

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD ANTE CORROSIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Manual del usuario

Valeria Vanessa Lugo García
René Bernardo Elías Cabrera Cruz
Julio César Rolón Aguilar
Roberto Pichardo Ramírez

Autores

editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIDAD

Índice de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Manual del usuario

Índice de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado. Manual del usuario / Valeria Vanessa Lugo García, René Bernardo Elías Cabrera Cruz, Julio César Rolón Aguilar, Roberto Pichardo Ramírez, autores.—Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas ; Ciudad de México : Editorial Fontamara , 2025.

151 págs. ; 17 x 23 cm.

1. Ingeniería civil

LC: TA643 I5.3 2025

DEWEY: TA643 I5.3 2025

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2025

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Segundo Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2905
publicaciones@uat.edu.mx • www.uat.edu.mx • https://libros.uat.edu.mx/

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-8888-92-4

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-968-9729-02-0

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.

Libro digital

Esta obra y sus capítulos fueron sometidos a una revisión de pares a doble ciego, la cual fue realizada por especialistas pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Asimismo, fueron aprobados para su publicación por el Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas y el Comité Interno de la editorial Fontamara.



Índice de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Manual del usuario

Valeria Vanessa Lugo García
René Bernardo Elías Cabrera Cruz
Julio César Rolón Aguilar
Roberto Pichardo Ramírez

Autores





MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado
PRESIDENTE

Dr. Fernando Leal Ríos
VICEPRESIDENTE

Dra. Dora María Lladó Lárraga
SECRETARIA TÉCNICA

Mtro. Eduardo García Fuentes
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

CP Jesús Francisco Castillo Cedillo
VOCAL

MVZ Rogelio de Jesús Ramírez Flores
VOCAL

Comité Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodrigues** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marciano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

ÍNDICE

Agradecimientos	9
Acrónimos	11
Glosario	13
Introducción	17
Capítulo 1.	19
Evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado	
Capítulo 2.	49
Índice de vulnerabilidad estructural ante corrosión (IVEC)	
Anexo A:	81
Fundamento teórico	
Anexo B:	101
fichas técnicas	
Anexo C:	133
formatos	
Anexo D:	141
información general	

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por la beca nacional otorgada a la ingeniera Valeria Vanessa Lugo García durante el periodo 2022-2024 en el que cursó la Maestría de Ingeniería Portuaria en la División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería Tampico de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Dicha beca y el respaldo institucional han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

ACRÓNIMOS

DC1	Fisuración en el recubrimiento por corrosión.
DC2	Depósitos en la superficie.
DC3	Defectos de construcción.
DC4	Resistividad eléctrica del concreto.
DC5	Pérdida de sección.
DC6	Intensidad o velocidad de corrosión.
ICO	Índice de corrosión.
IDC	Índice de Daños en el Concreto Reforzado.
IVAM	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente.
IVE	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura.
IVEC	Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión.
VA1	Clima.
VA2	Exposición al deterioro.
VA3	Exposición al cambio climático.
VE1	Recubrimiento.
VE2	Protección del acero ante corrosión.
VE3	Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas.
VE4	Armado.
VE5	Importancia estructural del elemento.
VE6	Importancia de la estructura.
END	Ensayo no destructivo

GLOSARIO

Agresividad ambiental: capacidad del ambiente en el que se encuentra un material para corroerlo o degradarlo con el tiempo, es decir, qué tan hostil es el ambiente para un material específico y cómo eso afecta su resistencia a la corrosión. “Viene determinada por los factores de contaminación y los meteorológicos, que a menudo actúan simultáneamente, potenciándose sus efectos” (Perepérez-Ventura et al., 1987, p. 17).

Agresividad atmosférica: capacidad del aire y los gases presentes en la atmósfera para causar corrosión en materiales expuestos a estos (Mariaca et al., 1999).

Alveolado: vacíos entre el agregado grueso (Red Iberoamericana, 2000).

Armadura o armado: “conjunto de barras o cables de acero que se colocan dentro de la masa del concreto y hacen que el mismo sea apto para resistir esfuerzos de flexión, cizalladura, tracción, etcétera, o para mejorar su resistencia a la compresión” (Red Iberoamericana, 2000, p. 196).

Cambio climático: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (ONU, 1992, p. 3).

- Concreto:** mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregados (fino y grueso) y agua, con o sin aditivos, fibras u otros materiales cementosos (ACI, 2019; ACI, 2018).
- Concreto reforzado:** “concreto estructural reforzado con no menos de las cuantías mínimas de refuerzo preesforzado, refuerzo no preesforzado, o ambas” (ACI, 2019, 38).
- Corrosión:** “ataque destructivo que sufre un material generalmente metálico, por reacción química o electroquímica con su medio ambiente (atmósfera, suelo, agua, etc.)” (Gómez de León, 2004, p. 13).
- Corrosión atmosférica:** “forma o tipo de corrosión que resulta de la interacción entre una atmósfera natural y un material metálico expuesto en la misma” (Mariaca et al., 1999, p. 24).
- Corrosividad:** capacidad de un material o sustancia para corroer o deteriorar otros materiales con los que entra en contacto (Mariaca et al., 1999).
- Corrosividad atmosférica:** capacidad del ambiente atmosférico para causar corrosión en materiales expuestos a él (Mariaca et al., 1999).
- Daño:** “lesiones externas o internas que sufre una estructura, provocados por una violencia exterior, generalmente derivada de su exposición a sollicitaciones mecánicas accidentales de máxima intensidad o a situaciones extraordinarias” (Treviño, 1998, p. 54).
- Defecto:** “menoscabo o detrimento que sufren las características de una estructura como consecuencia de errores u omisiones cometidos en las etapas de planeación y diseño (defecto congénito) o en la etapa de ejecución (defecto adquirido) aun y cuando se descubra posteriormente a la recepción de la obra por parte del propietario” (Treviño, 1998, p. 53).
- Delaminación:** desprendimiento de fragmentos del concreto debido a tensiones generadas por la corrosión del acero o por dilataciones y contracciones diferenciales (Red Iberoamericana, 2000).
- Depósito:** “sustancia extraña que procedente del entorno, se deposita sobre la superficie de un material” (Red Iberoamericana, 2000, p. 198).
- Desgarramiento:** desprendimiento o separación de una capa superficial del concreto, generalmente en forma de escamas o fragmentos, similar a las grietas debido a adhesión a la cimbra o molde (Castro-Borges y Mendoza-Rangel, 2008).
- Eflorescencia:** sal soluble en agua exudada y depositada en el exterior del concreto, presentada como cubierta blanca en su superficie (Red Iberoamericana, 2000).

- Ensayos o pruebas de corrosión:** procedimientos realizados para estimar los daños producidos, la velocidad de corrosión y la eficacia de los métodos de protección empleados (Gómez de León y Alcaraz, 2004).
- Ensayos o pruebas no destructivos (en concreto):** técnicas utilizadas para evaluar las propiedades y la integridad del concreto sin alterar las piezas sometidas a examen (Gómez de León y Alcaraz, 2004).
- Estructura:** consiste en una serie de partes conectadas con el fin de soportar una carga. Puede concebirse como un conjunto de componentes que se combinan en forma ordenada para cumplir una función dada (González, 2002).
- Expediente de la estructura:** conjunto de documentos y registros que contienen información relevante sobre una estructura específica: el diseño, la construcción, el mantenimiento y la historia de la estructura. Es una herramienta importante para gestionar la vida útil de la estructura, ya que proporciona información útil para el mantenimiento, las reparaciones, las renovaciones y las decisiones de gestión a lo largo del tiempo. Además, puede ser útil en caso de futuras evaluaciones de la estructura, transferencias de propiedad o disputas legales (Tsinker et al., 2004).
- Exudación:** “fenómeno según el cual se produce una acumulación progresiva en la superficie de una masa de concreto fresco de parte del agua de mezcla, fenómeno este que acompaña la compactación y sedimentación del concreto” (Red Iberoamericana, 2000, p. 200).
- Fisura:** “aberturas de ancho de hasta de 1mm que afectan solamente a la superficie de una estructura de concreto” (Sotomayor-Cruz, 2020, p. 1).
- Grieta:** “aberturas cuyo ancho es mayor a 1mm que afectan a la estructura de concreto en todo su espesor” (Sotomayor-Cruz, 2020)
- Informe de evaluación:** documento que resume los resultados y conclusiones obtenidos a partir de un proceso de evaluación (Rodríguez et al., 1989).
- Inspección:** proceso en el cual se recopila información con el objetivo de registrar el estado real de las estructuras y detectar cualquier cambio (deterioro) que se haya producido desde su puesta en funcionamiento (Tsinker et al., 2004).
- Inspección no destructiva:** inspección realizada por medio de métodos no destructivos (Gómez de León y Alcaraz, 2004).
- Inspección visual:** incluye un “escaneo” rápido de la estructura para una evaluación preliminar del estado general de la estructura, teniendo como objetivo identificar y definir posibles áreas de peligro que requieren una acción de seguimiento; por lo que incluiría un mapeo del estado actual de varios tipos de deficiencias estructurales, como fallas en la construcción, distorsión, movimiento y deterioro del material (Tsinker et al., 2004).

Intemperismo: “desgaste de la superficie del concreto, lavado de la pasta del cemento” (Red Iberoamericana XV.B. DURAR. CYTED, 2000, p. 75).

Intensidad de corrosión: “se llama velocidad o intensidad de corrosión (i_{corr}) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo” (Red Iberoamericana XV.B. DURAR. CYTED, 2000, p. 129).

Junta de construcción: “son los sitios en que se detiene el proceso de colocación del concreto, y son necesarias porque en la práctica es imposible depositarlo en una operación continua” (Treviño, 1998, 78).

Junta de dilatación: “espacio que se deja entre dos elementos estructurales contiguos a los fines de permitir el movimiento libre de cada uno de ellos” (Red Iberoamericana, 2000, p. 201).

Recubrimiento: distancia desde la superficie exterior del concreto hasta la barra (varilla) más próxima (Administración Pública de la Ciudad de México, 2023).

Resistividad eléctrica: es una propiedad del material que corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Esta en función del tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, etcétera (Red Iberoamericana, 2000).

Vulnerabilidad estructural: “se refiere a la susceptibilidad de daño que una estructura presenta frente a algún evento, sea este natural o antrópico, que lleve a la estructura a cualquiera de sus límites de funcionamiento” (Aragón-Cárdenas et al., 2021, p. 28).

INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo debido a su durabilidad, resistencia y adaptabilidad; especialmente en estructuras modernistas donde es un elemento definitorio. Este material se deteriora con el tiempo debido a factores ambientales, químicos, físicos o de diseño (por la construcción original), lo que puede afectar su integridad. La vida útil se ve reducida por las patologías en la estructura. Una de las más frecuentes y que impacta en la durabilidad es la corrosión en el acero de refuerzo, un fenómeno que compromete la estabilidad estructural, la seguridad de las edificaciones y genera pérdidas económicas. Para rehabilitarlas, es crucial abordar los problemas existentes, utilizando materiales compatibles y procedimientos que minimicen la eliminación innecesaria de material. La evaluación del estado de la estructura es el primer paso para identificar características significativas, comprender las causas del deterioro y determinar las rehabilitaciones adecuadas. Las reparaciones deben ser técnicamente sólidas para evitar daños adicionales. El cumplimiento de las normativas vigentes, la realización de pruebas y las reparaciones son esenciales para garantizar la calidad, durabilidad, estética y funcionalidad del diseño original (Harrer y Gaudette, 2019).

La corrosión en el acero de refuerzo del concreto es la principal causa de deterioro de las estructuras (Rodríguez et al., 2021),

disminuyendo su vida útil, especialmente si se encuentran en ambientes agresivos como el marino (Zhu y Liu, 2023). Para hacer frente a este problema, es necesario evaluarla, comúnmente con inspecciones y ensayos. Estos últimos se dividen entre destructivos (DT) y no destructivos (NDT), donde los primeros causan daño a la estructura de concreto, pero son más certeros, mientras que los segundos no causan daño, pero deben aplicarse en conjunto para asegurar los resultados. Además, son más preferidos por no comprometer la estructura del concreto (Hornbostel et al., 2020); sin embargo, los métodos son sofisticados, costosos y requieren capacitaciones para la utilización de los equipos de NDT.

Es necesario disponer de modelos confiables para evaluar el ciclo de vida de las estructuras, particularmente en ambientes agresivos como los costeros debido a la humedad o salinidad por cloruros. Esta es una guía práctica para la evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras de concreto reforzado ante la corrosión. A través de una metodología estructurada, se identifican, analizan y evalúan los factores que pueden acelerar el proceso de corrosión. El manual está dirigido a ingenieros, arquitectos o técnicos del área de la construcción y mantenimiento de infraestructuras, mediante herramientas para la toma de decisiones informadas. Busca ser una herramienta en la preservación de las infraestructuras de concreto reforzado, promoviendo prácticas de mantenimiento y conservación que prevengan fallas estructurales a largo plazo.

CAPÍTULO 1.

Evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado

Patología de estructuras de concreto reforzado

En 1952, en Francia se publicó el libro de Henry Lossier, titulado *La Pathologie du Béton Armé*, en donde el autor emplea una terminología médica para analizar, tratar y prevenir situaciones en estructuras de hormigón armado. En la década de los setenta se introdujo en España y se difundió en México. Más concretamente, este enfoque consistía en adoptar términos médicos al léxico de ingeniería civil, estableciendo una analogía del estudio, tratamiento y prevención de enfermedades humanas en las estructuras de concreto reforzado (Treviño, 1998).

Treviño (1998) define a la *patología estructural* como “el estudio sistemático y ordenado de los síntomas, mecanismos, causas y orígenes de los defectos; deterioro y daños que sufren las construcciones para que estos puedan diagnosticarse y tratarse con propiedad” (p. 51). Por otro lado, la *terapéutica estructural* es “el estudio del tratamiento o medidas necesarias para la solución de los problemas patológicos de las construcciones” (p. 51). Asimismo, la *profilaxis estructural* se define como “el conjunto de medidas preventivas que deben ser tomadas en las construcciones nuevas desde las etapas de planeación, diseño y ejecución de obra a fin de preservarlas de defectos y deterioro prematuro” (p. 51).

Treviño (1998) clasifica las fallas de concreto reforzado de acuerdo con la etapa de vida de la estructura en la que se originan: planeación y diseño; ejecución; uso u operación de la estructura. Dentro de estas fallas está el deterioro por corrosión. A continuación, se describen las patologías descritas por Treviño (1998).

Defectos

Un defecto es considerado como aquel menoscabo, detrimento o trastorno que sufren las características de una estructura como consecuencia de errores u omisiones cometidos en las etapas de planeación o ejecución, aun y cuando se descubra posteriormente a la recepción de la obra por parte del propietario.

Defectos congénitos. Son fallas originadas en las etapas de planeación y diseño. La concepción errónea del comportamiento estructural, un mal detallado del acero de refuerzo y del desarrollo del proyecto, son algunos de los errores más frecuentes que implican un incorrecto comportamiento estructural y que pudieron tratarse en la etapa de diseño.

Defectos adquiridos. Son las fallas originadas en la etapa de ejecución de obra. Los defectos adquiridos más comunes están relacionados con los materiales, procedimientos de ejecución de obra, y agrietamiento producido antes o durante el proceso de endurecimiento del concreto.

Agrietamiento del concreto fresco. El agrietamiento se da cuando los esfuerzos internos de tensión del concreto exceden su resistencia, la cual varía con la edad y con la velocidad de aplicación de las cargas. Existen tres mecanismos básicos que puede dar origen a esfuerzos internos de tensión tanto en el concreto fresco como en el endurecido. Los movimientos generados dentro del mismo (contracción y asentamiento plástico, contracción por secado y expansión o contracción térmica) y la expansión de materiales embebidos en el concreto, debido a la corrosión del acero de refuerzo, son mecanismos que generan grietas intrínsecas o no estructurales; y las sollicitaciones mecánicas que, a diferencia de los otros dos, generan grietas extrínsecas o estructurales al concreto.

Deterioro

El deterioro se define como el menoscabo o detrimento progresivo que sufren las características de una estructura a través del tiempo, causado por agresiones físicas, químicas o biológicas externas o por influencias autógenas internas.

Deterioro del concreto endurecido por procesos físicos

Agrietamiento. Puede surgir por contracción térmica temprana, contracción por secado, estrellamiento (caracterizado por trayectorias que siguen un patrón de áreas irregulares), ciclos de congelación y deshielo.

Erosión. Los tipos más generales son: desgaste superficial por abrasión, debido a acciones mecánicas; y superficial por cavitación, debido al contacto con corrientes de agua.

Deterioro del concreto endurecido por procesos químicos

Agrietamiento. Junto con la desintegración del concreto, el agrietamiento por agentes químicos es de los que genera mayores daños en la estructura, siendo difícil de tratar. Frecuentemente, los ataques por agentes agresivos químicos ocurren en el cemento y, en menor medida, en los agregados. Este deterioro es causado por reacciones álcali-agregado (álcali-sílice, álcali-silicato y álcali-carbonato), carbonatación del cemento y corrosión del acero.

Deterioro por ácidos. Los ácidos ocasionan que el concreto se desintegre, y se divide en dos categorías: los inorgánicos, como el sulfúrico, sulfuroso, clorhídrico, nítrico, sulfhídrico, carbónico, bromico, crómico, fosfórico y fluorhídrico; y los orgánicos, como el acético que se encuentra en los vinos y vinagres -que con el hidróxido cálcico da lugar a la formación de acetato cálcico-, láctico, oxálico, tánico y húmico.

Deterioro por sulfatos. Son quizá los agentes agresivos más perjudiciales para el concreto de todos los aniones que componen las sales, su ataque al cemento termina por destruirlo. Los sulfatos pueden encontrarse en diferentes formas del medio en el que se encuentra el concreto, los parámetros que influyen en su expansión tienen que ver con las condiciones de exposición: cantidad de sustancias disponibles, susceptibilidad del concreto que depende del tipo de cemento, la permeabilidad del concreto, la cantidad de agua disponible y la temperatura.

Deterioro por álcalis. En este, la sustancia reactiva está en los agregados; diferente al ataque por sulfatos que se encuentra en el cemento. El mecanismo se asemeja más al de sulfatos que al de ácidos, debido a que el ataque es sobre ciertas sustancias del concreto.

Otros agresivos químicos. Por ejemplo, hipoclorito cálcico, hidróxido de sodio o sosa cáustica; jugos de frutas (ácidos orgánicos), azúcar, leche, aceites y grasas; aguas residuales, alcohol metílico, alcohol etílico, aldehídos, aguas puras (deshielos o blandas) y ureas.

Deterioro del concreto endurecido por procesos biológicos

Aguas residuales. Es considerada una de las formas más graves de ataque biológico. Este daño es debido a la acción del ácido sulfúrico. Los compuestos de azufre en el alcantarillado son reducidos a sulfuros por microorganismos en zonas sin oxígeno disuelto. Parte de estos se liberan como gas de hidrógeno, que se disuelve en la humedad de las paredes por encima del nivel del agua residual. Allí, una bacteria oxidante convierte el sulfuro de hidrógeno en ácido sulfúrico en presencia de oxígeno, causando corrosión. En sistemas de alcantarillado, la desintegración del concreto se presenta comúnmente solo por encima del nivel de agua, siendo más severa arriba del promedio diario. Puede producirse corrosión arriba de este punto, incrementarse hasta alcanzar la corona y perforar, en casos severos. La aparición de eflorescencias blancas es la primera manifestación patológica. El deterioro inicia lento, pero conforme progresa se vuelve más rápido hasta provocar que el concreto se desconche. En su desarrollo final, la superficie del concreto se reduce a un material suave y cremoso del cual se desprende el agregado.

Concreto en contacto con abonos naturales. Un ejemplo muy común es el estiércol, aunque no es un agente agresivo, al sufrir un conjunto de reacciones químicas similares a las aguas residuales, conlleva los mismos riesgos.

Invernaderos e instalaciones análogas. El nitrito de amonio contenido en el abono del terreno en temperaturas mayores a 20 °C ataca de forma grave al concreto de estructuras en contacto directo, como las cimentaciones.

Deterioro superficial del concreto endurecido

Eflorescencias. La hidratación del cemento Portland genera hidróxido de calcio, que se transforma al contacto con dióxido de carbono, formando eflorescencias. Estas se activan por baja compacidad y condiciones climáticas específicas. Aunque no son graves en áreas accesibles, pueden ser costosas de limpiar. Para su limpieza se recomienda el uso de ácidos débiles, como el muriático diluido.

Depósitos de cultivos biológicos. Las superficies húmedas de concreto son propensas a cultivos biológicos como las colonias de algas de color verde oscuro, que afectan su apariencia. Aunque algunas algas toleran condiciones alcalinas, una reducción del pH acelera su crecimiento. Muchas superficies que parecen sucias están más afectadas por contaminación biológica que por depósitos minerales. Por ello, aplicar biocidas de acción prolongada podría mejorar su aspecto.

Depósitos de polvo por contaminación ambiental. El viento puede depositar polvo sobre las superficies de concreto, especialmente en zonas áridas, donde puede colorear el concreto. El polvo fino ($d \leq 0.01$ mm) se adhiere más firmemente a la superficie rugosa. La capacidad de limpieza por el agua de lluvia es crucial, ya que

la inclinación y la forma de las superficies como terrazas pueden dificultar esa labor, especialmente en áreas curvas donde la lluvia no puede llegar.

Corrosión del acero de refuerzo

Es la principal causa del deterioro de las estructuras de concreto reforzado. La mayoría de los metales en la naturaleza no se encuentran en estado puro, sino en compuestos llamados menas. Para separar los metales puros de estas, se requiere mucha energía. Al apartarlos, los metales almacenan fuerza, por lo que tienden a oxidarse y regresar a un estado original más estable. Mientras más energía se necesite para obtener un metal, más fuerte será su tendencia a regresar a un estado más fijo y tenderá a corroerse con mayor rapidez.

El concreto confiere una protección natural al acero de refuerzo ante corrosión, debido a que su alcalinidad logra una inactividad química; también le confiere un cuidado físico, al limitar el acceso de agua, oxígeno, cloruros y otras sustancias. Sin embargo, la corrosión en el acero de refuerzo en el concreto puede producirse por la destrucción de esta capa pasivante, debido a dos razones: la presencia de iones despasivantes en contacto con el refuerzo (ejemplo, cloruros), y la disminución de alcalinidad del concreto, por causa a la reacción de este con las sustancias ácidas del medioambiente.

La corrosión del acero de refuerzo puede reducir su sección transversal y causar el estallido del recubrimiento de concreto. Esta disminuye linealmente la capacidad de carga, pero afecta más las propiedades de deformación y resistencia a la fatiga, que son más sensibles a la corrosión. La herrumbre ocupa un volumen mucho mayor que el acero, lo que genera fuerzas de expansión que pueden agrietar y estallar el concreto circundante. Esto puede llevar a un colapso repentino si el agrietamiento ocurre en las regiones de anclaje de las barras.

Daños

Comprenden todas las lesiones (externas o internas) que sufre una estructura debido a la violencia exterior, derivada de su exposición a sollicitaciones mecánicas, accidentales o situaciones extraordinarias.

Daños ocasionados por acciones mecánicas

Agrietamiento por actuación directa de cargas. Las grietas por acciones mecánicas en elementos estructurales surgen cuando el concreto se agota debido a esfuerzos de tensión, flexión, cortante, torsión o compresión. A menudo, estas se superponen, complicando el diagnóstico del problema.

Agrietamiento por deformaciones impuestas. Los asentamientos o expansiones del suelo pueden causar problemas patológicos en estructuras de entramados reticulares. Cuando una columna desciende debido al asentamiento de su cimiento, su carga se reduce, pero se transfiere a columnas adyacentes. Esto puede llevar al agotamiento resistente de columnas cercanas. Frecuentemente, este problema es causado por alteraciones en el nivel freático o excavaciones adyacentes. En el caso de vigas asociadas a columnas, es común que se agrieten en su cara inferior cerca de la columna que se asienta, y en su cara superior en el extremo opuesto.

Daños ocasionados en situaciones extraordinarias

Incendio. El fuego es un agente agresor para las construcciones, en específico, el concreto reforzado, debido a que la combinación de acero y concreto reacciona de manera diferente a las altas temperaturas. Las alteraciones en las propiedades mecánicas de ambos materiales, así como en la adherencia entre ellos, pueden generar deformaciones y esfuerzos por gradientes de temperatura. Durante un incendio, los componentes de la estructura absorben calor, lo que puede llevar a transformaciones indeseables y afectaciones en la resistencia. Los daños varían desde manchas por humo y calor, hasta la destrucción total del edificio. Debido a que la baja resistencia puede llevar al colapso estructural, se exige que los elementos de construcción mantengan una adecuada resistencia al fuego, estabilidad y compartimentación.

Explosiones y colisiones. Este tipo de daños son muy variados y frecuentes. Pueden causar graves accidentes, como impactos de vehículos, estruendos de gas y estallidos.

Colapso progresivo. Se refiere a la destrucción de una pequeña parte de la estructura, donde el daño total es desproporcionado a la causa inicial. Este término excluye el colapso total de estructuras estáticamente determinadas, como armaduras que pierden un solo miembro. En 1968, una explosión de gas en el piso 18 del edificio Ronan Point en Inglaterra causó un colapso progresivo, donde una pequeña porción del daño llevó a una destrucción extensa del edificio. Se han documentado numerosos colapsos progresivos, algunos ocurridos antes de 1968, incluyendo ejemplos de propagación vertical, horizontal y combinada.

Daños ocasionados por mal uso o abuso de la estructura

Ausencia de inspección y mantenimiento. Los códigos y especificaciones exigen que las estructuras se construyan, modifiquen y mantengan para garantizar la seguridad pública. Se requieren inspecciones periódicas para detectar anomalías y efectos ambientales, así como un mantenimiento adecuado para prevenir el deterioro y extender la vida útil de las edificaciones. Sin embargo, persiste la creencia de que las estructuras pueden durar indefinidamente sin atención. El concepto de

mantenimiento es poco común entre propietarios de estructuras de concreto. Esto puede resultar en deformaciones, reducción de capacidad de carga, disminución de la seguridad, deterioro estético, altos costos de reparación y depreciación económica. Además, muchos propietarios carecen de conocimientos en ingeniería, lo que les impide identificar problemas tempranos que derivan en reparaciones costosas.

Cambio de uso. Este a menudo se realiza sin la verificación de un ingeniero, lo que puede generar problemas; por lo que se recomienda no modificar los usos que alteren las cargas sin obtener previamente una licencia. Algunos ejemplos incluyen:

- Transformaciones de viviendas a oficinas que requieren zonas de archivo, con sobrecargas mucho mayores.
- Cambio de bibliotecas a áreas de almacenamiento de libros, con cargas mal definidas.
- Instalación de equipos informáticos o cajas fuertes que superan la capacidad de carga de los entresijos.
- Errores en la asimilación de cargas concentradas, como las de vehículos, al tratar de sustituirlas por cargas uniformemente distribuidas.
- Conversión de oficinas en talleres, lo que contribuyó al colapso de varios edificios en la Ciudad de México tras los sismos de 1985.

Guías, manuales y estándares para evaluación y reparación de estructuras

En otros países se han desarrollado manuales, guías y normas para atender las patologías de las estructuras de concreto. Un ejemplo es el *Manual de Reparación y Rehabilitación de Edificios de Concreto Reforzado del Gobierno de la India* (Central Public Works Department of the Government of India [CPWD], 2018), publicado por el Departamento Central de Obras Públicas de dicho gobierno. Este manual proporciona directrices para la reparación y rehabilitación de edificios de concreto reforzado (RCC, por sus siglas en inglés) que han sufrido daños o deterioro. Además, aborda la evaluación de daños (incluyendo evaluaciones no destructivas), técnicas de reparación, rehabilitación estructural, materiales para reparación y rehabilitación, normas, códigos y casos prácticos, centrándose en la seguridad, sostenibilidad y eficiencia. Es un recurso para profesionales en el campo de la ingeniería civil, arquitectos y constructores que trabajan con estructuras de concreto en India, facilitando el mantenimiento adecuado y la gestión de edificios existentes.

Otro ejemplo, es la *Guía para la Evaluación de Estructuras de Concreto antes de la Rehabilitación* (American Concrete Institute [ACI], 2019), que proporciona un marco y procedimientos generales para la evaluación de estructuras de concreto antes de

su rehabilitación, complementando las normas ACI 562. Su objetivo es evaluar la condición actual de la estructura, su deterioro, daños, adecuación estructural y capacidad para soportar cargas adicionales; determinar la viabilidad de cambios en el uso o modificaciones, y estimar la vida útil restante de la estructura y su capacidad para soportar actividades de reparación. También identifica factores operativos y económicos que afectan el plan de rehabilitación, enfocándose en estructuras de concreto. El proceso incluye: revisión de documentos, observaciones de campo, evaluaciones de condiciones, estructural y pruebas de materiales, concluyendo con un informe de los hallazgos preliminares y una valoración más detallada si es necesario. Respecto a los métodos para evaluación de estructuras, existe una *Guía sobre Ensayos No Destructivos de Estructuras de Concreto desarrollada por el Organismo Internacional de Energía Atómica de Viena* (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2002). El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha impulsado por años la tecnología de ensayos no destructivos (END), fundamental en varios proyectos regionales como *Acuerdos Regionales de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina* (ARCAL), *Acuerdo Regional de Cooperación para la Investigación, el Desarrollo y la Formación en materia de Ciencia y Tecnología Nucleares para Asia y el Pacífico* (ACR), *Acuerdo Regional de Cooperación para la Investigación, el Desarrollo y la Formación en materia de Ciencia y Tecnología Nucleares en África* (AFRA) y el *Proyecto Regional de END en Asia Occidental*. El OIEA ha desarrollado guías para métodos convencionales de END, como ensayos por líquidos penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonidos aplicados en materiales metálicos. Sin embargo, debido al creciente uso del concreto en construcción, surgió la necesidad de guías especializadas para END en este material. De esta manera surge la *Guía sobre Ensayos No Destructivos de Estructuras de Concreto* desarrollada por el Organismo Internacional de Energía Atómica de Viena (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2002). Este manual técnico proporciona una guía integral sobre los métodos de ensayos no destructivos (END) aplicados a estructuras de concreto. Además, facilita directrices y buenas prácticas para asegurar que las inspecciones sean consistentes y precisas. Por último, incluye recomendaciones para interpretar los resultados obtenidos mediante los END.

Métodos de evaluación de corrosión en concreto reforzado

De acuerdo con Quesada (2015), para solucionar los problemas de corrosión, ya sea para prevención, reparación o rehabilitación, es necesario evaluar el daño por deterioro de la estructura.

En la literatura (Rodríguez et al., 2005; Red Iberoamericana, 2000; Gómez de León y Alcaraz, 2004; Castro, 2001) se pueden distinguir dos tipos de evaluaciones de corrosión en estructuras de concreto reforzado: *simplificada* y *detallada*. La primera

consiste en realizar inspecciones preliminares donde se incluye una visual y otros ensayos no destructivos, con el fin de conocer el estado de la estructura, efectuar recomendaciones y corroborar el estado de corrosión. Por otro lado, una evaluación detallada requiere de un estudio más profundo de la estructura, con ensayos que en su mayoría son destructivos, así como un diagnóstico sobre el estado de corrosión, un pronóstico de su comportamiento futuro e intervenciones adecuadas.

Inspección preliminar o simplificada

De acuerdo con Castro (2001) “la inspección preliminar en una estructura dañada por corrosión [...] se obtiene directa o indirectamente la información requerida para realizar luego una inspección detallada que proporcione un diagnóstico y recomendaciones para darle solución al problema” (p. 33). Se conforma por tres elementos: antecedentes o trabajo de gabinete, examen visual, mediciones-ensayos mínimos que llevarán a poder hacer una evaluación (Rodríguez et al., 1989; Castro, 2001).

Este tipo de inspección se apoya en un reconocimiento o examen visual, en donde se recopilan las características tanto del medio como de la estructura. Respecto a la estructura, se busca identificar si se está produciendo corrosión o un daño significativo. Con base en esto, se estudia la tipología estructural, la agresividad ambiental y el nivel de daño.

Además, se requiere de un estudio o trabajo de gabinete en la cual se recolecte información de la estructura mediante cálculos, planos o reportes, para elaborar una “ficha de antecedentes” (Castro, 2001; Red Iberoamericana, 2000), que incluye la información de la estructura y del medio. El estudio de gabinete puede realizarse antes o después de la inspección visual, con base en información recolectada en campo que puede incluir: localización, ubicación, tipo de estructura, tipo de obra (datos generales), características del concreto, planos, croquis (datos constructivos y estructurales de la obra), agentes físico-químicos en contacto con la estructura, tipo de atmósfera y de agua, naturaleza del terreno, presencia de agentes químicos y de corrientes de interferencia o erráticas (datos del medio). Así como también las propiedades físicas y químicas del medio para atmósfera, humedad relativa, temperatura y régimen de vientos; para el agua, cloruros, sulfatos, pH y temperatura; y para el suelo, cloruros, sulfatos, pH, potencial redox, resistividad eléctrica, humedad y nivel freático (Red Iberoamericana, 2000; Castro, 2001).

De acuerdo con Rodríguez et al. (1989), se realizan levantamientos de la geometría del elemento (dimensiones geométricas, espesor del recubrimiento de concreto, diámetro y número de armaduras) mediante técnicas no destructivas como la inspección visual. Para el levantamiento de daños, pueden presentarse ensayos

destructivos o no destructivos en inspecciones preliminares, pero son mínimos. Se incluyen algunos para determinar la resistencia del material, la profundidad de penetración de los agresivos y medidas de corrosión; como la velocidad de corrosión representativa. Si el problema no es complejo y el evaluador es experimentado, puede ser suficiente la información recolectada con el examen visual y el trabajo en gabinete para evaluar la estructura (Castro, 2001).

Al término de esta inspección se pueden seleccionar las zonas que requieren una indagación detallada, así como determinar las técnicas de ensayo requeridas.

Inspección detallada

Esta se basa en los resultados de la evaluación preliminar. Tiene como objetivo “cuantificar la extensión del deterioro mediante ensayos, mediciones y, eventualmente, definir los sistemas de intervención” (Castro, 2001, p. 34).

Dentro de los ensayos para corrosión que se pueden realizar en la estructura están (González y Peña, 2009): profundidad de carbonatación (ensayo de la fenolftaleína), determinación de iones o la concentración de cloruro y sulfato en el concreto, resistencia del material (acero y concreto), ensayos de testigos, muestras de acero, valores nominales de los planos, memoria de construcción, y resistencias mínimas prescritas por la normativa de la época de construcción de la estructura, localización de la armadura y detalle de armado (uso de pachómetros donde sea posible), medidas de corrosión (medida de la intensidad de corrosión, medida de la pérdida de sección del acero y medida de la resistividad), potencial y ultrasonido (Castro, 2001; Rodríguez et al., 1989; González, 2009).

De acuerdo con Castro (2001), una inspección detallada incluye los siguientes ensayos:

- a. Evaluación del concreto.
- b. Evaluación de las condiciones del concreto que rodea al acero de refuerzo desde el punto de vista de los parámetros que intervienen en la corrosión del acero:
 - El espeso del recubrimiento del concreto.
 - Las concentraciones de iones que despasivan el acero (cloruro, ASTM C 1411; y sulfato; UNE 2001).
 - La resistividad eléctrica.
 - La absorción de agua y porosidad.
 - La resistividad del concreto frente a la penetración de cloruros.
 - El pH o la profundidad de carbonatación del concreto.

Evaluación de la calidad del concreto:

- Ensayo de resistividad a la compresión sobre muestras extraídas.

- Exámenes petrográficos.
- Ensayo de la velocidad del pulso ultrasónico.
- Prueba del martillo de rebote (esclerómetro).
- Las determinaciones del contenido de cemento.
- Mediciones de permeabilidad del concreto.

Evaluación de la degradación por agrietamiento y delaminación:

- Exámenes visuales.
- Mapeo de infrarrojo.
- Mapeo de radar.
- Ensayos acústicos.

Evaluación del comportamiento del concreto:

- Mapeo de grietas (levantamiento de daños).
- Ensayos de carga.

c. Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo:

- Mediciones de potenciales electroquímicos (ASTM C 876) expresados mediante un mapeo.
- Extracción de porciones del acero de refuerzo para evaluar pérdida de sección.
- Estimación de las velocidades de corrosión.
- Identificación de productos de corrosión.

Ensayos destructivos y no destructivos

Los ensayos en concreto reforzado se pueden clasificar en dos categorías: destructivos y no destructivos. Los primeros proporcionan datos más confiables, pero causan modificaciones. De acuerdo con Gómez de León y Alcaraz (2004), los ensayos o pruebas no destructivas (END) se emplean en la inspección de estructuras donde se busca no deteriorarlas, dañarlas o modificarlas; pero son menos certeros que los destructivos. Sin embargo, entre mayor sea el número de ensayos no destructivos aplicados, los datos se pueden correlacionar para ser más confiables.

Ensayos no destructivos

Los métodos de ensayos no destructivos (END) para evaluar estructuras de concreto se clasifican en cinco tipos principales: sónico/ultrasónico, electromagnético, eléctrico, termografía infrarroja y radiografía. Estos métodos proporcionan resultados indirectos que se relacionan con propiedades del concreto, y han avanzado desde técnicas simples, como el martillo de rebote, hasta sistemas más sofisticados que usan propagación de ondas.

Estos ensayos se han popularizado por la rapidez de evaluación e interpretación de resultados y por el desarrollo de *software* y dispositivos portátiles (Verma et al., 2013). Los avances en sensores, nuevos materiales y compactación/portabilidad están impulsando nuevos métodos de END, facilitados por técnicas de fusión de datos que mejoran la evaluación de la integridad de los materiales, fortaleciendo los resultados (Verma et al., 2013; Helal et al., 2015). Por ello, los usuarios pueden conocer las ventajas y limitaciones de cada técnica y elegir la adecuada para cada caso (Verma et al., 2013).

Su mayor ventaja es que inspeccionan sin dañar las estructuras, permitiendo detectar defectos de forma temprana y monitorear continuamente. Sin embargo, a pesar de su creciente aceptación, su adopción enfrenta obstáculos debido al limitado conocimiento sobre los materiales y métodos. Además, la interpretación de resultados puede ser compleja, por lo que es crucial contar con formación adecuada y experiencia para manejar los equipos y técnicas de END. Si la condición real de la estructura difiere de lo supuesto, los resultados pueden no ser satisfactorios (Verma et al., 2013; Helal et al., 2015).

Los ensayos no destructivos más comunes para inspección de materiales son:

- Inspección visual
- Ensayos mediante líquidos penetrantes
- Ensayos magnéticos
- Ensayos de inducción electromagnética
- Métodos radiográficos
- Inspección por ultrasonidos (Gómez de León y Alcaraz, 2004)

Inspección visual

Dentro de esta se pueden distinguir dos tipos de técnicas: el examen directo y la microscopía. El primero consiste en la verificación visual por medio de lámparas estroboscópicas y sistemas endoscópicos; es la técnica de verificación más simple, de bajo costo, con facilidad de aplicación y que ha demostrado que ayuda a determinar el origen de fallos de manera oportuna. La principal desventaja es que puede hacerse compleja bajo instrumentos sofisticados, se limita a aquellos defectos visibles y superficiales que requieren una gran experiencia y conocimiento (Gómez de León y Alcaraz, 2004). Por su parte, el segundo examen no es una técnica de verificación directa de la pieza; sin embargo, “constituye una herramienta imprescindible para visualizar la microestructura del material, con el fin de descubrir e identificar sus características y la existencia de posibles defectos” (Gómez de León y Alcaraz, 2004, p. 136); la aplicación puede ser óptica o electrónica, donde este último ofrece un

mayor nivel de detalle. La mayoría de los defectos macrográficos en los materiales se pueden detectar con una microscopía óptica. Los microscopios electrónicos deben ser empleados solo cuando se requiere una inspección visual a detalle. Esta permite visualizar la estructura del elemento, pero no puede ser aplicada directamente sobre la pieza a estudiar, sino que requiere extraer unas muestras del material, de dimensiones y preparación adecuadas, para su observación en el instrumento. Por tanto, la mayoría de las veces es necesario seccionar una porción de la pieza por examinar, aunque no es un ensayo destructivo (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Líquidos penetrantes

Se aplican en la detección de discontinuidades superficiales, principalmente grietas en cualquier tipo de material, excepto en aquellos muy porosos. Aunque antes se utilizaba petróleo, aceite y cal, actualmente todos los procedimientos existentes consisten en la aplicación de líquidos o tinturas especiales sobre la superficie a inspeccionar, dejar que estos penetren en los defectos superficiales y comprobar las huellas que deje sobre una superficie auxiliar de contacto. Estos líquidos permiten el almacenamiento de las pruebas gráficas del ensayo, sirven como negativos fotográficos, reproduciendo la forma, posición y magnitud de los defectos. Su desventaja es que no se pueden aplicar en materiales muy porosos (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Partículas magnéticas

Otro ensayo no destructivo es por partículas magnéticas, el cual “permite detectar discontinuidades e impurezas superficiales, tales como inclusiones no metálicas, en materiales ferromagnéticos. También pueden detectarse estos defectos cuando se encuentran bajo la superficie, aunque próximos a esta” (Gómez de León y Alcaraz, 2004, p. 147). Este ensayo se puede realizar de diferentes formas con cuatro etapas básicas: magnetizar la pieza, extender las partículas magnéticas, examinar, interpretar y registrar las indicaciones, y desmagnetización. Algunas de sus ventajas son:

- Su capacidad para detectar defectos ligeramente subsuperficiales.
- Puede detectar grietas y defectos superficiales, aunque se encuentren rellenos con suciedad, grasa u otros agentes poco absorbentes.
- Permite detectar la presencia de inclusiones de diferente permeabilidad magnética que el metal base.
- Puede aplicarse cuando la superficie a ensayar se encuentra recubierta de pintura, siempre que la capa no tenga mucho espesor y sea suficientemente uniforme (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Las desventajas de los ensayos por partículas magnéticas son:

- Solo puede aplicarse a materiales ferromagnéticos.
- Se detectan solo las discontinuidades de dirección perpendicular a las líneas de fuerza.
- En ocasiones es preciso aplicar elevadas corrientes de magnetización, lo que conlleva cierto riesgo.
- La superficie debe estar perfectamente horizontal, con el fin de que no se vea afectada la distribución de las partículas. Esto supone un serio inconveniente cuando deben ensayarse piezas con formas redondeadas (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Corrientes inducidas

Son técnicas de inspección rápidas y eficientes, “permiten no solo detectar la presencia de grietas o heterogeneidades en el material, sino que arrojan datos acerca de la homogeneidad estructural y naturaleza del mismo” (Gómez de León y Alcaraz, 2004, p. 153). Es efectiva para localizar defectos en piezas de geometría compleja, incluso bajo ciertos límites pueden detectarse grietas subsuperficiales y hacer un seguimiento de su evolución. Sin embargo, necesita de un conjunto bien definido de patrones de diagnosis para cada tipo de pieza. Algunas de sus principales aplicaciones son:

- Detección de discontinuidades o grietas en piezas y determinación de su magnitud.
- Naturaleza y estado de tratamiento de metales y aleaciones:
 - Comprobación, identificación y clasificación de metales y aleaciones.
 - Determinación de la profundidad de capas superficiales, ya sea por endurecimiento, ablandamiento o por la aplicación de tratamientos.
- Determinación de propiedades físicas:
 - Medida de la conductividad eléctrica.
 - Medida de la permeabilidad magnética.
- Medida de las dimensiones:
 - Medida de espesores de recubrimientos.
 - Medida de espesor de chapas.
 - Controles de calidad dimensional de piezas (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Rayos X

El uso de rayos X en inspecciones es uno de los END más utilizados. La inspección radiográfica detecta la presencia de heterogeneidades en un determinado medio, basado en las diferencias de niveles de absorción que experimenta una determinada radiación electromagnética al atravesar diferentes medios. Los rayos X se emplean en diferentes campos; por ejemplo, en ensayos de corrosión dentro del mantenimiento, en el análisis de picaduras, medida de espesor de capa, y detección de corrosión en interiores. Esta técnica se limita a radiografías en dos direcciones perpendiculares de la pieza a examinar, además de que debe ser accesible por ambos lados, ya que es requerido cuando se desconoce la naturaleza y tamaño del posible defecto a observar. Otra desventaja es el riesgo de exposición a las radiaciones con niveles altos. Debido a esto, solo se usa cuando otras técnicas no consiguen los mismos resultados (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Ultrasonidos

Existen dos métodos principales de inspección mediante ultrasonidos: impulso-eco y transmisión, basados en fenómenos de reflexión y refracción, respectivamente, a los cuales experimenta la onda ultrasónica al incidir contra una superficie o heterogeneidad interpuesta en un medio. “El método de impulso-eco consiste en emitir un tren de ondas ultrasónicas a través de un emisor y medir la amplitud de la onda ultrasónica reflejada y el tiempo transcurrido desde que se envió hasta que es recibida por el receptor” (Gómez de León y Alcaraz, 2004, p. 173), como se muestra en la Figura 1.

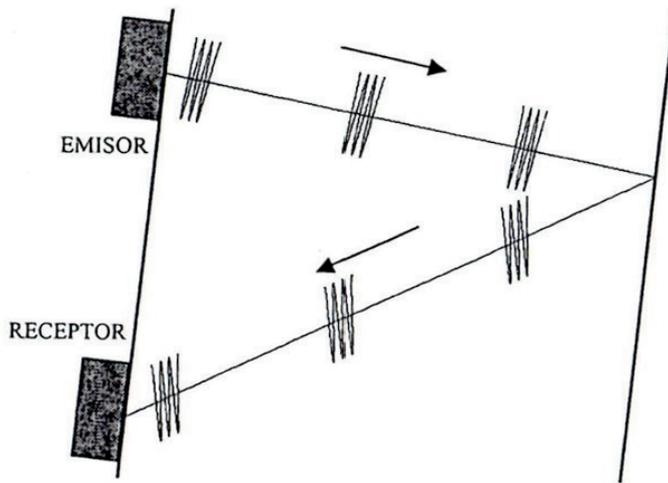


Figura 1. Inspección por impulso-eco
Fuente: Gómez de León y Alcaraz (2004).

En el método de transmisión es preciso disponer de dos elementos separados que cumplan la misión de emisor y receptor, ya que el principio del método consiste en recibir la señal transmitida a través del material. Es necesario acceder a ambas caras de este, aunque en algunos casos la transmisión también puede realizarse por medio de alguna reflexión en las superficies límite del material sin acceder a las dos caras, es decir, “la amplitud de la onda recibida por el receptor será tanto menor cuanto más grande sea la heterogeneidad interpuesta” (Gómez de León y Alcaraz, 2004, p. 174). Sus ventajas son:

- Elevada capacidad de penetración, que permite ensayar materiales de gran espesor. A diferencia de la inspección radiológica, no existe riesgo alguno para el operador, incluso para espesores muy grandes.
- Alta sensibilidad que permite detectar defectos muy pequeños incluso a bastante profundidad.
- Elevada capacidad diagnóstica, siendo posible cuantificar la dimensión del fallo en el interior del material. Esto es particularmente útil en el caso de grietas por corrosión y por fatiga.
- Facilidad de transporte, ya que los equipos son en general de reducidas dimensiones.
- Respuesta inmediata, a diferencia de la inspección radiológica donde es preciso esperar al procesar las placas (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Las desventajas de ensayos de ultrasonidos son:

- No da buenos resultados cuando las superficies del material a examinar son muy rugosas o irregulares.
- Es necesario disponer de un medio líquido de acoplamiento entre el palpador y el material.
- El manejo de la instrumentación requiere cierto nivel de cualificación para configurar el instrumento e interpretar correctamente los resultados.
- Es preciso calibrar periódicamente el instrumento, lo que exige disponer de patrones fiables de calibración (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Ensayos destructivos y no destructivos para evaluación de corrosión

En un estudio completo para evaluar la corrosión se deben considerar dos aspectos: el material y el medio. Entre los ensayos sobre el metal se encuentran: examen macroscópico y microscópico, examen con rayos X, examen del deterioro de la apariencia (examen visual) y verificación de las propiedades mecánicas (elongación,

resistencia a la tensión, medición de la variación del módulo de elasticidad del material, etcétera), eléctricas (conductividad eléctrica) y ópticas (examen visual y transmisión de luz), y otros métodos físicos como líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corrientes inducidas, ultrasonidos y radiografía (rayos X y gamma) (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Entre los ensayos sobre el medio se encuentran: mediciones gasométricas (medida de la concentración de hidrógeno y oxígeno), métodos analíticos, polarografía (para detectar el aumento de la concentración de iones, del metal como la disminución de los constituyentes corrosivos), determinación del pH, métodos indicadores (sistemas de identificación de puntos anódicos durante la corrosión) y mediciones electroquímicas (medidas de intensidad, medidas de potencial, curvas de polarización, corrientes dispersas o vagabundas, conductividad del medio y sondas Redox) (Gómez de León y Alcaraz, 2004).

Algunos de los ensayos para evaluación de la corrosión en el concreto son:

1. Análisis fisicoquímicos del concreto
 - a. Toma de testigos
 - ii. Núcleos
 - iii. Porciones de material en polvo
 - iv. Porciones de concreto
 - e. Resistividad eléctrica
 - f. Ultrasonido
 - g. Esclerometría
 - h. Profundidad de carbonatación
 - i. Concentración de cloruros
 - j. Resistencia a la compresión
 - k. Porosidad
2. Evaluación del estado de la armadura
 - a. Determinación de la profundidad y localización de la armadura
 - b. Medición de potenciales
 - c. Medida de la velocidad de corrosión (Red Iberoamericana, 2000)

Ensayos no destructivos para evaluación de corrosión

La Tabla 1 muestra los ensayos no destructivos aplicados para evaluar las diferentes propiedades del concreto relacionadas con la corrosión.

Tabla 1. Relación de las propiedades del concreto con los procedimientos de evaluación

Propiedades físicas y químicas	Procedimiento de evaluación		
	Pruebas químicas*	Medidas de potencial eléctrico**	Medidas de resistencia eléctrica***
Contenido de cloruro	*		
Corrosión ambiental	*	*	
Contenido de humedad			*

Notas: *NMX-C-515-ONNCCE-2016, NMX-C-531-ONNCCE-2016, ASTM C 1411. **ASTM C 876 - 15, ASTM C1760-12. *** NMX-C-514-ONNCCE-2019, ASTM C1760-12

Fuente: ACI (1999).

Las Tablas 2 y 3 muestran los ensayos no destructivos para evaluar las condiciones físicas del concreto relacionadas con la corrosión.

Tabla 2. Relación de la condición física del concreto con los procedimientos de evaluación

Condición física	Procedimiento de evaluación					
	Emisiones acústicas	Impacto acústico	Pruebas químicas	Fibra óptica	Radiografía gamma	Termografía infrarroja
Corrosión del acero			*			
Agrietamiento	*	*		*		*
Propiedades y espesor de la sección transversal					*	
Delaminación		*		*	*	*
Decoloración			*			
Desintegración					*	*
Distorsión						
Eflorescencia			*			
Erosión						
“Panal de abeja”				*	*	*
Desprendimiento						
Descamación						
Desconchado					*	*

Fuente: ACI (1999).

Tabla 3. Relación de la condición física del concreto con los procedimientos de evaluación, continuación.

Condición física	Procedimiento de evaluación					Examen visual (ACI 201.R, ASTM C823)
	Análisis petrográfico (ASTM C856)	Medición física	Radar	Pulso ultrasónico (ASTM C597)	Pulso-eco ultrasónico	
Corrosión del acero	*					*
Agrietamiento	*	*	*	*	*	*
Propiedades y espesor de la sección transversal		*		*		
Delaminación	*		*	*	*	*
Decoloración	*					*
Desintegración	*			*		
Distorsión						*
Eflorescencia	*					*
Erosión	*					*
“Panal de abeja”	*			*		
Desprendimiento						*
Descamación						*
Desconchado						*

Fuente: ACI (1999).

Para evaluar la corrosión de propiedades del acero de refuerzo, es común que se empleen ensayos, como: examen visual, medidas de potencial electroquímico y mediciones físicas.

La Tabla 4 describe, en general, los ensayos no destructivos relacionados con la corrosión y mencionados en las tablas anteriores (Tablas 1, 2 y 3).

Tabla 4. Ensayos no destructivos relacionados a la corrosión

Método	Aplicaciones	Principio de acción	Experiencia del usuario	Ventajas	Limitaciones
Análisis petrográfico (ASTM C 856)	Se utiliza para determinar diversas propiedades del concreto o de la muestra de mortero extraída de la estructura; algunas de ellas son: 1) densidad del cemento, 2) homogeneidad del concreto, 3) localización de grietas, 4) contenido de aire, 5) proporciones de áridos, cemento y vacíos de aire, y 6) curado.	En combinación con otras pruebas, el análisis químico y físico de las muestras de concreto es realizado por un petrográfico cualificado.	Se requiere un alto nivel de destreza y formación para realizar y analizar los resultados de las pruebas.	Proporciona información detallada y fiable de ingredientes del concreto, pasta, áridos, curado posibles daños y congelación.	Se requiere un petrográfico cualificado con experiencia; es relativamente caro y requiere mucho tiempo.
Emissiones acústicas	Control continuo de la estructura durante su vida útil para detectar fallos de impacto; control del rendimiento de la estructura durante las pruebas de ensayo.	Durante el crecimiento de grietas o la deformación plástica, la rápida liberación de energía de deformación produce ondas acústicas (de sonido) que pueden ser detectadas por sensores en contacto con la superficie de un objeto de ensayo o fijados a ella.	Amplios conocimientos necesarios para planificar pruebas e interpretar resultados.	Supervisa la respuesta estructural a la carga aplicada; capaz de localizar la fuente de un posible fallo; el equipo es portátil y fácil de manejar, bueno para pruebas de carga.	Ensayo caro de realizar; solo se puede utilizar cuando la estructura está cargada y cuando los defectos están creciendo; la interpretación de los resultados requiere un experto; actualmente se limita en gran medida al laboratorio; historial limitado, se requieren más trabajos.
Examen visual (ACI 201.1R y ASTM C 823)	(a) Evaluación del estado superficial del concreto (acabado, rugosidad, arañazos grietas, color). (b) Determinación de deficiencias en juntas. (c) Determinación de deformaciones y movimientos diferenciales de la estructura.	Examen visual con o sin ayudas ópticas, herramientas de medición, registros fotográficos u otras herramientas de bajo costo, movimiento diferencial determinado durante largos periodos con métodos topográficos y otros instrumentos.	Experiencia necesaria para determinar qué buscar, qué medidas tomar, interpretar las condiciones y qué pruebas de seguimiento especificar.	Costes generalmente bajos; evaluación rápida de las condiciones del concreto.	Evaluación con formación necesaria, evaluación primaria evaluación primaria limitada a la superficie de la estructura.

Método	Aplicaciones	Principio de acción	Experiencia del usuario	Ventajas	Limitaciones
Fibra óptica	Ver partes de una estructura que son inaccesibles a la vista.	Sonda de fibra óptica compuesta por fibras ópticas flexibles, lentes y un sistema de iluminación que se inserta en una grieta o en un orificio perforado en el concreto; el ocular se utiliza para ver el interior en busca de defectos como grietas, huecos o desprendimientos de áridos; se suele utilizar para examinar zonas en las que se han extraído testigos o se han perforado orificios. Examen de paredes huecas y otras perforaciones de mampostería.	Los equipos son fáciles de manejar y utilizar.	Proporciona imágenes nítidas de alta resolución de objetos remotos. Se puede acoplar una cámara para hacer fotos. La manguera flexible permite una visión multidireccional.	Equipo caro; se necesitan muchas perforaciones para proporcionar un acceso adecuado. Mortero en muros de mampostería restringe vista.
Impacto acústico	Se utiliza para detectar desprendimientos, delaminaciones, vacíos y grietas finas.	Se golpea la superficie de un objeto con un instrumento. Las características de frecuencia y amortiguación del sonido resultante dan una indicación de la presencia de defectos; el equipo puede variar desde un simple martillo o cadena de arrastre hasta sofisticados equipos electrónicos montados en remolques.	Se requiere un bajo nivel de conocimientos para utilizar el sistema auditivo, pero el sistema electrónico requiere formación.	Equipo portátil; fácil de realizar con sistema auditivo; el dispositivo electrónico requiere más equipo.	La geometría y la masa del objeto de prueba influyen en los resultados; mala discriminación para el sistema auditivo; se necesitan normas de referencia para las pruebas electrónicas.
Medición del potencial eléctrico (ASTM C 876)	Indicación del estado de las barras de refuerzo de acero en las mamposterías de concreto. Indicación de la actividad de corrosión en pavimentos de concreto.	El potencial eléctrico del concreto indica la probabilidad de corrosión.	Se requiere un nivel moderado de experiencia, el usuario debe ser capaz de reconocer los problemas.	Equipo portátil, mediciones sobre el terreno se realizan fácilmente; parecen proporcionar información fiable.	No se facilita información sobre la velocidad de corrosión; es necesario acceder a las barras de armadura.
Medidas de resistencia eléctrica	Determinación del contenido de humedad del concreto.	La determinación del contenido de humedad del concreto se basa en el principio de que la conductividad del concreto cambia con los cambios en el contenido de humedad.	Se requiere un alto nivel de conocimientos para interpretar los resultados; el equipo es fácil de usar.	Los equipos están automatizados y son fáciles de usar.	El equipo es caro y requiere aplicaciones especializadas de alta frecuencia; las propiedades dieléctricas también dependen del contenido de sal y de la temperatura de la muestra, lo que plantea problemas en la interpretación de los resultados. No es demasiado fiable.

Método	Aplicaciones	Principio de acción	Experiencia del usuario	Ventajas	Limitaciones
Medidor de humedad nuclear (ASTM D 3017)	Estimación del contenido de humedad del concreto endurecido.	El contenido de humedad en el concreto se determina basándose en el principio de que los materiales (como el agua) disminuyen la velocidad de los neutrones rápidos en función de la cantidad de hidrógeno producida en la probeta.	Debe ser operado por personal capacitado y con licencia.	Se pueden realizar estimaciones portátiles de la humedad del concreto en obra.	Equipo sofisticado y caro; se requiere una licencia NRC. (<i>Nuclear Regulatory Commission, Comisión Reguladora Nuclear</i>) para su funcionamiento; los gradientes de humedad en la muestra pueden dar resultados erróneos. Mide todo el nitrógeno del concreto, así como el nitrógeno del agua.
Radar	Detección de huecos en el sustrato, delaminaciones y empotramientos. Medición del espesor de pavimentos de concreto.	Utiliza señales de impulsos electromagnéticos transmitidos para la detección de vacíos.	Se requiere un alto nivel de conocimientos para interpretar los resultados.	Los métodos expeditivos pueden localizar barras de refuerzo y huecos independientemente de la profundidad. Puede utilizarse cuando solo se dispone de una superficie.	El equipo es caro; la fiabilidad de la detección de huecos se reduce considerablemente si hay refuerzos; procedimiento aún en fase de desarrollo.
Radiografía gamma	Estimación de la ubicación, el tamaño y el estado de las barras de refuerzo; voz en el concreto; densidad	Basado en el principio de que la tasa de absorción de rayos gamma se ve afectada por la densidad y el grosor de la muestra de ensayo; los rayos gamma se emiten desde la fuente, penetran en la muestra, salen por el lado opuesto y se registran en un archivo.	El uso de isótopos productores de rayos gamma está estrechamente controlado por la NRC (<i>Nuclear Regulatory Commission, Comisión Reguladora Nuclear</i>); los equipos deben ser operados por inspectores autorizados.	Se pueden detectar defectos internos; aplicable a diversos materiales; registro permanente en película, equipo de rayos gamma fácilmente portátil.	El equipo es caro; la fuente de rayos gamma es peligrosa para la salud y la seguridad; requiere acceso a ambos lados de la muestra.
Termografía infrarroja	Detección de defectos internos, crecimiento de grietas, delaminación y vacíos internos.	Defectos detectados mediante frecuencias infrarrojas selectivas para detectar diversos patrones de calor pasivo que pueden identificarse como pertenecientes a determinados defectos. Las grietas en el concreto y la mampostería pueden detectarse en días fríos.	Se requiere un alto nivel de conocimientos para interpretar los resultados.	Tiene potencial para convertirse en un método relativamente barato y preciso para detectar defectos en el concreto; puede cubrir grandes áreas rápidamente	Requiere habilidades y equipos especiales. Eficaz cuando la diferencia de temperatura entre superficies es alta.

Método	Aplicaciones	Principio de acción	Experiencia del usuario	Ventajas	Limitaciones
Pulso ultrasónico (ASTM C 597, BS EN 12504-4:2004)	Da estimaciones de uniformidad, calidad, resistencia a la compresión (cuando se correlacionan previamente) del concreto; las discontinuidades internas pueden localizarse y estimarse su tamaño; es el método de ondas de tensión más utilizado sobre el terreno.	Funciona según el principio de que la velocidad de propagación de las ondas de tensión se ve afectada por la calidad del concreto; se inducen ondas de impulsos en los materiales y se mide el tiempo de llegada a la superficie receptora con un receptor.	Se requiere un nivel variable de conocimientos para interpretar los resultados. El operador requiere un buen grado de formación.	Equipo relativamente barato y fácil de manejar; medición precisa de la uniformidad y calidad. Al correlacionar la resistencia a la compresión de los testigos y la velocidad de onda, se puede estimar la resistencia in situ.	Un buen acoplamiento entre el transductor y el concreto es crítico; la interpretación de los resultados puede ser difícil. La densidad, la cantidad de árido, las variaciones de humedad, y la presencia de metal de refuerzo pueden afectar a los resultados; se requieren estándares de calibración.
Pulso-eco ultrasónico	Permite estimar la resistencia a la compresión, la uniformidad y la calidad del concreto. Puede localizar barras de refuerzo, defectos, vacíos, delaminación y determinar el espesor.	Se basa en el principio de que la dirección original, la amplitud y la frecuencia de las ondas de tensión introducidas en el concreto se ven modificadas por la presencia de interfaces tales como grietas, objetos y secciones que tienen una impedancia acústica diferente.	Se requiere un alto nivel de conocimientos para interpretar los resultados. El operador debe tener una formación considerable para utilizar el equipo y conocimientos de electrónica, y debe tener una formación considerable en el ámbito de la inspección del estado de las estructuras de concreto.	Puede funcionar donde sólo se puede acceder a la superficie exterior. Puede funcionar en seco (en teoría, nunca se ha hecho publicidad del material). Permite «ver» el interior del concreto.	Aún está en fase mental. Necesita el desarrollo de criterios de medición. Actualmente no es un método de prueba estándar. El tratamiento digital de las señales puede mejorar la interpretación, pero actualmente los datos deben devolverse al laboratorio para su tratamiento.

Fuente: ACI (1999).

Dispositivos no destructivos para evaluación de corrosión

Las preferencias por usar ensayos no destructivos para evaluación de la corrosión del concreto han llevado a desarrollar dispositivos muy costosos. En la Tabla 5 se muestran algunos de los dispositivos en el mercado utilizados. En la Tabla 6 se muestran otros dispositivos secundarios que, aunque no miden directamente la corrosión, analizan otros parámetros relacionados que pueden complementar la investigación.

Tabla 5. Dispositivos para ensayos no destructivos de corrosión

Marca	Modelo	Aplicación	Imagen
GalvaPulse	GalvaPulse-5000 Kit	Potenciales de media celda. Resistencia eléctrica. Velocidad de corrosión.	
iCOR	iCOR 900081	Potenciales de media celda. Resistencia eléctrica. Velocidad de corrosión.	
SAFECOR	GECOR 10	(Mas de laboratorio o varillas expuestas) <ul style="list-style-type: none"> • Velocidad instantánea de corrosión mediante la técnica de resistencia de polarización. Esta técnica incluye la medida de: • Potencial de corrosión o potencial de celda. • Resistencia eléctrica del hormigón . • Resistividad del hormigón mediante el método de las 4 puntas o de Wenner. • Mapeo de potencial y resistividad para la localización de zonas con mayor riesgo de corrosión. • Velocidad de corrosión instantánea (operación clásica en modo potencioestático), para probetas de laboratorio de pequeño tamaño. 	
T-measurement	TEM-R62	Resistividad del concreto.	
Proceq	Resipod Resistivity 38mm Probe	Resistividad eléctrica del concreto.	

Marca	Modelo	Aplicación	Imagen
Proceq	Profometer Corrosion	Potencial de corrosión.	
TPM	XS-100	Muestra el grado de corrosión de las barras de refuerzo con gráficos de 9 niveles en gris o coloridos.	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Dispositivos complementarios para ensayos no destructivos de corrosión

Marca	Modelo	Aplicación	Precio
Proceq	Pundit 200	Velocidad de pulso. Velocidad de superficie. Registro de datos. Módulo de elasticidad. Correlación de resistencia a la compresión. Profundidad de fisura. Escaneo de línea. Escaneo de área.	
Langry LR	Langry LR - G200	Detectar la ubicación, distribución y dirección de las barras de acero en la estructura de hormigón armado, el espesor de la capa protectora de hormigón y el diámetro estimado de las barras de acero.	
PROCONSA	JY8S	Detecta y localiza barras de refuerzo y otros equipos de construcción metálicos. Medición del espesor de la capa protectora y del diámetro de las barras de refuerzo de concreto.	
PROCONSA	CK102	Interpreta automáticamente el ancho de la grieta, directamente a los valores de ancho de la grieta se muestran en la pantalla.	
Dji	Phantom 4 Pro V2.0	Uso en inspección visual con dificultades de acceso.	
AERIALTRONICS	ALTURA ZENITH ATX8	Captar marcas térmicas y defectos visuales como abolladuras, grietas y corrosión en aspas y torres.	

Fuente: elaboración propia.

Investigaciones sobre la corrosión y ensayos no destructivos

Hernández et al. (2016) estudiaron la relación entre la velocidad de corrosión de la armadura y el ancho de fisuras en vigas de concreto armado, expuestas a ambientes que simulan el medio marino. Se encontró que existe una relación directa entre la propagación del ancho de fisuras y la velocidad de corrosión, y se observaron algunas de mayor ancho en vigas cargadas. Para simular el ambiente marino, se rociaron las vigas de concreto con solución salina al 3.5 % p/p de NaCl para acelerar el proceso de corrosión natural de la armadura. Para la evaluación se realizaron ensayos electroquímicos por medio del potencial de corrosión de la armadura apoyándose de la norma ASTM C876 (Hernández et al., 2016).

Se han realizado estudios para entender las variables que influyen en los procesos de corrosión con el fin de prever la vida útil de las estructuras de concreto armado, mejorar las técnicas de lectura y lograr una buena interpretación de los resultados de reparaciones realizadas. Macioski et al. (2016) analizaron la corrosión de barras de acero en función de la variación del pH del medio, encontrando que el tipo de acero, el pH de la protección media y la superficie de la barra de acero influyen en los resultados de densidad de corriente y velocidad de corrosión, confirmando que el tiempo y el sistema de protección de superficie influyen en el proceso. Para esto se evaluaron aceros CA-50, CA-60 y CP-175-RB (ASTM G1, 2011) con y sin protección, aplicado la técnica de polarización lineal (ASTM G 59, 1997), la cual vincula el potencial de corrosión (ASTM C 876, 2009) y la tasa de corrosión a través de mediciones electroquímicas.

Martínez-Madrid et al. (2018) evaluaron la capacidad de carga de la estructura de un muelle corroído en el golfo de México, mediante una prueba de carga viva y un análisis de calificación para determinar la integración estructural, aplicando cargas de 50, 60, 350 y 700 toneladas; además de apoyarse de modelos de elementos finitos, y estimando los factores de clasificación de carga utilizando el *Manual para la evaluación de los puentes*, de la AASHTO, y apoyándose de las especificaciones de diseño de puentes de la AASHTO LRFD. Se encontró que los daños por corrosión no representaron una amenaza estructural extrema, sino que es un problema por servicio y no hay un efecto mayor en las capacidades estructurales de las secciones con concreto desprendido (por expansión del acero de refuerzo debido a la corrosión) hasta que exista una pérdida de acero significativa (debido a la corrosión); sin embargo, se descubrió que los elementos estructurales de varios pilares actualmente están sobrecargados y necesitan ser reforzados externamente,

además de requerirse pruebas no destructivas para detección de acero (Martínez-Madrid et al., 2018).

Hornbostel et al. (2020) evaluaron el estado de corrosión de tres vigas de concreto armado expuestas a un ambiente marino durante 25 años, esto mediante la medición de tres parámetros: potencial electroquímico (ASTM C 876), resistividad del concreto y velocidad de corrosión. En este estudio, las mediciones de potencial electroquímico, utilizando una cuadrícula de tamaño reducido, ofrecieron una buena indicación del estado real de corrosión, al detectar refuerzos en estado activo o pasivo en los elementos de prueba expuestos al ambiente marino. Aunque la tasa de corrosión y las mediciones de resistividad del hormigón siguieron la misma tendencia que las mediciones de potencial, mostraron una mayor dispersión y resultaron, en general, más difíciles de interpretar.

Zhang et al. (2016) utilizaron un ensayo no destructivo para detectar y analizar la fuga de campo magnético del concreto armado corroído en puentes, mediante un sensor micromagnético digital tridimensional, encontrando que “la corrosión mejora la resistividad magnética de la barra de acero y produce concentración de carga magnética en la región de corrosión, lo que genera esta distribución anormal del campo magnética” (p. 8), por lo que “la intersección de las curvas del campo magnético puede utilizarse para detectar y evaluar el alcance de la corrosión interior del acero en estructuras de ingeniería” (p. 1). Los autores proponen una nueva técnica magnética como ensayo no destructivo que permite detectar y evaluar la corrosión interna en estructuras utilizando sensores micromagnéticos de alta resolución, resultando ser un método sencillo, barato y eficaz que permite comprobar la estructura de concreto armado.

Del Valle et al. (2011) realizaron una evaluación para determinar el estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas, Sonora, la cual comprendió en una serie de ensayos físico-químicos de tipo semidestructivo y no destructivo. En esta investigación, se inició con una inspección visual para identificar y caracterizar los daños, se determinaron las características mecánicas del concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión de núcleos y obtención del módulo elástico, índices esclerométricos y resistencia a tensión por adherencia. La *extracción de núcleos* se realiza con la norma ASTM C42/C 42M-99 y el ensaye se ejecuta con base en las normas NMX-C-83, NMX-C-109 y NMX-C-169. Los *ensayes esclerométricos* se ejecutan de acuerdo con ASTM C805-97 mediante un esclerómetro. Este sirve para generar una idea de la homogeneidad del concreto.

Las *pruebas de adherencia* se pueden efectuar de acuerdo con ASTM C-881-90, y se puede usar el equipo marca Germann Instruments, modelo *Bond Test*, con rango de lectura de 0 a 25 kN, y mediante probetas de acero de 76 mm de diámetro.

Para determinar el grado de contaminación interna en el concreto, se realizaron pruebas de carbonatación, contenido de cloruros y de sulfatos. La impregnación de los núcleos de concreto con una solución indicadora de pH se efectúa para determinar la profundidad del frente de carbonatación. En la determinación del contenido de cloruros solubles en ácido se ensayan muestras de 1.5 gramos de polvo de concreto extraídas en 3 rangos de profundidades para cada uno de los sitios. El ensayo para determinar el contenido de sulfatos en los núcleos de concreto extraídos en sitio se efectúa conforme a las normas ASTM C-114 y C1218. Este muestra el grado potencial de ataque por sulfatos (SO_4) en el concreto clasificado por el ACI 201.2R, de acuerdo con el porcentaje de contenido respecto al peso del cemento.

Tabla 7. Criterios de evaluación del grado de ataque por sulfatos

Nivel de ataque	% de SO_4/W_{cem}
Insignificante	0.0-0.1
Moderado	0.1-0.2
Severo	0.2-2.0
Muy severo	Más de 2.0

Fuente: Del Valle et al. (2011).

Del Valle et al. (2011) verificaron la concordancia entre la información documental y la estructura construida, así como la medición de espesores de recubrimiento, mediante el uso de equipo de detección del acero de refuerzo.

La técnica empleada para determinar el potencial de corrosión en diferentes áreas consiste en obtener lecturas de diferencias de potencial, medidas en milivolts, para estimar la probabilidad de la existencia de corrosión en el acero de refuerzo de acuerdo con la norma ASTM C 876-91:

- Las lecturas mayores a -200 mV indican un probabilidad del 90 % o mayor de que no exista corrosión.
- Las lecturas comprendidas entre -200 y -350 mV indican incertidumbre (50 % de probabilidad) en la actividad corrosiva.
- Las lecturas menores a -350 mV indican una probabilidad del 90 % o mayor de existencia de corrosión activa.

Las pruebas de carga consisten en desplazar el vehículo cargado a lo largo de los tramos, sobre distintas trayectorias rectilíneas paralelas sobre la zona instrumentada en cada tramo. Las actividades relacionadas con las pruebas de carga son: selección de puntos de instrumentación, definición de esquemas de instrumentación y medición, colocación de galgas extensométricas, preparación de sistema de adquisición de datos, preparación de vehículo para la ejecución de pruebas, ejecución de pruebas de carga, medición de vibración (por medio de un acelerómetro) y procesamiento y análisis de datos, así como la colección de los datos.

CAPÍTULO 2.

Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)

Criterios, índices e indicadores

Este modelo toma como base el método simplificado de Rodríguez et al. (1989), lo mejora y adecua a las condiciones y establecimientos mexicanos, sustentándose por otros estudios (Mariaca et al., 1999; Red Iberoamericana, 2000; Gómez de León y Alcaraz, 2004; Castro, 2001; Aragón-Cárdenas et al., 2021), sintetizando los parámetros incluidos en cada uno.

Se identificaron tres criterios para la evaluación de la vulnerabilidad ante corrosión de una estructura de concreto reforzado:

- Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos.
- Daños al concreto reforzado.
- Vulnerabilidad estructural ante el deterioro por corrosión.

Se identificaron tres índices para la evaluación de la vulnerabilidad ante corrosión de una estructura de concreto reforzado, relacionados con los criterios anteriores:

- Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM).
- Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).
- Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE).

Tabla 8. Peso global de índices e indicadores

Nombre	Ponderación	Peso global	Nombre	Ponderación	Peso global	Nombre	Ponderación	Peso global	Indicador	Ponderación	Peso global
Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)	1	1.000	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)	2	0.400	Vulnerabilidad Estructural (VE)	2	0.400	Recubrimiento (VE1) Protección del acero ante corrosión (VE2) Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3) Armado (VE4) Importancia estructural del elemento (VE5) Importancia de la estructura (VE6)	3	0.10
			Índice de Corrosión (ICO)	3	0.600	Daños en el Concreto Reforzado (DC)	2	0.400	Fisuración en el recubrimiento por corrosión (DC1) Depósitos en la superficie (DC2) Defectos de construcción (DC3) Resistividad eléctrica del concreto (DC4) Pérdida de sección (DC5)	2	0.07
									Intensidad o velocidad de corrosión (DC6)	3	0.10
						Vulnerabilidad al Ambiente (VA)	1	0.200	Clima (VA1) Exposición al deterioro (VA2) Exposición al cambio climático (VA3)	1	0.05
										2	0.10
										1	0.05

Fuente: elaboración propia.

De cada índice se identificaron los correspondientes indicadores, como se muestra en la Tabla 8, asignando una ponderación de acuerdo con su importancia, aplicando el método Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process [AHP]). Los valores obtenidos de los pesos globales corresponden a los coeficientes asignados a cada uno de los indicadores y subíndices para determinar el Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC). Lugo-García (2024) explican con detalle el desarrollo del método AHP de ponderación, que sirve como base para la capacitación y consulta de dudas sobre el *software* IVEC.

Fases de evaluación

La evaluación de la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado es de tipo simplificado no destructivo, basado en criterios, índices e indicadores. Este modelo se basa en Rodríguez et al. (1989), del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), España. En este manual, se presenta una versión adecuada a las condiciones y establecimientos mexicanos. La metodología de esta evaluación consiste en cuatro fases: selección de la estructura, inspección de la estructura y el medio, evaluación de la estructura y recomendaciones, en la secuencia que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Fases de la evaluación

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3 se muestra con mayor detalle la metodología, que comienza con la selección de la estructura de concreto armado a evaluar. La fase dos consiste en una inspección visual directa, trabajo de oficina, mediciones y ensayos no destructivos, cuando sea posible. Durante la fase de la inspección se recolectan tres tipos de información: estudio sobre el medio, nivel de daños en el concreto reforzado y caracterización de la estructura. Lo anterior permite realizar una diagnosis y una prognosis, que son las dos etapas de evaluación de la estructura. La información recabada en la fase de inspección visual directa permite obtener el IVEC, que conforma la diagnosis. Mientras que en la prognosis, se determina el nivel de riesgo de falla de la estructura y el nivel de urgencia, a partir del IVEC. La evaluación finaliza con las recomendaciones, sugerencias de acciones pertinentes e intervenciones, como el mantenimiento, la rehabilitación o una demolición.

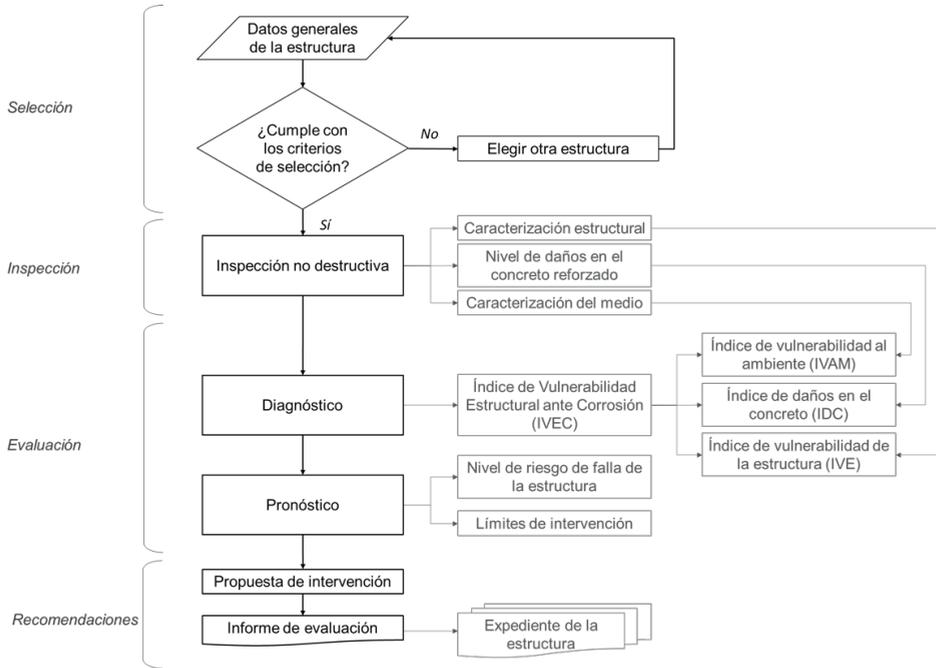


Figura 3. Metodología de la evaluación

Fuente: elaboración propia.

Fase 1: selección

Para realizar la evaluación es necesario seleccionar la estructura y determinar sus datos generales.

Criterios de selección

Los criterios de selección de la estructura son:

- Concreto reforzado/armado.
- Inspección visual directa.
- Seguridad.
- Autorización y acceso para realizar la inspección.
- Acceso a su expediente de ciclo de vida.
- Posibilidad de estimar la etapa en que se encuentra la estructura dentro de su ciclo de vida.

Esta evaluación se limita a estructuras de concreto reforzado o armado que permiten una inspección visual directa, es decir, no debe estar sumergida (en agua) o enterrada (en suelo); en estos casos se aplican otros métodos más costosos como

inspecciones de buceo o lanchaje. Si la estructura está parcialmente sumergida en agua o suelo, puede aplicarse la metodología planteada con los elementos accesibles.

Para la selección de la estructura es importante considerar la posibilidad del evaluador para llegar al sitio de estudio y de que se tenga la autorización necesaria. Además, este tipo de estructuras se encuentran en zonas controladas privadas o públicas; por lo que las evaluaciones pueden causar interrupciones parciales o completas de las actividades/operaciones que se desarrollan en los alrededores, lo que genera pérdidas por tiempo de inactividad o demora.

Otro criterio de selección es el acceso a su expediente de ciclo de vida, formado por un sistema de información que incluya bases de datos obtenidas del proceso de planeación, diseño y construcción de la estructura, que incluyen valoraciones del estado, inspecciones de mantenimiento periódicas-detalladas-especiales y evaluaciones de ingeniería; inspecciones previas a reparaciones e información posterior a reparaciones que hayan surgido durante el ciclo de vida de la estructura. Sin embargo, en la práctica no es común que se tenga un sistema de información a la altura de una gestión de ciclo de vida, aunque son indispensables los planos estructurales de construcción, memorias de cálculo y bitácoras de construcción.

Finalmente, el último criterio de selección de la estructura es la posibilidad de estimar la etapa en que se encuentra dentro de su ciclo de vida, para lo cual es necesario obtener información del año de inicio y término de construcción.

Recolección de datos generales

De acuerdo con esta metodología, los datos sobre las fases de diseño, construcción y mantenimiento de la estructura deben encontrarse en memorias de cálculo, planos o reportes de inspección dentro de un sistema de información de gestión de su etapa de vida. Al realizar la evaluación, es conveniente contar con la siguiente información sobre su estructura:

- Ubicación
- Edad
- Descripción estructural (tipo, elementos que la conforma, etcétera)
- Cambios que hayan existido durante la vida de servicio de la estructura
- Cantidad de reparaciones realizadas y su naturaleza y extensión
- Resultados de inspecciones y evaluaciones previas realizadas (Rodríguez et al., 1989)

Tipología estructural

Esta tipología se refiere a los tipos de elementos estructurales que componen el sistema estudiado. La información se recaba durante los trabajos de gabinete y se corrobora en campo durante la inspección visual. Debe agruparse en lotes de acuerdo con las clasificaciones sobre su tipología.

Fase 2: inspección

La segunda fase es la inspección visual, que consiste en ensayos no destructivos que identifican tres aspectos fundamentales: 1) Exposición al entorno o vulnerabilidad ambiental ante agentes corrosivos. 2) Nivel de daños en el concreto. 3) Vulnerabilidad estructural ante la corrosión. Además, los tres tipos de actividades de esta fase que se pueden realizar simultáneamente son: 1) Caracterización del medio. 2) Caracterización de la estructura. 3) Levantamiento del nivel de daños en el concreto.

La vulnerabilidad ambiental ante agentes es determinada durante la primera etapa, que consiste en caracterizar el medio donde se encuentra la estructura a evaluar. Durante la segunda etapa se determina el nivel de daños en el concreto. En la etapa tres, por medio de indicadores, se caracteriza la vulnerabilidad ante la corrosión. La información se puede obtener por inspección visual o algún otro método no destructivo.

Productos y reporte de inspección

Estos elementos deben estar dentro del producto de este examen visual:

- Croquis o planos
- Fichas de la estructura y del medio
- Formularios de inspección
- Inventario de daños
- Registro o anexo fotográfico

El reporte de inspección es realizado con base en el levantamiento de daños observados en la estructura. Se incluyen croquis o planos, fichas estructurales y el medio, formularios de inspección e inventario de daños y un registro fotográfico. Con el reporte se crea el plan de mediciones y ensayos a realizar en la tercera etapa: la evaluación. Si está parcialmente sumergida, ya sea en agua o en suelo, solo se inspeccionan elementos que están fuera de la superficie o a los que se tiene acceso, indicando recomendaciones pertinentes (fase cuatro).

Inspección visual

Este es el principal método no destructivo. Por lo tanto, es el primer paso de cualquier evaluación descriptiva del estado de la estructura, independientemente si se realizarán ensayos destructivos o no. Durante esta etapa, el objetivo principal es evaluar el daño por corrosión en la estructura, además de corroborar la información obtenida en los trabajos de gabinete sobre agresividad ambiental y tipología estructural; o bien, recabarlos en campo.

Caracterización del medio

Se recopila información sobre el medio donde está construida la estructura a fin de caracterizarla y determinar la vulnerabilidad ambiental ante agentes corrosivos (VA) representada por el Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM) determinado en la etapa de evaluación. Es importante considerar las características del ambiente y su relación con la estructura: 1) Tipo de ambiente (seco, húmedo, marino, con agresividad química, con erosión o cavitación, etcétera). 2) Condición del elemento estructural (en contacto con el agua, en contacto con el suelo).

Caracterización de la estructura

Los datos recabados en la fase de selección permiten describir en general la estructura. En términos de diseño y construcción, se requieren los siguientes datos:

Datos generales

- Ubicación
- Edad de la estructura
- Descripción estructural (tipo, elementos que la conforma, etcétera)
- Cambios estructurales que hayan existido durante la vida de servicio
- Cantidad de reparaciones realizadas y su naturaleza y extensión
- Resultados de inspecciones y evaluaciones previas realizadas

Datos para caracterización de la estructura

- Tipo
- Uso de la estructura
- Estructuración general
- Dimensiones generales
- Tipos de elementos
- Esfuerzos efectuados en los elementos
- Dimensiones de los elementos
- Armado longitudinal y transversal

- Localización de los elementos
- Recubrimiento
- Protección al acero ante corrosión

Su ubicación es importante para la identificación de su vulnerabilidad ante fenómenos extraordinarios. Los dibujos y esquemas usados para la tipología estructural pueden ser empleados en la localización y caracterización de daños. Es necesario identificar esta información y clasificarla, así como describir dichos elementos; es recomendable recabarla durante los trabajos de gabinete y corroborarlos en campo durante la inspección visual. Esta debe agruparse en lotes de acuerdo con las clasificaciones sobre tipología.

Nivel de daños en el concreto

Con el inventario surgido del levantamiento, se determina su nivel de daños. La Tabla 9 muestra posibles orígenes del daño en el concreto armado.

Tabla 9. Origen de daños

Características del daño	Origen
Fisuras inclinadas o verticales en las zonas de cortante o flexión respectivamente.	Funcionamiento estructural del elemento.
Fisuración paralela a las armaduras, delaminación, presencia de manchas o saltado del recubrimiento.	Efecto de la corrosión del acero de refuerzo. Reacciones del concreto con agentes agresivos como sulfatos u otros agentes expansivos.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

El registro del levantamiento de daños implica la elaboración de croquis o planos con el fin de determinar si los daños son iguales en todos los elementos o existen diferencias por causas locales puntuales (Castro, 2001). Durante su levantamiento se realiza una tipificación de la estructura en general, por lotes (tipología estructural) y por cada elemento, detallando y registrando la siguiente información:

- Mecanismo de deterioro: cloruros/carbonatación
- Manchas de óxido: color, extensión y curso
- Fisuras: ubicación, dirección y dimensiones
- Zonas de desprendimiento del recubrimiento de concreto con/sin exposición del refuerzo

Las Tablas 10, 11, 12 y 13 muestran la clasificación simplificada de daños en las estructuras que se registra en los croquis o planos generados con el levantamiento de daños percibidos durante la inspección. Para esta exploración en campo son necesarios formatos de registro.

Tabla 10. Tipos de agrietamiento en el concreto

Daño	Descripción	Causa	Detalles proporcionados en inspección
Grietas o fisuras	Rotura del concreto, superficial o profunda Son por lo general paralelas al acero de refuerzo afectado	Sobrecarga, contracciones, corrosión	Dirección, ancho, longitud, profundidad
Red de grietas	Grietas estrechas y cortas formando una red	Cambio diferencial de volumen de concreto superficial e interno	Ancho de grietas, tamaño de red y superficie afectada

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Tabla 11. Tipos de depósitos en la superficie del concreto

Daño	Descripción	Causa	Detalles proporcionados en inspección
Exudación	Material del tipo viscoso que va exudando a través de los poros del concreto	Reacción álcali en el agregado	Severidad (superficie afectada, cantidad de depósito)
Eflorescencia	Cubierta blanca en la superficie del concreto	Lixiviación de hidróxidos (cal del cemento) con o sin formación de carbonatos.	Severidad (superficie afectada, cantidad de depósito)
Manchas de óxido	Manchas de color café-rojizo	Corrosión del refuerzo o de alambres pegados a la superficie	Localización, extensión, intensidad, posible daño asociado
Manchas de humedad	Zona superficial del concreto con indicios de humedad o con agua acumulada en la superficie	Escurrimiento externo o interno, condensación. Filtraciones, depósitos	Severidad (superficie afectada)

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Tabla 12. Tipos de pérdida de concreto

Daño	Descripción	Causa	Detalles proporcionados en inspección
Brotos o protuberancia (pop-out)	Daño localizado superficial	Desarrollo de presión interna local o expansión del agregado	Localización, área de superficie, profundidad
Desprendimientos (spall) o concreto fofo	Fragmentos separados de una masa considerable de concreto. Sonido hueco al golpe del martillo	Inducción de esfuerzos internos, por ejemplo, por la corrosión del acero de refuerzo, cangrejeras o por fuerzas externas	Área (superficie afectada), profundidad
Delaminaciones	Esquirlas delgadas. Fragmento de concreto separado de la masa	Formación de esfuerzos internos sobre un área grande. Presión interna por corrosión de la armadura o por una fuerza externa aplicada	Área (superficie afectada), profundidad
Intemperismo	Desgaste de la superficie del concreto, lavado de la pasta del cemento	Acción del medioambiente que produce desgaste en la superficie	Área (superficie afectada), profundidad

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Tabla 13. Tipos de defectos y características de construcción en el concreto

Clasificación	Daño	Descripción	Causa	Detalles proporcionados en inspección
Defectos de construcción	Desgarramiento	Similar a las grietas	Adhesión a la cimbra o molde	Área, profundidad
	Alveolado (panal de abeja o cangrejera)	Vacíos entre el agregado grueso	Falta de homogeneidad durante el vaciado del concreto. Falta de vibración	Superficie afectada, profundidad, intensidad
Características de construcción	Junta de construcción	Línea en la superficie del concreto, puede ser biselado o de apariencia porosa	Junta entre dos colados	Localización y posible daño asociado
	Junta de tablero o dilatación	Ranura en la superficie del concreto. Línea formada por la unión de dos planos de concreto	Espacio dejado para evitar agrietamientos por contracciones en los tableros	Abertura, obstrucciones y cualquier deterioro asociado

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Fase 3: evaluación

Diagnóstico

Esta fase comprende el diagnóstico y pronóstico, que se determinan a partir del Índice Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC), el Índice de Corrosión (ICO), el Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM) y el Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC). Con el ICO se diagnostican los daños externos y exposición ambiental, mientras que con el Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE) se evalúa la vulnerabilidad estructural a la corrosión.

Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)

De acuerdo con Aragón-Cárdenas et al. (2021), “la vulnerabilidad estructural se refiere a la susceptibilidad de daño que presenta frente a algún evento, sea este natural o antrópico, que lo lleve a cualquiera de sus límites de funcionamiento” (p. 28). El IVEC evalúa el nivel de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado a través de un método no destructivo con tres criterios: vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos, daños al concreto reforzado relacionados con la corrosión y vulnerabilidad de la estructura ante el fenómeno de corrosión. El IVEC se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$IVEC = 0.40 \cdot IVE + 0.60 \cdot ICO \quad [1]$$

Donde,

IVEC: Índice de Vulnerabilidad ante Corrosión del Concreto Reforzado

IVE: Índice de Vulnerabilidad Estructural

ICO: Índice de Corrosión

El ICO se conforma por el IVAM y el IDC, con la siguiente ecuación:

$$ICO = 0.20 \times IVAM + 0.40 \times IDC \quad [2]$$

Donde,

ICO: Índice de Corrosión

IVAM: Índice de Vulnerabilidad al Ambiente

IDC: Índice de Daños en el Concreto Reforzado

La Figura 4 representa la relación de los índices y los indicadores que conforman el IVEC.

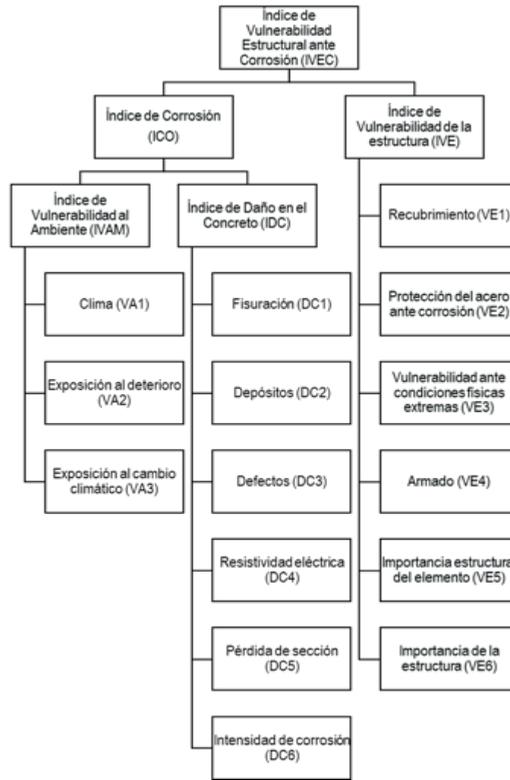


Figura 4. Índices e indicadores del modelo

Fuente: elaboración propia.

Índice de Corrosión (ICO)

El ICO evalúa el nivel de corrosión de la estructura de concreto reforzado con base en la vulnerabilidad a la exposición ante agentes corrosivos del ambiente y los daños al concreto reforzado. El Índice de Corrosión (ICO), se conforma por el Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM) y el IDC, con la siguiente ecuación:

$$ICO = 0.20 \cdot IVAM + 0.40 \cdot IDC \quad [2]$$

Donde,

ICO: Índice de Corrosión

IVAM: Índice de Vulnerabilidad al Ambiente

IDC: Índice de Daños en el Concreto Reforzado

La Figura 5 representa la relación de estos índices y los indicadores que los conforman.

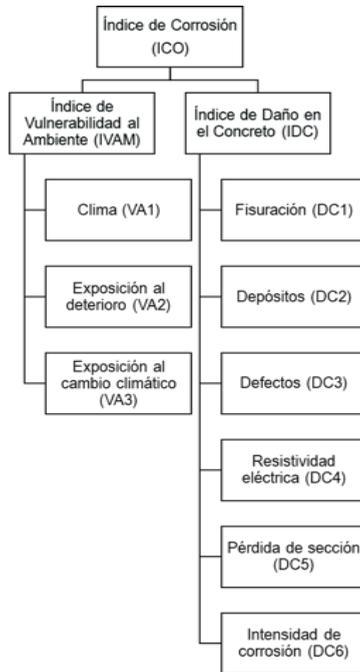


Figura 5. Índice de corrosión

Fuente: elaboración propia.

Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)

El IVAM evalúa el nivel de exposición de la estructura de concreto reforzado ante agentes corrosivos externos. Incluye indicadores de vulnerabilidad al ambiente como el clima, exposición al deterioro y exposición al cambio climático. Su obtención es a partir de la siguiente ecuación:

$$IVAM = 0.05 \cdot VA1 + 0.10 \cdot VA2 + 0.05 \cdot VA3 \quad [3]$$

Donde,

- VA1: Clima
- VA2: Exposición al deterioro
- VA3: Exposición al cambio climático

La Figura 6 representa la relación de este índice y los indicadores que lo conforman.



Figura 6. Índice de Vulnerabilidad al Ambiente

Fuente: elaboración propia.

Clima (VA1)

Sánchez y Ortiz (2019) evaluaron la muestra de diferentes regiones de México para determinar el grado de corrosión atmosférica en dispositivos electrónicos, logrando construir un mapa al respecto. En el ámbito internacional, se han realizado programas colaborativos internacionales con experimentos de exposición de muestras y toma de datos de contaminantes atmosféricos para describir el comportamiento de la corrosión en diferentes ambientes. Por ejemplo, el proyecto ISOCORRAG con el cual se fundamentó la norma ISO 9223 a través de estudios realizados a partir de 1986 en Norte América, Europa y Asia por el Grupo de Trabajo WG 4 de ISO 156 Technical Committee *Corrosion of metals and alloys*. Otro estudio internacional es el proyecto *Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (MICAT)* que formó parte del programa internacional Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), el cual comenzó en 1988 y terminó seis años después. Participaron catorce países de Iberoamérica, incluido México (Ortega et al., 2019).

La norma ISO 9223 (2012) define a la corrosividad de la atmósfera como la “habilidad para causar desgaste en un sistema de corrosión determinado” (p. 2). Dicha norma establece categorías de corrosividad de la atmósfera en relación con el efecto de corrosión de un año, ya sea por mediciones directas de especímenes o por estimaciones basadas en información ambiental como temperatura promedio anual, humedad relativa promedio anual, deposición promedio anual de Cl⁻ y deposición promedio anual de SO₂.

De acuerdo con Sánchez y Ortiz (2019), los grados de corrosividad en México son: bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto (Figura 7). Se ha comprobado una relación entre el clima y la corrosividad atmosférica, la Tabla 14 muestra esta relación, de acuerdo con la clasificación climática en México según el INEGI (2020), que se indica en la Figura 8.

Tabla 14. Relación entre clima y grado de corrosividad

Grado de corrosividad atmosférica	Clima
Baja	Seco/semiseco/muy seco
Medio-bajo	Templado subhúmedo/seco/semiseco/muy seco
Medio	Templado subhúmedo/seco/muy seco
Medio-alto	Cálido subhúmedo/templado subhúmedo/seco/semiseco
Alto	Cálido húmedo

Fuente: adaptado de Sánchez y Ortiz (2019), modificado con base en el INEGI (2020).



Figura 7. Clasificación del grado de corrosión atmosférica

Fuente: Sánchez y Ortiz (2019).



Figura 8. Climas en México

Fuente: INEGI (2021).

Exposición al deterioro (VA2)

Para determinar la agresividad ambiental, Rodríguez et al. (1989) consideran las exposiciones ambientales a las que se encuentra el concreto susceptible a la corrosión. Por ejemplo, la distancia de la superficie del concreto a la fuente de cloruros es un factor que debe tomarse en cuenta. En su defecto, la carbonatación será el mecanismo agresivo en el concreto, por lo que el nivel de humedad será el parámetro fundamental. La Tabla 15 muestra la clasificación de exposición de elementos de concreto según el Código Estructural, que coincide con la clasificación europea EN 206 (CEN, 2013).

Tabla 15. Clasificación de exposición de los elementos de concreto según el código estructural

Designación de la clase	Descripción del entorno	Ejemplos informativos donde pueden existir las clases de exposición
Sin riesgo de ataque por corrosión		
X0	Para concreto en masa: todas las exposiciones, salvo donde haya ataque hielo/deshielo, abrasión o ataque químico. Para concreto con armaduras en un ambiente muy seco.	Elementos de concreto en masa. Elementos de concreto en interiores de edificios con una humedad muy baja. (HR<45 %).
Corrosión inducida por carbonatación		
XC1	Seco o permanentemente húmedo	Elementos de concreto armado o pretensado dentro de recintos cerrados (tales como edificios), con humedad del aire baja. (HR<65 %). Elementos de concreto armado o pretensado permanentemente sumergido en agua no agresiva.
XC2	Húmedo, raramente seco	Elementos de concreto armado o pretensado permanentemente en contacto con agua o enterradas en suelos no agresivos (por ejemplo, cimentaciones)
XC3	Humedad moderada	Elementos de concreto armado o pretensado dentro de recintos cerrados (tales como edificios), con humedad media o alta (HR>65 %). Elementos de concreto armado o pretensado en el exterior, protegidos de la lluvia.
XC4	Sequedad y humedad cíclicas	Elementos de concreto armado o pretensado en el exterior, expuestos al contacto con el agua, de forma no permanente (por ejemplo, la procedente de la lluvia).
Corrosión inducida por cloruros de origen no marino		
XD1	Humedad moderada	Elementos de concreto armado o pretensado en el exterior, expuestas a aerosoles con iones cloruro con origen no marino.

Designación de la clase	Descripción del entorno	Ejemplos informativos donde pueden existir las clases de exposición
XD2	Húmedo, raramente seco	Piscinas. Elementos de concreto armado o pretensado expuestos a aguas industriales que contienen cloruros.
XD3	Ciclos humedad y secado	Elementos de puentes expuestos a salpicaduras de aguas con cloruros, situados a menos de 10 metros de distancia horizontal o a menos de 5 metros de distancia vertical de una zona de rodadura donde se usen sales de deshielo. Elementos enterrados a menos de 1 metro del borde de una zona de rodadura donde se usen sales de deshielo. Losas en aparcamientos.
Corrosión inducida por cloruros de origen marino		
XS1	Expuestos a aerosoles marinos, pero no en contacto directo con el agua del mar.	Elementos estructurales de concreto armado o pretensado sometidos a los aerosoles marinos, ubicados en la costa o cerca de la costa.
XS2	Permanentemente sumergida en agua de mar.	Elementos estructurales de concreto armado o pretensado permanentemente sumergidos en agua marina.
XS3	Zonas de carrera de mareas afectadas por el oleaje o salpicaduras.	Elementos estructurales de concreto armado o pretensado situados en zona de carrera de mareas, afectados por el oleaje o salpicaduras.
Ataque hielo/deshielo		
XF1	Saturación moderada, sin sales fundentes.	Elementos con superficies verticales expuestas a lluvia y helada (tales como fachadas y pilares). Elementos con superficies horizontales no saturados, pero expuestos a lluvia y helada.
XF2	Saturación moderada, con sales fundentes.	Mismo tipo de elementos que en la clase XF1, pero expuestos a sales fundentes, bien directamente o bien a sus salpicaduras y/o escorrentía (por ejemplo, dinteles, pilas, cargaderos, etcétera)
XF3	Saturación alta, sin sales fundentes.	Elementos con superficies horizontales donde se pueda acumular el agua y estén expuestas a la helada.
XF4	Saturación alta con sales fundentes o agua del mar.	Elementos con superficies horizontales donde se pueda acumular el agua y estén expuestas a la helada y sales fundentes, bien directamente o bien a sus salpicaduras.
Ataque químico		
XA1	Ambiente de una débil agresividad química.	Terrenos naturales y aguas (subterráneas, industriales, residuales, etc.).
XA2	Ambiente de una moderada agresividad química.	Terrenos naturales y aguas (subterráneas, industriales, residuales, etcétera).
XA3	Ambiente de una alta agresividad química.	Terrenos naturales y aguas (subterráneas, industriales, residuales, etcétera).

Designación de la clase	Descripción del entorno	Ejemplos informativos donde pueden existir las clases de exposición
Erosión		
XM1	Elementos sometidos a erosión/abrasión moderada.	Losas sometidas al tráfico de vehículos.
XM2	Elementos sometidos a erosión/abrasión intensa.	Losas en zonas industriales sometidas al tráfico de carretillas de horquillas con neumáticos.
XM3	Elementos sometidos a erosión/abrasión extrema.	Losas en zonas industriales sometidas al tráfico de carretillas de horquillas con ruedas de acero o cadenas.

Fuente: Gobierno de España (2021).

El Comité Euro-Internacional del Concreto -CEB- (1989), relaciona los tipos de exposición marina con el riesgo de corrosión. En la Figura 9 se observa que la zona atmosférica marina presenta mayor riesgo, y disminuye cuando la altura del edificio aumenta (Balestra et al., 2019).

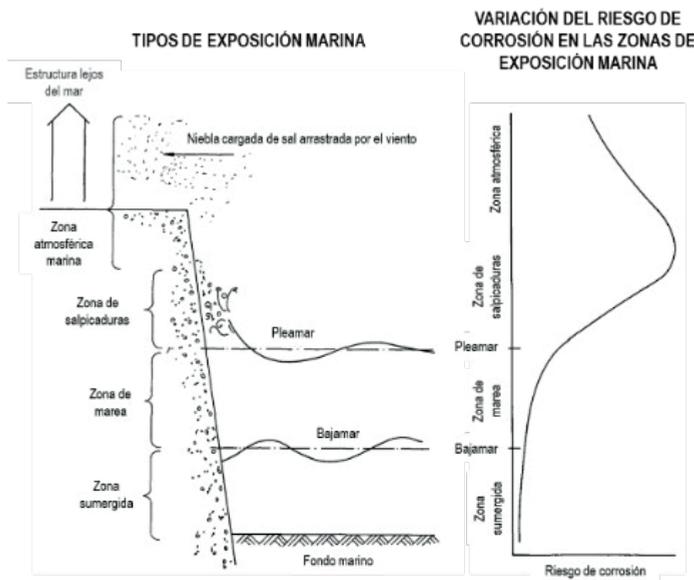


Figura 9. Tipos de exposición marina y variación del riesgo de corrosión de las armaduras
Fuente: Comité Euro-Internacional del Concreto -CEB- (1989).

Exposición al cambio climático (VA3)

En los últimos años se ha encontrado una relación entre la corrosión y el cambio climático. Según De Medeiros-Junior et al. (2015), la degradación del concreto

por cloruros en ambientes marinos está relacionada con variables ambientales. En Australia, Wang et al. (2012) evaluaron las probabilidades de inicio y daño por corrosión en concreto debido a cambios climáticos hasta 2100, y concluyeron que las estructuras existentes pueden deteriorarse más rápido de lo previsto en la etapa de diseño si no se consideraron los efectos del cambio climático.

Peng y Stewart (2014) investigaron el deterioro inducido por la carbonatación en tres ciudades chinas; Kunming, Xiamen y Jinan, bajo un clima cambiante con proyecciones de las tendencias cambiantes del CO₂ atmosférico, la temperatura local y la humedad relativa, basándose en los últimos escenarios de emisiones de CO₂ y en un análisis de simulación de Monte Carlo que incluye los últimos escenarios de emisiones del IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático), las vías de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés), RCP 8.5 (escenario de emisiones altas) y RCP 4.5 (escenario de emisiones medias). Peng y Stewart (2014) encontraron que debido al cambio climático, para 2100 en China, la profundidad de carbonatación en el concreto reforzado puede aumentar hasta un 45 % y puede causar entre 7-20 % daños adicionales por carbonatación en zonas templadas o frías.

De Medeiros-Junior et al. (2015) desarrollaron una metodología para evaluar el impacto de los cambios de temperatura y humedad relativa en la durabilidad del concreto sujeto al ingreso de cloruros en ambiente marino en la costa norte de Sao Paulo, Brazil. De Medeiros-Junior et al. (2015) encontraron que el incremento de temperatura y humedad relativa redujeron de 7.8 a 10.2 años de vida útil en un periodo de 100 años. Wang et al. (2018) presentaron un procedimiento numérico que considera el calentamiento global y el aumento del nivel del mar para analizar la vida útil del concreto con agrietamiento; encontraron que para una vida útil de 50 años esta se reduce 6 % debido al aumento de temperatura y del nivel del mar. Ngoc-Long et al. (2021) estudiaron la costa central norte de Vietnam, en donde propusieron un modelo para predecir el tiempo de inicio de la corrosión considerando el cambio climático; este tiene un gran impacto en el tiempo de iniciación de la corrosión de las estructuras de concreto reforzado localizadas en ambientes marinos. En México, Castro-Borges y Mendoza-Rangel (2008) han comprobado el efecto del cambio climático en la corrosión del concreto, en costas mexicanas, y por ende en la afectación en su durabilidad. Esto ha permitido elaborar propuestas para aumentar la durabilidad del concreto.

De acuerdo con la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2014), la exposición “se refiere al grado de estrés climático sobre una unidad particular de análisis” (p. 16). Para construir un índice de vulnerabilidad al cambio climático, la UNAM (2014) consideró tres indicadores: el grado de exposición; la sensibilidad de la

población; y la capacidad adaptativa. Para el grado de exposición al clima consideraron indicadores sobre la frecuencia de eventos extremos, problemática ambiental y cambio climático. Las variables consideradas para el grupo de indicadores de frecuencia de eventos extremos fueron inundaciones, heladas, lluvias, deslizamientos; todos reportados entre 1980 y 2005. En el segundo conjunto de variables, se tomaron en cuenta problemas ambientales reportados, superficie sin vegetación, unidades de producción por pérdidas y falta de fertilidad. En el tercer grupo, se consideraron las razones de cambio entre temperatura y precipitación medias.

Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC)

El IDC evalúa el nivel de daños en la estructura, incluye indicadores de daños al concreto reforzado como fisuración en el recubrimiento por corrosión, depósitos en la superficie, defectos de construcción, resistividad eléctrica, pérdida de sección e intensidad de corrosión. Su obtención es a partir de la siguiente ecuación:

$$IDC = 0.0671 \cdot DC1 + 0.033 \cdot DC2 + 0.033 \cdot DC3 + 0.067 \cdot DC4 + 0.10 \cdot DC5 + 0.10 \cdot DC6 \quad [4]$$

Donde

- IDC: Índice de Daños en el Concreto
- DC1: Fisuración en el recubrimiento por corrosión
- DC2: Depósitos en la superficie
- DC3: Defectos de construcción
- DC4: Resistividad eléctrica del concreto
- DC5: Pérdida de sección
- DC6: Intensidad o velocidad de corrosión

La Figura 10 representa la relación de estos índices y los indicadores que los conforman.

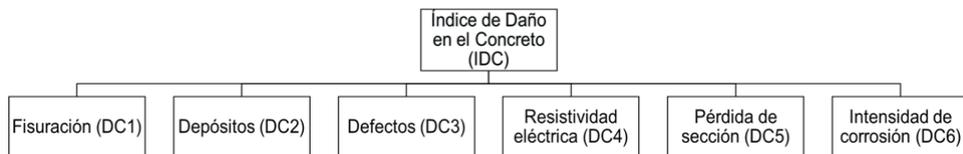


Figura 10. Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC)

Fuente: elaboración propia.

Fisuración en el recubrimiento (DC1)

De acuerdo con EUCLID GROUP (2019), las fisuras en estado endurecido pueden deberse a cargas o exposición ambiental. Por exposición, se clasifican por retracción por secado (*creep* o fisuración en mapa), por cambio térmico, por reactividad álcali-agregado, por corrosión o ataque por sulfatos. De acuerdo con Rodríguez et al. (1989), la corrosión en el acero de refuerzo se identifica visualmente por fisuras en el recubrimiento del concreto. En el concreto reforzado, se forma una barrera protectora en el acero de refuerzo; sin embargo, esta capacidad de protección se puede perder por la carbonatación del recubrimiento la presencia de iones cloruros, que generan una corrosión localizada. La fisuración debida a corrosión por carbonatación aparece sobre la longitud del acero de refuerzo y paralela a su dirección, ya que es generalizada. Mientras que para el caso que sea por cloruros, las fisuras en el recubrimiento pueden aparecer o no, dependiendo de la extensión corrosiva.

La incidencia de la abertura de la fisura en la corrosión de la armadura depende factores como la agresividad del medioambiente, el recubrimiento de la armadura y la calidad del concreto (Red Iberoamericana, 2000). Según Korec et al. (2023), el proceso de agrietamiento inducido por la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto se puede dividir en tres etapas (Figura 11): transporte de especies de hierro y su precipitación, fractura del concreto debido a presión inducida por la precipitación y ensanchamiento de las grietas, lo que lleva a delaminación/descantillado de la cubierta de concreto.

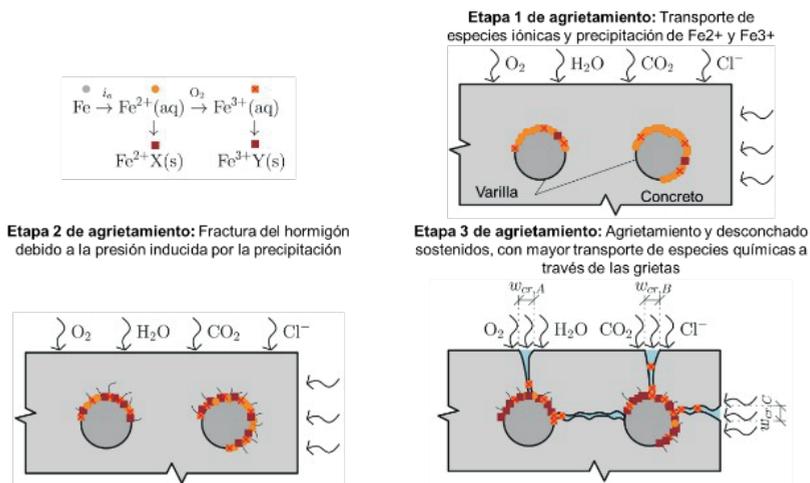


Figura 11. Proceso de agrietamiento del concreto inducido por corrosión del acero de refuerzo

Fuente: Korec et al. (2023).

En la Figura 12 se observa que el ancho de la grieta es notorio en la fase de propagación hasta llegar a un desprendimiento o delaminación del concreto antes de comenzar la etapa final de la propagación. Si esta continúa, la estructura corre el riesgo de presentar una falla estructural. Aquí los desprendimientos y delaminaciones son más significativos y el ancho de la grieta superficial aumenta considerablemente.

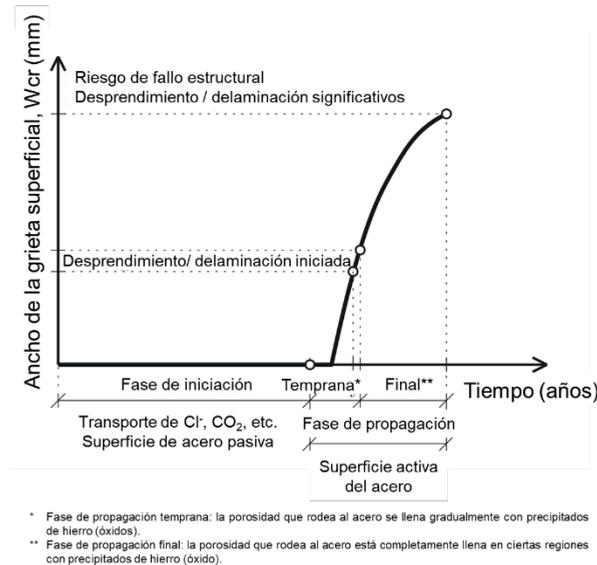


Figura 12. Relación entre el ancho de la grieta y el tiempo de propagación

Fuente: Korec et al. (2023).

Otras causas del agrietamiento pueden ser por asentamiento plástico, superficial (*crazing*), contracción plástica, contracción por secado, temperatura; o bien pueden ser fisuras estructurales, es decir, originadas por sollicitaciones mecánicas sobre la estructura. Se puede diferenciar visualmente entre una fisura por corrosión y una estructural por la dirección que lleva. Las fisuras estructurales se generan transversales a la armadura, en otras palabras, en planos ortogonales a las armaduras principales, ya que son colocadas para absorber las tensiones que el concreto no puede soportar por sí solo. Por el contrario, las fisuras que van en la misma dirección de la armadura, en general, son resultado de un proceso de corrosión iniciado. Sin embargo, pueden aparecer por procedimientos constructivos incorrectos, como por una contracción de fraguado en ciertas condiciones, bajo rendimiento de los estribos o estados tensionales de compresión elevados por efecto del módulo de Poisson. Por otro lado, una fisura, aunque no sea por corrosión, permite el ingreso de agentes

que llegan a la armadura y comienzan el proceso de corrosivo o bien contribuyen con su propagación, dependiendo de la abertura (Red Iberoamericana, 2000). La fisuración en el recubrimiento del concreto es un signo de que se está produciendo corrosión en el acero de refuerzo y su ancho está en función de la propagación. Este indicador permite evaluar el nivel de daños.

Rodríguez et al. (1989) clasifican el nivel de fisuras por corrosión de acuerdo con su ancho, como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16. Fisuración del recubrimiento del concreto inducido por corrosión

Descripción	Nivel
Sin fisuras	1
Fisuras < 0.3 mm	2
Fisuras > 0.3 mm	3
Fisuración generalizada y estallidos	4

Fuente: Rodríguez et al. (1989).

Según la Red Iberoamericana (2000), la abertura de una fisura por debajo de 0.4 mm en concreto reforzado no incrementa el riesgo de ataque por corrosión. Por otra parte, Sotomayor-Cruz (2020) clasifica las fisuras o grietas en función a su ancho y grado de repercusión en las estructuras (Tabla 17). Las fisuras son aberturas de no más de 1 mm de ancho que afectan solo a la superficie de la estructura de concreto, están relacionadas con cambios de humedad, temperatura y el estado tensional de las armaduras. Las grietas son aberturas de ancho mayor a 1 mm que afectan a la estructura de concreto en todo su espesor, apareciendo en cualquier elemento estructura o de cerramiento por movimiento de suelo, reparto defectuoso de las cargas no previstas, sobrecargas o variaciones térmicas.

Tabla 17. Clasificación de fisuras y grietas en función a su ancho y grado de repercusión

Clasificación	Ancho (e)	Nivel de repercusión en la estructura
Microfisuras	$e < 0.05$ mm	Nivel muy bajo.
Fisuras	$0.1 < e < 0.2$ mm	Nivel bajo. Tener cuidado con ambientes marinos u otros agresivos donde pueda desencadenarse la corrosión del acero.
Macrofisuras	$0.2 < e < 0.4$ mm	Nivel moderado. Podría existir repercusiones estructurales, se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico y alternativas de reparación o reforzamiento en caso lo amerite.

Clasificación	Ancho (e)	Nivel de repercusión en la estructura
Grietas	$0.4 < e < 1.0$ mm	Nivel alto. Podría existir reducción de la capacidad sismorresistente. Se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico, y alternativas de reparación o reforzamiento en lo aplicable.
Grietas	$e > 1.0$ mm	Nivel muy alto. Posible reducción significativa de la capacidad sismorresistente. Se requiere estudio de vulnerabilidad para el diagnóstico y determinar la posibilidad de salvar la estructura. Dependiendo de los daños encontrados, se debe evaluar la evacuación y apuntalamiento de la edificación.

Fuente: Sotomayor-Cruz (2020).

Depósitos en la superficie (DC2)

De acuerdo con la Red Iberoamericana (2000), se pueden identificar cuatro tipos de depósitos en la superficie del concreto como daños a este (Tabla 18).

Tabla 18. Tipos de depósitos en la superficie del concreto

Depósito en la superficie del concreto	Descripción	Causas
Exudación	Material del tipo viscoso que va exudando a través de los poros del concreto.	Reacción álcali en el agregado.
Eflorescencia	Cubierta blanca en la superficie del concreto.	Lixiviación de hidróxidos (cal del cemento) con o sin formación de carbonatos.
Manchas de óxido	Manchas de color café-rojizo.	Corrosión del refuerzo o de alambres pegados a la superficie.
Manchas de Humedad	Zona superficial del concreto con indicios de humedad o con agua acumulada en la superficie.	Escurrimiento externo o interno, condensación. Filtraciones, depósitos.

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Defectos de construcción (DC3)

De acuerdo con la Red Iberoamericana (2000), se pueden identificar dos tipos de defectos en la superficie del concreto (Tabla 19).

Tabla 19. Defectos de construcción en la superficie del concreto

Defectos en la superficie del concreto	Descripción	Causas
Desgarramiento	Similar a las grietas	Adhesión a la cimbra o molde.
Alveolado (panal de abeja o cangrejera)	Vacíos entre el agregado grueso	Falta de homogeneidad durante el vaciado del concreto. Falta de vibración.

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Resistividad eléctrica del concreto (DC4)

Se ha encontrado una relación entre la resistividad eléctrica del concreto con la probabilidad de que se esté produciendo corrosión en la armadura del concreto. Las mediciones son métodos no destructivos para determinar el nivel de riesgo por corrosión, ya que existe una relación entre la resistividad y su intensidad, aunque realmente indica la humedad de la estructura.

Pérdida de sección (DC5)

La pérdida de diámetro del acero de refuerzo es el primer efecto directo de la corrosión, por lo que es un indicador de daños en el concreto armado. Esta reducción afecta la capacidad portante de la estructura (Rodríguez et al., 1989).

Intensidad o velocidad de corrosión (DC6)

La intensidad o velocidad de corrosión indica la cantidad de metal que se transforma en óxido por unidad de superficie del acero de refuerzo y el tiempo. Puede emplearse para calcular la pérdida de sección del acero, identificar las zonas de corrosión y evaluar la eficacia de las reparaciones (Rodríguez et al., 1989).

Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)

El IVE evalúa el nivel de vulnerabilidad que posee la estructura con base en sus características, condiciones, diseño y construcción. Incluye indicadores como recubrimiento, protección del acero ante corrosión, vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas, armado, importancia de la estructura y del elemento. Su obtención es a partir de la siguiente ecuación, de acuerdo con el método analítico jerárquico, AHP:

$$IVE = 0.10 \cdot VE1 + 0.10 \cdot VE2 + 0.067 \cdot VE3 + 0.067 \cdot VE4 + 0.033 \cdot VE5 + 0.033 \cdot VE6 \quad [5]$$

Donde,

- VE1: Recubrimiento
- VE2: Protección del acero ante corrosión
- VE3: Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas
- VE4: Armado
- VE5: Importancia estructural del elemento
- VE6: Importancia de la estructura

La Figura 13 representa la relación del índice con los indicadores que lo conforman.

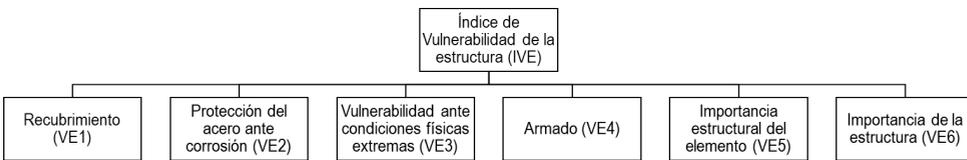


Figura 13. Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE)

Fuente: elaboración propia.

Recubrimiento (VE1)

El recubrimiento es la capa de concreto que va desde la superficie del concreto hasta la armadura, en otras palabras, es la distancia libre entre la superficie de las barras o varillas de refuerzo y el paramento más próximo del elemento de concreto (Treviño, 1998). Funciona como una barrera que cubre al acero de refuerzo ante corrosión física o química, actuando como un protector físico entre el medioambiente y el acero. Además, confiere un óxido protector o capa pasivante, que proporciona un ambiente alcalino que rodea al acero de refuerzo protegiéndolo de la corrosión de forma duradera. Sin embargo, pueden presentarse fisuraciones por varias razones: el ingreso lento de agentes externos, carbonatación que reduce la pasividad del acero haciéndolo más propenso a la corrosión o la presencia de cloruros en ambientes agresivos que lo desencadenan en la armadura (Red Iberoamericana, 2000; Castro-Borges, 2001).

De acuerdo con Treviño-Treviño (1998), arriba de los valores mínimos predeterminados, el recubrimiento protege el acero de la corrosión o incendio; permite la adherencia del acero al concreto de tal manera que los dos materiales se comporten como uno solo, por lo que el aumento del recubrimiento aumenta la eficiencia de la adherencia.

Protección del acero ante corrosión (VE2)

El concreto ofrece una protección natural al acero embebido. El pH fuertemente alcalino (entre 12.5 y 13.5) que se encuentra en los poros del concreto mantiene al acero inactivo naturalmente. Además, el concreto brinda una protección física, ya que limita el acceso de los agentes externos causantes de la corrosión, como el agua, oxígeno, cloruros y otras sustancias; sin embargo, esta protección no es una barrera perfecta debido a los poros del concreto y la tendencia de formar grietas (Treviño, 1998).

Ante el riesgo de un recubrimiento inadecuado o malas prácticas constructivas, es necesario el empleo de técnicas adicionales que garanticen esta protección y aseguren su vida útil sin fallos considerables (Red Iberoamericana, 2000; Castro-Borges, 2001). Se clasifican en directas en el acero de refuerzo y protecciones indirectas. La Tabla 20 muestra algunas de las directas, mientras que la Tabla 21 muestra indirectas.

Para las reparaciones, se utilizan técnicas electroquímicas, protección catódica, revestimientos, galvanizado y resina epoxi, armaduras especiales, acero inoxidable y plástica sin fibras, e inhibidores de corrosión, orgánicos e inorgánicos (Macioski et al., 2016).

Tabla 20. Protección directa de acero de refuerzo

Protección directa	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Protección catódica	Cualquier estructura	Única eficaz en corrosión ya iniciada	Personal calificado, mantenimiento, caso de corriente impresa
Galvanizado	Estructuras carbonatadas	Facilidad de aplicación, costo relativo, sin mantenimiento	Deterioros locales por manipulación y mantenimiento
Recubrimientos epóxicos	Cualquier estructura	Sin mantenimiento	Costo elevado en la puesta en obra y deterioro local por manipulación

Fuente: elaborado con base en Red Iberoamericana (2000).

Tabla 21. Protección indirecta de acero de refuerzo

Protección directa	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Revestimientos/ recubrimientos	Cualquier estructura	Facilidad de aplicación	Puede acelerar la corrosión si no se elimina Cl- / concreto carbonatado
Inhibidores	Cualquier estructura	Facilidad de aplicación, sin mantenimiento, reparación en sitios con alta contaminación por Cl- / Cl- añadido en mezcla	Garantía difusión y garantía de efectividad
Realcalinización electroquímica	Estructuras en ambiente húmedo y carbonatados	Ninguna remoción de concreto contaminado	Costo y dificultad de aplicación en campo
Extracción electroquímica de cloruros	Estructuras en ambiente húmedo y con cloruro	Ninguna remoción de concreto contaminado	Costo y dificultad de aplicación en campo

Fuente: elaborado con base en Red Iberoamericana (2000).

Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3)

Conocer las condiciones físicas de la zona de construcción es muy importante para planear los proyectos de ingeniería (Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT], 2001). En el *Manual de Dimensionamiento Portuario* de la SICT, se presenta una zonificación costera de México de acuerdo con condiciones físicas. Se clasifican en normales o cotidianas -meteorológicas, viento, clima; oceanográficas, oleaje, corrientes y mareas- y extraordinarias -ciclones, nortes, sismos, etcétera.

Los sismos y los huracanes son los fenómenos naturales que propician la destrucción de estructuras dañadas por corrosión. Esta deteriora la estructura y la debilita con el tiempo, por lo que no soportan la carga de sismos o huracanes (Castro-Borges, 2001).

Armado (VE4)

De acuerdo con Rodríguez et al. (1989), “las consecuencias de la corrosión de las armaduras en el concreto son muy diferentes dependiendo de diversos factores: tipo de sección y esfuerzos de esta, nivel de armador, tipo de armaduras, etcétera.” (p. 23). En línea con lo anterior, los autores desarrollaron un índice estructural que reúne estos factores considerando el armado transversal y longitudinal para elementos sometidos a flexión -trabes y losas- y a flexocompresión -columnas-.

Importancia estructural del elemento (VE5)

El comportamiento de la edificación está influenciado por el impacto de los elementos dañados. Gómez-García (2023) propone una escala de importancia de elementos estructurales de acuerdo con las consecuencias de la falla (Figura 14).

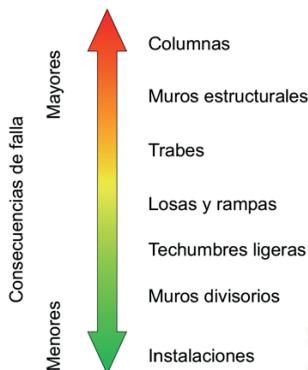


Figura 14. Importancia de elementos estructurales

Fuente: Gómez-García (2023).

Importancia de la estructura (VE6)

Está en función de las consecuencias del fallo, las cuales pueden ser leves o significantes; en particular, estas últimas corresponden a aquellas donde hay riesgo para la vida o existen importantes daños materiales (Rodríguez, et al., 1989).

De acuerdo con la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015; 2020), “el destino de las construcciones debe tomarse como referencia para determinar su importancia basada en la relevancia y magnitud de los daños que puedan generarse en caso de falla” (p. 20). La CFE (2015) en su *Manual de Diseño de Obras Civiles* capítulo C.1.3 Diseño por Sismo, clasifica las construcciones según dos criterios: por su importancia y efectos que podrían ocurrir en caso de falla (Tabla 22).

Tabla 22. Clasificación de las estructuras según su destino

Grupo	Descripción
A+	<p>Las estructuras de gran importancia, o del Grupo A+, son aquellas en que se requiere un grado de seguridad extrema, ya que su falla causaría cientos o miles de víctimas, y/o graves pérdidas y daños económicos, culturales, ecológicos o sociales.</p> <p>Ejemplos de estructuras de importancia extrema son las grandes presas y las plantas nucleares.</p>
A	<p>Estructuras en que se requiere un grado de seguridad alto. Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas, daños ecológicos o culturales, científicos o tecnológicos de magnitud intensa o excepcionalmente alta, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables, así como construcciones cuyo funcionamiento sea esencial después de un sismo.</p> <p>Ejemplo de ellas son las estructuras fundamentales (principales) de: centrales de generación, transmisión y distribución eléctrica, instalaciones industriales de proceso, almacenamiento y distribución de hidrocarburos, sistemas de transporte y telecomunicaciones, sistemas de almacenamiento, conducción, distribución y tratamiento de aguas, escuelas, centros de investigación, estadios, hoteles, sistemas de emergencia como estaciones de bomberos u hospitales, etcétera.</p>
B	<p>Estructuras en las que se requiere un grado de seguridad convencional. Construcciones cuya falla estructural ocasionaría la pérdida de un número reducido de vidas pérdidas económicas moderadas o pondría en peligro otras construcciones de este grupo y/o daños a las del Grupo A+ y A moderados.</p> <p>Ejemplo de ellas son las naves industriales, locales comerciales, estructuras comunes destinadas a vivienda u oficinas, salas de espectáculos, depósitos y estructuras urbanas o industriales no incluidas en los Grupos A+ y A, así como muros de retención, bodegas ordinarias y bardas.</p>

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2015).

La CFE (2020) en su *Manual de Diseño de Obras Civiles* capítulo C.1.4 Diseño por Viento, clasifica las construcciones según su importancia (Tabla 23).

Tabla 23. Clasificación de las estructuras según su importancia

Grupo	Descripción
A+	<p>Las estructuras de gran importancia son aquellas en que se requiere un grado de seguridad extremo, ya que su falla causaría cientos o miles de víctimas; así como graves pérdidas, daños económicos, culturales, ecológicos y sociales.</p> <p>Ejemplos de estructuras de importancia extrema son las estructuras fundamentales, como las existentes dentro de plantas nucleares, termoeléctricas, hidroeléctricas, de hidrocarburos, entre otras.</p>
A	<p>Estructuras en que se requiere un grado de seguridad alto. Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas, daños ecológicos o culturales, científicos o tecnológicos de magnitud excepcionalmente alta, o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables, así como construcciones cuyo funcionamiento sea esencial después de la ocurrencia de vientos fuertes.</p> <p>Ejemplo de ellas son las estructuras fundamentales, tales como: aerogeneradores y plantas solares; otros ejemplos son: áreas de reunión con capacidad mayor que doscientas personas (por ejemplo, salas de espectáculos, auditorios y centros de convenciones), locales y cubiertas que alojen equipo especialmente costoso, museos, templos, estadios, terminales de distribución de hidrocarburos, centrales telefónicas e inmuebles de telecomunicaciones principales, estaciones terminales de transporte, estaciones de bomberos, de rescate y de policía, hospitales e inmuebles médicos con áreas de urgencia, centros de operación para situaciones de rescate, escuela, subestaciones eléctricas.</p>
B	<p>Estructuras en las que se requiere un grado de seguridad moderado. Construcciones cuya falla estructural ocasionaría la pérdida de un número reducido de vidas, pérdidas económicas moderadas o pondría en peligro otras construcciones de este grupo y/o causaría daños moderados a las del Grupo A+ y A.</p> <p>Ejemplo de ellas son las estructuras no fundamentales, tales como: plantas industriales, subestaciones eléctricas de menor importancia que las del Grupo A, bodegas ordinarias, gasolineras (excepto los depósitos exteriores de combustibles pertenecientes al Grupo A), comercios, restaurantes, casas para habitación, viviendas, edificios de apartamentos u oficinas, hoteles, bardas cuya altura sea mayor que 2.5 metros.</p> <p>También pertenecen a este grupo: salas de reunión y espectáculos, estructuras de depósitos urbanas e industriales, no incluidas en el Grupo A. Los recubrimientos, tales como cancelerías y elementos no estructurales que conformen parte de las fachadas y techos, pertenecerán a este Grupo B siempre y cuando no causen daños corporales y materiales (incluyendo contenidos) importantes al desprenderse; en caso contrario, se analizarán las condiciones para el Grupo A o A+.</p>
C	<p>Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad bajo. Son aquellas cuya falla no implica graves consecuencias, ni causa daños a construcciones de los Grupos A+, A y B.</p> <p>Ejemplos de ellas pueden ser estructuras o elementos temporales con vida útil menor que seis meses, tales como bodegas provisionales, cimbras, andamios, carteles, muros aislados y bardas con altura menor o igual que 2.5 metros.</p>

Fuente: CFE (2020).

Previsión

Aquí se determina la urgencia de intervención a partir del IVEC, identificando el nivel de riesgo de falla de la estructura y el límite recomendado para realizar una intervención (Tabla 24), con base en el sistema de ecuaciones planteado haciendo coincidir con el modelo base (Rodríguez et al., 1989), el cual considera una escala de 4 niveles que se puede representar en un modelo 3D con ayuda de un *software* de ingeniería como Revit.

Tabla 24. Urgencia de intervención (años)

IVEC	Semáforo	Nivel de riesgo de falla	Urgencia de intervención (años)
1.00-1.75		Bajo	>10
1.76-2.50		Moderado	5-10
2.51-3.25		Alto	2-5
3.26-4.0		Muy alto	0-2

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Fase 4: recomendaciones de la evaluación

Esta etapa indica acciones para contrarrestar la corrosión y prolongar la vida útil de la estructura -la armadura del concreto-. Dichas acciones van desde sugerencias de prevención, mantenimiento, reparaciones o rehabilitaciones, de acuerdo con el criterio ingenieril experto.

ANEXO A:

Fundamento teórico

Concreto

Breve historia del concreto

El uso del concreto como material constructivo se remonta a los días del antiguo Egipto, de los griegos y de los romanos. “En 1824, Joseph Aspdin desarrolló en Inglaterra un cemento que al endurecerse se asemejaba a una piedra gris muy dura que se encuentra en la Isla de Portland; de ahí su nombre actual” (Castro, 2001, p. 1). Posteriormente, en 1855, Lambot comenzó con el uso del acero como material de refuerzo al concreto, introduciendo así el concreto armado; lo que dio lugar a que en 1897 Hennebique construyera la primera estructura de concreto reforzado en Gran Bretaña en el Molino de Weaver (Castro, 2001).

Definición de concreto

“La palabra concreto proviene del latín *concretus*, que significa compuesto” (Castro, 2001, p. 2). El ACI define al concreto como la mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregados (fino y grueso) y agua, con o sin aditivos, fibras u otros materiales cementosos (ACI, 2019; 2018). El Gobierno de la Ciudad de México (2001) lo define como “mezcla de cemento Portland o cualquier otro de tipo hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos” (p. 20). El diseño de mezclas de concreto o

proporcionamiento de mezclas es un proceso que consiste de pasos dependientes entre sí: selección de los ingredientes convenientes, determinación de sus cantidades relativas (proporcionamiento) para producir un m^3 que sea económico, con trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad apropiada (Flores, 2020). En algunos países, como España, se le denomina “hormigón” al concreto.

Propiedades del concreto endurecido

Se considera que el concreto es más eficiente soportando cargas a compresión (Mehta y Monteiro, 2014). La resistencia “es una medida de la cantidad de esfuerzo requerido para hacer fallar un material” (p. 7). Las pruebas que se realizan para compresión son realizadas generalmente en muestras curadas bajo condiciones estándar de temperatura y humedad por un periodo de 28 días. La resistencia a la tensión (conocida como tracción en otros países) y a la flexión del concreto es mucho menor que la resistencia a la compresión, donde generalmente son de 10 y 15 % de esta, respectivamente.

La deformación unitaria “es definida como el cambio en la longitud por unidad de longitud” (p. 7), siendo una deformación que se produce “como resultado de una carga aplicada” (p. 6), donde esta carga “se expresa como esfuerzo” (p. 7); fuerza por unidad de área. La deformación elástica corresponde a la unitaria, que es proporcional al esfuerzo aplicado y es reversible al descargar el espécimen. El módulo de elasticidad es la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria reversible, y, en el diseño estructural, es una propiedad muy importante que “representa el esfuerzo máximo permisible antes de que el material sufra deformaciones permanentes” (p. 8). La ductilidad se puede medir por la cantidad de deformación inelástica que puede ocurrir antes de la falla.

La tenacidad se puede definir como una medida de “la energía requerida para que falle el material, producto de fuerza por distancia y es representado por el área bajo la curva de esfuerzo-deformación unitaria” (p. 8). Se diferencia de la resistencia, en que esta es una medida del esfuerzo exigido para romper el material, mientras que la tenacidad es una medida de la energía requerida para que el material falle. “Generalmente, cuando la resistencia de un material aumenta, la ductibilidad y la tenacidad disminuyen” (p. 8). Normalmente, la deformación unitaria en la fractura del concreto es del orden de 0.002, considerablemente menor que la deformación unitaria a la falla de metales estructurales. La durabilidad “es definida como la vida de servicio de un material bajo ciertas condiciones ambientales. En general, los concretos densos o impermeables tienen una durabilidad de largo plazo” (p. 10).

La resistencia a la compresión se define como “la capacidad de carga por unidad de área del concreto hidráulico, medida en ensayos de especímenes elaborados, curados y ensayados en las condiciones estándar especificadas” (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. [ONNCCE], 2014, p. 8), generalmente expresadas en kg/cm² en México o expresadas de acuerdo con el Sistema Internacional en Pascal, que comúnmente cuando se trata de concreto se utiliza el megapascal (MPa). El módulo de ruptura “es el valor obtenido mediante el procedimiento para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensaye a la flexión de una viga” (p. 7).

En la norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014 se define la durabilidad como:

La capacidad del concreto hidráulico para resistir satisfactoriamente durante la vida útil de la estructura las cargas de diseño, acción ambiental, ataque químico o abrasión y de proteger al acero de refuerzo y demás elementos metálicos embebidos de la corrosión o cualquier otro proceso de deterioro, con el objeto de que el concreto mantenga su forma original, condición de servicio y propiedades mecánicas (ONNCCE, 2014, p. 7)

Tipos de concreto

Cuando se habla de concreto, generalmente se hace referencia al hidráulico, el cual es definido en la norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014 como “mezcla de agregados, cementante y agua, a la que además se le puede agregar algunos aditivos y adiciones” (ONNCCE, 2014, p. 6).

Por el estado en que se encuentra el concreto, se pueden diferenciar entre hidráulico en estado fresco e hidráulico en estado endurecido. El primero corresponde a la “etapa inicial del proceso de fraguado del concreto durante la cual presenta una consistencia que permite realizar las operaciones de transporte, colocación, compactación y acabado” (ONNCCE, 2014, p. 6); mientras que el segundo corresponde a “la condición en la que el concreto hidráulico es capaz de resistir las acciones para las cuales fue especificado” (p. 6).

De acuerdo con su forma de elaboración, se clasifica como concreto hidráulico hecho en obra y concreto premezclado (SICT, 2004). El primero “se fabrica en la obra mediante un equipo mecánico ligero denominado revolvedora, dosificando generalmente sus componentes en volumen, o bien con equipos mayores como plantas dosificadoras” (p. 2). Mientras que el segundo “se dosifica o premezcla en una planta, por lo general no ubicada dentro de la obra, y posteriormente se le transporta en camiones mezcladores o de volteo al sitio requerido. La dosificación siempre se hace en masa” (p. 2).

Por otra parte, el prefabricado se define como un elemento de concreto estructural construido en un lugar diferente de su ubicación final en la estructura (ACI, 2019; Gobierno de la Ciudad de México, 2021).

El ligero es aquel “de peso ligero que contiene agregado fino y grueso, y que cumple con lo especificado en ASTM C330. Concreto con agregado liviano que tiene una densidad de equilibrio, tal como la define ASTM C567, entre 1440 y 1840 kg/m³” (Gobierno de la Ciudad de México, 2021, p. 20). En las *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto con Comentarios* se puntualiza al concreto de peso normal como aquel “que contiene agregados que cumplen con lo especificado en NMX-C-111-ONNCCE” (p. 20).

En el ACI (2019) se especifica como el “que contiene agregados finos y gruesos que cumplen con lo especificado en ASTM C33M y que tienen una densidad mayor que 2160 kg/m³” (p. 37). Existen con alta densidad, mayor a 3 000 kg/m³, que generalmente son fabricados con áridos naturales o industriales de naturaleza ferrosa.

El simple o también conocido como en masa (*plain concrete*), es aquel “concreto estructural sin refuerzo o con menos refuerzo que el mínimo especificado para concreto reforzado” (ACI, 2019; Gobierno de la Ciudad de México, 2021, p. 20).

El armado o reforzado es aquel “concreto estructural reforzado con no menos de las cuantías mínimas de refuerzo preesforzado, refuerzo no preesforzado, o ambas” (ACI, 2019, p. 38). Es el resultado de la adherencia del concreto con las armaduras (acero de refuerzo) logrando que sea resistente. Los productos de acero para elaborar armaduras son: varilla corrugada y alambrión.

El estructural o para uso estructural es aquel “concreto hidráulico elaborado, ya sea fuera o en el sitio de utilización dosificado por masa y mezclado por medios mecánicos, con resistencia, rigidez y durabilidad adecuadas para el desempeño satisfactorio de las estructuras ante las acciones externas” (ONNCCE, 2014, p. 6). Dicho en otras palabras: es “utilizado con propósitos estructurales incluyendo concreto simple y reforzado” (ACI, 2019; Gobierno de la Ciudad de México, 2021, p. 20).

El no preesforzado es aquel “reforzado con al menos la mínima cuantía de refuerzo no preesforzado, o para losas en dos direcciones con menos de la cuantía mínima de refuerzo preesforzado” (ACI, 2019, p. 38).

Mientras que el preesforzado/presforzado/pretesado es aquel “al que se le han introducido esfuerzos internos por medio de refuerzo preesforzado con el fin de reducir los esfuerzos potenciales de tracción en el concreto causados por

las cargas” (ACI, 2019, p. 38). El ACI (2019) denomina al “postensado” como el “método de preesforzado en el cual el acero se tensiona después de que el concreto ha endurecido” (p. 45), caso contrario con el método de pretensado, que tensiona el acero de preesforzado antes de su colocación.

El concreto se puede clasificar por su resistencia a la compresión en: de baja resistencia con resistencia a la compresión menor a 20 MPa (204 kg/cm²); de resistencia moderada a la compresión entre 20 a 40 MPa (204 a 408 kg/cm²); y de alta resistencia con más de 40 MPa (408 kg/cm²) de resistencia a la compresión (Mehta y Monteiro, 2014), llegando a emplearse en la actualidad de entre 50 y 60 MPa.

Componentes del concreto armado

Cemento

Es un conglomerante, el más usado es el Portland. El Instituto Americano del Concreto (2018) lo define como “cualquiera de una serie de materiales que son capaces de unir partículas de agregado” (p. 13).

El cemento hidráulico “es el material empleado en la elaboración del concreto hidráulico para uso en la construcción” (ONNCCE, 2014, p. 6), definido por la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 como “material inorgánico finamente pulverizado que, al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales, tiene la propiedad de fraguar y endurecer [...] una vez endurecido, desarrolla su resistencia y conserva su estabilidad” (p. 5). El ACI (2018) señala que el cemento hidráulico es un material aglutinante que fragua y endurece por reacción química con el agua, como el Portland o el de escoria (2018). De acuerdo con el ONNCCE (2004), el nombre genérico y comúnmente aceptado por los usuarios es simplemente “cemento” en lugar de cemento hidráulico.

En México, de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-155-ONNCCE-2014, el cemento hidráulico “debe cumplir con las características y especificaciones descritas en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE” (ONNCCE, 2004, p. 8). Dicha norma “establece las especificaciones y métodos de prueba aplicables a los diversos tipos de cemento hidráulico de fabricación nacional o extranjera que se destinen a los consumidores en México” (p. 4).

El cemento Portland “es un conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece” (SICT, 2002, p. 1). Se fabrica con la molienda del producto resultante de la cocción en hornos rotatorios a 1450 °C de una mezcla denominada Clinker Portland, la cual consiste en caliza, arcilla, sílice y óxidos de hierro (Monzón, 2012).

Después de ser sometida a cocción, dicha mezcla de arcilla y materiales calcáreos (Clinker Portland) se enfría y se somete a un proceso industrial donde se

pulveriza o muele a un grado de finura determinado. Posteriormente, se le añade sulfato de calcio para regular el tiempo de fraguado (SICT, 2002). A los cementos con una proporción de Clinker superior al 95 % se les denomina cemento Portland (Monzón, 2012). Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda, se le pueden incorporar otros materiales como puzolanas, escoria granulada de alto horno, humo de sílice y caliza (SICT, 2002).

Las puzolanas:

son materiales naturales, artificiales o subproductos industriales síliceos o silicoaluminosos, o una combinación de ambos, los cuales no endurecen por sí mismos, pero finamente molidos, reaccionan en presencia de agua a la temperatura ambiente con el hidróxido de calcio y forman compuestos con propiedades cementantes (SICT, 2002, p. 1).

La escoria granulada de alto horno es “el residuo no metálico que se obtiene en el alto horno por la fusión de minerales de hierro, enfriado bruscamente con agua o vapor y aire, compuesto principalmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos” (SICT, 2002, p. 2). El humo de sílice “es una puzolana muy fina constituida esencialmente por sílice amorfa, obtenida como un subproducto de la fabricación de silicio o aleaciones con arco eléctrico de ferro-silicio” (p. 2).

La caliza es un material “de naturaleza inorgánica y origen mineral carbonatado, compuesto principalmente por carbonatos de calcio y que se utiliza para mejorar las propiedades y el comportamiento del cemento” (ONNCCE, 2004, p. 2). El sulfato de calcio o comúnmente conocido como yeso “es el producto natural o artificial que se utiliza para regular el tiempo de fraguado y se representa en diferentes estados: como anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$)” (p. 6).

Clasificación del cemento

La norma NMX-C-414 clasifica al cemento (Tabla 25) por el tipo y la clase resistente. En caso de que tenga alguna de las características especiales, su designación se completa de acuerdo con la nomenclatura correspondiente, si se presentan dos o más, la designación se hace siguiendo el orden descendente de la 25 y separándose con una diagonal. Por ejemplo, la designación para un cemento Portland puzolánico de clase 30, de baja reactividad álcali-agregado y bajo calor de hidratación, sería:

Cemento CPP 30 BRA/BCH (ONNCCE, 2004).

Tabla 25. Clasificación de los cementos

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistente a los Sulfatos
CPP	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja Reactividad Álcali agregado
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R	BCH Bajo Calor de Hidratación
CPC	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	-
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

Fuente: ONNCCE (2004).

La diferencia entre el CPEG y el CEG radica en el porcentaje en masa de sus componentes. El CPEG contiene entre un 40 a 94 % de Clinker Portland y yeso, y entre 6 y 60 % de escoria granulada de alto horno, mientras que el CEG contiene entre 20 y 39 % de Clinker Portland y yeso, y entre 61 y 80 % de escoria granulada de alto horno, como se muestra en la Tabla 26.

Tabla 26. Componentes de los cementos

Tipo	Denominación	Componentes (% masa)					Minotarios (1)
		Principales				Caliza	
		Clinker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (2)	Humo de sílice		
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP	Cemento Portland Puzolánico	50-94	-	6-50	-	-	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	6-60	-	-	-	0-5

Tipo	Denominación	Componentes (% masa)					
		Principales					Minotarios (1)
		Clinker Portland + yeso	Escoria granulada de alto horno	Materiales puzolánicos (2)	Humo de sílice	Caliza	
CPC	Cemento Portland Compuesto (3)	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	20-39	62-80	-	-	-	0-5

Fuente: ONNCCE (2004).

(1) Los componentes minoritarios deben ser uno o más de los componentes principales representados en la tabla.

(2) Los materiales puzolánicos incluyen: puzolanas naturales, artificiales o cenizas volantes.

(3) El Cemento Portland Compuesto debe llevar como mínimo dos componentes principales, excepto cuando se adicione caliza, ya que ésta puede ser en forma individual o en conjunto con clinker + yeso.

Tipos de cemento

La norma NMX-C-414 (ONNCCE, 2004) clasifica los cementos de acuerdo con sus componentes en: Cemento Portland Ordinario (CPO), Cemento Portland Puzolánico (CPP), Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno (CPEG), Cemento Portland Compuesto (CPC), Cemento Portland con Humo de Sílice (CPS) y Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno (CEG). El Cemento Portland Ordinario (CPO) “es el cemento producido a base de la molienda de Clinker Portland y usualmente sulfato de calcio” (p. 5). El Clinker Portland es el producto artificial obtenido por la calcinación y sinterización de los crudos a la temperatura, tiempo y enfriamiento adecuado, con el fin de que tengan la composición química y la constitución mineralógica requerida. “Los crudos de Clinker Portland son mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen cal (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios, los cuales se clinkerizan” (p. 5). El Cemento Portland Puzolánico (CPP) “es el que resulta de la integración del Clinker Portland, materiales puzolánicos y sulfato de calcio” (p. 5). El Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno (CPEG) “es el que resulta de la integración de Clinker Portland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio” (p. 5). El Cemento Portland Compuesto (CPC) “es el cemento

que resulta de la integración de Clinker Portland, sulfato de calcio y mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, esta puede ser componente único” (p. 5). El Cemento Portland con Humo de Sílice (CPS) “es el que resulta de la integración del Clinker Portland, humo de sílice y sulfato de calcio” (p. 5). El Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno (CEG) “es el que resulta de la integración de Clinker Portland, sulfato de calcio y principalmente escoria granulada de alto horno” (p. 5).

Clases resistentes de cementos

La norma NMX-C-414 clasifica los cementos por su resistencia a la compresión en clases: 20, 30, 30 R, 40 y 40 R. Las clases de cemento con una resistencia a 3 días se indican con la letra “R” que corresponde a resistencia rápida (ONNCCE, 2004). La Tabla 27 relaciona las clases de cemento con su resistencia a la compresión de acuerdo con la norma NMX-C-414 (ONNCCE, 2004), donde también es expuesto en la norma N-CMT-2-02-001/02 (SICT, 2002).

Tabla 27. Clases de cementos Portland

Clase resistente	Resistencia a compresión, MPa (kg/cm ²)		
	A 3 días*	A 28 días**	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20 (204)	40 (408)
30	-	30 (306)	50 (510)
30 R	20 (204)	30 (306)	50 (510)
40	-	40 (408)	-
40 R	30 (306)	40 (408)	-

* Corresponde a la resistencia inicial del cemento.

** Corresponde a la resistencia normal del cemento.

Fuente: SICT (2002).

Clasificación por características especiales

La norma NMX-C-414 clasifica los cementos por sus características especiales, en Resistente a los Sulfatos (RS), Baja Reactividad Alkali agregado (BRA), Bajo Calor de Hidratación (BCH) y Blanco (B). Las características especiales de estos cementos se muestran en la Tabla 28 de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-414 (ONNCCE, 2004).

Tabla 28. Especificaciones de los cementos con características especiales

Nomenclatura	Características especiales	Expansión	Expansión por		Calor de		Blancura (mínimo %)
		por ataque	la reacción		hidratación		
		de sulfatos	álcali agregado		(máximo)		
		(máximo %)	(máximo %)	(máximo %)	kJ/kg	kcal/kg	
		1 año	14 días	56 días	7 días	28 días	
RS	Resistencia a los Sulfatos	0.100	-	-	-	-	-
BRA	Baja Reactividad Álcali agregado	-	0.020	0.060	-	-	-
BCH	Bajo Calor de Hidratación	-	-	-	250 (60)	290 (70)	-
B	Blanco	-	-	-	-	-	70

Fuente: ONNCCE (2004).

Los Cementos Resistentes a los Sulfatos (RS) “son aquellos cementos que por su comportamiento cumplen con el requisito de expansión limitada de acuerdo con el método de prueba establecido” (ONNCCE, 2004, p. 4). Los de Baja Reactividad Álcali agregado (BRA) “son aquellos cementos que cumplan con el requisito de expansión limitada a la reacción álcali agregado, de acuerdo con el método de prueba establecido” (p. 4). Los de Bajo Calor de Hidratación (BCH) son aquellos cementos que desarrollan un calor de hidratación igual o inferior al especificado en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004. Los Cementos Blancos (B) son todos aquellos cuyo índice de blancura cumpla con el valor especificado en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 (ONNCCE, 2004).

Agregados

La norma NMX-C-155 (ONNCCE, 2014) define a los agregados como “materiales naturales, procesados o artificiales, que se mezclan con los cementos y agua para hacer morteros o concretos” (p. 5). Ejemplos de estos materiales granulares son: arena, grava, piedra triturada, material hidráulico triturado, concreto de cemento o escoria de alto horno de hierro (ACI, 2018). Estos materiales también son conocidos como áridos. Según Monzón (2012), los áridos son materiales granulares inertes de procedencia natural (procedentes de fuentes naturales sin más transformación que las mecánicas de cribado, lavado, etcétera) o artificial (fabricados con materias primas que sufren una transformación mecánica, térmica o química) que contribuyen a la estabilidad de volumen, aportan resistencia y durabilidad. Por

agregado se considera a “todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente, no perturben ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento Portland” (Flores, 2020, p. 9).

Estos se pueden clasificar en agregado fino y grueso (SICT, 2019). Donde el árido grueso más común es grava y el árido fino más común es arena (Monzón, 2012; Flores, 2020).

El ACI (2018) define como agregado grueso como “retenido predominantemente en el tamiz de 4.75 mm (n.º 4) o la parte retenida en el tamiz de 4.75 mm (n.º 4)” (p. 14), mientras que al agregado fino lo define como “el que pasa el tamiz de 9.5 mm (3/8 pulg.), casi en su totalidad pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4), y predominantemente retenido en el tamiz de 75 micrómetros (No. 200)” (p. 28) o bien “esa porción de agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y predominantemente retenido en el tamiz de 75 micrómetros (No. 200)” (p. 28).

Aditivos

Tienen el propósito de modificar “una o más de las propiedades del concreto en sus etapas de estado fresco, fraguado, endureciéndose y endurecido” (ONNCCE, 2014, p. 5). Se definen como “materiales diferentes del agua, de los agregados y del cemento, que se pueden emplear como componenete del concreto y se agregan antes o durante el mezclado [...] modificando una o más de las propiedades del concreto” (p. 5).

Adiciones

Estos “son materiales inorgánicos o con hidraulicidad latente que finamente divididos pueden ser añadidos al concreto con el propósito de mejorar alguna propiedad o conferirle características especiales” (Monzón, 2012, p. 12).

Pueden ser “materiales que no tienen propiedades cementantes, como las fibras que se utilizan como refuerzo o los pigmentos” (ONNCCE, 2014, p. 5) o “materiales que desarrollan características cementantes, como la puzolana natural, escorias, humo de sílice, ceniza volante o ceniza de cáscara de arroz, que se pueden emplear como constituyentes del cemento o concreto” (p. 5).

Agua

Es un componente fundamental del concreto (Monzón, 2012; Flores, 2020); sus funciones son: hidratar los componentes activos del cemento, actuar como lubricante posibilitando que la masa sea trabajable y crear espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento. El agua de amasado

participa en las reacciones de hidratación del cemento y confiere al concreto la trabajabilidad necesaria para su correcta puesta en obra, mientras que el agua de curado se añade para compensar las pérdidas por evaporación y permite que se desarrollen nuevos productos de hidratación (Monzón, 2012).

Acero de refuerzo

“El acero conserva las características metálicas del hierro en estado puro, pero la adición de carbono y de otros elementos tanto metálicos como no metálicos mejora sus propiedades fisicoquímicas” (Monzón, 2012, p. 14).

El acero es “una combinación de hierro y pequeñas cantidades de carbono, generalmente menos del 1 %” (McCormac y Csernak, 2012, p. 5), además de otros pequeños porcentajes de algunos distintos elementos. Como material estructural, presenta grandes ventajas como: alta resistencia, uniformidad, elasticidad, durabilidad, ductilidad, tenacidad y adaptabilidad. Une diversos miembros por medio de conexión simple, como la soldadura y los pernos; tiene la posibilidad de prefabricar los miembros, es rápido de montar, se lamina en una gran cantidad de tamaños y formas, es posible utilizarlo nuevamente después de desmontar una estructura y existe la posibilidad de venderlo como chatarra. En general, el acero es el material reciclable por excelencia. Sin embargo, tiene desventajas como: ser susceptible a la corrosión al estar expuesto al aire y al agua; sus resistencias se reducen considerablemente en temperaturas que se alcanzan en incendios, cuando los otros materiales de un edificio se queman; son susceptibles al pandeo y a la fatiga; asimismo, bajo ciertas condiciones, el acero puede perder su ductilidad y la fractura frágil puede ocurrir en lugares de concentración de esfuerzos (McCormac y Csernak, 2012).

De acuerdo con la SICT (2007), el acero de refuerzo para concreto hidráulico “es el conjunto de varillas de acero que se utilizan para tomar los esfuerzos internos de tensión que se generan por la aplicación de cargas, contracción por fraguado y cambios de temperatura en una estructura de concreto hidráulico; pueden ser varillas lisas o corrugadas” (p. 1). En la norma N-CM-T-2-03-001/07 se clasifica el acero de refuerzo de acuerdo con el esfuerzo de fluencia que puede resistir, mostrado en la Tabla 29.

Tabla 29. Clasificación del acero y sus características

Grado	Esfuerzo de fluencia MPa (kg/cm ²)	Límite de fluencia mínimo MPa (kg/cm ²)	Límite de fluencia máximo MPa (kg/cm ²)	Resistencia a la tensión, mínima MPa (kg/cm ²)
30	294 (3 000)	294 (3 000)	-	490 (5 000)
42	412 (4 200)	412 (4 200)	-	618 (6 300)
52	510 (5 200)	510 (5 200)	-	706 (7 200)
42 baja aleación	412 (4 200)	412 (4 200)	540 (5 500)	550 (5 600)

Fuente: SICT (2007).

El recubrimiento es “la protección que le da un espesor de concreto al acero de refuerzo. Es la distancia medida desde la supecie del concreto a la parte más cercana del acero de refuerzo (incluyendo a los zunchos, anillos y estribos” (ONNCCE, 2014, p. 8). “Un adecuado recubrimiento posibilita la protección de las armaduras contra los efectos de la corrosión” (Monzón, 2012, p. 15).

Corrosión

Concepto de corrosión

Es un problema a nivel mundial con grandes repercusiones económicas. En 2013, se estimó que el costo global de la corrosión equivale a 3.4 % del producto interno bruto (PIB) mundial, un equivalente a 2.5 billones de dólares (Koch et al., 2016).

De acuerdo con Gómez (2004), las pérdidas económicas derivadas de la corrosión pueden dividirse entre directas -costos de reposición, averías imprevistas y daños accidentales- e indirectas -interrupciones en la producción, pérdidas de producto, pérdidas de rendimiento, contaminación de los productos, sobredimensionado y daños accidentales-. Ahora bien, “se denomina corrosión al ataque destructivo que sufre un material generalmente metálico, por reacción química o eletroquímica con su medio ambiente (atmósfera, suelo, agua, etcétera)” (p. 13). Por el contrario, cuando se trata del deterioro por ataques químicos directos de otros materiales no metálicos, como pueden ser cerámicos y polímeros, se denomina degradación. “El efecto de la corrosión es una alteración de las propiedades de los materiales afectados que puede venir acompañada de una pérdida de material” (p. 13). “En los materiales metálicos el proceso de corrosión es normalmente electroquímico, es decir, una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra” (p. 13).

Procesos corrosivos

Los procesos corrosivos se pueden clasificar en seca y húmeda (Gómez, 2004). La corrosión seca se da “cuando el material se encuentra sometido a la acción de gases, principalmente a temperaturas elevadas, por lo que no se tiene un electrolito condensado. Este tipo de corrosión es la que se produce en calderas, sobrecalentadores, recalentadores, reactores, etcétera. ” (p. 27). Los factores que intervienen en este proceso que se realiza en la interfase metal-medio corrosivo, son: temperatura, presión o concentración del agente corrosivo, acción catalítica y difusión. Mientras que la corrosión húmeda se da “cuando el material se encuentra en medios acuosos. Se produce normalmente a temperatura ambiente o no muy elevada. Es la más extendida, por cuanto afecta a un sinnfin de elementos en los que el material usado es el acero” (p. 27). La Figura 15 muestra los modelos simplificados de corrosión seca y húmeda. Para el caso de la corrosión seca, “en primera instancia, la capa externa del material se recubre del producto de la oxidación. Entonces, el proceso tiene lugar por difusión, lo que hace que en general, sea difícil y lento” (p. 25). Por otra parte, para que se produzca la corrosión húmeda, son necesarios tres requisitos: dos zonas con distinto potencial electroódico, una que constituye el ánodo de la reacción que al ceder electrones sufrirá la corrosión y otra que constituye el cátodo que absorberá los electrones cedidos por el ánodo; un electrolito, conductor eléctrico líquido, que contiene los elementos característicos del medio corrosivo; y una conexión eléctricamente conductora entre el ánodo y el cátodo (Gómez, 2004).

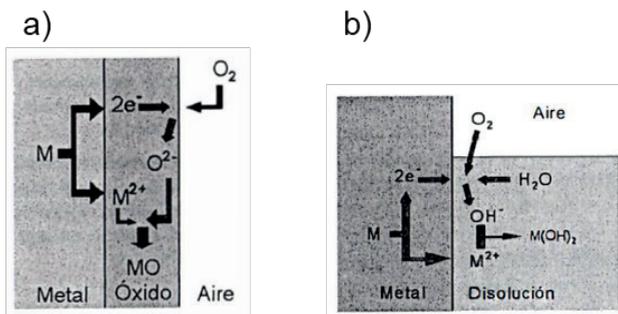


Figura 15. Modelo simplificado de corrosión seca, a); y modelo simplificado de corrosión húmeda, b).

Fuente: Gómez (2004).

Tipos y formas de corrosión

“De acuerdo con el tipo de ambiente donde ocurre la corrosión de los metales, se pueden distinguir dos formas: la química y la electroquímica” (Castro, 2001, p. 11).

De acuerdo con el aspecto externo de la superficie afectada, y a las alteraciones que causa la corrosión en las propiedades físicas del material, se clasifica en: por ataque uniforme, por ataque local o picadura, intergranular, selectiva, por grietas, bajo tensión, por fatiga, erosiva, por cavitación y por fricción (Gómez de León, 2004). “Algunas formas de corrosión pueden producir grietas o la pérdida de ciertas propiedades físicas, tales como resistencia o ductilidad” (p. 55). La corrosión por ataque uniforme “se caracteriza por una reacción química o electroquímica que actúa uniformemente sobre toda la superficie del material, por lo que puede considerarse que el espesor de material afectado es uniforme” (p. 56). Casos típicos: formación de herrumbre en el hierro y empañado de la plata o del estaño. La corrosión por ataque local también se le conoce como picadura o *pitting*, ya que puede producirse un ataque corrosivo profundo de la zona que actúa anódicamente, es de tamaño muy reducido. Este tipo de corrosión “se produce a distinta velocidad en diferentes zonas del material” (p. 57). La corrosión intergranular es “una forma de ataque corrosivo localizado en los bordes de grano de las aleaciones. Ejemplos frecuentes de aleaciones afectadas por la corrosión intergranular son algunos aceros inoxidable 18-8 que han sufrido un tratamiento térmico inadecuado” (p. 58). En la corrosión selectiva “el ataque ocurre preferentemente sobre uno o más componentes de una aleación” (p. 59).

Según Gómez (2004), “la superficie atacada se hace porosa aunque puede seguir manteniendo el mismo aspecto, si se exceptúa un ligero empañado, y su forma original; por lo que no aparenta la pérdida de resistencia y de ductibilidad producida” (p. 59). Un caso muy común de corrosión selectiva es el que “se produce en el ataque que experimenta el zinc cuando está aleado con cobre (latones)” (p. 59). La corrosión por grietas “se trata de una corrosión electroquímica localizada en [...] cualquier zona en la que pueda mantenerse alguna solución estancada” (p. 59). “El proceso global es similar al de las picaduras. Afecta a un sinnúmero de piezas de unión y elementos ensamblados” (p. 59). La corrosión bajo tensión, en inglés *stress corrosion cracking* (SCC), “se debe al efecto combinado de tensiones internas en el material y ataques localizados por agrietamiento” (p. 60). Algunos ejemplos en determinados ambientes que presentan esta forma son: aleación de aluminio en disoluciones de NaCl, aleación de cobre en disoluciones amoniacales, aceros ordinarios en agua de mar y aceros inoxidable en agua de mar.

La corrosión por fatiga llega a producir fallos por la intervención de este tipo de procesos, debido a que en un medio corrosivo el metal acaba fallando después de

un cierto número de ciclos en los que es sometido a tensiones alternantes aún para valores inferiores a la tensión crítica. El mecanismo principal varía dependiendo del material y del medio corrosivo; comienza por la aparición de grietas. La corrosión por erosión ocurre cuando se presenta un incremento de la velocidad de este proceso debido a un movimiento relativo, suficientemente rápido, entre un fluido y la superficie del material. El fluido erosivo favorece el ataque corrosivo. Aunque la cavitación no es directamente el fenómeno responsable, sí favorece y acelera el ataque, lo que provoca lo que se denomina corrosión por cavitación. La corrosión por fricción también llamada corrosión por roce, por frotamiento o por desgaste, genera picaduras, hoyos o surcos en las zonas de contacto, en donde ingresan residuos de óxido generados por el roce de las superficies que erosiona la capa de óxido formada. “Las partículas de óxido [...] actúan como abrasivo, lo que, además de incrementar el efecto de erosión-corrosión, provoca el desajuste de las piezas en contacto” (p. 62).

Corrosión en estructuras de concreto reforzado

La corrosión en el acero del concreto reforzado es la principal causa de degradación que afecta la capacidad de carga de las estructuras (Balestra et al., 2019), principalmente si se encuentran en ambientes agresivos como el marino (Ortega y Robles, 2016).

Corrosión en la armadura de concreto

El proceso de corrosión en el acero de refuerzo del concreto reforzado es similar a la de un metal en soluciones electrolíticas, como se observa en la Figura 16.

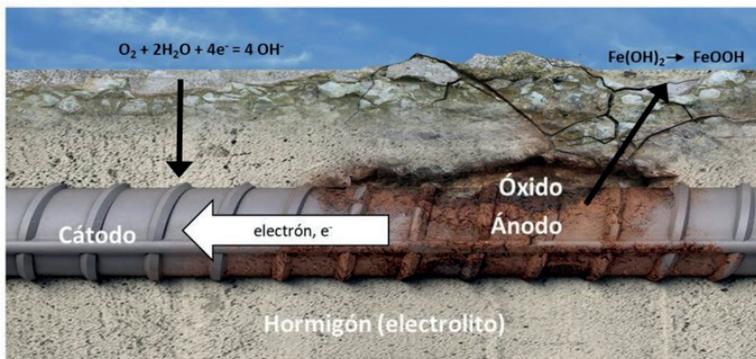


Figura 16. Modelo esquemático de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto

Fuente: Donadio et al. (2023).

De acuerdo con Donadio et al. (2023), se requieren tres condiciones simultáneas para que ocurra la corrosión del acero: pérdida de pasividad (debido a la carbonatación, o a la presencia de cloruros), humedad en los poros del concreto (electrolito) y presencia de oxígeno cerca de las armaduras.

Las causas principales de la pérdida de capacidad protectora del concreto al acero de refuerzo contra la corrosión son: presencia de agrietamientos, la carbonatación del recubrimiento y la presencia de iones cloruro (Rodríguez et al., 1989; Castro, 2001). La corrosión se puede producir sin agrietamientos; sin embargo, su presencia facilita el ingreso de agentes que la aceleran (Castro, 2001). La carbonatación induce corrosión generalizada en el acero de refuerzo, mientras que la presencia de cloruros produce corrosión localizada (Rodríguez et al., 1989). Puede existir corrosión bajo tensión si los elementos están pretensados (Figura 17).

La eficacia del concreto como medio protector disminuye con la reducción de su alcalinidad (reducción del pH) debido a las reacciones que se generan entre el bióxido de carbono del aire que está en contacto con el calcio y los hidróxidos alcalinos que hay en el concreto (Rodríguez et al., 1989; Castro, 2001). “La carbonatación no se desarrollará si el concreto está saturado en agua o si está totalmente seco. Sin embargo, su avance será máximo cuando se produzcan ciclos de humedad-sequedad, que confieren al concreto un grado de saturación moderado” (Rodríguez et al., 1989, p. 64). La generación de fisuras por carbonatación se da a lo largo del armado y paralela a este, con una velocidad de corrosión generalmente muy baja (alrededor de 20 años de vida para recubrimientos de 10-25 mm), por lo que el saltado del recubrimiento aparece en fases posteriores.

Por otro lado, los cloruros pueden ingresar al concreto desde el agua de amasado o penetrar desde el exterior por un medioambiente marino o por uso de sales de deshielo, lo que genera que el concreto deje de proteger el acero de refuerzo y se inicie la despasivación en el acero (Rodríguez et al., 1989; Castro, 2001). Este tipo de corrosión puede presentar fisuración del recubrimiento; sin embargo, depende de su extensión. “En las zonas totalmente sumergidas, el acero de refuerzo se puede corroer sin ninguna señal externa de daño en el recubrimiento” (Rodríguez et al., 1989, p. 69).



Figura 17. Tipología de la corrosión del acero de refuerzo en el concreto reforzado
 Fuente: Rodríguez et al. (1989).

La corrosión de las armaduras o el acero de refuerzo es la principal causa de deterioro de las estructuras de concreto armado, afectando a la capacidad de carga de la estructura (Balestra et al., 2019; Rodrigues et al., 2021) y disminuyendo su vida útil, especialmente si se encuentran en ambientes agresivos como el marino (Zhu y Liu, 2023).

Daños estructurales debido a la corrosión

Según Rodríguez et al. (1989), el primer efecto directo de la corrosión en un elemento de acero es la pérdida de sección. Se puede generar fisuración del concreto armado debido a las tensiones generadas de los productos de la corrosión que aumentan el volumen del acero de refuerzo embebido en el concreto, lo que puede generar estallidos conforme avanza (Figura 18) .

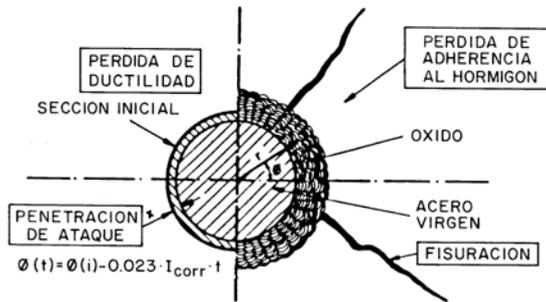


Figura 18. Consecuencias de la corrosión del acero de refuerzo en el comportamiento estructural
 Fuente: Rodríguez et al. (1989).

Sistemas para la gestión de corrosión

Existen diferentes tipos de sistemas para la gestión de la corrosión en los aceros de refuerzo, algunos de los más usados son (Donadio et al., 2023): morteros de reparación para el concreto; inhibidores de corrosión activos y pasivos; recubrimientos anticarbonatación; protección catódica contra la corrosión inducida con corriente; ánodos galvánicos (empotrados, discretos y aplicados en superficie).

La elección de la técnica de mitigación está en función de las necesidades de la estructura, su exposición, los niveles de corrosión existentes, la extensión de la vida útil adicional necesaria y del presupuesto (Donadio et al., 2023). Donadio et al. (2023) señalan que debe existir “una estrecha colaboración con todos los participantes en el proyecto de renovación para garantizar la selección de la técnica y los sistemas de mitigación más adecuados, así como su instalación y supervisión en caso necesario” (p. 252).

Según Donadio et al. (2023) para proteger las estructuras contra la corrosión inducida por la carbonatación, los sistemas de protección activos a base de inhibidores, utilizados solos o combinados con un revestimiento protector que permita respirar al sustrato, pero que impida la penetración de agua líquida son sistemas sencillos de instalar, eficaces y con un coste razonable en relación con el aumento de la durabilidad que proporcionan. Ahora bien, para proteger las estructuras contra la corrosión inducida por cloruros, si no está muy avanzada y el sustrato tiene la posibilidad de secarse, el uso de inhibidores pasivos de la corrosión es una solución eficaz y duradera. Para evitar purgar grandes cantidades de concreto sano pero contaminado y prevenir los efectos indeseables del efecto halo, el uso de ánodos galvánicos colocados en el concreto fuera de la zona a reparar es una posible solución. Asimismo, para la prevención y el control de la corrosión en concreto sano pero contaminado (especialmente contaminado con cloruros), la protección catódica es la solución más eficaz. Por último, un sistema híbrido que combina corriente inducida y galvánica equilibra la necesidad de supervisión permanente de los sistemas de protección por corriente inducida y la sencillez de los sistemas galvánicos.

ANEXO B:

Fichas técnicas

Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)

Ficha técnica de índice		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión	IVEC	1.00

Descripción	
Definición	Índice que evalúa el nivel de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado a través de un método no destructivo por medio de índices e indicadores.
Criterios	Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos. Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión. Vulnerabilidad estructural ante corrosión.
Índice precedente	Índice de Corrosión (ICO). Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM). Índice de Daño en el Concreto Reforzado (IDC). Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).
Índice dependiente	No aplica.

Descripción	
Indicadores componentes	Clima (VA1). Exposición al deterioro (VA2). Exposición al cambio climático (VA3). Fisuración en el recubrimiento (DC1). Depósitos en la superficie (DC2). Defectos de construcción (DC3). Resistividad eléctrica del concreto (DC4). Pérdida de sección (DC5). Intensidad o velocidad de corrosión (DC6). Recubrimiento (VE1). Protección del acero ante corrosión (VE2). Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3). Armado (VE4). Importancia estructural del elemento (VE5). Importancia de la estructura (VE6).
Fórmula	$IVEC = 0.40 \times IVE + 0.60 \times ICO$ <p>Donde,</p> <p>IVEC: Índice de Vulnerabilidad ante Corrosión del Concreto Reforzado.</p> <p>IVE: Índice de Vulnerabilidad Estructural.</p> <p>ICO: Índice de Corrosión.</p>

Escala de valoración

Tabla 30. Intervención segunda urgencia (años)

IVEC	Nivel	Semáforo	Descripción	Riesgo de falla	Urgencia de intervención (años)
1.00 - 1.75	1		Vulnerabilidad baja	Bajo	>10
1.76 - 2.50	2		Vulnerabilidad moderada	Moderado	5-10
2.51 - 3.25	3		Vulnerabilidad alta	Alto	2-5
3.26 - 4.00	4		Vulnerabilidad muy alta	Muy alto	0-2

IVEC: Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión.

Si el valor del índice se encuentra entre 0.0 y 1.0, significa que no se consideraron algunos indicadores y que los cálculos no son certeros, con una vulnerabilidad baja. Es conveniente considerar valores críticos o estimar con criterio cuando no se cuente con información.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Índice de Corrosión (ICO)

Ficha técnica de índice

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Denominación	Abreviatura	Peso
Índice de Corrosión	ICO	0.60

Descripción

Definición Índice que evalúa el nivel de corrosión de la estructura de concreto reforzado con base en la vulnerabilidad a la exposición ante agentes corrosivos del ambiente en que se encuentra la estructura y los daños al concreto reforzado, ya sea daños por corrosión o daños en la estructura que permitan el ingreso de agentes corrosivos.

Criterios Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos.
Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.

Índice precedente: Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM).

Índice dependiente: Índice de Daño en el Concreto Reforzado (IDC).

Índice dependiente: Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC).

Indicadores

componentes Clima (VA1).
Exposición al deterioro (VA2).
Exposición al cambio climático (VA3).
Fisuración en el recubrimiento (DC1).
Depósitos en la superficie (DC2).
Defectos de construcción (DC3).
Resistividad eléctrica del concreto (DC4).
Pérdida de sección (DC5).
Intensidad o velocidad de corrosión (DC6).

Fórmula

$$ICO = 0.20 \times IVAM + 0.40 \times IDC$$

Donde

ICO: Índice de Corrosión.

IVAM: Índice de Vulnerabilidad al Ambiente.

IDC: Índice de Daños en el Concreto Reforzado.

Escala de valoración

Tabla 31. Nivel de índice de corrosión

ICO	Nivel	Semáforo	Descripción
0.60 – 1.05	1		Corrosión baja
1.06 – 1.50	2		Corrosión moderada
1.51 – 1.95	3		Corrosión alta
1.96 – 2.40	4		Corrosión muy alta

ICO: Índice de Corrosión.

Si el valor del índice se encuentra entre 0.0 y 0.6, significa que no se consideraron algunos indicadores y que los cálculos no son certeros, con una vulnerabilidad baja. Es conveniente considerar valores críticos o estimar con criterio cuando no se cuente con información.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)

Ficha técnica de índice

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Denominación	Abreviatura	Peso
Índice de Vulnerabilidad al Ambiente	IVAM	0.20

Descripción

Definición Índice que evalúa el nivel de exposición de la estructura de concreto reforzado a agentes corrosivos en el ambiente.

Criterios Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos.

Índice precedente No aplica.

Índice dependiente Índice de Corrosión (ICO).

Indicadores componentes Clima (VA1).
Exposición al deterioro (VA2).
Exposición al cambio climático (VA3).

Fórmula

$$IVAM = 0.05 \times VA1 + 0.10 \times VA2 + 0.05 \times VA3$$

Donde,

VA1: Clima.

VA2: Exposición al deterioro.

VA3: Exposición al cambio climático.

Escala de valoración

Tabla 32. Nivel de Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)

IVAM	Nivel	Semáforo	Descripción
0.20 - 0.35	1		Vulnerabilidad al ambiente baja
0.36 - 0.50	2		Vulnerabilidad al ambiente moderada
0.51 - 0.65	3		Vulnerabilidad al ambiente alta
0.66 - 0.80	4		Vulnerabilidad al ambiente muy alta

IVAM: Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (ante agentes corrosivos).

Si el valor del índice se encuentra entre 0.0 y 0.25, significa que no se consideraron algunos indicadores y que los cálculos no son certeros, con una vulnerabilidad baja. Es conveniente considerar valores críticos o estimar con criterio cuando no se cuente con información.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Clima (VA1)

Ficha técnica de indicador

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Denominación	Abreviatura	Peso
Clima	VA1	0.05

Descripción

Definición El clima es uno de los parámetros considerados para estimar la corrosividad atmosférica, definida como la “habilidad de la atmósfera para causar corrosión en un sistema de corrosión determinado” (ISO, 2012, p. 2).

Criterio Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos.

Índice dependiente Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM).

Obtención

Con la Tabla 33 se obtiene el indicador VA1 de acuerdo con el clima en México.

Tabla 33. Relación de climas con indicador

Clasificación INEGI (2021)	Clima		VA1
	Zonificación SCT (2001)		
Semiseco, muy seco	Semiseco BS1, muy seco BW		1
Seco, templado	Seco BS		2

Clima		VA1
Clasificación INEGI (2021)	Zonificación SCT (2001)	
Cálido subhúmedo	Semicálido AC	3
Cálido húmedo	Cálido A	4



Figura 19. Climas en México
Fuente: INEGI (2021).

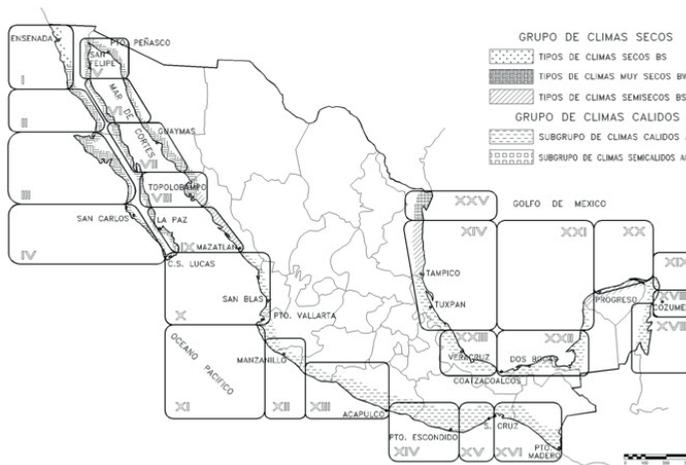


Figura 20. Zonificación de acuerdo con condicionantes físicas
Fuente: Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes, SICT (2001).

Exposición al deterioro (VA2)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Exposición al deterioro	VA2	0.10

Descripción	
Definición	Las clases de exposición a acciones de deterioro a las que pueden estar sometidas las estructuras de concreto son consideradas para definir las especificaciones y requisitos de durabilidad (ONNCCE, 2014; NTC; 2023).
Criterio	Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos.
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM).

Obtención

La Tabla 34 muestra la clasificación de acuerdo con la norma NMX-C-155-ONNCCE-2014 y el nivel de exposición de cada condición de exposición con base en las consideraciones de Rodríguez et al. (1989), el Código Estructural (Gobierno de España, 2021), la norma europea EN206 (Comité Europeo para Estandarización (CEN), 2013) y el Comité Euro-Internacional del Concreto (CEB, 1989).

Tabla 34. Clasificación de exposición a acciones de deterioro del concreto según NMX-C-155-ONNCCE-2014

Clasificación	Condiciones de exposición	VA2
1	Ambiente seco: Interior de edificaciones habitables. Componentes de interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento, ni a suelos o agua. Regiones con humedad relativa mayor al 60 % por un lapso no mayor a tres meses al año.	1
2a	Ambiente húmedo sin congelamiento: Interior de las edificaciones con humedad relativa mayor al 60 % por más de tres meses al año. Elementos exteriores expuestos al viento, pero no al congelamiento. Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua sin posibilidad de congelamiento.	2

Clasificación	Condiciones de exposición	VA2
2b	Ambiente húmedo con congelamiento. Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento. Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua con posibilidad de congelamiento.	3
3	Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes. Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento o exposición a agentes descongelantes. Elementos en suelos no reactivos o no agresivos o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes.	4
4a	Ambiente marino totalmente sumergido. Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire.	1
4b	Ambiente marino grado moderado. Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado moderado, colocadas entre 3 km y 300 m de la línea de costa.	2
4c	Ambiente marino grado severo. Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua. Estructuras con influencia del aire marino en grado severo, colocadas en la línea de costa y 300 metros.	3
4d	Ambiente marino zona de salpicadura. Área rica en sales en contacto con agua. Estructuras en contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado.	4
5a	Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.	2
5b	Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.	3
5c	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos). En contacto con agua. En contacto con suelo.	4
5d	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, líquidos o sólidos).	4
6a	Acciones de erosión o cavitación: Grado ligero. Vialidad con escasa circulación. Vehículos ligeros y tráfico peatonal. Sin riesgo de congelación.	1
6b	Acciones de erosión o cavitación: Grado Mediano. Carreteras y caminos de red secundaria. Pisos industriales con circulación de montacargas con ruedas de hule con menos de 12 t de carga. Superficies con maniobras de carga ligeras en interiores.	2

Clasificación	Condiciones de exposición	VA2
6c	Acciones de erosión o cavitación: Grado Alto. Carreteras con carga intensa. Montacargas provistos de ruedas de hule o metálicas con cargas mayores a 12 t. Flujo hidráulico menor a 12 m/s.	3
6d	Acciones de erosión o cavitación: Grado Severo. Carreteras con carga muy intensa. Montacargas provistos de ruedas de hule, metálicas y tipo oruga. Patios de maniobras con tráfico alto y arrastre de objetos pesados. Flujo hidráulico mayor a 12 m/s con riesgo de cavitación.	4

Nota: en todos los casos regirá la condición o combinación de exposición más agresiva.

Fuente: adaptado de ONNCCE (2014).

La Tabla 35 muestra la clasificación de exposición para superficie de un miembro reforzado o presforzado de concreto, que incluye metales que dependen del concreto para su protección contra los efectos del medio ambiente, de acuerdo con las normas NTC-2017 (Administración pública de la ciudad de México, 2017). En dicha tabla también se observa el nivel de exposición de cada condición de exposición con base en las consideraciones de Rodríguez et al. (1989), el Código Estructural (Gobierno de España, 2021), la norma europea EN206 (Comité Europeo para Estandarización (CEN), 2013) y el Comité Euro-Internacional del Concreto (CEB, 1989).

Tabla 35. Clasificación de exposición a acciones de deterioro del concreto según NTC-2017

Clasificación	Superficies y ambientes de exposición	VA2
A1	Superficie de miembros en contacto con el terreno, protegida por una membrana impermeable.	1
A2	Superficie de miembros en contacto con el terreno, en suelos no agresivos.	1
D	Superficie de miembros en contacto con el terreno, en suelos agresivos*.	4
A1	Superficies de miembros en ambientes interiores. Encerrado totalmente dentro de un edificio, excepto por breve periodo de exposición al ambiente durante la construcción**.	1
B1	Superficies de miembros en ambientes interiores. En edificios o sus partes donde los miembros pueden estar sujetos a humedecimiento y secado repetido**.	2
A2	Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores*** que no son agresivos.	1
B1	Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores*** que son ligeramente agresivos.	2

Clasificación	Superficies y ambientes de exposición	VA2
B2	Superficies de miembros no en contacto con el terreno y expuestos a ambientes exteriores*** que son agresivos.	3
B1	Superficies de miembros en contacto con agua dulce (dura)****.	2
B2	Superficies de miembros en agua dulce a presión (dura)****.	3
B2	Superficies de miembros en agua dulce corriente (dura)****.	3
B2	Superficies de miembros en contacto con agua dulce (suave)****.	3
D	Superficies de miembros en agua dulce a presión (suave)****.	4
D	Superficies de miembros en agua dulce corriente (suave)****.	4
B2	Superficies de miembros en agua con más de 20 000 ppm de cloruros, sumergida permanentemente****.	3
C	Superficies de miembros en agua con más de 20 000 ppm de cloruros, en zonas con humedecimiento y secado****.	4
D	Superficie de miembros en otros ambientes.	4

*Se deben considerar agresivos los suelos permeables con pH < 4.0 o con agua freática que contiene más de un gramo (1 g) de iones de sulfato por litro. Suelos ricos en sales con pH entre 4 y 5 deben considerarse como clasificación de exposición C;

**Cuando se emplee en aplicaciones industriales, se deben considerar los efectos sobre el concreto de los procesos de manufactura que allí se realicen; en tales casos se puede requerir una reclasificación de la exposición a D;

***La frontera entre los diferentes ambientes exteriores depende de muchos factores los cuales incluyen distancia desde la fuente agresiva, vientos dominantes y sus intensidades;

****Para establecer las características de dureza del agua se requiere analizarla (ASTM E 1116)

Fuente: adaptado de NTC-2017 (Administración pública de la Ciudad de México, 2017).

Exposición al cambio climático (VA3)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Exposición al cambio climático	VA3	0.05

Descripción	
Definición	De acuerdo con la UNAM (2014), la exposición “se refiere al grado de estrés climático sobre una unidad particular de análisis” (p. 16).
Criterio	Vulnerabilidad al ambiente ante agentes corrosivos.
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM).

Obtención

De acuerdo con la UNAM (2014), los grados de exposición al clima y al cambio climático en México son: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. La Tabla 36 muestra la relación entre el grado de exposición al clima y al cambio climático con los niveles de exposición propuestos para este indicador.

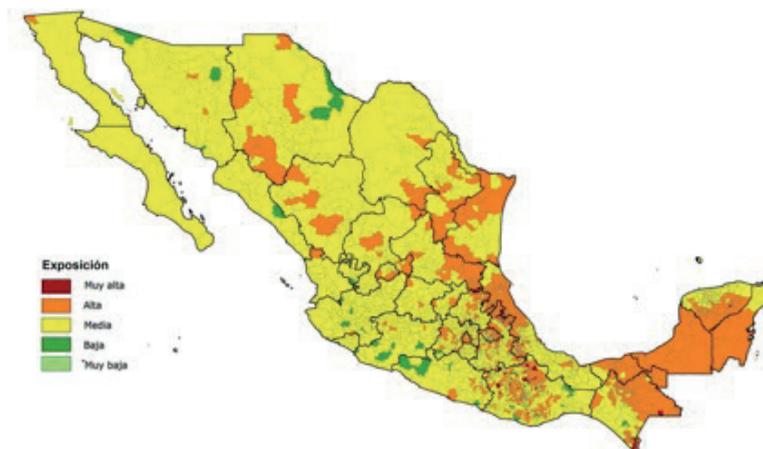


Figura 21. Grado de exposición climática y al cambio climático.

Fuente: UNAM (2014).

Tabla 36. Grado de exposición al clima y al cambio climático

Grado de exposición al clima y al cambio climático	VA3
Muy bajo	1
Bajo	1
Medio	2
Alto	3
Muy alto	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC)

Ficha técnica de índice		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Índice de Daños en el Concreto Reforzado	IDC	0.40

Descripción	
Definición	Índice que evalúa el nivel de daños en la estructura de concreto reforzado.
Criterios	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.
Índice precedente	No aplica.
Índice dependiente	Índice de Corrosión (ICO).
Indicadores componentes	Fisuración en el recubrimiento (DC1) Depósitos en la superficie (DC2) Defectos de construcción (DC3) Resistividad eléctrica del concreto (DC4) Pérdida de sección (DC5) Intensidad o velocidad de corrosión (DC6)
Fórmula	$IDC = 0.07 \times IDC1 + 0.03 \times IDC2 + 0.03 \times IDC3 + 0.07 \times IDC4 + 0.10 \times IDC5 + 0.10 \times IDC6$ Donde, IDC: Índice de Daños. IDC1: Fisuración en el recubrimiento por corrosión. IDC2: Depósitos en la superficie. IDC3: Defectos de construcción. IDC4: Resistividad eléctrica del concreto. IDC5: Pérdida de sección. IDC6: Intensidad o velocidad de corrosión.

Escala de valoración

Tabla 37. Niveles del Índice de Daños en el Concreto Reforzado

IDC	Nivel	Semáforo	Descripción
0.40 - 0.70	1		Daño en el concreto bajo
0.41 - 1.00	2		Daño en el concreto moderado
1.01 - 1.30	3		Daño en el concreto alto
1.31 - 1.60	4		Daños en el concreto muy alto

IDC: Índice de Daños en el Concreto Reforzado.

Si el valor del índice se encuentra entre 0.0 y 0.4, significa que no se consideraron algunos indicadores y que los cálculos no son certeros, con una vulnerabilidad baja. Es conveniente considerar valores críticos o estimar con juicio cuando no se cuente con información.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Fisuración en el recubrimiento (DC1)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Fisuración en el recubrimiento por corrosión	DC1	0.07
Descripción		
Definición	Fisura, agrietamiento y desprendimientos en el concreto pueden ser signo de que se está produciendo corrosión en el acero de refuerzo, y aunque las causas sean otras, estos daños permiten la entrada de agentes corrosivos, lo que los convierte en uno de los principales indicadores de daños relacionados con esta causa.	
Criterio	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.	
Índice dependiente	Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).	

Obtención

La Tabla 38 muestra la clasificación del grado y nivel de daño de la estructura por corrosión, de acuerdo con la condición de fisuración, agrietamiento y desprendimiento del recubrimiento del concreto presentado.

Tabla 38. Fisuración y grietas en el recubrimiento del concreto

Descripción	Grado de fisuración	Nivel de fisuración (DC1)
Sin fisuras o microfisuras, $e < 0.05$ mm	Muy bajo	1
Fisuras poco perceptibles, $0.05 \leq e < 0.2$ mm	Bajo	1
Fisuras perceptibles (macrofisuras), $0.2 \leq e < 0.4$ mm	Medio	2
Delaminaciones, fisura generalizada, fisuras muy perceptibles, grietas, $0.4 \leq e < 1.0$ mm	Alto	3
Grietas $e > 1.0$ mm o desprendimiento del concreto y acero expuesto	Muy alto	4

e: ancho de grieta o fisura.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Depósitos en la superficie (DC2)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Depósitos en la superficie	DC2	0.03

Descripción	
Definición	Evalúa el daño por corrosión del concreto en relación con los depósitos que se encuentran en la superficie del concreto. De acuerdo con la Red Iberoamericana (2000), se pueden identificar cuatro tipos de depósitos en la superficie del concreto como daños a este: exudación, eflorescencia, manchas de óxido y humedad.
Criterio	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.
Índice dependiente	Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).

Obtención

En la Tabla 39 se identifican los tipos de depósitos en el concreto, con la finalidad de determinar el grado y nivel de daño de la estructura por corrosión de acuerdo con los depósitos en la superficie del concreto, como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 39. Tipos de depósitos en la superficie del concreto

Depósito en la superficie del concreto	Descripción
Exudación	Material del tipo viscoso que va exudando a través de los poros del concreto.
Eflorescencia	Cubierta blanca en la superficie del concreto.
Manchas de óxido	Manchas de color café-rojizo.
(Manchas de) Humedad	Zona superficial del concreto con indicios de humedad o con agua acumulada en la superficie.

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Tabla 40. Depósitos en la superficie del concreto

Descripción del depósito	Grado	Nivel (DC2)
Depósitos < 10 % de la superficie total, poca intensidad	Bajo	1
20 % > Depósitos > 10 %, intensidad moderada	Medio	2
30 % > Depósitos > 20 %, intensidad alta	Alto	3
Depósitos > 30 %, intensidad muy alta	Muy alto	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Defectos de construcción (DC3)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Defectos de construcción	DC3	0.03

Descripción	
Definición	Evalúa el daño por corrosión del concreto en relación con los defectos de construcción que se encuentran en la superficie del concreto, ya que permite el ingreso de agentes corrosivos. De acuerdo con la Red Iberoamericana XV.B (2000), se pueden identificar dos tipos de defectos en la superficie del concreto como daños a este: desgarramiento y alveolado o conocido también como panal de abeja o cangrejera.
Criterio	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.
Índice dependiente	Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).

Obtención

Con la Tabla 41 se identifican los tipos de depósitos en el concreto, con la finalidad de determinar el grado y nivel de daño de la estructura por corrosión de acuerdo con los defectos de construcción en la superficie del concreto, de acuerdo con la Tabla 42.

Tabla 41. Defectos de construcción en la superficie del concreto

Defectos en la superficie del concreto	Descripción
Desgarramiento	Similar a las grietas
Alveolado (panal de abeja o cangrejera)	Vacios entre el agregado grueso

Fuente: Red Iberoamericana (2000).

Tabla 42. Defectos de construcción en la superficie del concreto

Descripción	Grado de defectos de construcción	Nivel de defectos de construcción
Defectos < 10 % de la superficie	Bajo	1
20 % > Defectos >10 %	Medio	2
30 % >Defectos >20 %	Alto	3
Defectos > 30 %	Muy alto	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Resistividad eléctrica del concreto (DC4)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Resistividad eléctrica del concreto	DC4	0.07

Descripción	
Definición	Evalúa la probabilidad de corrosión en relación con la resistividad eléctrica del concreto. La resistividad del concreto determina el riesgo por corrosión a través de métodos no destructivos.
Criterio	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.
Índice dependiente	Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).

Obtención

La Tabla 43 muestra los niveles de corrosión probable en relación con la resistividad eléctrica del concreto.

Tabla 43. Valores de resistividad eléctrica del concreto

Resistividad eléctrica del concreto (kΩcm)	Descripción	Probabilidad de corrosión	DC4
>1000	Porosidad interconectada baja	Baja	1
50-100	Porosidad interconectada moderada	Moderada	2
10-50	Porosidad interconectada de consideración	Alta	3
<10	Porosidad interconectada excesiva	Muy alta	4

Fuente: elaborada a partir de NMX-C-514-ONNCCE (2018).

Cuando no sea posible medir la resistividad eléctrica del concreto, estimar en función de la intensidad de corrosión, de acuerdo con la Figura 22. Los valores sugeridos de intensidad de corrosión (I_{corr}) por Rodríguez et al. (1989) según las clases de exposición, se muestran en la Tabla 44.

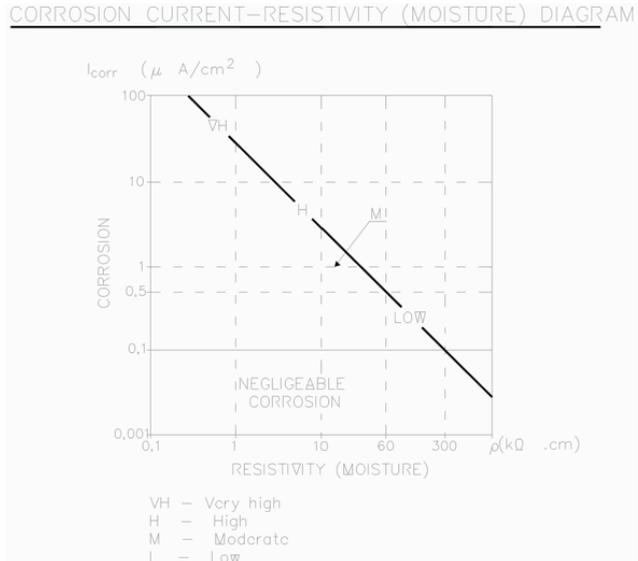


Figura 22. Relación general teórica entre la intensidad de corrosión y la resistividad eléctrica del concreto.

Fuente: Rodríguez et al. (1989).

Tabla 44. Rangos de valores de I_{corr} sugeridos para las clases de exposición de la NMX-C-155-ONNCCE (ONNCCE, 2014)

Clases de exposición		I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	
0	Sin riesgo de corrosión	~0.01	
Carbonatación		Parcialmente carbonatada	Totalmente carbonatada
1	Seco	~0.01	~0.01
2a	Húmedo raramente seco	0.1-0.5	0.2-0.5
2b	Humedad moderada	0.05-0.10	0.1-0.2
3	Ciclos de humedad-secado	0.01-0.20	0.2-0.5
Corrosión por cloruros			
4b	Humedad moderada	0.1-0.2	
4b	Húmedo raramente seco	0.1-0.5	
4d	Ciclos humedad secado	0.5-5.0	
4c	Niebla marina	0.5-5.0	
4a	Sumergida	0.1-1.0	
4d	Zona de mareas	1.0-10.0	

Fuente: adaptado de Rodríguez et al. (1989).

Pérdida de sección (DC5)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Pérdida de sección	DC5	0.10
Descripción		
Definición	Es un indicador que indica el nivel de corrosión en relación con la pérdida de sección del acero de refuerzo, ya que es el primer efecto directo de esta, afectando la capacidad portante de la estructura.	
Criterio	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.	
Índice dependiente	Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).	

Obtención

En donde sea posible se debe medir la pérdida de diámetro de este. Para medir su disminución, se puede realizar con un Vernier después de limpiar los óxidos existentes. La Tabla 45 muestra los niveles de corrosión en relación con la pérdida de sección del acero de refuerzo.

Tabla 45. Pérdida de sección del acero de refuerzo por corrosión

Pérdida de sección (%)	Probabilidad de corrosión	DC5
< 1 %	Baja	1
1-5 %	Moderada	2
5-10 %	Alta	3
> 10 %	Muy alta	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

Intensidad o velocidad de corrosión (DC6)

Ficha técnica de indicador	
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado	
Denominación	Abreviatura Peso
Intensidad o velocidad de corrosión	DC6 0.10
Descripción	Evalúa el nivel de corrosión en relación con la intensidad de corrosión obtenida por medio de pruebas o por clases de exposición al ambiente.
Definición	La intensidad o velocidad de corrosión indica la cantidad de metal que se transforma en óxido por unidad de superficie del acero de refuerzo y el tiempo (Rodríguez et al., 1989). La intensidad de corrosión puede emplearse para calcular la pérdida de sección del acero, identificar las zonas de corrosión y evaluar la eficacia de las reparaciones (Rodríguez et al., 1989).
Criterio	Daños al concreto reforzado relacionados con corrosión.
Índice dependiente	Índice de Daños en el Concreto Reforzado (IDC).

Obtención

Según Rodríguez et al. (1989), la intensidad se puede obtener de dos maneras: por medio de tablas que establecen un valor nominal o en campo por medio de pruebas “mediante un electrodo de referencia que indica el potencial eléctrico de la armadura, y un electrodo auxiliar que sirve para medir la corriente circulante en el ensayo” (p. 106). La Tabla 46 muestra los niveles de corrosión en relación con la intensidad medida en campo.

Tabla 46. Intensidad de corrosión medida *in situ*

Intensidad / velocidad de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Intensidad / velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	Grado de corrosión	DC6
< 0.1	1-5	Despreciable	1
0.1-0.5	5-10	Bajo	2
0.5-1.0	10-15	Moderado	3
> 1.0	> 15	Alto	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

La Tabla 47 muestra los rangos de intensidad de corrosión representativa en función de las clases de exposición, de acuerdo con Rodríguez (1989), y adaptada a la clasificación de exposición en esta propuesta. Esta tabla se puede emplear cuando no se puedan realizar pruebas *in situ*.

Tabla 47. Rangos de valores de I_{corr} sugeridos para las clases de exposición de la NMX-C-155-ONNCCE (ONNCCE, 2014)

Clases de exposición		I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	
0	Sin riesgo de corrosión	~0.01	
Carbonatación		Parcialmente carbonatada	Totalmente carbonatada
1	Seco	~0.01	~0.01
2a	Húmedo raramente seco	0.1-0.5	0.2-0.5
2b	Humedad moderada	0.05-0.10	0.1-0.2
3	Ciclos de humedad-secado	0.01-0.20	0.2-0.5
Corrosión por cloruros			
4b	Humedad moderada	0.1-0.2	
4b	Húmedo raramente seco	0.1-0.5	
4d	Ciclos humedad secado	0.5-5.0	
4c	Niebla marina	0.5-5.0	
4a	Sumergida	0.1-1.0	
4d	Zona de mareas	1.0-10.0	

Fuente: adaptado de Rodríguez et al. (1989).

Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)

Ficha técnica de índice

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Denominación	Abreviatura	Peso
Índice de Vulnerabilidad de la Estructura	IVE	0.40

Descripción

Definición Índice que evalúa el nivel de vulnerabilidad estructural ante el inicio y la propagación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado.

Criterios Vulnerabilidad estructural.

Índice precedente No aplica.

Descripción	
Índice dependiente	Índice de Corrosión (ICO).
Indicadores componentes	Recubrimiento (VE1). Protección del acero ante corrosión (VE2). Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3). Armado (VE4). Importancia estructural del elemento (VE5). Importancia de la estructura (VE6).

Escala de valoración

Tabla 48. Niveles del índice de Vulnerabilidad Estructural

IVE	Nivel	Semáforo	Descripción
0.40 - 0.70	1		Vulnerabilidad estructural baja
0.41 - 1.00	2		Vulnerabilidad estructural moderada
1.01 - 1.30	3		Vulnerabilidad estructural alta
1.31 - 1.60	4		Vulnerabilidad estructural muy alta

IVE: Índice de Vulnerabilidad Estructural.

Si el valor del índice se encuentra entre 0.0 y 0.4, significa que no se consideraron algunos indicadores y que los cálculos no son certeros, con una vulnerabilidad baja. Es conveniente considerar valores críticos o estimar con criterio cuando no se cuente con información.

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (2020).

Recubrimiento (VE1)

Ficha técnica de indicador

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Denominación	Abreviatura	Peso
Recubrimiento	VE1	0.10

Descripción	
Definición	Evalúa el nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión en relación con el cumplimiento con el recubrimiento impuesto en la normatividad correspondiente. El recubrimiento es la capa de concreto que va desde la superficie del concreto hasta la armadura. Funciona como una barrera que cubre al acero de refuerzo de agentes de deterioro.
Criterio	Vulnerabilidad estructural.
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).

Obtención

Se logra por medio de revisión de planos, memorias de cálculo, bitacora de obra, etcétera, o por medio de pruebas no destructivas en campo (por ejemplo, usando un pacómetro o pachómetro). Si existen desprendimientos o zonas donde está expuesto el acero de refuerzo se pueden hacer mediciones directas. El recubrimiento obtenido se deberá comparar con los recubrimientos mínimos dispuestos por la normatividad aplicable que se muestran en las Tablas 49, 50, 51, 52 y 53; y con la diferencia obtenida entre el recubrimiento real y el recubrimiento mínimo requerido, se determinará el nivel de corrosión a la que es expuesta la armadura. La 49 muestra los niveles de corrosión en relación con el cumplimiento del recubrimiento mínimo establecido por la normatividad correspondiente.

Tabla 49. Cumplimiento con el recubrimiento mínimo requerido

Recubrimiento (mm)	Grado de corrosión	VEI
Mayor o igual al mínimo estipulado	Bajo	1
< 10 del mínimo	Moderado	2
≥ 10 del mínimo	Alto	3
Sin recubrimiento	Muy alto	4
Debido a grandes desprendimientos de concreto o elementos no colados o parcialmente colados (en obra negra).		

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

La Tabla 50 muestra el recubrimiento mínimo requerido indicado por las NTC-2017 (Administración Pública de la Ciudad de México, 2023).

Tabla 50. Recubrimiento libre mínimo requerido de acuerdo con las NTC

Clasificación de exposición	Resistencia a compresión especificada, MPa (kg/cm ²)							
	15 (150)	20 (200)	25 (250)	30 (300)	40 (400)	50 (500)	60 (600)	70 (700)
Recubrimiento mínimo requerido (mm)								
A1	30	25	25	20	20	20	15	15
A2	50	40	35	30	25	25	20	20
B1	65	50	40	35	30	30	25	25
B2	-	-	50	45	40	35	30	30
C	-	-	-	-	-	70	65	60

Fuente: NTC (2017).

Las Tablas 50, 51, 52 y 53 muestran el recubrimiento mínimo especificado por el ACI (2019) para concreto en distintas condiciones.

Tabla 51. Recubrimiento especificado para miembros de concreto con presforzados construidos en sitio

Exposición del concreto	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado, mm
Construcción contra el suelo y permanentemente en contacto con él.	Todos.	Todos.	75
Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo.	Todos.	Barras no. 19 a no. 57.	50
		Barra no. 16, alambre MW200 o MD200, y menores.	40
No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo.	Losas, viguetas y muros.	Barras no. 43 y no. 57.	40
		Barras no. 36 y menores.	20
	Vigas, columnas, pedestales y amarres a tracción.	Armadura principal, estribos, espirales y estribos cerrados para confinamiento.	40

Fuente: ACI (2019).

Tabla 52. Recubrimiento especificado para miembros de concreto preesforzados construidos en sitio

Exposición del concreto	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado, mm
Construcción contra el suelo y permanentemente en contacto con él.	Todos.	Todos.	75
Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo.	Losas, viguetas y muros.	Todos.	25
	Todos los demás.	Todos.	40
No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo.	Losas, viguetas y muros.	Todos.	20
	Vigas, columnas, pedestales y amarres a tracción.	Refuerzo principal.	40
		Estribos, espirales y estribos cerrados para confinamiento.	25

Fuente: ACI (2019).

Tabla 53. Recubrimiento especificado para miembros de concreto prefabricado, preesforzado y no preesforzado, fabricados bajo condiciones de planta

Exposición del concreto	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado, mm
Expuestos a la intemperie o en contacto con el suelo.	Muros.	Barras no. 43 y no. 57, tendones con diámetro mayor de 40 mm.	40
		Barras no. 36 y menores, alambres MW200 Y MD200 y menores, tendones y torones con diámetro 40 mm y menores.	20
	Todos los demás.	Barras no. 43 y no. 57, tendones con diámetro mayor de 40 mm.	50
		Barras no. 19 hasta no. 36, tendones y torones mayores de 16 mm hasta 40 mm de diámetro.	40
		Barras no. 16, alambres MW200 y MD200 y menores, tendones y torones con diámetro 16 mm y menores.	30
		Barras no. 43 y no. 57, tendones con diámetro mayor de 40 mm.	30
	Losas, viguetas y muros.	Tendones y torones con diámetro 40 mm y menores.	20
		Barras no. 36 y menores, alambres MW200 y MD200 y menores.	16
		Refuerzo principal.	El mayor de db y 16 mm y no necesita ser mayor de 40 mm.
	No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo.	Vigas, columnas, pedestales y amarres y tensores a tracción.	Estribos, espirales y estribos cerrados de confinamiento.

Db: diámetro de barra.

Fuente: ACI (2019).

Tabla 54. Recubrimiento de concreto especificado para miembros de cimentaciones profundas

Exposición del concreto	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado, mm
Construcciones contra y en contacto permanente con el terreno, no rodeado por tubo de acero, sin camisa metálica permanente, ni en perfil de roca estable.	Construido en sitio	Todos.	75
Rodeado por tubo de acero, con camisa permanente, o en perfil de roca estable.	Construido en sitio	Todos.	40
Permanente contacto con el terreno.	Prefabricado Preesforzado	Todos	40
Expuesto a agua marina.	Prefabricado Preesforzado	Todos	60
	Prefabricado Preesforzado	Todos	50

Fuente: ACI (2019).

Protección del acero ante corrosión (VE2)

Ficha técnica de indicador

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Denominación	Abreviatura	Peso
Protección del acero ante corrosión	VE2	0.10

Descripción

Definición	Evalúa el nivel de vulnerabilidad del acero de refuerzo ante corrosión en relación inversa a la protección directa de la armadura ante corrosión.
Criterio	Vulnerabilidad estructural.
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).

Obtención

La Tabla 55 muestra los niveles de protección del acero de refuerzo.

Tabla 55. Nivel de protección del acero de refuerzo

Descripción de la protección	Nivel de protección del acero de refuerzo ante corrosión	VE2
Sin protección o protección inadecuada.	1	4
Pobre protección del acero.	2	3
Protección moderada del acero.	3	2
Protección completa y eficiente del acero.	4	1

Fuente: adaptado de Rodríguez et al. (1989).

Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas	VE3	0.07
Descripción		
Definición	Evalúa el nivel de vulnerabilidad estructural ante condiciones físicas extraordinarias.	
Criterio	Vulnerabilidad estructural.	
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).	

Obtención

La Tabla 56 muestra los niveles de protección del acero de refuerzo, de acuerdo con las condiciones físicas extraordinarias como ciclones (Figura 23) y sismos (Figura 24 y Figura 25).

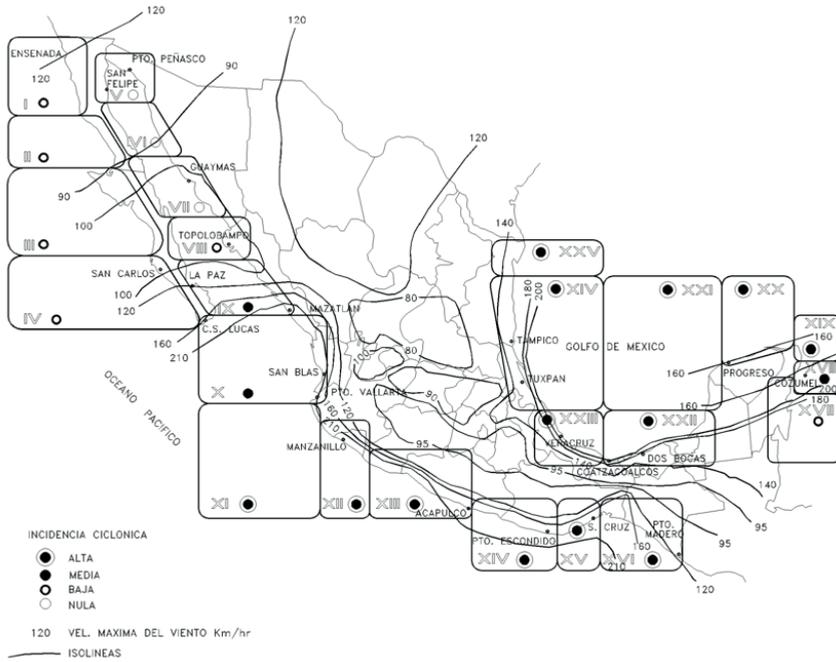


Figura 23. Incidencia ciclónica y zonificación costera mexicana
Fuente: SICT (2001).

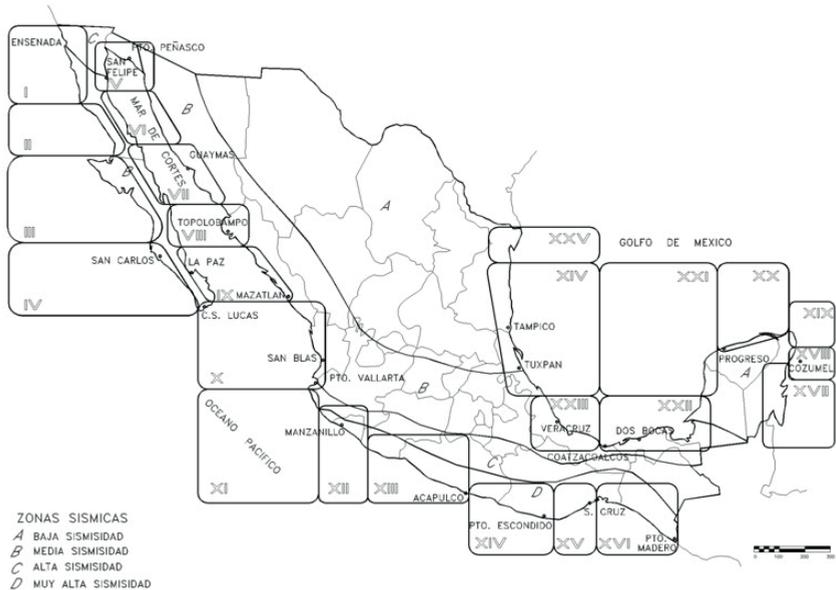


Figura 24. Zonas sísmicas y zonificación costera mexicana por condiciones físicas.
Fuente: SICT (2001).

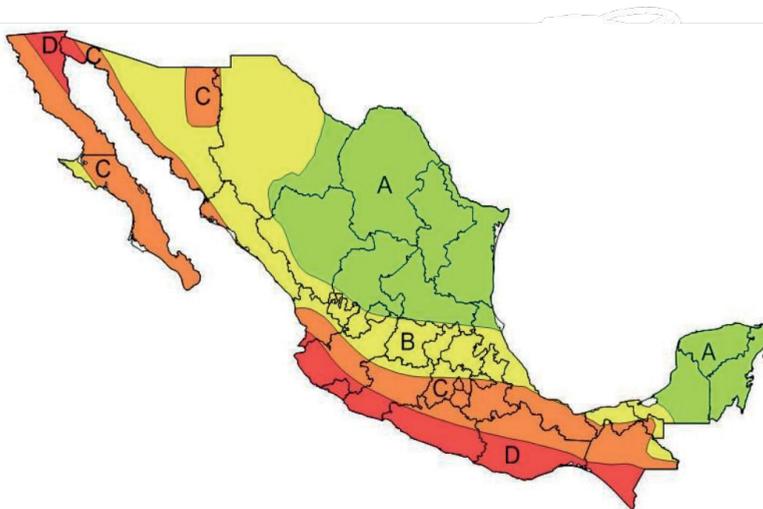


Figura 25. Regionalización sísmica de la República mexicana

Fuente: CFE (2015).

Tabla 56. Nivel de vulnerabilidad ante condiciones extraordinarias

Incidencia ciclónica	Intensidad sísmica	Nivel de vulnerabilidad ante condiciones extremas (VE3)
Baja	Nula	1
Baja	Baja	1
Baja	Media	2
Baja	Alta	2
Media	Nula	1
Media	Baja	2
Media	Media	2
Media	Alta	3
Alta	Nula	2
Alta	Baja	2
Alta	Media	3
Alta	Alta	3
Muy alta	Nula	2
Muy alta	Baja	3
Muy alta	Media	3
Muy alta	Alta	4

Fuente: adaptado de Rodríguez et al. (1989).

Armado (VE4)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Armado	VE4	0.07

	Descripción
Definición	Evalúa el nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión de acuerdo con la adecuación del armado (acero de refuerzo) en el elemento de la estructura de concreto.
Criterio	Vulnerabilidad estructural.
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).

Obtención

Para determinar el nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión de acuerdo con la adecuación del armado (acero de refuerzo) en los elementos estructurales sometidos a flexión, se considerará lo indicado en las Tablas 57 y 58. Para elementos no estructurales como castillos y cadenas de cerramiento, considerar el esfuerzo al que estarían propensos si fueran elementos estructurales. En la Tabla 57 se muestra el nivel de vulnerabilidad estructural de acuerdo con el armado en vigas planas, consideradas como elementos sometidos a flexión; considerándose como viga plana aquella que su peralte (h) es menor que su ancho (b).

Tabla 57. Nivel de armado para vigas planas

Armado transversal		VE4
Sección de apoyo	Sección de centro de claro	
Alta densidad	Alta densidad	2
Alta densidad	Baja densidad	3
Baja densidad	Alta densidad	3
Baja densidad	Baja densidad	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

En la Tabla 58 se muestra el nivel de vulnerabilidad estructural de acuerdo con el armado en vigas peraltadas y losas, consideradas como elementos sometidos a

flexión. Considerándose como viga peraltada aquella que su peralte (h) es mayor que su ancho (b). Se considera la densidad del elemento en dos tipos de secciones: de apoyo y del centro de claro.

Tabla 58. Nivel de armado para vigas peraltadas y losas

Armado transversal		VE4
Sección de apoyo	Sección de centro de claro	
Sin estribos	Sin estribos	1
Sin estribos	Alta densidad	2
Sin estribos	Baja densidad	2
Alta densidad	Sin estribos	2
Alta densidad	Alta densidad	3
Alta densidad	Baja densidad	3
Baja densidad	Sin estribos	3
Baja densidad	Alta densidad	4
Baja densidad	Baja densidad	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

Para determinar el nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión de acuerdo con la adecuación del armado (acero de refuerzo) en los elementos estructurales sometidos a compresión, se considerará lo indicado en la Tabla 59 para soportes mayores a 400 mm y la Tabla 60 para soportes menores e iguales a 400 mm.

Tabla 59. Nivel de armado para elementos sometidos a compresión, soporte > 400 mm

Armado transversal	Armado longitudinal	VE4
Estribos poco espaciados	Varillas verticales muy espaciadas	1
Estribos poco espaciados	Varillas verticales poco espaciadas	2
Estribos muy espaciados	Varillas verticales muy espaciadas	2
Estribos muy espaciados	Varillas verticales poco espaciadas	3

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

En la Tabla 60 se muestra el nivel de vulnerabilidad estructural de acuerdo con el armado en columnas y otros elementos sometidos a compresión, con soporte menor

e igual a 400 mm.

Tabla 60. Nivel de armado para elementos sometidos a compresión, soporte ≤ 400 mm

Armado transversal	Armado longitudinal	VE4
Estribos poco espaciados	Varillas verticales muy espaciadas	3
Estribos poco espaciados	Varillas verticales poco espaciadas	4
Estribos muy espaciados	Varillas verticales muy espaciadas	4
Estribos muy espaciados	Varillas verticales poco espaciadas	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

Importancia estructural del elemento (VE5)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Importancia estructural del elemento	VE5	0.03
Descripción		
Definición	Evalúa el nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión de acuerdo con el nivel de importancia del elemento.	
Criterio	Vulnerabilidad estructural.	
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).	

Obtención

La Tabla 61 muestra el nivel de importancia de elementos de acuerdo con las consecuencias de falla.

Tabla 61. Nivel de importancia de elementos en la estructura.

Elemento	Consecuencias de falla	VE5
Elemento no estructural	Leves	1
Techumbres ligeras	Leves	1
Losas y rampas	Moderadas	2
Trabes	Considerable	3
Muros estructurales	Significantes	4
Columnas	Significantes	4

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

Importancia de la estructura (VE6)

Ficha técnica de indicador		
Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado		
Denominación	Abreviatura	Peso
Importancia de la estructura	VE6	0.03

Descripción	
Definición	Evalúa el nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión de acuerdo con el nivel de importancia de la estructura.
Criterio	Vulnerabilidad estructural.
Índice dependiente	Índice de Vulnerabilidad Estructural (IVE).

La Tabla 62 muestra el nivel de importancia de la estructura de acuerdo con las consecuencias de falla.

Tabla 62. Nivel de importancia de la estructura

Clasificación	Descripción	Consecuencias de falla	VE6
A	Estructuras de gran importancia. Requieren un grado de seguridad extrema. Su falla causaría un número significativo de pérdidas de vidas y económicas, culturales, ecológicos y sociales.	Significantes	4
B	Estructuras de importancia considerable. Requieren un grado de seguridad alto. Su falla causaría un número considerable de pérdidas de vidas y económicas, culturales, ecológicos y sociales.	Considerables	3
C	Estructuras de importancia moderadas. Requieren un grado de seguridad moderada. Su falla causaría un número moderado de pérdidas de vidas y económicas, culturales, ecológicos y sociales, o pondría en peligro otras estructuras de esta clasificación o del grupo A y B.	Moderadas	2
D	Estructuras de poca importancia. Requieren un grado de seguridad bajo. Su falla no implica graves consecuencias, ni causa daños a construcciones de las clasificaciones A, B y C.	Leves	1

Fuente: elaborado con base en Rodríguez et al. (1989).

ANEXO C:

Formatos

Información general

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Datos de la estructura

Nombre de la estructura

Tipo de estructura

Uso

Estructuración

Ubicación

Año de inicio de construcción

Año de finalización de
construcción

Mantenimientos,
rehabilitaciones, etcétera

Datos de la evaluación
Fecha de inicio
Fecha de término
Evento antecedente de la evaluación
Motivo de la evaluación
Tipo de evaluación
Nombre del evaluador
Cargo o profesión

Tipología estructural

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Tipología estructural			
Número	Elemento	Código	Esfuerzo actuante

Evaluación

Caracterización del ambiente

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Vulnerabilidad al ambiente				
Código elemento	Clima (VA1)	Exposición al deterioro (VA2)	Exposición al cambio climático (VA3)	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)

Daños en el concreto armado

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Daños en el concreto armado							
Código elemento	Fisuración en el recubrimiento (DC1)	Depósitos en la superficie (DC2)	Defectos de construcción (DC3)	Resistividad eléctrica del concreto (DC4)	Pérdida de sección (DC5)	Intensidad o velocidad de corrosión (DC6)	Índice de Daños al Concreto reforzado (IDC)

Caracterización de la estructura

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Vulnerabilidad estructural							
Código elemento	Recubrimiento (VE1)	Protección del acero ante corrosión (VE2)	Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3)	Armado (VE4)	Importancia estructural del elemento (VE5)	Importancia de la estructura (VE6)	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)

Resumen de resultados

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Índice de vulnerabilidad estructural ante corrosión							
Código elemento	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)	Índice de Daños al Concreto Reforzado (IDC)	Índice de Corrosión (ICO)	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)	Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)	Nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión	Urgencia de intervención en años

Observaciones

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Descripción de los resultados

Recomendaciones

ANEXO D:

Información general

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Datos de la estructura	
Nombre de la estructura	Muelle
Tipo de estructura	Muelle
Uso	Permitir a embarcaciones pequeñas atracar para realizar carga y descarga.
Estructuración	Estructura de concreto reforzado conformado por una losa de transición y 14 pilotes.
Ubicación	Puerto de Tampico
Año de inicio de construcción	<i>Información desconocida</i>
Año de finalización de construcción	<i>Información desconocida</i>
Mantenimientos, rehabilitaciones, etcétera	<i>Información desconocida</i>
Datos de la evaluación	
Fecha de inicio	16-oct-2023
Fecha de término	16-oct-2023
Evento antecedente de la evaluación	Ninguno
Motivo de la evaluación	Informativa
Tipo de evaluación	Exploratoria
Nombre del evaluador	Valeria V. Lugo G.
Cargo o profesión	Ingeniero civil

Tipología estructural

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Tipología estructural			
Número	Elemento	Código	Esfuerzo actuante
1	Losa	L-1	Flexión
2	Pilote	P-1	Flexo-compresión
3	Pilote	P-2	Flexo-compresión
4	Pilote	P-3	Flexo-compresión
5	Pilote	P-4	Flexo-compresión
6	Pilote	P-5	Flexo-compresión
7	Pilote	P-6	Flexo-compresión
8	Pilote	P-7	Flexo-compresión
9	Pilote	P-8	Flexo-compresión
10	Pilote	P-9	Flexo-compresión
11	Pilote	P-10	Flexo-compresión
12	Pilote	P-11	Flexo-compresión
13	Pilote	P-12	Flexo-compresión
14	Pilote	P-13	Flexo-compresión
15	Pilote	P-14	Flexo-compresión

Evaluación

Caracterización del ambiente

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Vulnerabilidad al ambiente				
Código elemento	Clima (VA1)	Exposición al deterioro (VA2)	Exposición al cambio climático (VA3)	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)
L-1	4	4	4	0.8
P-1	4	4	4	0.8
P-2	4	4	4	0.8
P-3	4	4	4	0.8
P-4	4	4	4	0.8
P-5	4	4	4	0.8
P-6	4	4	4	0.8
P-7	4	4	4	0.8

Vulnerabilidad al ambiente				
Código elemento	Clima (VA1)	Exposición al deterioro (VA2)	Exposición al cambio climático (VA3)	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)
P-8	4	4	4	0.8
P-9	4	4	4	0.8
P-10	4	4	4	0.8
P-11	4	4	4	0.8
P-12	4	4	4	0.8
P-13	4	4	4	0.8
P-14	4	3	4	0.7

Daños en el concreto armado

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Daños en el concreto armado							
Código elemento	Fisuración en el recubrimiento (DC1)	Depósitos en la superficie (DC2)	Defectos de construcción (DC3)	Resistividad eléctrica del concreto (DC4)	Pérdida de sección (DC5)	Intensidad o velocidad de corrosión (DC6)	Índice de Daños al Concreto reforzado (IDC)
L-1	4	4	4	4	4	4	1.6
P-1	4	4	4	4	4	4	1.6
P-2	4	4	4	4	4	4	1.6
P-3	4	4	4	4	4	4	1.6
P-4	4	4	4	4	4	4	1.6
P-5	4	4	4	4	4	4	1.6
P-6	4	4	4	4	4	4	1.6
P-7	4	4	4	4	4	4	1.6
P-8	4	4	4	4	4	4	1.6
P-9	4	4	4	4	4	4	1.6
P-10	4	4	4	4	4	4	1.6
P-11	4	4	4	4	4	4	1.6
P-12	4	4	4	4	4	4	1.6
P-13	4	4	4	4	4	4	1.6
P-14	4	4	4	4	4	4	1.6

Caracterización de la estructura

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Vulnerabilidad estructural							
Código Elemento	Recubrimiento (VE1)	Protección del acero ante corrosión (VE2)	Vulnerabilidad ante condiciones físicas extremas (VE3)	Armado (VE4)	Importancia estructural del elemento (VE5)	Importancia de la estructura (VE6)	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)
L-1	4	4	2	1	4	2	1.199
P-1	4	4	2	1	4	2	1.199
P-2	4	4	2	1	4	2	1.199
P-3	4	4	2	1	4	2	1.199
P-4	4	4	2	1	4	2	1.199
P-5	4	4	2	1	4	2	1.199
P-6	4	4	2	1	4	2	1.199
P-7	4	4	2	1	4	2	1.199
P-8	4	4	2	1	4	2	1.199
P-9	4	4	2	1	4	2	1.199
P-10	4	4	2	1	4	2	1.199
P-11	4	4	2	1	4	2	1.199
P-12	4	4	2	1	4	2	1.199
P-13	4	4	2	1	4	2	1.199
P-14	4	4	2	1	2	2	1.133

Resumen de resultados

Método no destructivo para evaluar la vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado

Índice de vulnerabilidad estructural ante corrosión							
Código elemento	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)	Índice de Daños al Concreto Reforzado (IDC)	Índice de Corrosión (ICO)	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)	Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)	Nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión	Urgencia de intervención en años
L-1	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-1	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-2	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-3	0.80	1.6	2.40	1.20	3.60	4	0-2

Índice de vulnerabilidad estructural ante corrosión							
Código elemento	Índice de Vulnerabilidad al Ambiente (IVAM)	Índice de Daños al Concreto Reforzado (IDC)	Índice de Corrosión (ICO)	Índice de Vulnerabilidad de la Estructura (IVE)	Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión (IVEC)	Nivel de vulnerabilidad estructural ante corrosión	Urgencia de intervención en años
P-4	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-5	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-6	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-7	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-8	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-9	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-10	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-11	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-12	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-13	0.80	1.60	2.40	1.20	3.60	4	0-2
P-14	0.70	1.60	2.30	1.13	3.43	4	0-2

IVAM = 0.79

IDC = 1.60

ICO = 2.39

IVE = 1.19

IVEC = 3.59

Nivel de vulnerabilidad de la estructura ante corrosión: 4

Urgencia de intervención en años = 0-2

Referencias

- Administración Pública de la Ciudad de México. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- _____. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- American Concrete Institute [ACI]. (1999). *ACI 364.1 R-94 Guide for Evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation*. ACI Committee 364.
- _____. (2018). *ACI Concrete Terminology*. Farmington Hills.
- _____. (2019). *ACI 364.1R-19 Guide for Assessment of Concrete Structures before Rehabilitation*. ACI Committee 364.
- _____. (2019). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318SUS-19) y comentario (ACI 318SUSR-19)*. Farmington Hills.
- Aragón-Cárdenas, J., Flores-Corona, L. E. y Díaz-Pérez, J. A. (2021). *Manual del formato de captura de datos para evaluación estructural de edificaciones de vivienda*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.
- Atehortúa Hurtado, F. (Ed.). (2005). *Gestión y auditoría de la calidad para organizaciones públicas. Norma NTCGP 1000:2004 conforme a la Ley 872 de 2003*. Editorial Universidad de Antioquía.
- Autoridad Marítima Portuaria El Salvador C.A. (2010). *Glosario de Términos Marítimos Portuarios*. <https://www.puertoensenada.com.mx/upl/sec/glosario-de-terminos-maritimos.pdf>
- Balestra, C. E., Nakano, A. Y., Savaris, G. y Medeiros-Junior, R. A. (2019). Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: Proposal of parameters based on field structures. *Ocean Engineering*, 187, 1-13. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106167
- Castro Borges, P. (2001). *Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, inspección, diagnóstico, vida útil y reparaciones*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C.
- Castro-Borges, P. y Mendoza-Rangel, J. M. (2008). Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de hormigón ante los efectos del cambio climático global. Situación actual. *Materiales de Construcción*, 59(296), 117-124. DOI: 10.3989/mc.2009.46608
- Central Public Works Department of the Government of India [CPWD]. (2018). *Handbook on repairs and rehabilitation of RCC building*
- Comisión Federal de Electricidad [CFE]. (2015). *Manual de Diseño de Obras Civiles. Diseño por Sismo*. Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Comité Euro-Internacional del Concreto [CEB]. (1989). *Durable Concrete Structures* (2ª. ed.). Thomas Telford.
- Comité Europeo para Estandarización [CEN]. (2013, 27 de junio). *The European Committee for Standardization provides European standards and technical specifications*. European Com-

- mission. <https://interoperable-europe.ec.europa.eu/collection/european-committee-standardization-cen>
- de Medeiros-Junior, R. A., de Lima, M. G. y de Medeiros, M. H. (2015). Service life of concrete structures considering the effects of temperature and relative humidity on chloride transport. *Environment Development and Sustainability*, 17, 1103-1119. doi:10.1007/s10668-014-9592-z
- Del Valle Moreno, A., Fabela, M. D., Hernández, J. R., Vázquez, D., Torres, A., Terán, J. et al. (2011). *Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas* (Publicación Técnica No. 336). Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Dirección General de Protección Civil y Emergencias. (2020). *Vientos fuertes*. Gobierno de España. <https://www.proteccioncivil.es/coordinacion/gestion-de-riesgos/meteorologicos/vientos-fuertes#:~:text=El%20viento%20es%20el%20movimiento,componente%20horizontal%20del%20vector%20velocidad>.
- Donadio, M., Capacho, J. y Santander, L. (2023). Total Corrosion Management. Documentary analysis. *Revista ALCONPAT*, 13(2), 235-253. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v13i2.690>
- Euclid Group. (2019). *Guía de especificación para el tratamiento de fisuras en el concreto*. Toxement. https://www.toxement.com.co/media/3896/spec_fisuras-comprimido.pdf
- Flores, A. (2020). *Evaluación de la corrosión y protección del acero de refuerzo embebidas de concreto en presencia de grafito y su efecto en las propiedades mecánicas-electroquímicas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Repositorio RIAA. <https://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/1554>
- García, A. (2021). *Análisis y selección de un sistema de protección a la corrosión en zona de salpicadura en pilotes de muelles portuarios* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio DSpace. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54737>
- Gobierno de España. (2021). *Código Estructural*. Boletín Oficial del Estado (BOE).
- Gobierno de la Ciudad de México. (2021). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto con comentarios*. Gaceta oficial de la Ciudad de México.
- Gómez De León, F. y Alcaraz, D. (2004). *Manual básico de corrosión para ingenieros*. Universidad de Murcia.
- Gómez, J. (2023). *Tipos y niveles de daño generados por sismo en edificación*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/855913/Tema_3_Evaluaci_n_de_Estructuras.pdf
- González Armijos, J. (2003). *Inspección y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado para aplicaciones portuarias* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio DSpace Espol. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4702>

- González Cuevas, Ó. M. (2002). *Análisis estructural*. LIMUSA Noriega Editores.
- González-Rabanal, M. (2021). *Los indicadores como herramienta de evaluación de los programas sociales. Algunas propuestas de aplicación en el ámbito del bienestar*. Editorial Aranzadi.
- Harrer, A. y Gaudette, P. (2019). Challenges of preserving modernist concrete. *MATEC Web of Conferences*, 289(07003), 1-5. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201928907003>
- Helal, J., Sofi, M. y Mendis, P. (2015). Non-Destructive Testing of Concrete: A Review of Methods. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 14(1), 97-105. doi:<https://doi.org/10.56748/ejse.141931>
- Hernández, Y., Troconis de Rincón, O., Torres, A., Delgado, S., Rodríguez, J. y Morón, O. (2016). Reinforcement corrosion rate and crack width relationship in concrete beams exposed to simulated marine environment. *Revista ALCONPAT*, 6(3), 271-282. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.152>
- Ho, W., Dey, P. K. y Higson, H. (2006). Multiple criteria decision making techniques in higher education. *International Journal of Educational Management*, 20(5), 319-337. DOI: 10.1108/09513540610676403
- Hornbostel, K., Danner, T. y Geiker, M. (2020). Non-destructive Test Methods for Corrosion Detection in Reinforced Concrete Structures. *Nordic Concrete Research*, 62(1), 41-61. doi:10.2478/ncr-2019-0005
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). *Marco Geoestadístico*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#descargas>
- International Atomic Energy Agency [IAEA]. (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TCS-17_web.pdf
- Koch, G., Varney, J., Thompson, N., Moghissi, O., Gould, M. y Payer, J. (2016). *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study*. NACE International. <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>
- Korec, E., Jirásek, M., Wong, H. S. y Martínez-Pañeda, E. (2023). A phase-field chemo-mechanical model for corrosion-induced cracking in reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 393, 131964. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131964>
- Macioski, G., de Souza, D. J., Capraro Brandão, A. P. y de Medeiros, M. (2016). Analysis of Steel Bars Corrosion as a Function of the Environment pH. *Revista ALCONPAT*, 6(3), 223-234. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v6i3.153>
- Mariaca, L., Genescá, J., Uruchurtu, J., Salvador, L., Veleza, L. y Maldonado, L. (1999). *Corrosividad atmosférica (MICAT-México)*. Plaza y Valdés Editores.
- Martínez-Madrid, M., Torres-Acosta, A., Castro-Borges, P., Aschermann, S., Commander, B. y Grimson, J. (2018). Load rating assessment of a corroded pier structure in the Gulf of Mexico. *Revista ALCONPAT*, 8(3), 347-362. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v8i3.323>

- McCormac, J. C. y Csernak, S. F. (2012). *Diseño de estructuras de acero* (5ª. ed.). Editorial Alfaomega.
- Mehta, K. y Monteiro, P. (2014). *Concreto. Estructura, propiedades y materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D. y Garcia, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348-360. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- Molina Gómez, J. (2007). *Diseño de sistema de protección catódica de pilotes metálicos tipo Frodingham en muelles portuarios* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio DSpace Espol. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/55901>
- Monzón Bello, P. (2012). *Determinación de la Velocidad de Corrosión en Armaduras Mediante Técnicas Cuantitativas de Análisis Electroquímico* [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de Valencia]. Repositorio Riunet UPV. <https://riunet.upv.es/handle/10251/18242>.
- Ngoc-Long, T., Van-Phuc, P. y Morozov, V. (2021). Investigating the corrosion initiation process in reinforced concrete structures under the impact of climate change. *Architecture and Engineering*, 6(2), 37-44. doi:10.23968/2500-0055-2021-6-2-37-44
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S. C. [ONNCCE]. (2004). *NMX-C-414-ONNCCE-2004 Cementos hidráulicos. Especificaciones y método de prueba*.
- _____. (2018). *NMX-C-514-ONNCCE. Industria de la construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo*.
- _____. (2014). *NMX-C-155-ONNCCE-2014 Concreto hidráulico. Dosificado en masa. Especificaciones y métodos de ensayo*.
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (1992). *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Organización Internacional de Normalización [ISO]. (2012). *Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation*.
- Ortega, F., Alonso, G., Vigil, M. y Andrés, S. (2019). Caracterización del ambiente para el proyecto de estructuras [conferencia]. *XXIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, Málaga, España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8224203>
- Peng, L. y Stewart, M. (2014). Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(4), 499-516. doi:10.1080/15732479.2013.858270
- Perepérez, B., Barbera, O. y Andrade, C. (1987). La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón. *Informes de la Construcción*, 38(388), 17-24. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/87110/1/20-11-2013-di.pdf>

- Quezada Amaya, W. (2015). *Evaluación de la infraestructura del muelle La Pitahaya del cantón Arenillas y proponga alternativas de solución* [Trabajo de grado, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio Digital Utmachala. https://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/5016/1/TTUAIC_2015_IC_CD0078.pdf
- Red Iberoamericana. (2000). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado* (3ª. ed.). Programa Iberoamericana de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. DURAR. CYTED.
- Rodríguez, J., Aragoncillo, J., Andrade, C. e Izquierdo, D. (1989). *Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura*. GEOCISA-ICCET.
- Romero, R. y León, Á. (2003). *Logística del transporte marítimo*. MARGE BOOKS.
- Rúa Costa, C. (2006). *Los puertos en el transporte marítimo*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Salinas, G. (Ed.). (2000). *Diccionario de comercio internacional. Términos marítimos, aduaneros*. <https://books.google.com.sv/books?id=8pG1q7TvkoQC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Sánchez, F. y Ortiz, A. (2019). Environmental Effects on Electronic Devices in Mexico. *Materials Sciences and Applications*, 10(3), 243-252. doi:10.4236/msa.2019.103020
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2001). *Manual de dimensionamiento portuario 2001*. Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. Gobierno de México.
- _____. (2001). Capítulo 3 Condiciones físicas. *Manual de dimensionamiento portuario*. Coordinación General de Puertos y Marina Mercante. Gobierno de México.
- _____. (2002). *N-CMT-2-02-001/02 Calidad del Cemento Portland*. Gobierno de México.
- _____. (2004). *N-CMT-2-02-005/04 Calidad del concreto hidráulico*. Gobierno de México.
- _____. (2007). *N-CMT-2-03-001/07 Acero de refuerzo para concreto hidráulico*. Gobierno de México.
- _____. (2019). *N-CMT-2-02-002/19*. Gobierno de México.
- Sotomayor, C. (2020). *Entendiendo a las fisuras y grietas en las estructuras de concreto* (Artículo técnico N°6). Consultcreto. <https://www.consultcreto.com/pdf/entendiendo.pdf>
- Toskano Hurtado, G. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Digital UNMSM. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/toskano_hg.pdf
- Treviño, E. (1998). *Patología de las estructuras de concreto reforzado. Reflexiones y recomendaciones* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Académico Digital UANL. <http://eprints.uanl.mx/6017/>
- Tsinker, G. P. (Ed.). (2004). *Port engineering Planning, construction, maintenance, and security*. John Wiley & Sons, Inc.

- Verma, S., Bhadauria, S. y Akhtar, S. (2013). Review of Nondestructive Testing Methods for Condition Monitoring of Concrete Structures. *Journal of Construction Engineering*, 23(1), 1-11. doi:<http://dx.doi.org/10.1155/2013/834572>
- Wang, X., Stewart, M. y Nguyen, M. (2012). Impact of climate change on corrosion and damage to concrete infrastructure in Australia. *Climatic Change*, 110, 941-957. doi:10.1007/s10584-011-0124-7
- Wang, X., Lee, H. y Kwon, S. (2018). Analysis of service life of cracked marine concrete considering global warming and Bruun rule. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 9(2), 61-73. <https://doi.org/10.22712/susb.20180007>

Algunas obras de los mismos autores:

- La ingeniería aplicada en el noreste de México
- Concreto verde: perspectivas de investigación
- Tópicos selectos de ingeniería y ciencias ambientales
- Ingeniería básica y de frontera con incidencia en los Programas Nacionales Estratégicos
- Investigaciones actuales en medio ambiente II
- Ingeniería, Ciencia, Tecnología e Innovación en la Cadena de Conocimiento

Consulta estos títulos dentro del catálogo de Libros UAT del Consejo de Publicaciones en el siguiente enlace:



<https://libros.uat.edu.mx>

 <https://publicaciones.uat.edu.mx>

Equipo editorial

Coordinación: Venancio Vanoye Eligio

Gestión y administración: Jessica Abigail Rodríguez Tinajero, María Teresa Maldonado Sada

Revisión y corrección de estilo: José Luis Énder Velarde García, Jorge Alberto Vázquez Herrera

Diseño y maquetación: Erika González Navarro, Wendy Castillo Cruz, Lorena E. Cortez Rodríguez

Índice de vulnerabilidad ante corrosión de estructuras de concreto reforzado de Valeria Vanessa Lugo García, René Bernardo Elías Cabrera Cruz, Julio César Rolón Aguilar, Roberto Pichardo Ramírez, autores, publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y Editorial Fontamara en agosto de 2025. La revisión y diseño editorial correspondieron al Consejo de Publicaciones UAT.

editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

El concreto reforzado es uno de los principales materiales de construcción usado a nivel mundial. El concreto simple tiene alta resistencia a la compresión, pero muy baja resistencia a la tensión. Por su parte, el acero se caracteriza por su resistencia a la tensión. La combinación de ambos materiales permite combinar (optimizar) las propiedades de dichos materiales. Una de las patologías que más afecta al concreto reforzado es la corrosión en el acero de refuerzo, que si no se interviene a tiempo, puede disminuir la vida útil de la estructura. Para determinar las acciones de intervención es necesario conocer el estado de la estructura frente al problema de corrosión. Las evaluaciones o ensayos aplicados en el concreto se clasifican en destructivos y no destructivos, de acuerdo con las alteraciones que producen. Aunque los primeros son más certeros que los segundos, estos dañan la estructura de concreto, por lo que no pueden aplicarse periódicamente. Por otra parte, se ha demostrado que en conjunto, diversos ensayos constituyen alternativas confiables que causan el menor daño y pueden implementarse regularmente (ideal para llevar un control periódico). El objetivo de este libro es presentar un manual de usuario del Índice de Vulnerabilidad Estructural ante Corrosión de Estructuras de Concreto Reforzado (IVEC) mediante la descripción de cuatro fases (selección, inspección, evaluación y recomendaciones), así como el desarrollo de fichas técnicas y formatos de evaluación.

ISBN UAT: 978-607-8888-92-4

ISBN Fontamara: 978-968-9729-02-0

ISBN 978 968 9729 02 0



9 1789689 1729020

UAT
Universidad
Autónoma de
TAMAULIPAS

Aniversario
75 UAT
1950-2025


Consejo de
Publicaciones