de los aditivos cristalinos como solución integral en contraposición a tácticas que son solo superficiales o parcialmente efectivas. Sin embargo, la metodología de revisión sistemática presenta como limitación su dependencia respecto a las condiciones experimentales, heterogeneidad y calidad de los estudios analizados; esto tiene el potencial de afectar la generalización de los hallazgos.

Desde la perspectiva de Lean Construction, la incorporación de indicadores cuantitativos permitió superar una interpretación exclusivamente conceptual de los beneficios. Los coeficientes de difusión determinaron factores relativos del tiempo de iniciación de la corrosión de 1,39, 2,19 y 2,32 para CA-1, CA-2 y CA-3, equivalentes a incrementos potenciales de 38,8 %, 119,0 % y 132,2 % respecto

del control, bajo condiciones equivalentes. De forma complementaria, los índices relativos de necesidad potencial de intervención fueron 0,720, 0,457 y 0,431, respectivamente. Estos resultados cuantifican la prevención de defectos y la reducción relativa de exposición a intervenciones; además, la ganancia marginal de aproximadamente 6 % entre CA-2 y CA-3, junto con la mayor resistencia mecánica de CA-2, evidencia la necesidad de optimizar la dosificación en función del valor generado y no únicamente del máximo contenido de aditivo. Las estimaciones son indicadores relativos derivados de ensayos acelerados y no constituyen predicciones determinísticas de vida útil, número real de reparaciones ni ahorro monetario en condiciones de servicio.

Con base en lo anteriormente expuesto, se plantean como líneas de investigación futura la validación del comportamiento de los aditivos cristalinos en condiciones reales de servicio, la incorporación de profundidad de recubrimiento y concentraciones superficial y crítica de cloruros para estimar tiempos absolutos de iniciación de la corrosión, y el desarrollo de modelos predictivos de durabilidad fundamentados en la microestructura. Asimismo, se recomienda integrar un análisis de costo del ciclo de vida que considere precio del aditivo, costos unitarios de mantenimiento y reparación, frecuencia de intervención y tasa de descuento, con el fin de cuantificar monetariamente la generación de valor asociada a Lean Construction. También resulta pertinente examinar sistemas híbridos que combinen biomineralización y nanotecnología y evaluar su incidencia sobre prevención de defectos, optimización de recursos y reducción de desperdicios, fallas y retrabajos.

En conclusión, la investigación corrobora que los aditivos cristalinos son una opción efectiva para incrementar la durabilidad del concreto en entornos marinos, ya que influyen en los mecanismos de degradación y transporte del material. La implementación de su propuesta, junto con otras tácticas para modificar la microestructura, es una vía esperanzadora para crear soluciones más duraderas, sostenibles y que se ajusten a las condiciones reales de exposición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almashakbeh, Y., Saleh, E., & Al-Akhras, N. (2022). Evaluation of Half-Cell Potential Measurements for Reinforced Concrete Corrosion. 17(7), 975-1001.
doi:<https://doi.org/10.3390/coatings12070975>
- Cappellesso, V., DiSumma, D., DeBelie, N., Porhaji, P., Dabral, K., Ferrara, L., . . . Gruyaert, E. (2023). A review of the efficiency of self-healing concrete technologies for durable and sustainable concrete under realistic conditions. *International Material Reviews*, 68(5), 747-769.
doi:<https://doi.org/10.1080/09506608.2022.2145747>
- Cuenca, E., Mezena, A., & Ferrara, L. (2021). Synergy between crystalline admixtures and nano-constituents in enhancing autogenous healing capacity of cementitious composites under cracking and healing cycles in aggressive waters. *Construction and Building Materials*, 266 Part B(10), 121447-12168. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121447>
- Cuenca, E., Rigamonti, S., Gastaldo, E., & Ferrara, L. (2020). Crystalline Admixture as Healing Promoter in Concrete Exposed to Chloride-Rich Environments: Experimental Study. 33(3), 1-14.
doi:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003604](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003604)
- Feng, P., Jia, J., Liu, M., Peng, S., Zhao, Z., & Shuai, C. (2021). Degradation mechanisms and acceleration strategies of poly (lactic acid) scaffold for bone regeneration. *Materials & Design*, 210(15), 648-679. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110066>
- Giaireton, V., Santos, N. D., Longhi, M., Borge, A., & Carpena, D. (2022). Reduction of concrete permeability using admixtures or surface treatments. *J Build Rehabil*, 7(38), 176-189.
doi:<https://doi.org/10.1007/s41024-022-00176-z>
- Giaireton, V., Van, T., Gruyaert, E., Van, K., & DeBelie, N. (2024). Self-healing concrete with a bacteria-based or crystalline admixture as healing agent to prevent chloride ingress and corrosion in a marine environment. *Developments in the Built Environment*, 19(1), 100486-100501.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100486>
- Golewski, G. (2022). The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustainable Chemistry*, 3(4), 520-534.
doi:https://doi.org/10.3390/suschem3040032?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Jemimah, M., Arulraj, P., & Meyyappan, P. (2021). Effect of partial replacement of cement with nano fly ash on permeable concrete: A strength study. *Materials Today Proceedings*, 43(5), 891-915.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.891>

- López, A., Moreno, A., Cabello, J., González, S., Pérez, J., & Pérez, T. (2025). Evaluación de las propiedades de durabilidad de mezclas de concreto con adición de microceniza. Instituto Mexicano del Transporte, 2(2), 1-57. doi:<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28357.36327>
- Tibbetts, C., Riding, K., & Ferraro, C. (2021). A critical review of the testing and benefits of permeability-reducing admixtures for use in concrete. Cement, 6(21), 1016-1028. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cement.2021.100016>
- Wang, X., Guo, M.-z., & Ling, T.-C. (2022). Review on CO₂ curing of non-hydraulic calcium silicates cements: Mechanism, carbonation and performance. Cement and Concrete Composites, 133(5), 104641-104665. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104641>
- Wu, Z., Zhang, J., Xu, W., Ding, Y., Ren, Q., Sun, Q., & Zhue, Y. (2023). Development of cementitious capillary crystalline waterproofing agents and durability study of concrete in the presence of chloride with sulfate in aqueous environment. Journal of Building Engineering, 79(15), 798-821. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107798>
- Zhan, Q., Dong, W., FU, C., Wang, A., & Yi, J. (2022). The self-healing of marine concrete cracks based on the synergistic effect of microorganisms and inorganic minerals. Journal of Building Engineering, 61(1), 210-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105210>
- Zhang, Y.-z., Liu, L.-y., Wei, G., & Lai, L.-y. (2023). Investigating the self-healing performance of cracked undersea constructions. Journal of Building Engineering, 80(15), 928-942. doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107928>
- Howell, G. A. (1999). What is Lean Construction? Proceedings of the International Group for Lean Construction (IGLC).
- Koskela, L. (1992). Application of the New Production Philosophy to Construction. Technical Report No. 72, Stanford University.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). Lean Thinking. Free Press.

CONFLICTO DE INTERÉS:

Los autores declaran que no existen conflicto de interés posibles

FINANCIAMIENTO

No existió asistencia de financiamiento de parte de pares externos al presente artículo.

NOTA:

El artículo no es producto de una publicación anterior.

