

Evaluación de la vida útil en la rehabilitación de hormigón - un beneficio de sostenibilidad.

P. C. Stivaros^{1*}

*Autor de Contacto: pstivaros@geiconsultants.com

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.814>

Recibido: 27/09/2024 | Correcciones recibidas: 18/03/2025 | Aceptado: 28/04/2025 | Publicado: 01/05/2025

RESUMEN

Este documento analiza varias prácticas de reparación, diseño y mantenimiento para producir estructuras de concreto duraderas y sostenibles. Se hace hincapié en la valoración y valoración de estructuras de hormigón deterioradas. Los principios de evaluación y reparación se demuestran a través de estudios de casos de estructuras de hormigón deterioradas. La preservación del concreto es una consideración importante para mantener los recursos económicos y naturales. El hormigón, como casi cualquier otro material de construcción, es susceptible de deterioro durante su vida útil. Reparar y prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón contribuye a la sostenibilidad general de los materiales y recursos. Las decisiones de evaluación y reparación deben basarse en una evaluación exhaustiva que consista en una inspección visual, ensayos no destructivos (END), pruebas de laboratorio y un análisis de evaluación de la vida útil.

Palabras clave: reparación de hormigón, sostenibilidad del hormigón, evaluación estructural, ensayos no destructivos, vida útil.

Citar como: Stivaros, P. C. (2025), “Evaluación de la vida útil en la rehabilitación de hormigón - un beneficio de sostenibilidad.”, Revista ALCONPAT, 15 (2), pp. 205 – 217, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.814>

¹ Vice President, GEI Consultants, Inc., P.C., 1000 New York Avenue, Suite B, Huntington Station, NY, USA.

Contribución de cada autor

En este trabajo, el autor Pericles C. Stivaros contribuyó con todas las actividades en la preparación de este artículo.

Licencia Creative Commons

Los derechos de autor (2025) son propiedad de los autores. Este trabajo es un artículo de acceso abierto publicado bajo los términos y condiciones de una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 International License ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discusiones y correcciones posteriores a la publicación

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2026 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2025.

Service life evaluation in concrete rehabilitation – a sustainability benefit.

ABSTRACT

This paper discusses several repair design and maintenance practices to produce durable and sustainable concrete structures. Emphasis is given in the assessment and evaluation of deteriorated concrete structures. The evaluation and repair principles are demonstrated through case studies of deteriorated concrete structures. Concrete preservation is an important consideration to sustain both economic and natural resources. Concrete, like almost any other building material, is susceptible to deterioration during its service life. Repairing and extending the service life of concrete structures contributes to overall sustainability of materials and resources. Assessment and repair decisions should be based on a thorough evaluation consisting of visual inspection, nondestructive Testing (NDT), laboratory testing, and a service life evaluation analysis.

Keywords: concrete repair, concrete sustainability, structural assessment, nondestructive testing, service life.

Consideração da vida útil na reabilitação de concreto – um benefício à sustentabilidade.

RESUMO

Este artigo discute várias práticas de projeto e manutenção de reparos para produzir estruturas de concreto duráveis e sustentáveis. A ênfase é dada à inspeção e avaliação de estruturas de concreto deterioradas. Os princípios de inspeção e reparo são demonstrados por meio de estudos de caso de estruturas de concreto deterioradas. A preservação do concreto é um fator importante na redução do consumo de recursos naturais e também contribui à economia. O concreto, como qualquer outro material de construção, é suscetível à deterioração durante sua vida útil. Reparar e prolongar a vida útil de estruturas de concreto contribui para a sustentabilidade geral. As decisões de inspeção e reparo devem ser baseadas em uma avaliação completa que consiste em inspeção visual, ensaios não destrutivos (NDT), ensaios de laboratório e uma análise com avaliação da vida útil.

Palavras-chave: reparação de concreto, sustentabilidade do concreto, avaliação estrutural, ensaios não destrutivos, vida útil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

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

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

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

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad es un concepto amplio que abarca diversos objetivos, como el desarrollo económico, el desarrollo social y el desarrollo ambiental. En términos simples, la sostenibilidad es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. La industria de la construcción en todo el mundo consume una gran cantidad de recursos naturales, además de contribuir a efectos ambientales adversos. Por lo tanto, la necesidad de desarrollar prácticas de construcción sostenibles es importante. El concreto es, de lejos, el material de construcción más utilizado. El concreto ha ascendido a la cima de los materiales de construcción debido a sus ventajas sobre otros materiales de construcción. El concreto es fácil y rápidamente moldeado en varias formas y tamaños, y es adaptable a cualquier aplicación, ubicación geográfica y clima. El concreto, si es diseñado, construido y mantenido adecuadamente, puede durar para siempre, y eso no es exageración! Por lo tanto, el concreto puede y debe ser un material de construcción sostenible.

Una estructura de concreto sostenible debe ser diseñada, construida y mantenida de manera que se minimice el impacto ambiental total durante su ciclo de vida. El cemento Portland es el principal ingrediente del concreto. La fabricación de cemento es un proceso que consume mucha energía e incluye la molienda y el calentamiento de una mezcla de materias primas como piedra caliza, arcilla, arena y mineral de hierro en un horno rotativo. Este proceso produce emisiones tóxicas y libera cantidades significativas de dióxido de carbono (CO₂) en el medio ambiente.

Los problemas ambientales de efecto invernadero asociados a la producción de cemento y al consumo de recursos naturales dictan el desarrollo de medios y procedimientos para mejorar la eficiencia energética y ambiental de la fabricación de cemento. Además, el uso de cemento debe ser minimizado y/o parcialmente sustituido por otros materiales cementosos cuya producción requiera menos energía y emita menos gases tóxicos. La minimización del uso de cemento puede lograrse a través de un diseño estructural adecuado y eficiente y un mantenimiento apropiado después de la construcción. Es muy importante desarrollar métodos efectivos de protección para estructuras de concreto para extender su vida útil y eliminar la necesidad de reparaciones o reconstrucciones. Para estructuras de concreto deterioradas existentes, la extensión de su vida útil se logra a través de una comprensión completa del tipo, la causa y la extensión del daño, así como de la implementación de reparaciones y un mantenimiento adecuados.

El desarrollo de planes sostenibles en la industria de la construcción comienza en la concepción del proyecto y se extiende a la construcción y más allá de su vida útil. Este artículo discute diversas consideraciones de diseño, construcción y mantenimiento para producir estructuras de concreto duraderas. Se hace hincapié en la evaluación y reparación de estructuras de concreto deterioradas, utilizando modelos de evaluación de vida útil.

2. CONEXIÓN ENTRE LA EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL Y LA SOSTENIBILIDAD

El objetivo principal de los planes de desarrollo sostenible incluye la conservación de recursos y la reducción de residuos. Por lo tanto, cuanto más tiempo las estructuras estén en servicio, menor será el impacto ambiental a lo largo de su vida útil. Las estructuras están sujetas a daños y deterioro principalmente debido al uso y a los efectos ambientales. Los enfoques tradicionales a menudo implican la sustitución completa, lo que consume muchos recursos y es perjudicial para el medio ambiente. La evaluación de la vida útil proporciona un enfoque más sostenible, evaluando la vida útil restante de las estructuras de concreto existentes e identificando técnicas de rehabilitación apropiadas. La reparación y, por lo tanto, la prolongación de la vida útil de las estructuras de concreto contribuyen a la sostenibilidad general de los materiales y recursos. La evaluación

estructural, la evaluación de la vida útil y la rehabilitación de estructuras de concreto deterioradas son necesarias para extender su vida útil y mantener la integridad estructural, pero también para promover prácticas sostenibles en la construcción y en la gestión de infraestructura.

En resumen, la evaluación de la vida útil es una herramienta esencial en la evaluación del comportamiento de estructuras de concreto deterioradas, que puede contribuir a reparaciones adecuadas y duraderas a largo plazo, maximizando así la vida útil de las estructuras y minimizando su impacto ambiental.

3. SUSTENTABILIDAD EN EL PROYECTO DEL CONCRETO

El proyecto estructural de concreto generalmente está regido por códigos de construcción y normas y regulaciones nacionales y locales. Los códigos (normas) de construcción del pasado enfatizaban la resistencia y la seguridad de las estructuras con pocos requisitos de durabilidad. La industria del concreto reaccionó positivamente al desarrollar estándares de diseño y construcción que incorporan requisitos de protección y durabilidad en línea con los planes de desarrollo sostenible. El Instituto Americano de Concreto (ACI) inició una campaña de sostenibilidad e implementó diversas mejoras en el desarrollo sostenible en sus publicaciones de diseño, construcción y materiales, incluyendo el documento ACI 130R-19, Informe sobre el Papel de los Materiales en la Construcción Sostenible de Concreto (ACI 130R, 2019). El Instituto Americano de Arquitectos (AIA) desarrolló una guía para propietarios e ingenieros/arquitectos sobre cómo elaborar contratos para proyectos con objetivos sostenibles (Documento AIA D 503, 2013).

Los ingenieros estructurales pueden influir significativamente en los impactos ambientales de las estructuras de concreto a través de decisiones de diseño y especificaciones. A continuación, algunos factores que afectan el rendimiento y la sostenibilidad de las estructuras de concreto:

- Cargas del proyecto: Tener una estructura que pueda resistir desastres sin sufrir daños significativos se considera más sostenible.
- Eficiencia Estructural: Optimiza el rendimiento y minimiza el desperdicio. No sobredimensionar los elementos.
- Durabilidad: Una combinación de buenos detalles de diseño y protección, junto con una dosificación de concreto orientada a la durabilidad, puede resultar en una estructura de concreto más sostenible.
- Constructibilidad: Elementos más pequeños, con armaduras congestionadas y dimensiones fuera de lo estándar, requieren más energía y esfuerzo. Además, especificaciones prescriptivas pueden hacer que el diseño sea menos sostenible.
- Eficiencia energética: los edificios de concreto suelen ser más eficientes en términos energéticos.
- Dosificación del Concreto: Las proporciones de los ingredientes utilizados en las dosificaciones del concreto pueden tener un impacto significativo en la huella ambiental. Las especificaciones de rendimiento permitirían la optimización de la mezcla, mejorarían la calidad del producto, fomentarían la innovación, reducirían el costo y el tiempo de construcción, reduciendo, al mismo tiempo, la huella ambiental. Una mezcla de concreto sostenible debe incluir:
 - Minimizar la huella energética y de CO₂.
 - Utilizar materiales cementosos alternativos, como adiciones.
 - Minimizar el uso de agua potable.
 - Utilizar aditivos reductores de agua.
 - Minimizar el desperdicio.
 - Aumentar el uso de materiales reciclados.

La sostenibilidad y la durabilidad van de la mano. La experiencia nos ha mostrado que los edificios de concreto no colapsan rápidamente, pero pueden deteriorarse bastante rápido. La durabilidad está

relacionada con la capacidad de las estructuras para resistir la acción del intemperie, ataque químico, abrasión y otras condiciones potenciales de deterioro durante el servicio. Diseñar para la durabilidad es indudablemente la mejor inversión económica y social, ya que reduce los costos de mantenimiento y reparación y extiende la vida útil de la estructura. Las prácticas de diseño de durabilidad pueden incluir dosis adecuadas de concretos, suficiente recubrimiento sobre la armadura de acero, curado y protección adecuados en la edad temprana y aplicación de recubrimientos protectores. El plan de desarrollo de sostenibilidad más eficaz es evitar la necesidad de mantenimiento y reparaciones extensivas. El Comité 160 del ICRI, Ciclo de Vida y Sostenibilidad (2015), desarrolló un documento técnico sobre sostenibilidad para la reparación y mantenimiento de edificios de concreto y mampostería. El artículo del ICRI (2015) argumenta que la protección, el mantenimiento y las reparaciones proactivas ofrecen las ventajas sostenibles inherentes definitivas en términos de costo, longevidad, energía e incluso responsabilidad cultural. Generalmente, un proyecto estructural sostenible debe incluir requisitos de resistencia y durabilidad, así como otras consideraciones de sostenibilidad, como eficiencia estructural, consideraciones de constructibilidad, eficiencia energética y, lo más importante, un estudio de dosificación del concreto con minimización del uso de cemento y agua.

4. INSPECCIÓN Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Las estructuras son susceptibles a daños y deterioro principalmente debido al uso y a los efectos ambientales. Inspecciones y reparaciones periódicas pueden evitar reparaciones largas y costosas. Una estructura de concreto dañada requiere una evaluación estructural para determinar la causa y la extensión del daño. Para diseñar una reparación duradera y, por lo tanto, sostenible, es necesario tener un profundo conocimiento de los mecanismos de deterioro, la tasa de deterioro y los efectos potenciales de las condiciones deterioradas existentes. Es importante saber si el daño se debe a efectos relacionados con efectos ambientales, como la infiltración de agua y la acción de congelación y descongelación. Igualmente, es importante verificar las propiedades físicas y las características de durabilidad del concreto dañado. Ciertas cuestiones deben abordarse antes de la reparación y rehabilitación. ¿El concreto que se va a recuperar está en buenas condiciones? ¿Cuál es su resistencia a la compresión in situ? ¿Está carbonatado y tiene potencial de desarrollar la corrosión del acero? ¿Incluye algún contaminante químico? ¿Sufrió un ataque químico con potencial de daños futuros? ¿Incluye microfisuras internas?

El proceso y la evaluación incluyen el desarrollo de un programa de investigación, que incluye levantamientos de condiciones, ensayos no destructivos, ensayos de laboratorio de materiales y verificación del diseño estructural. La evaluación debe incluir información sobre el tipo, la causa y la extensión de los daños, así como el mantenimiento y la supervisión futuros necesarios. Un elemento importante del programa de investigación es la evaluación de alternativas de reparación a través de una evaluación de la vida útil. Una evaluación inadecuada puede llevar a detalles de reparación y especificaciones de materiales inapropiados, lo que resultará en un fallo prematuro de la reparación y acelerará los daños a otras partes no dañadas de la estructura. Así, el nivel de sostenibilidad se reduce.

La ACI 364 (2019) proporciona procedimientos generales para la evaluación de estructuras de concreto antes de la rehabilitación y la reparación. El ACI 562 (2019) codifica los requisitos mínimos para la evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras existentes. Otros códigos, normas de la industria y guías están disponibles, proporcionando información sobre cómo abordar las cuestiones complejas de un programa de reparación, tales como:

- ACI 201.1R (2008), Guía para la Inspección Visual del Concreto en Servicio
- ACI 224.1R (2007), Causas, Evaluación y Reparación de Grietas en Concreto
- ACI 228.2R (2013), Informe sobre Métodos de Prueba No Destructivos para la Evaluación de Estructuras de Concreto

- ACI 546R (2023), Guía para la Reparación de Concreto ACI 563 (2018), Especificaciones para la Reparación de Concreto en Edificios
- ICRI No. 210.4 (2021), Guía para Métodos de Evaluación No Destructivos para la Evaluación de Condición, Reparación y Monitoreo de Desempeño de Estructuras de Concreto
- ICRI No. 310.1R (2008), Guía para la Preparación de Superficies para la Reparación de Concreto Deteriorado Resultado de la Corrosión del Acero de Refuerzo

En general, una evaluación estructural adecuada llevará a reparaciones estructurales apropiadas, así como reparaciones duraderas que extenderán la vida útil de las estructuras de concreto y, por lo tanto, contribuirán a la sostenibilidad general de los materiales y recursos.

5. EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL – CONCEPTO GENERAL

La Vida Útil Técnica de un elemento de concreto es el tiempo en servicio hasta que se alcanza un estado inaceptable definido, como el agrietamiento del concreto, un nivel de seguridad por debajo del aceptable o la falla de elementos. Un elemento importante del diseño de reparación es la vida útil y el análisis de costos de las reparaciones. Se debe realizar una evaluación de la vida útil en estructuras de concreto para determinar el potencial de deterioro futuro y evaluar métodos alternativos de reparación.

La deterioración de las estructuras de concreto armado se debe principalmente a la corrosión del acero de refuerzo embutido en el concreto. La corrosión del acero se atribuye generalmente a la entrada de cloruros y otros productos químicos corrosivos en la masa de concreto. En general, la evaluación de la vida útil de una estructura de concreto en reparación se basa en modelos probabilísticos que predicen el tiempo necesario para que los contaminantes alcancen el acero embutido en el concreto e inicien la corrosión. El análisis considera las características específicas del concreto, los daños existentes, las propiedades del material, las condiciones ambientales locales y los tratamientos de protección de las superficies de concreto expuestas.

En resumen, el beneficio sostenible proporcionado por la evaluación de la vida útil radica en el hecho de que debe realizarse a nivel de prevención desde el diseño. Esto implicará economías sustanciales en el uso de recursos y materiales, reduciendo así el impacto ambiental de las estructuras. Si la evaluación se inicia a partir de la necesidad de reparación, el beneficio será considerarla como punto de partida para la prevención del problema recurrente y, de este modo, prolongar la vida útil de la estructura.

6. DESARROLLO DE PROYECTO DE REPARACIÓN

El proyecto y los detalles de la reparación necesaria deben desarrollarse en base a la evaluación y al estudio de caso. Los códigos y normas aplicables al diseño y construcción originales del edificio, así como el código base del proyecto de reparación, deben determinarse. Los materiales de reparación deben ser compatibles con la estructura y con el entorno de servicio. El mantenimiento previsto debe tenerse en cuenta en la selección de materiales y métodos de reparación. De acuerdo con la norma ACI 562 (2019), el diseño de la reparación debe considerar la resistencia (capacidad de carga de los elementos dañados), la operatividad estructural (como estabilidad general, resistencia al fuego, deflexión, fisuras y vibración excesiva) y la durabilidad a largo plazo (capacidad de los elementos estructurales para resistir la deterioración).

La restauración de la resistencia de los elementos generalmente es exigida por los códigos (normas) de construcción aplicables. Una estructura debe ser restaurada a su capacidad de carga originalmente proyectada. Algunos requisitos de durabilidad, como el recubrimiento de concreto en el acero de refuerzo, también son exigidos por las normas (códigos). Otros requisitos de

durabilidad, como recubrimientos protectores, generalmente no son exigidos por las normas. Sin embargo, las medidas de protección tienen un impacto significativo en la vida útil de las estructuras. La eficacia y la longevidad de una reparación en concreto dependen mucho de la preparación de la superficie, de la aplicación del material de reparación y de la protección y curado de la reparación. Por lo tanto, se debe desarrollar un riguroso programa de garantía de calidad y se deben especificar procedimientos de inspección. El programa de garantía de calidad debe incluir disposiciones para la inspección y pruebas para verificar la calidad de la mano de obra y de los materiales de reparación. El ICRI (2015) discute varios principios para reparaciones sostenibles y duraderas de estructuras de concreto:

- Proyecto de reparación: Recupere la mayor cantidad posible del material existente. Proporcione medidas de protección de superficie y proteja adecuadamente las varillas de acero para evitar la corrosión.
- Gestión de residuos: Minimice el desperdicio y/o recicle los residuos.
- Utilice materiales de reparación "verdes": reciclados, de origen local, duraderos, con vida útil considerada y fáciles de usar.
- Técnicas de reparación sostenibles: considere el impacto ambiental del método de eliminación de concreto e incluya medidas de control de corrosión del armado.
- Implementación de reparaciones: Establecer un programa de control de calidad.
- Monitoreo: inicie un programa de monitoreo e implemente mantenimiento preventivo.

Generalmente, un proyecto de reparación sostenible debe incluir requisitos de resistencia y durabilidad, así como otras consideraciones de sostenibilidad, como la recuperación y reutilización de materiales, la minimización de residuos, el uso de materiales reciclados y la consideración del impacto ambiental de la demolición y desecho de materiales de construcción.

7. ESTUDIO DE CASO: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE SANEAMIENTO

Los principios de inspección y evaluación de estructuras de concreto antes de la rehabilitación son demostrados por un estudio de caso que involucra la reparación de tanques de concreto en una planta de tratamiento de aguas residuales. A diferencia de las estructuras de edificios, las estructuras ambientales están construidas para durar y, de hecho, algunos municipios exigen una vida útil de 100 a 200 años. Las plantas de tratamiento, tuberías y otras instalaciones ambientales deben ser diseñadas, construidas y mantenidas adecuadamente a lo largo de sus ciclos de vida para sostener los niveles de servicio necesarios. Cuidar estas estructuras es clave para su sostenibilidad y rendimiento exitoso.

La evaluación, el análisis y la reparación de estructuras de saneamiento presentan algunas diferencias notables en comparación con los estudios de estructuras del tipo de construcción. Las severas condiciones de exposición, con el ataque continuo de los elementos, la presencia constante de agua y otros líquidos, el ataque continuo de productos químicos y la erosión de la superficie causada por el movimiento de líquidos son algunas de las diferencias que distinguen las estructuras hidráulicas de otras estructuras. Este estudio de caso investiga la causa y la extensión de la deterioración y desarrolla un proyecto de reparación para tanques de concreto que contienen líquidos en una estación de tratamiento de aguas residuales. Los tanques de decantación de concreto de la estación presentaban un extenso deterioro, en forma de erosión superficial, fisuras, desconchados, corrosión de las armaduras y otros signos de desgaste y deterioro. El objetivo de la investigación estructural de los tanques de concreto era determinar el estado general, la extensión de los daños, el tipo y el costo de las reparaciones para la rehabilitación necesarios y la vida útil restante de los tanques de concreto.

Los objetivos del proyecto fueron los siguientes:

- Identificar el tipo y extensión del daño
- Determinar la calidad y la resistencia del concreto
- Evaluar el efecto de los daños en la integridad estructural
- Identificar y evaluar opciones de reparación

Para alcanzar los objetivos anteriores, se desarrolló el siguiente programa de investigación y reparación:

- Revisión de los documentos de construcción disponibles
- Levantamientos de condiciones - inspecciones visuales
- Ensayos destructivos
- Ensayos no destructivos
- Ensayos de laboratorio de muestras de concreto
- Evaluación de la vida útil
- Evaluación estructural
- Diseño de reparación
- Ejecución de reparaciones

Un programa de reparación exitoso que restaure la integridad estructural y maximice la vida útil de las estructuras de concreto deterioradas depende de la planificación y ejecución adecuada de la evaluación estructural, así como del diseño y la ejecución de la reparación. Esta planificación debe incluir el establecimiento de los objetivos y expectativas del proyecto, así como la forma de alcanzarlos.

7.1 Levantamiento de Condiciones

Las observaciones visuales se realizaron de acuerdo con el ACI 201.1R (2008). Las condiciones observadas incluyeron: fisuras, desprendimientos, agregados expuestos y erosión superficial, armaduras expuestas, corrosión de las armaduras y juntas de dilatación dañadas. Con base en las observaciones visuales, se desarrolló un programa detallado de evaluación que incluyó ensayos no destructivos y ensayos de laboratorio de muestras de concreto. Los defectos típicos identificados y las reparaciones realizadas se ilustran en la Figura 1.



Figura 1. Columnas de concreto fisuradas, con reparaciones. Armaduras expuestas y corroídas.

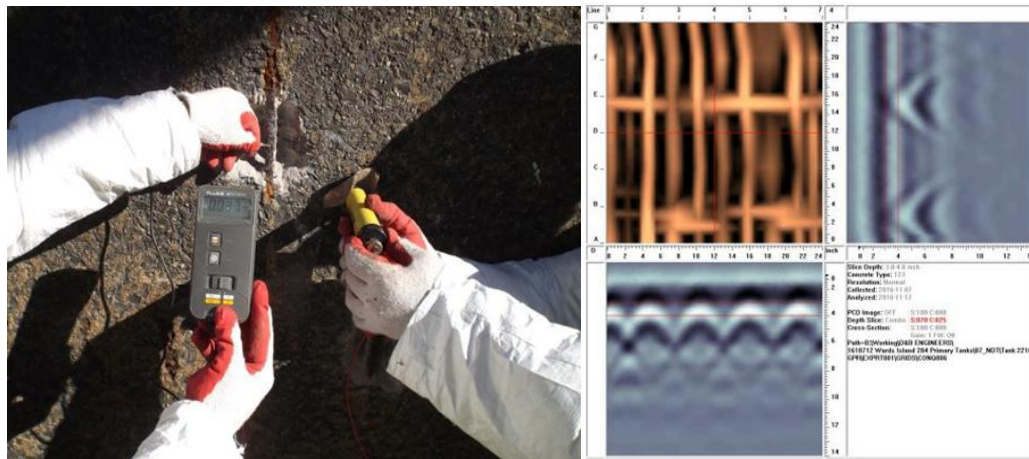


Figura 2. Ensayo de Media celda: Medición de potenciales de corrosión. GPR: Identificación de fallas internas y localización del acero.

7.2 Ensayos no destructivos.

Las observaciones visuales proporcionan información solo sobre daños fácilmente visibles. Los daños ocultos dentro del concreto pueden ser identificados utilizando métodos de ensayos no destructivos, así como ensayos destructivos. Se realizaron ensayos no destructivos en sitios seleccionados para confirmar la rigidez del concreto, identificar fallas internas, detectar corrosión potencial de la armadura y localizar la profundidad de la armadura. Los métodos de ensayos no destructivos incluyeron: ensayos de recubrimiento de las armaduras, ensayos de radar de penetración en el suelo (GPR), eco de impacto, ultrasonido y potencial de corrosión para medir los potenciales de corrosión. La descripción de los métodos no destructivos se proporciona en ACI 228.2R (2013). Fotografías de los ensayos no destructivos se ilustran en la Figura 2. El resumen de los ensayos no destructivos incluye:

- Las pruebas de recubrimiento de las armaduras y GPR indicaron que la armadura de acero estaba ubicada a profundidades que variaban de espesores de hasta 75 mm, con la mayoría de las armaduras localizadas a 35 mm a 50 mm de la superficie. El recubrimiento de diseño de las armaduras era de 50 mm.
- Las pruebas de impacto-eco y respuesta al impulso no indicaron deficiencia estructural significativa en los tanques. Las paredes de los tanques eran sólidas, sin fallas ni fragilidades estructurales generalizadas. Sin embargo, las pruebas indicaron la existencia de áreas dispersas con defectos localizados, como delaminaciones superficiales, concreto segregado y vacíos en todos los tanques de concreto. Estos defectos se identificaron principalmente en los lugares de varillas de acero corroídas expuestas, en lugares de fisuras y a lo largo de las juntas de dilatación.
- El ensayo de potencial de corrosión indicó una alta probabilidad de corrosión cerca de las armaduras expuestas corroídas. La actividad de corrosión disminuye a medida que se aleja de las armaduras expuestas. No se detectó actividad de corrosión generalizada.
- Pruebas en áreas sospechosas mostraron que armaduras localizadas a profundidades menores de 12 mm presentaban corrosión leve a severa, mientras que varillas a profundidades mayores presentaban corrosión leve o ninguna.

7.3 Ensayos de laboratorio

El objetivo de los ensayos de laboratorio, en muestras de concreto, fue determinar la resistencia y la calidad del concreto, detectar ataques químicos y determinar las características de durabilidad a largo plazo del concreto. Las pruebas de laboratorio incluyeron la resistencia a la compresión del concreto, el contenido de cloruro, el contenido de sulfato, la alcalinidad (pH) y el examen petrográfico. El resumen de las pruebas de laboratorio incluye:

- La resistencia a la compresión del testigo de concreto varió de aproximadamente 30 MPa a 70 MPa. La resistencia de diseño del concreto era de 30 MPa
- El contenido de cloruro varió de 0,21 a 0,77% respecto al peso del cemento Portland en los 25 mm exteriores y de 0,12 a 0,44% en las profundidades de 50 mm a 75 mm. Los niveles de cloruro están muy por encima de lo prescrito en el ACI 318
- El ACI 318 (2019) sugirió un límite de 0,15% (servicio seco) o 0,08% (servicio húmedo) por encima del cual puede ocurrir corrosión del acero de refuerzo
- El contenido de sulfato varió de menos de 0,0011% a 0,0016% en masa de concreto en la superficie y por debajo de 0,001% en profundidades de 75 mm. Estos niveles de sulfato estaban muy por debajo de los límites sugeridos por el ACI 318 (2019) para la actividad de corrosión.
- La profundidad de la carbonatación varió bastante alcanzando una profundidad máxima de 12 mm de la superficie del concreto.
- Los niveles de alcalinidad (pH) del concreto varían entre 10 y 12, desde la superficie hasta 75 mm de profundidad. Los valores de pH medidos no cayeron por debajo del nivel crítico de 8,5, en el cual la película protectora de pasivación a la corrosión del acero se rompe, pudiendo ocurrir corrosión.

La prueba de petrografía indicó lo siguiente

- Concreto de buena calidad con agregados densos y bien granulados, concreto bien compactado.
- La superficie de concreto expuesta estaba en malas condiciones. Las superficies de concreto presentaban granos de arena expuestos y extensos agregados expuestos, mostrando pérdida de pasta y erosión. La exposición prolongada a la humedad y al flujo de agua, así como el ataque químico de los contaminantes del agua, fueron determinados como los principales mecanismos de deterioro.
- No hubo evidencia de reacciones álcalis sílice u otras reacciones perjudiciales entre la pasta de cemento y el agregado.
- Microfisuras fueron observadas principalmente en los primeros 50 mm.
- El concreto no contenía aire incorporado, lo que lo hacía vulnerable a la acción del hielo y del deshielo. Como los tanques siempre están llenos de agua, no se observaron daños por hielo y deshielo en los testigos de concreto.

8. EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Se realizó una evaluación de la vida útil de cada tipo de tanque que contiene líquido u otros elementos de concreto sospechosos en toda la planta. Se extrajeron muestras de concreto de cada tipo de estructura, así como muestras de aguas residuales que serán recolectadas para pruebas en laboratorio. Las muestras de concreto se probaron para determinar las propiedades iónicas y de transporte de humedad del concreto. Las muestras de aguas residuales se probaron en cuanto al pH y a varias concentraciones de metales. Los datos recolectados de las pruebas de concreto y agua se utilizaron en la evaluación de la vida útil del concreto. Se realizaron varias simulaciones para estimar el tiempo hasta el inicio de la corrosión de la armadura de acero. Las simulaciones incluyeron el estado de deterioro del concreto y los diversos métodos de reparación.

- a. Ejecución de las reparaciones mínimas necesarias, incluyendo reparación de fisuras, desprendimientos, juntas de dilatación y armaduras corroídas.
- b. Ejecución de las reparaciones mínimas necesarias, de acuerdo con el Ítem (a), aplique un mortero de sílice activa cementosa de 12 mm de espesor y aplique un recubrimiento protector de epoxi en todas las superficies del tanque.

Los resultados de las simulaciones, son mostrados en las Figuras 3 y 4. Los resultados de la simulación indicaron que los contaminantes de cloruros, pueden alcanzar los 50 mm de

profundidad y causar corrosión de la armadura en aproximadamente siete a diez años. Las armaduras localizadas cerca de la superficie, a menos de 50 mm, se empezarán a corroer en un tiempo menor. Para armaduras localizadas a más de 75 mm de profundidad, los cloruros tardarán de 20 a 40 años en afectar las armaduras. Cuando se introdujo una capa protectora de mortero y un recubrimiento epóxico en la simulación, el tiempo para el inicio de la corrosión de las varillas de acero aumentó a mucho más de 40 años.

En resumen, los resultados de las simulaciones de vida útil indican que, si el concreto solo se repara y se inyectan las fisuras, la corrosión de la armadura probablemente reiniciará en pocos años. La simulación sugiere que una reparación que elimine el concreto dañado, lo sustituya por mortero denso y lo selle con un recubrimiento protector, probablemente protegerá la armadura de la corrosión por mucho más de 40 años, aumentando así la vida útil de las estructuras y minimizando su impacto ambiental.

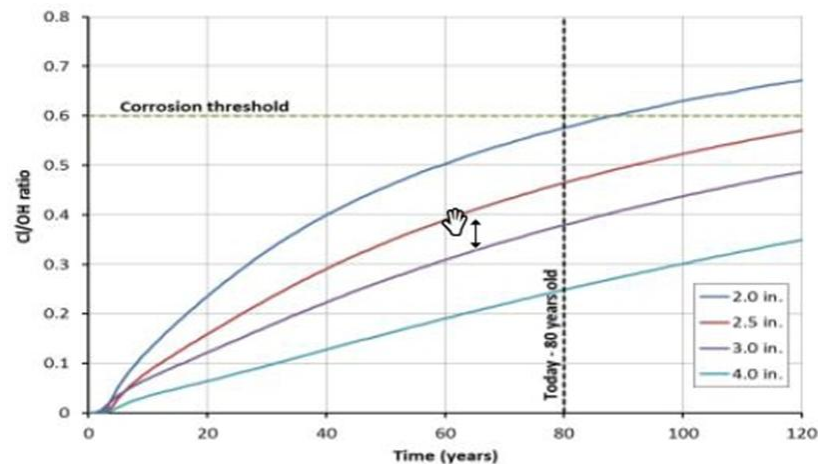


Figura 3. Evolución de la relación cloruro/hidróxido a lo largo del tiempo y el inicio esperado de corrosión del acero a diferentes profundidades con mínimas reparaciones para preservar el concreto tal como está.

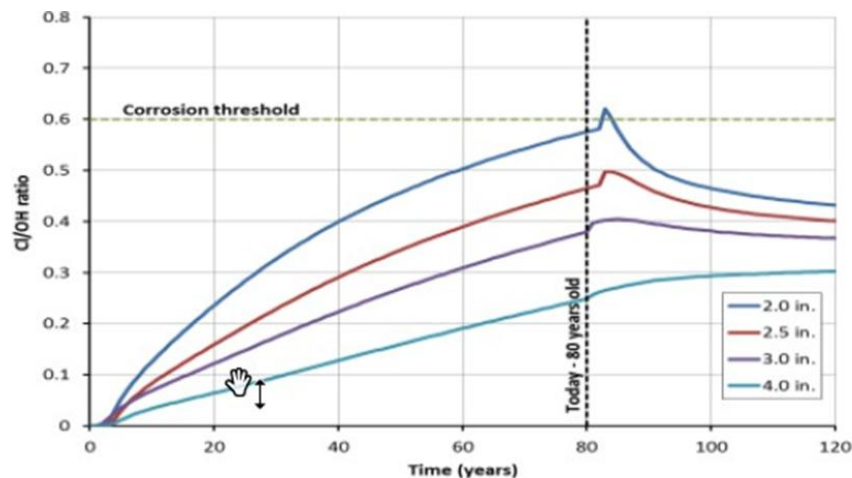


Figura 4. Evolución de la relación cloruro/hidróxido a lo largo del tiempo y comienzo esperado de corrosión de la armadura a diferentes profundidades utilizando una estrategia de reparación robusta.

9. PROYECTO DE REPARACIÓN

La filosofía del proyecto de reparación para este caso fue doble: restaurar la integridad estructural de los tanques de concreto y garantizar su durabilidad a largo plazo después de las reparaciones. El proyecto de reparación sugerido incluyó métodos y materiales de reparación duraderos y de última

generación. Así, se aumentó la durabilidad y se extendió la vida útil de los tanques. La durabilidad a largo plazo de las reparaciones y de los materiales es una cuestión importante de sostenibilidad, ya que reduce los impactos ambientales de las frecuentes sustituciones y reparaciones, con los residuos, la fabricación y el desecho de escombros asociados. La evaluación de la vida útil indicó que el uso de un recubrimiento protector en la superficie del concreto aumentará la vida útil de la estructura en el doble en comparación con la opción de realizar solo las reparaciones mínimas necesarias.

El proyecto de reparación también consideró la minimización de los materiales de reparación. La intención del proyecto era reparar solo las áreas dañadas localmente, sin sustituciones completas o aplicación de una capa extra continua de concreto sobre las paredes y pisos existentes del tanque. Las especificaciones del proyecto de concreto incluían disposiciones de sostenibilidad relacionadas con los materiales utilizados y el control de calidad. Las especificaciones incluían materiales compatibles con los sustratos existentes y tenían requisitos para la garantía de calidad, incluyendo prototipos y ensayos en las reparaciones. Las especificaciones también permitían el uso de materiales cementosos suplementarios, como ceniza volante, cemento de escoria y sílice activa. Así, se reduce el impacto ambiental del CO₂, así como el uso de materiales cementosos que pueden mejorar la durabilidad a largo plazo del concreto. La ceniza volante generalmente sustituye hasta el 25% del cemento, el cemento de escoria sustituye hasta el 60% o más, y la sílice activa hasta el 8%.

También se incluyeron sugerencias para el tratamiento de los residuos. El concreto dañado retirado podría ser reciclado para producir concreto nuevo, que podría ser utilizado para otras necesidades de concreto moldeado in situ de la planta, como pavimentos, bases de fundación para aceras o como material de relleno.

En general, un proyecto de reparación sostenible para estructuras ambientales debe incluir tanto la restauración de la integridad estructural como la maximización de la durabilidad y la vida útil de las reparaciones a largo plazo. En este estudio de caso, esto se logró mediante una evaluación adecuada de la vida útil, el desarrollo de detalles de reparación apropiados, utilizando materiales de reparación de alta calidad y minimizando reparaciones y materiales, y, sobre todo, aplicando un programa de control de calidad para garantizar que el programa de reparación se ejecute de manera eficiente y adecuada.

10. OBSERVACIONES FINALES.

Este estudio presentó la discusión sobre cuestiones de sostenibilidad relacionadas con la construcción en concreto y las reparaciones en concreto, con énfasis en la evaluación y reparación de estructuras de concreto deterioradas utilizando modelos de evaluación de vida útil. La vida útil de una estructura de concreto adecuadamente diseñada, construida y mantenida puede ser extendida con inspecciones y reparaciones periódicas a lo largo de su vida útil. Concreto duradero es concreto sostenible. La evaluación de la vida útil ayuda a cuantificar los beneficios de la rehabilitación en comparación con la sustitución, enfatizando la sostenibilidad. Un diseño de concreto que considere los requisitos de durabilidad en la protección y en el material es la mejor inversión económica y social; los costos de mantenimiento y reparación se reducen, así como se extiende la vida útil. El plan de desarrollo sostenible más eficaz es evitar la necesidad de mantenimiento y reparaciones extensivas. El objetivo es disminuir el impacto a largo plazo de las estructuras, creando estructuras duraderas.

La evaluación y el estudio de estructuras de concreto dañadas antes de la rehabilitación son de suma importancia. Una evaluación estructural y una evaluación de la vida útil adecuadas son requisitos previos para la durabilidad a largo plazo del concreto y su integridad estructural y, por lo tanto, su sostenibilidad. Las simulaciones de la vida útil deben incluir el estado de deterioro del concreto y los diversos métodos de reparación.

Un trabajo de reparación satisfactorio y duradero exige una comprensión completa del mecanismo y la extensión del deterioro, así como de las propiedades físicas y químicas del material de concreto existente; por lo tanto, se realiza una preparación adecuada de la superficie y se aplican materiales de reparación compatibles.

11.REFERENCIAS

- ACI Committee 130 (2019), *“Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction (ACI 130R-19),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 34 pp.
- AIA Document D503 (2013), *“Guide for Sustainable Projects,”*, American Institute of Architects, Washington, DC, 20120, 67 pp.
- ICRI Committee 160 (2015), *Life Cycle and Sustainability, Sustainability for Repairing and Maintaining Concrete and Masonry Buildings*, 13 pp.
- ACI Committee 364 (2020), *“Guide for Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation (ACI 364.1R-20),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 24 pp.
- ACI Committee 562 (2019), *“Code Requirements for Evaluation, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary (ACI 562-19),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 94 pp.
- ACI Committee 201 (2008), *“Guide for Conducting Visual Inspection of Concrete in Service (ACI 201.1R-08),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 15 pp.
- ACI Committee 224 (2007), *“Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete (ACI 224.1R-07),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 22 pp.
- ACI Committee 228 (2013), *“Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete Structures (ACI 228.2R-13),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 82 pp.
- ACI Committee 546R (2023), *“Guide to Concrete Repair (ACI 546R-23),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 59 pp.
- ACI Committee 563 (2019), *“Specifications for Repair of Concrete in Buildings (ACI 563-18)”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 40 pp.
- ICRI No. 210.4 (2021) *Guide for Nondestructive Evaluation Methods for Condition Assessment, Repair, and Performance Monitoring of Concrete Structures*, 28 pp.
- ICRI No. 310.1R (2008) *Guide for Surface Preparation for the Repair of Deteriorated Concrete Resulting from Reinforcing Steel Corrosion*, 8 pp.
- ACI Committee 318 (2019) *“Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19),”* American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 623 pp.