

Automatización del método de evaluación simplificado de corrosión de la estructura de concreto armado



Abstract

The researches to increase the durability of reinforced concrete structure and to extend the structure development have found a big trouble because its structure has the inconvenience of being potentially susceptible to be damaged by corrosion. The problem of the concrete structures degradation is serious and of major economic implications. The difficulty to assess and interpret the corrosion severity shows the importance to give a hand to the engineer, students and all the employers related in this field.

In the next chapters there is a tool who makes easier the inspection scheduling and the ability to assess the corrosion severity and solutions may use. The reader should be able to use a program manual and will find the knowledge of the corrosion fundamentals detailed.

Resumen

El esfuerzo para aumentar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado y de ampliar su desempeño estructural ha encontrado un gran obstáculo y es que la armadura que lo conforma tiene el inconveniente de ser susceptible a la corrosión. El problema del deterioro de la estructura es grave y acarrea implicaciones económicas mayores. La dificultad de evaluar y diagnosticar el grado de corrosión presenta la importancia de suministrar una ayuda a los ingenieros, estudiantes y todo el personal relacionado en este campo.

A continuación se muestra una herramienta que facilita la inspección, la habilidad para evaluar la corrosión y posibles soluciones que se puedan aplicar; así, brindar una ayuda al lector mediante un manual para utilizar el programa y los temas elementales para comprender las bases que rigen el fenómeno de la corrosión.

Automatización del método de evaluación simplificado de corrosión de la estructura de concreto armado.

ANDREA AGUILAR BRENES

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Septiembre del 2007

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

Prefacio.....	2
Resumen Ejecutivo.....	3
Concreto armado y sus componentes... 4	
Conceptos básicos de durabilidad.....	6
Fundamentos generales de la corrosión.....	9
Evaluación de estructuras de concreto armado afectadas por corrosión.....	20
Método Simplificado.....	20
Inspección Detallada.....	28
Procedimiento de los ensayos.....	31
Introducción.....	40
Metodología.....	41
Resultados.....	42
Análisis de resultados.....	59
Conclusiones.....	60
Apéndice.....	61
Anexos.....	62
Referencias.....	

Prefacio

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción en Costa Rica. Sus características mecánicas y la poca necesidad de mantenimiento lo ha hecho un material muy competitivo que destaca entre otros. Sin embargo en ambientes muy agresivos, su durabilidad se acorta debido a la corrosión de la armadura de acero, esto hace que el pensamiento de la durabilidad del concreto ya no sea tan extensa.

La existencia de estructuras revela la importancia de brindar una herramienta que facilite la inspección, evaluación y posibles soluciones posibles al inminente problema de la corrosión de las estructuras de concreto armado.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una herramienta computacional en Visual Basic para la evaluación simplificada de la corrosión de estructuras de concreto. Además que esta herramienta sea sencilla para el usuario que lo permita facilitar el aplicar el método simplificado y la inspección detallada.

Finalmente quiero agradecer al profesor Gustavo Rojas por toda la ayuda brindada para realizar este proyecto y el software computacional.

A mi familia que siempre acompañan mis retos.

A Gustavo Serrano mi novio y amigo por la ayuda incondicional en la elaboración de este proyecto.

Resumen ejecutivo

La creación de este programa computacional pretende ser una ayuda para facilitar la evaluación y automatizar el Método Simplificado y la Inspección Detallada de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado.

La presencia de la corrosión en las estructuras de concreto armado es un problema que siempre esta presente; la poca información sobre el tema dificulta la evaluación y, por ende, las formas de tratarlas y en que tiempo es adecuado hacerlo.

Se analizaron los datos de una investigación de una estructura de concreto en mampostería, para evaluar la corrosión de la estructura con la ayuda del programa creado.

Con la ayuda del programa se determinó la evaluación de la estructura citada, dando como análisis una corrosión severa, un concreto de poca durabilidad y una urgencia de intervención de dos a cinco años.

Como resultado del análisis se presenta un informe final, que facilita la lectura de los resultados e información suministrada al programa.

Por último en el apéndice se presenta el Manual de Usuario que facilita el uso del programa computacional denominado ECECA "Evaluación de la Estructura de Concreto Armado".

Concreto Armado y sus componentes

En Costa Rica es fácil notar que uno de los materiales más utilizados en la construcción es el concreto armado. Esta rápida difusión del uso del concreto armado se ha debido en, gran medida, al complemento de propiedades de dos materiales: acero y concreto, que reunidos en un material compuesto, le dotan de la destacada resistencia a la tracción del primero y la buena resistencia a la compresión del segundo.

Concreto¹

El concreto es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante una mezcla cuidadosamente proporcionada de cemento, arena, grava u otro agregado, y agua; después, esta mezcla se endurece en formaletas con forma y dimensiones deseadas. El cuerpo del material consiste en agregado fino y grueso. El cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conformar una masa sólida. Es necesario agregar agua, además de aquella que se requiere para la reacción química, con el fin de darle a la mezcla la trabajabilidad adecuada que permita llenar las formaletas y rodear el acero de refuerzo embebido, antes de que inicie el endurecimiento. Se pueden obtener concretos en un amplio rango de propiedades ajustando apropiadamente las proporciones de los diferentes materiales constitutivos. Un rango aún más amplio de propiedades puede obtenerse mediante la utilización de cementos especiales (cementos de alta resistencia inicial), agregados especiales (los diversos agregados ligeros o pesados), aditivos (plastificantes y agentes incorporadores de aire, microsílíce o cenizas volantes) y mediante métodos especiales de curado.

Los factores que hacen del concreto un material de construcción universal son tan evidentes que ha sido utilizado de diversas maneras por miles

¹ Arthur H. Nilson, "Diseño de Estructuras de Concreto", Pág. 1

de años; probablemente se comenzó a usar en el antiguo Egipto. A continuación se hace una breve descripción de los componentes del concreto:

Cemento²

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuadas.

Esta categoría, tecnológicamente importante de materiales, incluye no sólo el cemento sino también limos, asfaltos y alcritanes, tal como se usa en la construcción de carreteras y otros. Para la fabricación del concreto estructural se utilizan exclusivamente los llamados hidráulicos. Para completar el proceso químico (hidratación), mediante el cual el polvo de cemento fragua y endurece para convertirse en una masa sólida, se requiere la adición de agua. De los diferentes cementos hidráulicos desarrollados el cemento Pórtland, patentado por primera vez en Inglaterra en 1824, es el más común de todos.

Existen diferentes tipos de cemento Pórtland en el mercado, los cuales están clasificados de acuerdo a la norma C 150 de la ASTM (American Society for Testing and Materials)³, como se muestra en el cuadro 1.

2. Agregados³

Para concretos estructurales comunes, los agregados ocupan entre el 70 y 75 por ciento del volumen de la masa endurecida. El resto está conformado por la pasta de cemento endurecida, agua no combinada, es decir, agua no utilizada en la hidratación del cemento y vacíos de aire. Evidentemente, los últimos dos no contribuyen a la resistencia del concreto. En general, mientras

² Arthur H. Nilson, "Diseño de Estructuras de Concreto", Pág. 28

³ Arthur H. Nilson, "Diseño de Estructuras de Concreto", Pág. 29

más densamente pueda empaquetarse el agregado, mejor será el refuerzo, la resistencia a la intemperie; que su superficie esté libre de impurezas como arcillas, limos o materia orgánica las cuáles pueden debilitar la unión con la pasta de cemento; y que no produzca una reacción química desfavorable entre éste y el cemento. Los agregados naturales se clasifican en finos y gruesos. Un agregado fino o arena es cualquier material que pasa el tamiz No. 4 (con cuatro aberturas por pulgada lineal). El material más grueso que éste se clasifica como agregado grueso o grava. Cuando se desea una gradación

CUADRO 1. TIPOS DE CEMENTO PORTLAND	
Cemento	Uso
Tipo I	Cemento de uso general
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas concentradas.

óptima los agregados se separan mediante tamizado en dos o tres grupos de diferente tamaño para las arenas y en varios grupos de diferente tamaño para las gravas; posteriormente estos pueden combinarse de acuerdo con tablas de gradación que permiten obtener un agregado densamente empaquetado. El tamaño máximo de agregado grueso para concreto reforzado está controlado por la facilidad con que éste debe

entrar en las formaleas y en los espacios entre las varillas de refuerzo.

El peso unitario del concreto normal (el concreto con agregados de piedra naturales) varía aproximadamente entre 2250 y 2450 kg/m³ y puede generalmente promediarse 2300 kg/m³.

Aditivos⁴

Además de los principales componentes del concreto, usualmente se utilizan aditivos para mejorar el comportamiento del mismo. Existen aditivos para acelerar o retardar el fraguado y el endurecimiento, para mejorar la manejabilidad, para aumentar la resistencia, para mejorar la durabilidad, para disminuir la permeabilidad y para proporcionar o afectar otras propiedades.

Los agentes incorporadores de aire son, en la actualidad, los aditivos más ampliamente utilizados. Ellos producen la inclusión de aire en el concreto en forma de pequeñas burbujas dispersas. Esto mejora la manejabilidad y la durabilidad (principalmente la resistencia al congelamiento y a la abrasión) y reduce la segregación durante la colocación. Estos aditivos disminuyen la densidad del concreto debido a que aumentan la relación de vacíos y, por tanto, disminuyen su resistencia; sin embargo, esta disminución puede balancearse parcialmente mediante la reducción del agua de mezcla sin que pierda manejabilidad.

Los aditivos acelerantes se utilizan para reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo inicial de la resistencia. El más utilizado es el cloruro de calcio; debido a su bajo costo; pero debe ser utilizado con precaución en concreto preesforzado o en concreto reforzado en ambientes húmedos, debido a su tendencia a suscitar la corrosión del acero. Existen aditivos acelerantes patentados, sin cloruros y sin agentes corrosivos.

Los aditivos retardantes del fraguado se utilizan principalmente para contrarrestar los efectos acelerantes de altas temperaturas ambientales y para mantener la trabajabilidad del concreto durante todo el período de colocación. Esto ayuda a eliminar el agrietamiento debido a deflexiones de la formalea y también mantiene la trabajabilidad del concreto permitiendo el vaciado de concreto adicional sin el desarrollo de juntas frías.

⁴ Arthur H. Nilson, "Diseño de Estructuras de Concreto", Pág. 28

Acero de refuerzo⁵

El acero para reforzar concreto se utiliza en distintas formas; la más común es la varilla que se fabrica tanto de acero laminado en caliente, como de acero trabajado en frío.

La mayoría de las varillas tienen corrugaciones para mejorar su adherencia al concreto.

El acero de refuerzo es una aleación, que generalmente tiene un acabado superficial en relieve llamado corrugado.

El uso del acero de refuerzo ordinario es común en elementos de concreto presforzado. Este acero es muy útil para:

- Aumentar ductilidad
- Aumentar resistencia
- Resistir esfuerzos de tensión y compresión
- Resistir cortante
- Resistir torsión
- Restringir agrietamiento
- Reducir deformaciones a largo plazo
- Confinar el concreto

Los esfuerzos de fluencia más utilizados son de 40 y 60 ksi (2800 y 4200 kg/cm²).

Las varillas de refuerzo con esfuerzos de fluencia de 40 klb/pulg², de uso estándar 25 años atrás, han sido remplazadas casi en su totalidad por varillas con esfuerzos de fluencia de 60 klb/pulg², debido a que éstas últimas son más económicas y tienden a reducir la congestión del acero en las formaletas.

El acero de refuerzo o armadura es el componente metálico embebido en la masa de concreto que le proporciona resistencia a la tracción. Cuando el concreto se prepara correctamente, debido a su elevado pH (12.5 a 13.5, aproximadamente) mantiene a las armaduras en estado pasivo, y garantiza así una protección química que prolonga su vida útil. Por otro lado, el concreto supone un impedimento físico a la penetración por difusión de oxígeno, humedad, cloruros, anhídrido carbónico y otras sustancias agresivas hasta la superficie del acero. Cuando estas condiciones no se satisfacen, el concreto se hace más permeable a agentes agresivos que ocasionan problemas de corrosión y causan su pronto deterioro.

⁵ Angélica del Valle Moreno, El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto armado, Pág. 40

Conceptos básicos de la durabilidad de las estructuras de concreto armado

a. Funcionalidad y durabilidad

La funcionalidad está en función de la capacidad de la carga de estructura. La funcionalidad se puede cuantificar con el tiempo que se pretende dure la estructura. Cuando el concepto de tiempo entra en juego en la evaluación de la funcionalidad de una estructura, varios factores externos resultan en primer plano (medio ambiente, tipo de cargas y otros). Como la funcionalidad está íntimamente relacionada con la durabilidad de una estructura, esta se puede definir como la habilidad de mantener la funcionalidad requerida⁶.

b. Degradación

El concepto de degradación es, por definición, el decremento gradual de la funcionalidad de la estructura con el tiempo. Se puede cuantificar a la degradación como el inverso de la funcionalidad.

c. Vida útil

El reporte de la Red Temática DURAR⁷ propone una definición clara para el concepto de vida útil de una estructura: "periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento." Es decir, si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética), ésta ya sobrepasó el periodo de su vida útil. En el diseño de estructuras por durabilidad el requerimiento de la vida útil de la estructura puede ser definido de antemano por el cliente, por lo que se le llamará vida útil de servicio. Así Tuutti⁸ estableció su conocido modelo que se muestra en la Figura 1.

⁶ Andrés Torres Acosta, Diseño de Estructuras de Concreto con Criterios de Durabilidad, Pág. 13

⁷ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 21.

⁸ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 21

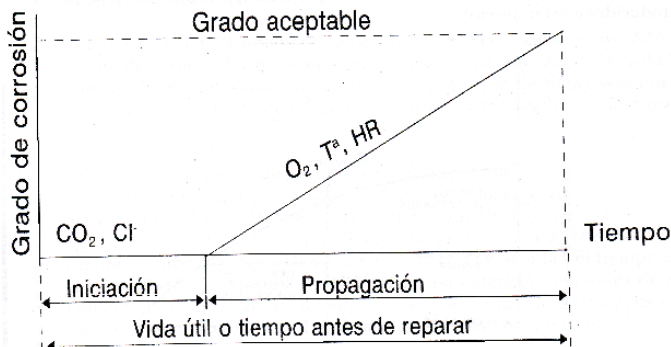


Figura 1 Modelo de Vida útil de Tutti. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Este modelo está desarrollado específicamente para el caso de la corrosión de armadura. En el modelo se distinguen dos períodos:

1) Período de iniciación de la corrosión:

Es el tiempo que tardan los cloruros o la carbonatación en llegar hasta la armadura y despasivarla.

2) Período de propagación:

Es el tiempo en el cual la armadura se corroe libremente, hasta que llega a un grado de deterioro inaceptable desde el punto de vista de la seguridad y funcionalidad o estética.

d. Vida residual

“Se entiende por vida residual el tiempo a partir del momento en que la estructura alcanza el límite inaceptable”⁹, es decir cuando llega al final de la vida útil. Este es el periodo en el que la estructura necesitaría reparación, remodelación o completa renovación para que regrese a su estado de servicio original; esto es que sea segura, funcional y estética. En pocas palabras, la etapa de vida residual es el tiempo que tiene el dueño de la estructura, o elemento estructural, para repararla antes que la degradación avance hasta el límite de posible colapso.

La Figura 2. presenta un esquema de la tendencia progresiva de degradación en su capacidad portante de una estructura que se está corroyendo y que corresponde a lo que sería su vida residual.

⁹ Angélica del Valle Moreno, El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto armado, Pág. 45

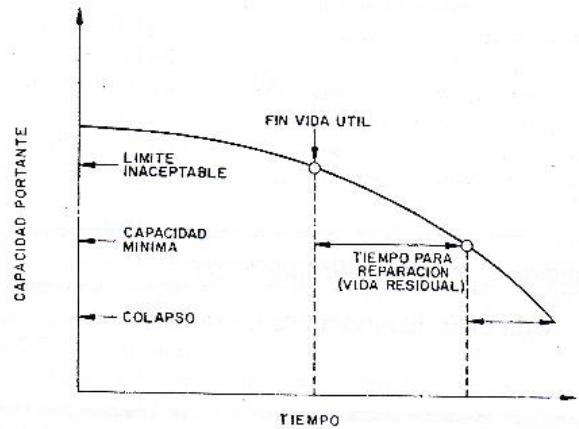


Figura 2 Modelo de Vida Residual. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Los daños por durabilidad en la infraestructura han afectado las estructuras de concreto en su desempeño estructural y, en ocasiones, también tienen repercusiones económicas que son puntos clave para determinar la rentabilidad de un proyecto. En el artículo “El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto armado” se analizan las ventajas de aprovechar y aplicar en la práctica constructiva el diseño por durabilidad de una estructura de concreto. Se presenta la filosofía del diseño por durabilidad, una herramienta y concepto tecnológico que bien aplicado, puede conducir a la industria de la construcción a tener un mejor desempeño y optimización de materiales durante el siglo XXI, logrando con esto construir estructuras con una mayor vida útil y menores costos de mantenimiento, con la finalidad de que la construcción participe en mayor medida en el desarrollo sustentable de nuestro país.

Históricamente¹⁰, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; así, se han logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio; sin embargo, se han encontrado problemas relacionados con el medio ambiente en el que se encuentra la estructura. Era inminente la necesidad de investigar las razones del porqué del deterioro del concreto y

¹⁰ O. Hernández-Castañeda y C.J. Mendoza-Escobedo, Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, Pág. 58.

solucionar problemas prácticos. Se plantearon varias preguntas:

¿Cómo evitar el deterioro del concreto? ¿Cómo eliminar la corrosión? ¿Cómo lograr un concreto durable? ¿Cómo construir un puente o pavimento que resista satisfactoriamente las condiciones agresivas? ¿Cómo evitar costos de mantenimiento periódicos en estructuras marinas o ubicadas en ambientes agresivos? ¿Cómo lograr pisos industriales que resistan cargas excesivas?

De ahí se derivó el interés de estudiar la relación y los factores que interactúan entre el concreto y su entorno; la rama de la tecnología del concreto que resuelve estos problemas prácticos es la durabilidad del concreto.

Los primeros problemas de durabilidad surgieron antes de la mitad del siglo XX, por lo que la problemática no es nueva; no obstante, las obras que se han realizado las décadas más recientes siguen presentando problemas de esta naturaleza, ya que no se ha difundido lo suficiente, por que significa generalmente un costo inicial mayor.

El inversionista o el contratista confunden un concreto económico con uno barato. Un concreto barato puede ser resistente ante sus solicitaciones de carga, pero no necesariamente es un concreto durable, que a largo plazo, por el mantenimiento requerido, puede resultar en un mayor costo. Por su parte, un concreto resistente y durable puede implicar un costo inicial mayor, pero a posteriormente representará ahorros considerables.

En las obras de importancia nacional, empresarial o personal, es necesario considerar la durabilidad del material con el que se pretende construir una estructura. Lo cual significa construir responsable, profesional e inteligentemente.

Asimismo, es primordial considerar la durabilidad de las obras de concreto, ya que de ellas dependen las condiciones y el grado de deterioro que alcanzará el concreto ante el medio ambiente al que se encuentra expuesto. Dadas las diferencias climáticas de cada región y a las diversas condiciones de servicio, es necesario investigar el efecto que tendrán en los materiales empleados y para las condiciones particulares de cada obra. Las diferentes aplicaciones que tiene el concreto también requieren distintas concepciones de durabilidad, de acuerdo con la naturaleza del uso y agresividad del medio ambiente: una cimentación expuesta a sulfatos

requiere otros aspectos por cuidar que en un reactor nuclear o en una plataforma marítima.

La durabilidad es una propiedad importante del concreto, es indispensable que tenga la calidad y capacidad para resistir las condiciones de servicio.

El ACI-201 (1997) la define como: *“la habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente”*. Se evalúa *“en función de su capacidad para resistir las acciones de deterioro derivadas de las condiciones de exposición y servicio a que está sometida”* (ACI,1996).

La corrosión en las estructuras de concreto armado, es una de las principales causas del por que la vida útil de las estructuras se disminuye. Y al mismo tiempo la durabilidad y la funcionalidad también disminuyen, es decir el tiempo de degradación aumenta.

Fundamentos de Corrosión

La mayoría de las estructuras de concreto están reforzadas con armaduras de acero. La corrosión del refuerzo es una de las principales causas del deterioro de las estructuras.

Se puede definir corrosión como el deterioro que sufre un material en sus propiedades debido a una reacción con el medio, en el caso del concreto reforzado el concreto le brinda al acero una doble protección; por una parte es una barrera física que los separa del medio ambiente, y por otra, el líquido encerrado en los poros del hormigón es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivación) de forma duradera¹.

Corrosión de la armadura en el concreto¹¹

La corrosión de la armadura en el concreto consiste en la oxidación destructiva del acero, por el medio que lo rodea. En ella pueden tener lugar procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que tenemos una celda galvánica o pila.

Ahora bien, aunque la potencialidad para la corrosión electroquímica puede existir debido a la

falta de uniformidad del acero en el hormigón, la corrosión normalmente se previene por la formación de esa película de óxido de hierro "pasivante" mencionada anteriormente. Pero, cuando las condiciones de servicio cambian y el hormigón se altera o a través de él penetran sustancias

¹¹ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 18.

Generales de

agresivas se desencadenan con una triple consecuencia

1. El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido,

2. El hormigón puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.

3. La adherencia armadura-hormigón disminuye o desaparece.

Tipos de corrosión¹²

En el concreto reforzado, las formas que puede adoptar la corrosión de la armadura son diversas. Los tipos de corrosión son los siguientes:

1. Corrosión localizada: Se subdivide en las siguientes.

a. Corrosión por picaduras.

Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva. Típicamente resultan del ingreso de iones cloruro al medio, bien sea porque provienen del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa del hormigón.

¹² Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 21.

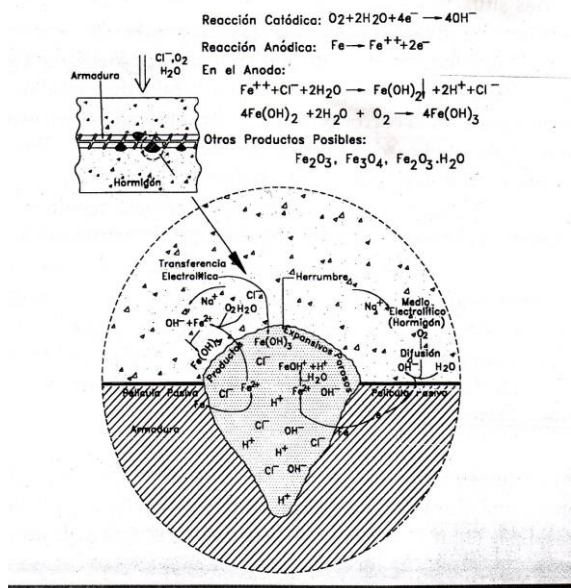


Figura 3. Mecanismo de Corrosión por Picadura de la Armadura. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

b. Corrosión en espacios confinados.

La corrosión de este tipo puede ocurrir cuando sobre la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente resguardado que evita el acceso continuo del oxígeno a esa zona, la cual pudiese crear celdas diferenciales de oxígeno que inducen a la corrosión del refuerzo.

En la siguiente figura se muestra una serie de eventos propuestos para el progreso de la corrosión en armaduras cubiertas con epóxicos, sujetas a condiciones muy corrosivas.

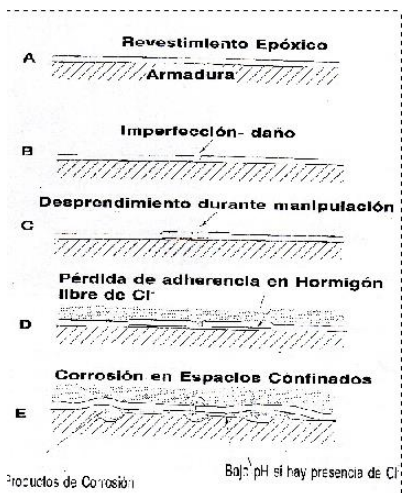


Figura 4 Resumen de etapas en el Mecanismo de Corrosión por Espacios Confinados. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

c. Corrosión bajo tensión

Este tipo de corrosión ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzos de tracción sobre el acero y un medio agresivo. Esto ocurre preferencialmente en hormigón pre o postensado, donde se utilizan aceros de alta resistencia, en general, a la presencia de hidrógeno atómico difundido a través del metal. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico, generalmente asociado a una mala calidad del hormigón.

d. Corrosión por corrientes de interferencia

Las corrientes de interferencia, llamadas también vagabundas, erráticas o de fuga, pueden ser definidas como las corrientes que fluyen en una estructura y que no forman parte del circuito eléctrico/celda electroquímica específica. Para que ocurra corrosión por corrientes de interferencia debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico

Entre las fuentes más comunes de este tipo de corrientes están los sistemas de protección catódica que operan en las cercanías de la estructuras de hormigón armado, especialmente en medios de muy baja resistividad, como lo es el agua salobre; el sistema de potencia eléctrica, como los trenes eléctricos; máquinas de soldar, donde la estructura conectada a tierra se encuentra a cierta distancia de los electrodos de soldar; las corrientes telúricas (asociadas a la actividad solar y al campo magnético de la Tierra). Independientemente de la fuente, las corrientes que fluyen en un medio electrolítico son manifestaciones de diferencias de voltaje.

2. Corrosión Uniforme/Generalizada

La corrosión uniforme es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, que resulta de la carbonatación del hormigón y/o presencia de excesiva cantidad de iones cloruro. También puede ocurrir por efecto de la lixiviación del hormigón producida por la percolación y/o lavado por aguas puras o ligeramente ácidas.

La figura 5 muestra un ejemplo específico, donde se puede observar el mecanismo mediante el cual ocurre corrosión por efecto de la carbonatación.

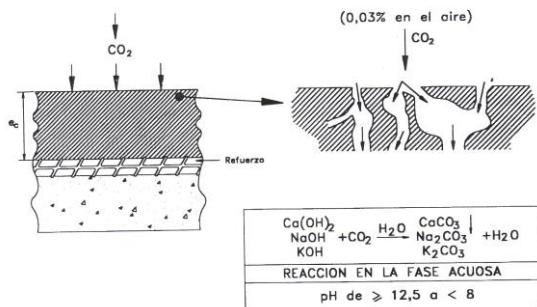


Figura 5. Mecanismo de Corrosión Uniforme de la Armadura en Hormigón. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

3. Corrosión Galvánica

Este tipo de corrosión se puede dar cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico. En el caso del acero en el concreto, esta situación se dará cada vez que en alguna zona se dañe o no se forme la película pasiva característica. También se podrá presentar cuando el refuerzo se encuentre en contacto con otros conductores más nobles. Un ejemplo es el caso de armaduras exteriores que se corroen al ingresar los cloruros, mientras que las armaduras interiores permanecen pasivas.

Factores que afectan y desencadenan la corrosión de las armaduras ¹³

Existen varios factores que afectan o desencadenan la corrosión. Algunas de ellas son la dosificación, la compactación y la homogeneidad del hormigón. Los factores que desencadenan con más frecuencia son: altas tensiones mecánicas en el acero y las corrientes erráticas o de interferencia. A continuación se da una breve explicación sobre estos factores.

1. Dosificación del concreto.

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, la protección de la armadura de acero de las acciones agresivas de los agentes externos.

El concreto que envuelve las varillas de acero debe cumplir una doble función protectora: a) como barrera física que se opone al ingreso de

¹³ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, pag 28.

los agentes agresivos externos y b) crean así una capa pasivante sobre el acero. Por lo tanto, el recubrimiento del acero es determinante dosificarlo por métodos que proporcionen su máxima compactación, lo que significa su mínima porosidad.

La porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de vector de transferencia de los elementos agresivos externos.

2. Compactación y homogeneidad

La compactación se mide como la relación entre la suma de los volúmenes absolutos de materias sólidas (grava, arena y pasta de cemento endurecida) contenida en un metro cúbico de hormigón, referido al volumen aparente del mismo. Es la propiedad del concreto más importante a los efectos de su resistencia, a la penetración de los agentes agresivos externos, es inversamente proporcional a la porosidad.

La compactación es función principalmente de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos. Sin embargo, la compactación puede afectarse por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta la homogeneidad del concreto y propicia la segregación de los materiales. De igual manera, la segregación puede producirse por un procedimiento deficiente en la colocación del concreto y/o inadecuado proceso de compactación.

Por otra parte, la homogeneidad del hormigón es la cualidad por la cual los distintos componentes del mismo aparecen igualmente distribuidos en toda su masa, lo cual permite que dos muestras tomadas de distintos lugares resulten prácticamente iguales. El concreto, por su origen, es un material heterogéneo, pero se puede lograr su homogeneidad mediante un adecuado proceso tecnológico de producción, transporte, colocación, compactación y curado.

De tal manera que un concreto que tenga una adecuada compactación y homogeneidad garantizaría la protección de la armadura.

3. Espesor de Recubrimiento del Concreto. ¹⁴

El recubrimiento es parte fundamental de la protección de la armadura, esta masa de concreto no siempre cumple con sus funciones específicas porque suele ser menos compacta y

¹⁴ Manual ACI 357

porosa que el resto del volumen que constituye el elemento. La principal causa de este fenómeno es una mala compactación del concreto.

El espesor de la capa de recubrimiento es importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto. Existen normas internacionales en las que se especifican los espesores adecuados de acuerdo con la agresividad ambiental, por ejemplo el manual ACI 318¹⁵ recomienda un mínimo de 4cm (aproximadamente 1½ pulgada) de recubrimiento para la mayoría de las estructuras y lo incrementa a 2 pulgadas (aproximadamente 5cm) de recubrimiento para la protección contra las sales del deshielo. El ACI 357 recomienda 2 ½ pulgadas (aproximadamente 6cm) de recubrimiento mínimo en ambientes marinos.

4. Humedad Ambiental

La presencia del agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos. El agua es el medio en que los iones se movilizan a través del electrolito. En el concreto seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasivante del acero, por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de humedad en los poros del concreto, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser, en principio, las velocidades de corrosión.

5. Efecto del Oxígeno

El proceso de corrosión no se desarrolla sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta "aireación" de las mismas.

Se ha considerado que el acceso o flujo de oxígeno es el factor determinante de la velocidad de corrosión. Así, se piensa a menudo que el espesor del recubrimiento influye mucho en el acceso de oxígeno y se han realizado múltiples trabajos para medir la permeabilidad del concreto, al oxígeno, al aire o a los gases. Pero el estado actual de conocimientos descarta esta hipótesis, por lo que no son válidas las extrapolaciones al fenómeno de corrosión de las armaduras de los ensayos de permeabilidad del concreto, cuando se utiliza la presión mecánica como fuerza impulsora de los gases.

Si el flujo de oxígeno fuera el factor determinante de la velocidad de corrosión, sin duda ésta debería ser mayor en un concreto seco que en un concreto húmedo donde el flujo de oxígeno es menor, ya que éste tiene que disolverse previamente en el agua contenida en los mismos. No obstante, la evidencia experimental muestra claramente que la velocidad de corrosión es máxima cuando los poros tienen suficiente agua, sin llegar a saturarse, como para facilitar los procesos de corrosión.

6. Efecto de la temperatura

La temperatura juega también un doble papel en los procesos de deterioro. Por una parte su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias; por otra, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material. Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura. Existe un efecto opuesto entre humedad y temperatura, ya que al aumentar esta última se evapora humedad y cuando desciende, condensa agua líquida en los capilares.

Finalmente, es importante destacar que estos tres factores ambientales (humedad, oxígeno y temperatura) tienen efectos contrapuestos y que, por tanto, no es fácil predecir la evolución del proceso de corrosión del acero a partir de uno sólo. Esta característica del "efecto inversor" (por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión pero impide el acceso del oxígeno, o bien una mayor temperatura acelera la corrosión pero disminuye la condensación) lleva a múltiples predicciones erróneas del comportamiento de las armaduras.

¹⁵ Manual ACI 318

7. Estado superficial del acero

La superficie del acero es la primera interfase con el medio, su estado superficial afectará las reacciones que tendrán lugar en contacto con él. En términos generales, el acero cuya superficie posee la cubierta de óxidos provenientes del proceso de conformado se presenta menos reactivo que aquel cuya superficie está libre de dicha capa.

8. Tensiones Mecánicas del acero

Donde haya ciertos iones despasivantes (SCN^- , S^{2-} , Cl^-), existe el riesgo de una corrosión bajo tensión. Este tipo de corrosión se caracteriza por incubar grietas no visibles al ojo humano, que se propagan con relativa rapidez hacia el interior. Alcanzada una pérdida de sección crítica, la varilla se rompe de forma frágil.

Los aceros de pre- y postensado contienen alrededor del 0,8% de carbono y suelen estar sometidos a tensiones entre el 60 y el 80% de su límite elástico. Estas elevadas tensiones no representan ningún riesgo si el acero está exento de imperfecciones y de óxidos superficiales y si el concreto que lo rodea es de alta calidad.

9. Corrientes erráticas o de interferencia

Las corrientes erráticas o de interferencia son aquellas que, por diversas causas, abandonan sus circuitos naturales para circular por el medio en el que se encuentran los conductores, y siguen así caminos no previstos. En el caso de estructuras de concretos armado se ha demostrado que este efecto es importante para acelerar un proceso de corrosión ya iniciado por otros factores, como por ejemplo, concretos ya contaminados por iones cloruros o carbonatados. Es importante tomar en cuenta este efecto en estructuras enterradas o sumergidas que son los lugares potencialmente factibles para que existan corrientes capaces de acelerar la corrosión de las armaduras. Esto induce a un rápido incremento en la disolución localizada del material, pudiendo llegar a ser un daño catastrófico.

10. Contacto galvánico entre dos metales

El contacto de las armaduras con otros metales no suele ocasionar su corrosión en ausencia de agentes desencadenantes. Sin embargo, deberá evitarse este contacto, pues podrían existir determinadas circunstancias que sitúen al acero en condiciones más favorables para la

despasivación, si los otros metales lo polarizaran hacia potenciales más anódicos.

11. Iones despasivantes

De los iones despasivantes, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación del refuerzo. Los iones sulfato intervienen en la degradación del concreto, lo cual puede permitir que la armadura se exponga al medio, produciéndose así su corrosión.

A continuación se exponen estos dos tipos de iones despasivantes:

a. Cloruros

Provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) que pueden reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos.

Los cloruros pueden encontrarse en la masa del concreto por dos causas: porque los contengan las materias primas (aditivos, agua, cemento o áridos) o porque penetren desde el exterior al estar situada la estructura en ambientes marinos o estar sometida a la acción de sales del deshielo.

b. Sulfatos

El ion sulfato (SO_4^{2-}) puede estar presente en las aguas residuales industriales en forma de solución diluida de ácido sulfúrico; en las aguas del subsuelo, pocas veces aparece el sulfato en forma iónica, siendo mucho más frecuentes sus sales, es decir, los sulfatos.

El ion sulfato forma sales. Los sulfatos perjudiciales para el concreto se encuentran preferentemente en los terrenos arcillosos o en sus capas freáticas. Los sulfatos más peligrosos para el cemento Portland son los amónicos, cálcico, magnésicos, y sódicos.

La presencia de sulfatos en el agua que está en contacto con una pasta endurecida de cemento, puede incrementar considerablemente la solubilidad de los componentes de dicha pasta y causar, por una parte el desarrollo de la degradación del concreto por lixiviación.

12. Carbonatación

Se denomina así al proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y da lugar a una neutralización de todo el material. Cuando este frente llega hasta la armadura, se despasiva de forma generalizada como consecuencia de la disminución del pH.

La velocidad de avance de este frente carbonatado es también de vital importancia para calcular el tiempo que tardará en llegar hasta la armadura. La velocidad de avance es función fundamentalmente del contenido de humedad del concreto de su porosidad (relación a/c) y del contenido de material alcalino carbonatable.

El contenido en humedad resulta crucial, si los poros están completamente secos, el CO₂ no podrá reaccionar y, si están completamente saturados, su penetración será lentísima, debido a la baja solubilidad del CO₂ en el agua. Sólo cuando los poros están parcialmente llenos de aguas (entre 50 y 80%) es cuando se dan las condiciones óptimas para la carbonatación.

La porosidad del concreto es también un parámetro muy importante, ya que los poros capilares de menor tamaño están generalmente siempre saturados de humedad y, por tanto, inaccesibles a la carbonatación. Los concretos porosos se carbonatan a gran velocidad.

Finalmente, el contenido en óxidos de calcio, sodio y potasio son los materiales susceptibles de carbonatarse. Cuanto mayor sea su contenido, menor será la velocidad de carbonatación, de ahí que los cementos Pórtland sin adiciones sean generalmente más resistentes a la carbonatación.

13. Lixiviación por Aguas Blandas

La degradación de concreto también puede ser causada por aguas totalmente puras, libres de sales; blandas que tengan pocas impurezas; aguas de condensación industrial, de fusión de glaciares, de nieve, de lluvia, pantanosas blandas y algunas aguas procedentes de grandes profundidades. El concreto es rápidamente atacado por las aguas blandas agresivas, las cuales tienden a disolver el calcio de la estructura.

La lixiviación del hidróxido de cálcico del concreto, es decir, la reducción de su contenido de CaO, conduce, por lo tanto, a la destrucción de los restantes componentes del concreto, silicatos, aluminatos y ferritos hidratados; como consecuencia, el concreto pierde su resistencia y se desmorona.

14. Existencia de Fisuras.

Las fisuras estructurales (transversales a la armadura) pueden constituir en principio un camino rápido de llegada a los agresivos hasta la misma, dependiendo de su abertura.

Las fisuras del concreto, originadas por solicitaciones mecánicas sobre la estructura, se disponen, en general, en planos ortogonales a las armaduras principales, puesto que éstas se colocan precisamente para absorber las tensiones de tracción que el concreto por si solo no puede soportar.

Las fisuras que acompañan las armaduras en su misma dirección son, en general, resultantes de un proceso de corrosión ya iniciado. Pueden sin embargo, aparecer también por procedimientos constructivos incorrectos, con una retracción de fraguado en ciertas condiciones, estribos con muy bajo rendimiento, estados tensionales de compresión elevados por efecto del módulo de Poisson.

Métodos de prevención y protección contra la corrosión¹⁶

Diversos métodos se han utilizado para proteger al concreto de la corrosión, comenzando por la calidad de los constituyentes de la mezcla (controlando las propiedades físico-químicas). Indirectamente, se puede minimizar la corrosión con pinturas, revestimientos del acero y recubrimientos sobre el concreto, con protección catódica, agregando inhibidores de corrosión, removiendo los iones cloruros y realcalinizando el concreto. A continuación se describen brevemente estas técnicas de protección:

1. Protección directa del acero¹⁷

a. Recubrimientos

Los recubrimientos más utilizados en el campo son los epóxicos y los galvanizados.

El recubrimiento epóxico protege por barrera, de ahí que cualquier poro en el revestimiento es perjudicial para la protección del acero, los resultados sobre el particular no han sido muy

¹⁶ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 47.

¹⁷ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 48.

halagadores y actualmente existen muchas estructuras donde este método ha sido aplicado, que muestran corrosión severa de la armadura, con el agravante de que el uso de cualquier otro sistema de control incluyendo la protección catódica podría no ser efectivo si el armadura no se le elimina el recubrimiento.

El zinc, en general, protege al acero por un mecanismo de sacrificio. Ahora bien, en un medio alcalino como el del concreto, el zinc fundamentalmente protege por formación de una capa compacta de productos de corrosión. Si hay un riesgo de ataque por cloruros es, pues, importante que la capa de zinc puro galvanizado tenga un espesor mínimo de alrededor de $50\mu\text{m}$ y que la capa aleada Fe-Zn sea lo más pequeña posible.

b. Protección Catódica

EL fundamento del método consiste en situar el potencial de la armadura y por debajo del potencial de la armadura por debajo del potencial de la picadura. Consiste en la aplicación de corriente continua entre la armadura (conectada al polo negativo de la fuente de tensión, o cátodo) y un electrodo auxiliar externo (que actúa como ánodo).

Este es el único sistema de verdadero control de la corrosión, ya que permite que la armadura se comporte como cátodo, por lo que se ha demostrado su gran utilidad en estructuras de concreto reforzado existentes, aun cuando en los últimos años se ha estado aplicando en estructuras nuevas. En la práctica, en general, por razones técnicas y económicas, no se llega a detener la corrosión, sino a alcanzar una disminución que garantice el tiempo de servicio. La protección catódica se puede aplicar por ánodos de sacrificio como se muestra en la figura 6. o por corriente impresa figura 7, siendo este último sistema el más usado a nivel mundial.

Los sistemas de protección catódica por corriente impresa¹⁸ utilizan una fuente externa de corriente DC y una serie de ánodos alrededor de la estructura, que distribuyen la corriente necesaria, para vencer la actividad corrosiva en el acero de refuerzo. Este sistema puede ser una buena opción, en la protección de áreas extensas, aun cuando requiere un mantenimiento y monitoreo constante durante su vida de servicio.

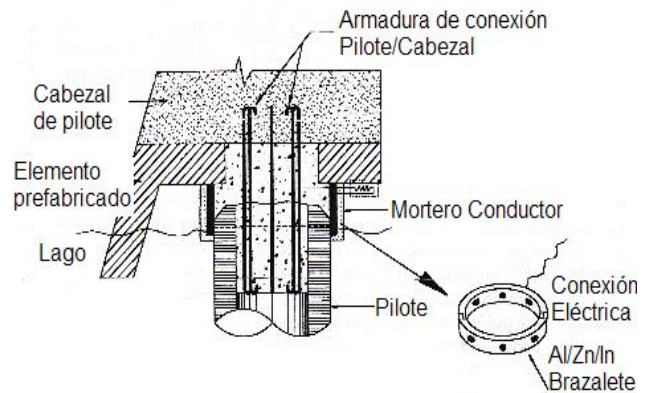


Figura 6. Protección catódica por ánodos de sacrificio de la armadura que une un pilote con su cabezal. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

La protección por ánodos de sacrificio implica la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como el ánodo. También se ha usado para protección de tuberías de concreto reforzado y pretensado en suelos de baja resistividad. En el caso de corriente impresa el ánodo podría ser cualquier material, ya que se utiliza una fuente de energía de corriente continua para inducir corriente que entra en la estructura a proteger, haciéndola cátodo. Sin embargo, en el caso de la protección del acero en concreto en estructuras aéreas, es necesario el uso de materiales (que van a actuar como ánodos) que no produzcan deterioro del concreto, por lo cual deberían ser inertes o con muy bajas velocidades de corrosión.

¹⁸ Vector Corrosion Technologies

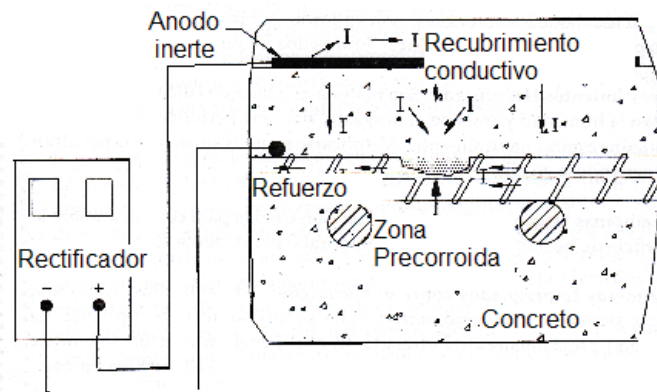


Figura 7 **Protección catódica por corriente impresa.** Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

2. Protección indirecta a través del concreto

a. Morteros de reparación

Son materiales constituidos por una mezcla de agregado fino seleccionado y un aglomerante cementante que puede ser de base cemento Portland u orgánica (acrílicos, epóxicos, poliuretanos u otro polímero orgánico). A estos morteros se les puede agregar algunos aditivos (microsílica, ceniza volante, fibra sintética, escorio de alto horno, entre otros). En general, los materiales basados en resinas se prefieren cuando las secciones por reparar son delgadas y en el caso de reparaciones grandes es preferible utilizar materiales con base en cemento Portland.

No debe ser utilizado en concreto contaminado con iones cloruro, esta reparación puede agravar el problema y crear celdas locales de corrosión. Esto es, si se utiliza material polimérico aislante se crearía una celda diferencial de oxígeno, donde el acero por debajo de la reparación, actuaría como ánodo, ya que es la zona donde no llegaría oxígeno. Si se repara con morteros cementicios, se reestablecería la película pasiva en el acero debajo de la reparación, actuaría como cátodo, siendo entonces el acero que está alrededor de la reparación el que actúe como ánodo (activo), acelerándose su corrosión por la formación de una celda galvánica. En cualquier caso se debe remover el concreto contaminado antes de reparar.

b. Revestimientos

Son aplicados sobre el concreto y actúan principalmente como barrera física. Algunos de ellos son:

- Revestimientos Hidrófugos: Son materiales a base de silicona que no sólo repelen la humedad y resisten el desgaste, sino que permiten al sustrato de concreto respirar naturalmente. Al aplicarse sobre la superficie la penetran impregnándose en ella.
- Membranas orgánicas Prefabricadas: son usadas para colocarse sobre la superficie del concreto de manera temporal o permanente.
- Polímeros Impregnados sobre el concreto: Son aplicados como una mezcla reaccionante (monómero + catalizador) sobre una superficie de concreto previamente deshidratada, la cual penetran considerablemente (aproximadamente 1 a 3cm), polimerizando luego y sellando los poros.
- Otros revestimientos: Son aplicados sobre el concreto en forma líquida formando una película protectora. Han sido eficaces para retardar/evitar la carbonatación del concreto y, a la vez, son los responsables de presentar la buena apariencia necesaria de las edificaciones de concreto. Entre los más importantes están los epóxicos, acrílicos y poliuretanos.

c. Extracción de los iones cloruros del concreto¹⁹

En los procesos de corrosión de las armaduras de concreto armado tiene influencia fundamental

¹⁹ Ing. Carlos Alberto Civello, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, "Corrosión en armaduras de hormigón armado".

la presencia de iones cloruro, los cuales pueden ingresar al concreto en la etapa de elaboración o posteriormente. La necesidad de comprender los mecanismos de ingreso ha originado la búsqueda continua de nuevas técnicas que posibiliten cuantificar la profundidad de ingreso de los cloruros al concreto endurecido. La corrosión de las armaduras de concreto armado se originan por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad (aire húmedo) en las proximidades de la barra, pero la existencia de cloruros libres (Cl-) en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso. Por tal razón resulta conveniente la limitación del contenido inicial de Cl- en el hormigón endurecido, como así también en el conocimiento de las variables que afectan su ingreso.

La extracción de iones cloruro del concreto es una técnica electroquímica, actualmente en desarrollo, donde se aplica un concepto similar al de protección catódica por corriente impresa. Se basa en aprovechar la carga negativa del ión cloruro para ser atraído por un ánodo colocado externo a la superficie de la estructura tratada. En la protección catódica propiamente, este efecto se lograría también, pero a largo plazo. La remoción de la mayor parte del cloruro libre y la producción de OH⁻ permite reestablecer la pasivación de la armadura.

d. Realcalinización

Es un proceso que se encuentra en desarrollo. Es un tratamiento temporal que incrementa el pH de la solución acuosa en los poros del concreto, debido a la penetración de un electrolito alcalino desde la superficie exterior. Este proceso repasa la armadura debido a las reacciones electroquímicas que ocurrirían en su superficie. Esta técnica puede ser utilizada para el caso de concretos carbonatados.

La realcalinización²⁰ es una técnica de rehabilitación de estructuras de hormigón armado carbonatado, con problemas de corrosión en sus armaduras, es no destructiva y temporal. Consiste en la aplicación de corriente eléctrica, entre la armadura del concreto y un ánodo colocado en la superficie del concreto, ver la figura 8.

El ánodo consiste en una malla de acero embebida en una solución electrolítica de pH alcalino. Los

iones migran a través del concreto hacia el refuerzo, donde se produce una reacción catódica dando productos que aumentan el pH, desactivando el proceso de corrosión, que se había originado por carbonatación del concreto.

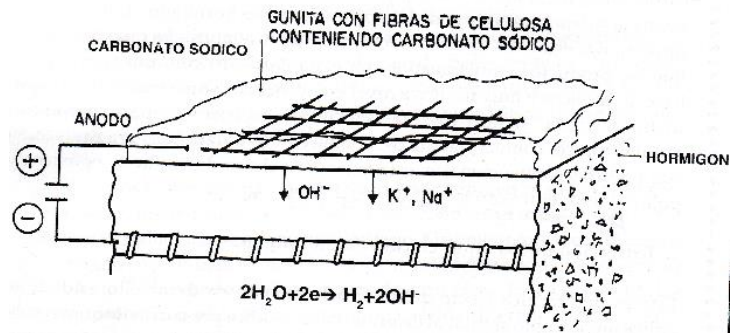


Figura 8 Principio de realcalinización electroquímica

La técnica involucra el paso de una corriente, a través del concreto, hacia la armadura, por medio de un ánodo colocado externamente sobre la superficie del concreto. Al igual que en la protección catódica se utiliza una fuente de energía de corriente continua, lográndose realcalinizar el concreto mediante varios mecanismos, siendo los más importantes: la electrólisis en los electrodos (alrededor de la armadura cátodo), se genera iones OH⁻ (por electrólisis del agua y reducción del O₂ difundiendo en el concreto) y electroósmosis, movimiento del electrolito en el concreto hacia el cátodo. Los hidróxidos de sodio y de calcio son generalmente utilizados como electrolitos cubriendo el concreto y, al penetrar en los poros del mismo prevendrían futuros decrecimientos del pH, atrapando el CO₂ que pudiese ingresar desde el exterior.

e. Inhibidores de corrosión

EL inhibidor de corrosión es una sustancia que se agrega a la mezcla de concreto para proteger la armadura contra el ataque corrosivo, aunque puede ir en detrimento de las propiedades del concreto. Este método podría ser la mejor solución en aquellos casos donde el concreto se prepara con aguas salobres o marinas, o con arena con alto contenido en cloruros (prácticas no recomendadas). También en aquellos casos donde se ejecutan construcciones / reparaciones en zonas de salpique en ambientes marinos.

²⁰ Irma Ocampo, Aumento de la vida útil de estructuras de hormigón armado corroídas, mediante realcalinización.

Los inhibidores de corrosión, son productos que actúan, ya sea, formando películas sobre la superficie metálica, tales como los fosfatos, o bien, entregando sus electrones al medio.

Evaluación de estructuras de concreto armado afectadas de corrosión

Se realizará el análisis de dos métodos de evaluación de la corrosión de las estructuras de concreto armado. El Método Simplificado y la Inspección Detallada. Ambas pueden ser consideradas complementarias a la vez que completamente operativas por sí mismas. Siendo el Método Simplificado para una evaluación rápida y simplificada mientras que la Inspección Detallada es para una evaluación más completa. Independientemente la decisión sobre cuál de las dos desarrollar debería estar basada entre otros en los siguientes criterios²¹ :

- Objetivo e importancia de la evaluación
- Número de elementos por evaluar y extensión del daño
- Resultados de otras inspecciones anteriores
- Razones económicas e interés del propietario de la estructura

El Método Simplificado está basado en establecer un nivel del estado de la estructura actualmente y una sugerencia de los períodos de intervención necesarios. El Manual CONTECVET describe el Método Simplificado de la siguiente manera “El MS está basado en la ponderación adecuada de diversos aspectos relativos, no sólo a la tipología estructural sino también al proceso de corrosión a través de un índice de corrosión y un índice estructural. Está especialmente diseñado para administraciones (públicas o privadas) que posean un parque importante de estructuras y cuyo primer nivel de conocimientos sea el establecimiento de una jerarquía de intervención en función de unos presupuestos siempre limitados. También para aquellos propietarios

²¹ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 7

(comunidades de vecinos) con recursos limitados o cuando se trate de realizar una Evaluación Preliminar de estructuras singulares. Aunque la teoría empleada en el desarrollo de estos índices puede ser aplicada fácilmente a obras públicas (diques, puentes y otros.) es necesario remarcar que los Índices han sido calibrados de momento exclusivamente para edificación, donde cada elemento posee una clara distinción estructural. Su aplicación, pues, a puentes o grandes estructuras, aunque posible, debe ser tomada con cautela y trabajada por el equipo evaluador”. Para facilitar el análisis de los pasos que utiliza el Método Simplificado en la Figura 9 se encuentra el diagrama de flujo del MS.²²

Por otra parte, la Inspección Detallada, consiste en un análisis más riguroso de la estructura, el manual CONTECVET propone la siguiente descripción de la Inspección Detallada: “El método tiene como base fundamental el conocimiento de la reducción de secciones del acero y del hormigón, así como en la determinación de la velocidad de corrosión representativa que aporta la posibilidad de predecir la evolución futura”.

La metodología de ambos se explicará a continuación.

²² Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 10

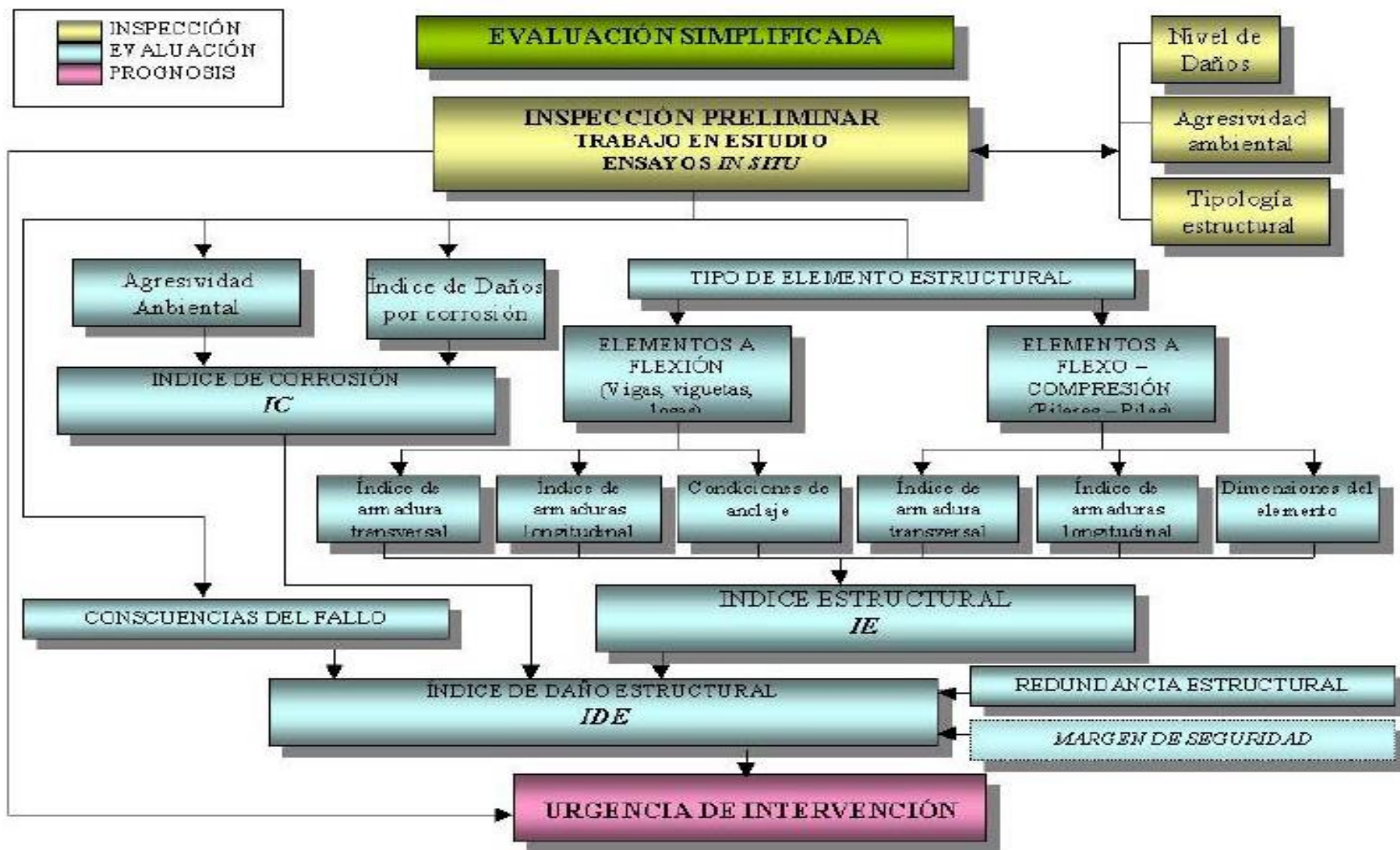


Figura 9. Diagrama de flujo del Método Simplificado. Manual CONTECVET

Método Simplificado

En este método se siguieron tres pasos (Figura 9) a continuación se describen²³.

1) Inspección

Para este método se necesita una inspección de la estructura lo suficientemente detallada que permita la obtención de los parámetros necesarios para la evaluación posterior.

Esta inspección desde el punto de vista de corrosión puede implicar una labor bastante sencilla en algunos casos o, por el contrario, una muy difícil en otros, según la complejidad de los problemas, así como dependiendo de la magnitud y naturaleza de la obra.

Se debe facilitar el estudio de la estructura y procurar recoger la mayor información posible referente a la edad o tiempo en servicio, naturaleza y procedencia de los materiales del concreto, dosificación y resistencia característica del concreto, tecnología de fabricación del concreto, edad del inicio de los problemas, diagnósticos y/o reparaciones anteriores, niveles de tensiones de trabajo de los elementos o componentes estructurales. En el Apéndice #1 Manual de Usuario se puede observar el formulario propuesto por el programa para evaluar las estructuras.

Además, también se debe ofrecer cómo estudiar el medio, con información que permita caracterizar su agresividad. Es fundamental señalar la forma de interacción entre el medio y la estructura afectada; también se puede observar en el Manual de Usuario el formulario que el programa propone para evaluar el medio.

2) Índice Simplificado de Corrosión (ISC)

Para facilitar la explicación de esta fase se presenta a continuación el siguiente diagrama de flujo²⁴.

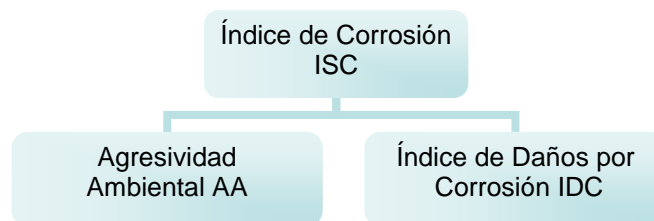


Figura 10. Diagrama de flujo Índice de corrosión. Manual CONTECVET

El ISC se determina a partir de la Agresividad Ambiental (AA) y del Índice de Daños por Corrosión (IDC). Algebraicamente se representa con la siguiente ecuación:

$$ISC = \frac{IDC + AA}{2} \quad (\text{Ec. 1})$$

Seguidamente se analizarán el Índice de Daños por Corrosión y la Agresividad Ambiental:

Índice de Daños por Corrosión (IDC)

Este índice se calcula como el promedio de una serie de indicadores de corrosión. Son seis indicadores, que reflejan no solo el estado actual de la armadura, sino la previsible evolución del deterioro. Los valores de estos IDC se presentan en el Cuadro 2²⁵.

En el caso de la presencia de Sulfatos este parámetro no se toma en cuenta en el Manual CONTECVET, ya que en Costa Rica es un problema la presencia de sulfatos por la existencia de estructuras cercanas a los volcanes fue preciso añadir el índice que tomara en cuenta este factor, para ello se utiliza la siguiente información según el porcentaje de sulfato SO₄ en el agua:

- de 0 a 0,1% despreciable
- de 0,1 a 0,2% positivo
- de 0,2 a 0,5% Considerable
- Mayor a 0,5% Severo

Y así asignándole un nivel del I al IV según el grado de ataque.

²³ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 8

²⁴ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 22

²⁵ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 22

CUADRO 2²⁶. INDICADORES DE CORROSIÓN				
Indicador	Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV
Profundidad de carbonatación [XCO ₂]	XCO ₂ = 0	XCO ₂ < c	XCO ₂ = c	XCO ₂ > c
Nivel de cloruros [XCl]	XCl = 0	XCl < c	XCl = c	XCl > c
Fisuración por corrosión en el recubrimiento [w]	Sin fisuras	Fisuras < 0.3 mm	Fisuras > 0.3 mm	Fisuración generalizada y estallidos
Resistividad (Ωm) [ρ]	> 1000	500-1000	100-500	< 100
Pérdida sección [∅]	< 1 %	1 – 5 %	5 - 10 %	> 10 %
Intensidad de corrosión (μA/cm ²) [ICORR]	< 0.1	0.1-0.5	0.5-1	>1

Hay índices que representan la situación presente y la futura intensidad de corrosión. El IDC se calcula a partir de asignarle puntos 1 al 4 a los cuatro niveles (I al IV) establecidos y realizando el promedio de los siete indicadores. Algebraicamente se representa de la siguiente manera:

$$IDC = \frac{\sum_{i=1}^7 \text{ Nivel del indicador}}{7} \quad (\text{Ec. 2})$$

Agresividad Ambiental (AA)

Este índice está basado según el tipo de exposición que tenga la estructura, según los datos obtenidos de la inspección visual. Para la valoración de la AA se utiliza la tabla de Clases de Exposición según la EN206 que se presenta en el Manual COCTECVET²⁷, la Figura 11 muestra la información mencionada.

Básicamente existen cuatro grupos:

1. Sin riesgo de corrosión como XO

²⁶ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág 8

²⁷ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Anexo B.4, Pág. 84.

2. Corrosión inducida por carbonatación, designado como XC

3. Corrosión inducida por cloruros de origen distinto al marino, designado como XD.

4. Corrosión inducida por cloruros XS.

Los pesos (valor numérico) que se le asignaran a cada grupo se pueden denotar en el Cuadro 4²⁸.

Una vez obtenidos ambos índices (ISC y AA) se procede a realizar la ecuación 1. El ISC, se asocia con un nivel de corrosión, según se muestra en el Cuadro 3²⁹

CUADRO 3. NIVELES DE CORROSIÓN SEGÚN ISC	
Corrosión despreciable	0-1
Corrosión baja	1-2
Corrosión media	2-3
Corrosión alta	3-4

²⁸ Gustavo Rojas M., Manual de Usuario EECC Versión 1.0, Pág. 12

²⁹ Gustavo Rojas M., Manual de Usuario EECC Versión 1.0, Pág. 13

Designación	Descripción del ambiente	Ejemplos
1. – Sin riesgo de corrosión.		
X0	Para hormigones en masa; todos los ambientes excepto donde hay acciones de deshielo, abrasión o ataques químicos	Hormigón en interiores de edificio con niveles de humedad muy bajos.
2. – Corrosión inducida por carbonatación.		
Cuando el hormigón armado está expuesto a ambientes húmedos, la exposición debe ser clasificada de la siguiente forma: Nota: las condiciones de humedad a considerar en el recubrimiento de hormigón, en algunos casos, pueden ser las mismas que las del ambiente circundante. En estos casos la clasificación de dicho ambiente debe ser la adecuada. Esta observación no es válida en el caso de existir una barrera entre el hormigón y el ambiente.		
XC1	Seco o permanentemente húmedo	Hormigón armado en el interior de edificios con humedad relativa baja. Hormigón permanentemente sumergido.
XC2	Húmedo, raramente seco	Superficies de hormigón sometidas a contacto con el agua durante largos períodos. Cimentaciones.
XC3	Humedad moderada	Hormigón armado en el interior de edificios con humedad relativa moderada. Hormigón en exteriores protegidos de la lluvia.
XC4	Ciclos húmedos y secos	Superficies de hormigón en contacto con agua, no incluidas en la clase XC2.
3. – Corrosión inducida por cloruros de origen distinto del marino.		
XD1	Moderadamente húmedo	Superficies de hormigón expuestas a los cloruros contenidos en aire.
XD2	Húmedo raramente seco	Piscinas. Hormigón expuesto a la acción de aguas industriales que contienen cloruros.
XD3	Ciclos húmedos y secos	Partes de puentes expuestos a salpicaduras que contienen cloruros.
4. – Corrosión inducida por cloruros de origen marino.		
XS1	Exposición a la acción de la sal contenida en el aire pero no en contacto con el agua de mar.	Estructuras cerca del mar o en la costa.
XS2	Permanentemente sumergidas	Parte de estructuras marítima.
XS3	Zonas expuestas a la acción de la marea o salpicaduras.	Parte de estructuras marítimas.

Figura 11. Índice de Daños por Corrosión según la EN206. Manual CONTECVET

CUADRO 4³⁰. PESOS GRUPOS AA											
Clase	XO	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Peso	0	1	1	2	3	2	3	4	2	3	4

³⁰ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Anexo B.4, Pág. 84.

3) Índice Estructural (IE)

Al igual que las consecuencias de la corrosión en el concreto son diferentes, así también, para lograr una evaluación de la corrosión con éxito la manera de evaluar la corrosión debe tomar en cuenta estas diferencias.

Los factores³¹ son los siguientes: tipo de sección y esfuerzos de ésta, nivel de armado, tipo de armado, etc.

Así, el IE intenta recoger todos estos factores para calificar la estructura. En la Figura 12 se muestra un diagrama de flujo que muestra el procedimiento para obtener el valor de IE.

De un modo general, al principio se establece una calificación entre elementos sometidos a flexión y entre elementos sometidos a flexocompresión.

A continuación se desglosa el procedimiento por seguir para flexión y flexocompresión.

CUADRO 5 ³³ ÍNDICE DE ARMADO TRANSVERSAL FLEXIÓN				
ϕt	Separación de los aros			Sin aros
	$st \leq 0.5 d$	$St > 0.5 d$	$st > 0.5 d$	
> 8 mm	1	1	2	1
≤ 8 mm	2	2	3	

ϕt es el diámetro de la armadura transversal en [mm].

d es el canto efectivo de la sección [mm].

st es la separación entre estribos en [mm].



Figura 12 Diagrama de Flujo Índice Estructural

a) Elementos sometidos a flexión

Los elementos sometidos a flexión se refieren a elementos con exigencia estructural parecida a losas, vigas, viguetas y otros.

En primer lugar, se determina el Índice de Armado Transversal (IAT), en este índice se tiene en cuenta:

- El diámetro de la armadura transversal
- La distancia de los aros

En el Cuadro 5³² se encuentran los parámetros anteriores para determinar el IAT.

Donde:

³¹ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 23.

³² Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 24.

³³ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 8

Seguidamente de calcular el IAT, se procede a obtener el valor del Índice de Armado Longitudinal (IAL).

Para el Índice de Armado Longitudinal se tienen en cuenta diversos aspectos. Al principio se definen dos grandes categorías en función del diámetro de las varillas que formen la armadura³⁴:

- Varillas de gran diámetro: formadas básicamente por varillas de diámetro ≥ 20 mm.
- Varillas de diámetro medio o pequeño: el armado longitudinal ésta formado por varillas de diámetro ≤ 20 mm.

Se consideran a continuación dos subcategorías dentro de cada diámetro, dependiendo de la cuantía de armadura a tracción debido a que las vigas con una cuantía reducida a flexión son bastante más sensibles a una pequeña corrosión de

³⁴ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 24.

sus armaduras. Así se establecen dos tipos de cuantías (alta y baja) según la clasificación siguiente:

- Baja para $\rho_1 < 1.0 \%$
- Alta para $\rho_1 > 1.5 \%$

Para valores intermedios de ρ_1 , es el evaluador quien deberá decidir en qué tipo de clasificación situar su elemento.

El concepto de Alta Cuantía o Baja Cuantía se deja al criterio del usuario.

En el Cuadro 6 que propone el Manual CONTECVET.columna 1 se puede observar como el Índice de Armado Longitudinal está en función

CUADRO 6. ÍNDICE DE ARMADO LONGITUDINAL FLEXIÓN				
IAT	Armadura Longitudinal (mm)			
	$\varnothing \geq 20$		$\varnothing < 20$	
	Alta Cuantía	Baja Cuantía	Alta Cuantía	Baja Cuantía
1	I	II	II	III
2	II	III	III	IV
3	III	IV	IV	IV

del Índice de Armado Transversal.

El IAT definido en el Cuadro 5, es el Índice Estructural.

En el caso de que los datos del Cuadro 5 no estén disponibles, o su obtención sea demasiado cara o difícil, el siguiente cuadro (Cuadro 6) muestra una clasificación de elementos a flexión simplificada. El nivel de precisión obtenido es considerablemente menor y está en la mayoría de los casos del lado de la seguridad.

b) Elementos sometidos a flexocompresión

Los elementos sometidos a flexocompresión, se refieren a elementos con exigencia estructural parecida a columnas o pilares.

Al igual que los elementos sometidos a flexión el primer paso es determinar el Índice de Armado Transversal. Se tienen en cuenta los mismos parámetros que en el caso de elementos a flexión: diámetro y espaciado de aros. Este índice representa³⁵ el mayor a menor riesgo de pandeo de las armaduras longitudinales del soporte. En el Cuadro 8 se muestran los valores del Índice de Armado Transversal en función de los parámetros anteriormente mencionados.

Una vez obtenido el Índice de Armado Transversal, el Índice de Armado Longitudinal se obtiene entrando al Cuadro 9, que al igual que los elementos en flexión, se encuentra en función del IAT. Además, el Cuadro 9 pretende tener en cuenta la mayor o menor posibilidad de estallido del recubrimiento por corrosión de las armaduras principales.

CUADRO 7. INDICE ESTRUCTURAL SIMPLIFICADO FLEXIÓN				
Armado transversal	Viga plana ($h < b$)		Vigas de canto, losas, viguetas	
	Sección de apoyo	Sección de centro de vano	Sección de apoyo	Sección de centro de vano
Sin aros	-	-	I	II
Alta densidad	II	III	III	IV
Baja densidad	III	IV	IV	IV

³⁵ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 25.

CUADRO 8 ³⁶ . IAT FLEXOCOMPRESIÓN		
\emptyset_t	$\lambda = \text{espaciado de cercos}$ $/ \emptyset \text{ barras principal}$	
	$\lambda \leq 10$	$10 < \lambda$
> 8	1	2
≤ 8	2	3

En los casos en que las dimensiones del soporte sean pequeñas (p.ej.: 30 – 40 cm) la pérdida de capacidad resistente por este efecto puede ser importante.

El estallido del recubrimiento se tiene en cuenta a través del detalle de armado del soporte (espaciado de las varillas longitudinales) y de las características de la sección del soporte. Se definen los siguientes parámetros:

1. Relación entre la sección reducida del soporte (sección bruta del soporte menos la sección que resulta de no considerar el recubrimiento y el diámetro de los aros) con respecto a la sección bruta del soporte.

2. Espaciado entre las varillas verticales del soporte. Cuanto más cerca estén las varillas verticales más posibilidad existe que se produzca el estallido del recubrimiento en la sección.

Los parámetros para calcular el Índice de Armado Longitudinal se muestran en el Cuadro 9.

CUADRO 9 ³⁷ IAL FLEXOCOMPRESIÓN				
IAT	$\eta = \text{Índice de estallido}$			
	$\eta \geq 0.75$		$\eta < 0.75$	
	Espaciado		Espaciado	
	$> 5 \emptyset$	$< 5 \emptyset$	$> 5 \emptyset$	$< 5 \emptyset$
1	I	I	II	III
2	I	II	III	IV
3	III	IV	IV	IV

Del mismo modo que en el caso de elementos sometidos a flexión el Cuadro 10 proporciona una

³⁶ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 27

³⁷ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 27

clasificación de soportes simplificada, para los casos en que obtener el detalle de armado resulte excesivamente laborioso o costoso. Esta tabla se ha restablecido en función de los datos de armado y dimensiones de la sección de concreto.

4) Índice de Daño Estructural (IDE)

El valor del IDE combina las clasificaciones de los tipos de estructuras, secciones y corrosión.

Es importante mencionar que el IDE toma en cuenta la consecuencia del fallo de la estructura, ya sea este de consecuencias leves o importantes. A continuación se explica desde que criterio debe ser considerada la consecuencia del fallo:

- Leve: Las consecuencias del fallo no son serias, o bien, son lo suficientemente pequeñas.
- Importante: En el caso de haber riesgo para la vida o importantes daños materiales.

El Manual CONTECVET³⁸ recomienda tener los siguientes criterios para analizar la consecuencia del fallo: “La existencia o no de un cierto grado de hiperestaticidad en la estructura puede representar un cambio significativo en la influencia del nivel de corrosión, en la reducción de la capacidad portante del elemento en consideración.

Para estructuras estáticamente determinadas (isostáticas) el fallo local en una de las secciones del elemento implicaría el fallo inmediato de la estructura, mientras que en aquellos casos en que existan otras secciones que puedan soportar la carga, los esfuerzos podrán redistribuirse”. Como se explica en el anterior párrafo lo que más atribuye a la decisión de leve o importante es si las consecuencias del fallo harían fallar la estructura de inmediato y, por lo tanto, con consecuencias fatales”.

En el Cuadro 11 se muestran las clasificaciones utilizadas para determinar este índice. Éste está graduado en cuatro niveles

Despreciable (D)
Medio (M)
Severo (S)
Muy Severo (MS)

³⁸ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 27.

CUADRO 10³⁹. ÍNDICE ESTRUCTURAL SIMPLIFICADO FLEXOCOMPRESIÓN				
Armado transversal	Dimensión mínima del soporte a			
	a > 400 mm		a ≤ 400 mm	
	Alta separación de varillas verticales	Varillas verticales poco espaciadas	Alta separación de varillas verticales	Varilla verticales poco espaciadas
Aros poco espaciados	I	II	III	IV
Aros muy espaciados	II	III	IV	IV

CUADRO 11 ÍNDICE DE DAÑO ESTRUCTURAL								
ISC	ÍNDICE ESTRUCTURAL							
	I		II		III		IV	
	Consecuencias del posible fallo							
	Leves	Signif	Leves	Signif	Leves	Signif	Leves	Signif
0-1	D	D	D	D	D	M	M	M
1-2	M	M	M	M	M	S	M	S
2-3	M	S	M	S	S	MS	S	MS
3-4	S	MS	S	MS	S	MS	MS	MS

Además, se puede observar que dentro de los criterios del Cuadro 11 se encuentra también el Índice Simplificado de Corrosión, el Índice Estructural y como se mencionó, anteriormente, las consecuencias del posible fallo.

³⁹ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 29.

5) Urgencia de intervención⁴⁰

En el método simplificado, la evaluación del comportamiento en el tiempo, se tiene en cuenta mediante el establecimiento de plazos de intervención o futura inspección en la estructura.

Una vez calculado el Índice de Daño Estructural, se prosigue a determinar la urgencia de intervención según el Cuadro 12 que sugiere el Manual CONTECVET.

CUADRO 12. URGENCIA DE INTERVENCIÓN	
IDE	Urgencia de intervención (años)
Despreciable	> 10
Medio	5 – 10
Severo	2 – 5
Muy Severo	0 – 2

⁴⁰ Geocisa, CONTECVET, “Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura”, Pág. 29.

Inspección Detallada

EL segundo método que se analizó es la inspección detallada, con ella se evaluará la problemática en la estructura.

En la Inspección Detallada los pasos por seguir son los siguientes:

- Plan de muestreo
- Clasificación de Daños
- Selección de ensayos

1) Plan de muestreo

Una vez reconocida la estructura, a través de la inspección preliminar, debe hacerse una división de ella por zonas clasificadas de acuerdo con ciertas características y/o condiciones, que sean representativas dentro del conjunto de la estructura.

El plan de muestreo pretende la clasificación de la inspección y está orientada a facilitar la determinación de las causas que han originado los daños por corrosión en las armaduras. La Red DURAR en su libro "Manual de inspección y diagnóstico de corrosión en estructuras de concreto armado"⁴¹ sugiere los siguientes criterios:

- Diferenciar las zonas con distintas exigencias estructurales/mecánicas

Dependiendo del elemento o componente de la estructura sometida a una exigencia estructural/mecánica, tal como vigas, losas, pilares, paredes, cimentaciones.

- Diferenciar las zonas sometidas a distintos medios:

Principalmente los medios agresivos, ya sea seco, húmedo o sumergido.

- Establecer los grados del deterioro en el concreto y las armaduras:

Considerándose entre los siguientes niveles: depreciable, medio, severo o muy severo.

2) Clasificación de Daños

En esta etapa del procedimiento se debe hacer una inspección minuciosa, tanto del concreto (y/o acabados), como del estado de las armaduras.

La clasificación abarcará todos los elementos y se registrarán las anomalías observadas; se puede tomar como una ayuda el Cuadro 13, donde se muestra la descripción, las causas y los detalles dados

por la inspección dependiendo del tipo de daño que tenga la estructura.

Se puede observar en el Cuadro 13 que la Clasificación de Daños debe incluir la mancha de óxido (uniforme o localizado, profundidad y extensión de picaduras, etc) y la morfología del ataque (uniforme o localizado, profundidad y extensión de picaduras y otros).

3) Selección de ensayos

Una parte muy importante de la información básica y necesaria para poder efectuar un dictamen sobre las causas que han podido determinar la corrosión de las armaduras y su propagación, se obtiene al realizar los apropiados ensayos sobre las armaduras y el concreto de la estructura.

Los ensayos recomendados son los siguientes⁴²:

- Para la evaluación del concreto:
 - Resistividad
 - Ultrasonido
 - Esclerometría
 - Profundidad de carbonatación
 - Concentración de cloruros
 - Resistencia a la compresión
 - Porosidad
- Para la evaluación de la armadura:
 - Localización de la armadura y espesor de recubrimiento
 - La medición de potenciales
 - La medición de la velocidad de corrosión

En el Cuadro 14 se resume la información de las técnicas más comunes en la evaluación de corrosión de las armaduras, sus ventajas y limitaciones.

A continuación será analizada la metodología de la inspección detallada para realizar los ensayos.

⁴¹ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 78

⁴² Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 81.

CUADRO 13⁴³ CLASIFICACIÓN SIMPLIFICADA DE DAÑOS				
CODIGO	DAÑO	DESCRIPCIÓN	CAUSAS	DETALLES DADOS EN LA INSPECCIÓN
A1	Grietas o fisuras	Rotura del concreto, superficial o profunda	Sobrecargas, contracción, corrosión	Dirección, ancho, longitud y profundidad
A2	Red de grietas	Grietas estrechas y cortas formando una red	Cambio diferencial de volumen del concreto superficial e interno	Ancho de grietas, tamaño de red y superficie afectada
B1	Gel de exudación	Gel viscoso saliendo a través de los poros del concreto	Reacción álcali-agregado	Superficie afectada, cantidad de depósito
B2	Eflorescencia	Costra blanca en la superficie del concreto	Lixiviación de hidróxidos con o sin formación de carbonatos	Superficie afectada, cantidad de depósito
B3	Manchas de óxido	Manchas de color marrón-rojiza	Corrosión de la armadura del alambre de amarre	Localización, intensidad, posible daño asociado
B4	Manchas de humedad	Zona superficial del concreto con indicios de humedad	Escurrimiento externo o interno, condensación	Superficie afectada
C1	Protuberancia ("Pop-Out")	Daño localizado superficial	Desarrollo de una presión interna local o expansión de partículas de agregado	Localización, profundidad
C2	Concreto fofo	Sonido hueco al golpe del martillo	Corrosión del acero de refuerzo, o cangrejas	Superficie afectada, grietas asociadas
C3	Delaminación	Fragmento de concreto separado de la masa	Presión interna por corrosión de la armadura, o por una fuerza externa aplicada	Superficie afectada, profundidad
C4	Intemperismo	Desgaste de la superficie del concreto, lavado de la pasta de cemento	Acción del medio ambiente que produce desgaste en la superficie	Superficie afectada, profundidad
D2	Nidos de abeja (Cangrejas)	Vacios entre los agregados gruesos	Falta de homogeneidad durante el vaciado del concreto	Superficie afectada, profundidad, intensidad
E1	Junta de construcción	Demarcación en la superficie del concreto, porosa o no.	Junta entre dos colados	Localización y posible daño asociado
E2	Junta de dilatación		Espacio dejado para pequeños movimientos rotatorios	Abertura, obstrucciones y cualquiera asociado a su deterioro

⁴³ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 81.

CUADRO 14⁴⁴ ENSAYOS MÁS COMUNES EN LA EVALUACIÓN DE CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS				
ENSAYO	CAPACIDAD DE DETECCIÓN	APLICACIÓN	VENTAJAS	LIMITACIONES
Medición de resistividad	Cualitativa	Problemas por presencia de Cl ⁻	Permite pre-seleccionar áreas con potencialidad corrosiva. Medida rápida	Interpretación compleja de los resultados
Medición de potenciales	Cualitativa	Cualquier estructura	Permite pre-seleccionar áreas con potencialidad corrosiva. Medida rápida	Interpretación compleja de los resultados
Medición de velocidad de corrosión	Cuantitativa	Cualquier estructura	Permite, una vez conocido el tipo de corrosión, evaluar la pérdida de sección de la armadura	Interpretación Disponibilidad del equipo adecuado que permite compensación caída óhmica
Medición de resistencia a la compresión y volumen de vacíos	Cuantitativa	Cualquier estructura	En conjunto con volumen de vacíos o relación agua/cemento o contenido de cemento, evalúa calidad del concreto	Ensayo destructivo
Definición de Profundidad de Carbonatación	Cuantitativa	Estructuras con Calidad de del concreto de baja a mala	Prueba sencilla que permite identificar fácilmente este fenómeno y el tiempo para alcanzar la armadura	Ensayo destructivo
Perfil de cloruros	Cuantitativa	Cualquier estructura	Permite determinar la calidad del concreto y el tiempo que se presente la corrosión del refuerzo	Ensayo destructivo Interpretación compleja Apoyo estadístico

⁴⁴ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 82.

Procedimiento de los ensayos⁴⁵

A continuación se presenta una explicación del procedimiento empleado en los ensayos tanto para la evaluación del concreto como de la armadura:

Ensayos para la evaluación del concreto

1) Resistividad Eléctrica

Para este tipo de ensayo hay tres formas de realizarlo: a nivel de laboratorio, In situ tipo A e In situ tipo B, seguidamente se describen los tres procedimientos.

- Ensayo a nivel de laboratorio:

Primero se debe realizar el procedimiento de muestreo, una vez tomados los núcleos correspondientes, se procede a tomar sus dimensiones (área A, diámetro D y longitud L) y a efectuar el montaje de ensayo, según la figura, donde I representa el miliamperímetro y E el voltímetro.

Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen se somete éste a una corriente dada, (I) y se registra el voltaje (E). En la Figura 9 se muestra un testigo y las variantes que deben ser tomadas.

La resistencia eléctrica, R, se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica esta dada por:

$$\rho \text{ (ohm-cm)} = R \text{ (A/L)} \quad (\text{Ec. 3})$$

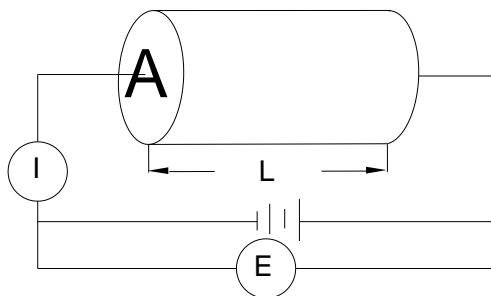


Figura 13. Ejemplo de muestra y variantes a considerar. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

⁴⁵ Red DURAR, Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, Pág. 88.

Se deben de tomar los datos del área, longitud, corriente y el voltaje, de esta manera el programa le dará el valor de la resistividad eléctrica.

- Ensayo Resistividad "In Situ" tipo A

Primero se debe prehumedecer las puntas de los pines para garantizar un buen contacto con el concreto; los cuatro terminales del equipo medidor de resistividad se colocan sobre la estructura en línea recta, a un espacio "a" uniforme. La profundidad "b" debe ser inferior con respecto al espaciado o al menos no excederlo en un 5%, "a" puede ser del orden de 50mm, mientras "b" será de 3mm. A través de los electrodos exteriores se pasa una corriente dada (I) y se mide el voltaje (E) entre los electrodos interiores. La resistencia eléctrica, R, se calcula como E/I y se expresa en ohm.

La resistencia R, está dada por:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (\text{Ec. 4})$$

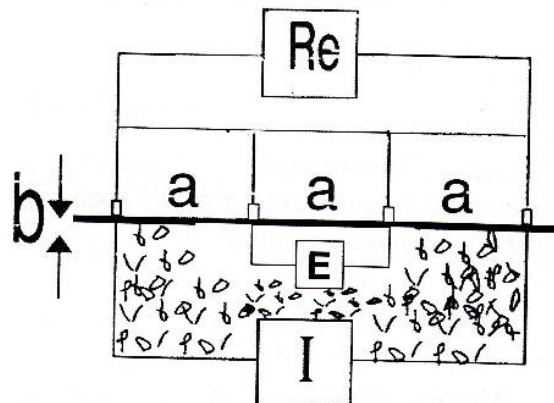


Figura 14. Diagrama Ensayo "In situ" tipo A. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Como electrodos se pueden utilizar clavos metálicos. Es fundamental asegurar un buen contacto de las cuatro puntas al concreto.

- Ensayo Resistividad "In situ" tipo B

Es otro método que se puede aplicar "in situ". Consiste en la utilización de un disco de pequeño diámetro que se coloca sobre la superficie del concreto y se conecta a la armadura que actúa de contra-electrodo. Se aplica un pulso de corriente o un incremento de potencial y se mide el salto instantáneo inducido en la variable (E ó I), conjugada.

Es decir, se evalúa la caída óhmica, mediante un pulso eléctrico.

El valor de la resistividad resulta:

$$\rho = 2 \cdot \delta \cdot R \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde δ = diámetro del disco en cm

R = caída óhmica medida

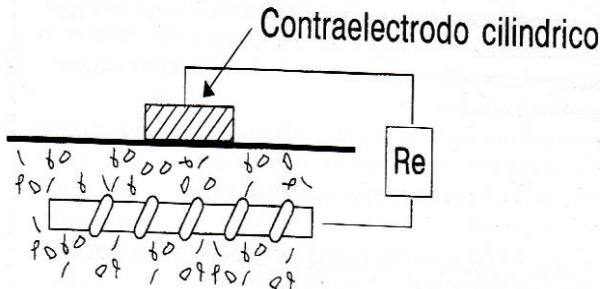


Figura 15. Diagrama de ensayo "In situ" tipo B. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Si no se cuenta con un medidor portátil apropiado, se puede utilizar cualquier instrumento capaz de medir la resistencia por el método de la interrupción de corriente.

Criterios de evaluación

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general:

$\rho > 200 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	Riesgo moderado
$\rho < 10 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$	Alto riesgo

2) Ultrasonido

a) Preparación de los especímenes o zonas de ensayo

Estos al ser ensayados deben tener la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y no deben estar carbonatadas.

Aquellas superficies que no sean suficientemente lisas, deberían regularizarse a través de procesos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica.

Se recomienda que en estructuras donde el concreto es razonablemente uniforme el ensayo puede ser realizado en puntos diferentes en mallas en 1m. En el caso de

concreto con muchas heterogeneidades o de piezas más pequeñas es necesario un espaciamiento menor. Deben evitarse zonas donde exista una gran concentración de armadura, puesto que la velocidad de propagación de onda es mayor en el acero que en el concreto.

b) Ensayo

Calibrar el aparato con la barra de referencia o dispositivo equivalente del equipo. Posicionar los transductores como se indica a continuación:

- Transmisión directa, con los transductores en las caras opuestas del material.
- Transmisión indirecta, con los transductores en la misma cara.
- Transmisión semidirecta, con los transductores en las caras adyacentes.

Colocar y presionar las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, considerándose satisfactorios cuando sea obtenido un valor mínimo de lectura con variación $\pm 1\%$.

c) Resultados

Calcular la velocidad de propagación de ondas conforme a la siguiente fórmula,

$$V = l/t \quad (\text{Ec. 6})$$

V = velocidad de propagación (m/s)

l = Distancia entre los puntos de acoplamiento

t = Tiempo recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción

Criterios de evaluación

Es posible expresar la homogeneidad del concreto en forma de parámetros estadísticos, tales como la desviación estándar o el coeficiente de variación de las medidas de velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en el hormigón hechas en los puntos de la malla.

3) Esclerometría

El esclerómetro debe ser verificado antes de su utilización o cada 300 impactos realizados en una misma inspección, siguiendo las instrucciones del fabricante del equipo para la utilización del Yunque de Ensayo.

Las superficies del concreto deben estar secas, limpias y preferencialmente planas, evitándose superficies húmedas y carbonatadas.

Las áreas de ensayo deben estar:

- Localizadas en las caras verticales

- Alejadas de regiones afectadas por segregación, exudación, concentración excesiva de armadura junta.
- Alejadas por lo menos 60mm de los cantos o aristas de los elementos.
- Tener una superficie entre 8 000m² (90x90mm²) y 40 000m² (200x200mm).

Frecuentemente el número de impactos está limitado por la separación de las barras de refuerzo. Sin embargo, es recomendable:

- Efectuar un mínimo de 9 impactos en cada área de ensayo.
- Evitar impactos sobre agregados, armaduras.
- No debe permitir más de un impacto sobre un mismo punto.
- Distancia mínima entre impactos de 30mm.

Utilización del esclerómetro

- El esclerómetro no debe ser utilizado cuando los índices esclerométricos son inferiores a 20.
- La barra de percusión debe ser presionada contra un punto del área de ensayo, previamente delimitada y, antes de que dicha barra desaparezca completamente en el cuerpo del esclerómetro, el martillo debe ser liberado.
- La liberación del martillo debe ser efectuada a través de un aumento gradual de presión en el cuerpo del aparato.
- Después del impacto, la punta indicadora localizada en la escala del esclerómetro proporciona directamente el índice esclerométrico. Este puede ser fijado por medio del botón de presión, para permitir una lectura más segura en áreas de poca luminosidad o en posiciones de difícil acceso.

El esclerómetro debe ser utilizado preferiblemente en posición horizontal y consecuentemente sobre superficies verticales. Cuando sea necesario aplicarlo en posiciones diversas, el índice esclerométrico debe ser corregido con los coeficientes proporcionados por el fabricante del esclerómetro.

4) Profundidad de carbonatación

Toma de testigos

La sección será un corte transversal donde un extremo corresponderá a la superficie expuesta a la atmósfera. El testigo puede ser cilíndrico o una sección extraída. El tiempo de exposición de la superficie por evaluar no podrá ser mayor de 15 minutos (fractura fresca).

En caso de que no pueda extraerse un testigo o porción, se procederá a taladrar una o varias secciones manual o mecánicamente hasta la profundidad de interés, dejando el lugar libre de material suelto y polvo, lo cual expondrá la superficie para el análisis.

Determinación de la profundidad de carbonatación

Una vez seleccionada la probeta y si está su superficie libre de polvo, se aplicará por automatización el indicador ácido-base en forma uniforme.

Logo de la aplicación, antes de transcurridos 15 minutos, se efectuará la medición de la longitud (profundidad) de la zona incolora desde la superficie, determinándose, con precisión los valores máximos/mínimos del frente incoloro y la media aritmética, de un mínimo de medición, en función del tamaño de la probeta. El procedimiento no debe tardar más de 20 minutos. Deberá levantarse un registro preciso sobre la ubicación de los testigos, tonalidad visualizada, profundidad de carbonatación medida e indicar explícitamente el tipo de indicador utilizado. Igualmente se efectuará un registro fotográfico donde sea pertinente.

Criterios de evaluación

a) NIVEL DE pH

En función del indicador ácido-base seleccionado se establecerá el pH del frente incoloro en la muestra.

La fenolftaleína es el indicador más comúnmente utilizado y su rango de viraje está entre pH 8,2 y pH 9,8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo.

La timolftaleína es otro indicador que podría utilizarse, ya que su rango de viraje está entre pH 9,3 y pH 10,5 con tonalidades de incoloro a azul.

En el botón con nombre figura, se puede acceder la figura que muestra los indicadores, su rango de viraje, el pH y las especies predominantes. Para facilitar la evaluación del pH en la Figura 16 se muestra el valor del pH y su respectiva evaluación

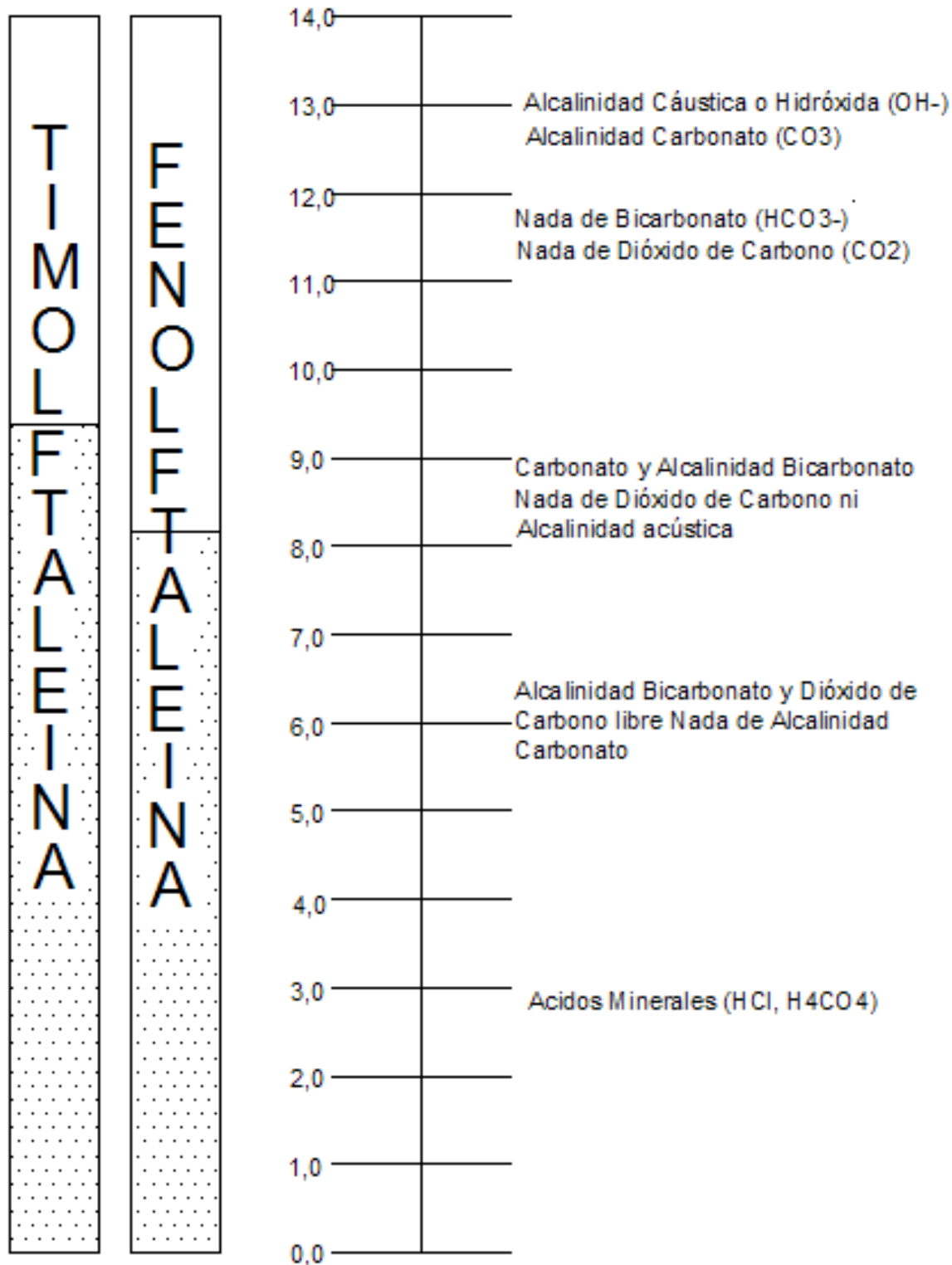


Figura 16. Evaluación del valor del pH. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

5) Concentración de cloruros

a) Toma de testigo

Los testigos se pueden extraer en piezas cilíndricas con un extractor o en polvo mediante un taladro. En todos los casos debe minimizarse el número de muestras y consultar a un ingeniero estructural acerca de las zonas de muestreo, para no afectar puntos críticos de la estructura.

A continuación se detallan dos técnicas:

- Extracción de testigo: El diámetro del testigo está relacionado con el tamaño del agregado grueso, recomendándose una relación de 3 a 1. Debe utilizarse la cantidad mínima de agua posible en la toma de la muestra, puesto que ocasiona pérdida de cloruros. Una vez tomado el testigo deberá identificarse correctamente y colocarlo en una bolsa plástica para protegerlo del medio ambiente, así como ejecutar los ensayos en el menor tiempo posible para evitar cambios en el proceso de difusión de los cloruros.

El testigo se corta con un disco de corte seco en rodajas de 5 a 10mm. Las rodajas se deben triturar antes de someterlas al análisis correspondiente.

- Extracción de muestra en polvo: el concreto se puede agujerear con un martillo adecuado, acoplado con una broca o un cincel de metal duro. Así se podrá retirar material en polvo a diferentes profundidades.

b) Coefficiente de aparente difusión:

Se calcula según la segunda ecuación de Fick

$$D_{ap} = (C_s \cdot X_{cl} / 2 \cdot \sqrt{C_x})^2 \cdot 1/t \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde:

C_x = Concentración a la distancia X

C_s = Concentración superficial

X_{cl} = profundidad alcanzada

D_{ap} = Coeficiente aparente difusión

t = tiempo

Evaluación de los resultados

El Manual de la Red Durar recomienda adoptar como valor límite permisible el de 0.4% de cloruros totales en relación a la masa de cemento para las estructuras de concreto armado

6) Resistencia a la compresión

a) Identificación de los lotes que serán ensayados:

- Se deben elegir regiones representativas de los componentes y elementos estructurales., o sea, en columnas y muros no se recomienda mezclar testigos extraídos del primer tercio (hasta 1 m de altura) con testigos de otros dos tercios. De la misma forma testigos representativos de losas y vigas no pueden ser representativos del concreto de los pilotes, o sea, los lotes bajo análisis deben ser compuestos de trozos equivalentes de elemento estructurales compatibles y similares.

b) Tamaño de la muestra:

- El número mínimo de testigos para constituir una muestra representativa es del orden de seis para testigos de diámetro igual o superior a 10 cm.
- Para testigos de diámetro inferior a 10cm, se recomienda por lo menos una muestra de diez testigos.
- En sacos excepcionales de análisis de un pequeño lote, puede admitirse una muestra con apenas tres testigos.

c) Dimensión de los testigos:

- Siempre que sea posible los testigos deben guardar la relación altura / diámetro igual a dos. Pueden aceptarse con relación igual o mayor a 1.
- El diámetro debe ser siempre igual o superior a tres veces la dimensión del árido grueso utilizado en la confección del concreto.
- No se admiten testigos con altura (longitud) inferior a su diámetro.

d) Cuidados durante la extracción

- Localizar la armadura
- Evitar extraer o cortar acero de las armaduras
- Apuntalar los elementos estructurales antes de la extracción, según la opinión del Ingeniero Estructural
- Llenar los agujeros de los testigos con concreto, mortero autonivelante, o morteros de resistencia compatibles con la resistencia del concreto original.
- No considerar testigos con vacíos o fallas, o sea, todos los testigos de la muestra para

conocer la resistencia a la compresión del concreto estructural deben ser íntegros.

e) Ensayo

- Cortar con disco de corte los toques de los testigos para obtener una superficie perfectamente plana y ortogonal a la generatriz del cilindro. Eso puede, excepcionalmente, ser obtenido con un fuerte desbaste por lija de la superficie. Luego estos deben ser refrentados.
- Los testigos representativos de lotes húmedos (estructura bajo agua o reservorios y tanques) deben ser rotos húmedos. Los provenientes de estructuras al aire pueden ser rotos secos en equilibrio con las condiciones del ambiente del laboratorio.
- Se determina la tensión de ruptura directa del valor obtenido de la prensa, dividido entre el área del testigo. La resistencia de la compresión del concreto (f'_c) depende de las dimensiones de los testigos y puede ser obtenida a partir de los coeficientes del Cuadro 15.

CUADRO 15. ÍNDICES CORRECIÓN DEL CONCRETO SEGÚN TESTIGO	
Relación Altura/Diámetro	Multiplicar la tensión directa por
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.90
1.00	0.89

Criterios de evaluación

- Con base en el diseño estructural: la resistencia normal debe ser mayor o igual a la resistencia a la compresión característica del concreto especificada en el diseño estructural
- En base a la durabilidad: Se acepta que concretos de elevada resistencia

(>45MPa) son durables y que concretos por de bajo de 20MPa son de baja durabilidad.

7) Porosidad

Ensayo de Absorción Capilar

Es base de la normativa sueca que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de tres coeficientes: m (Resistencia a la penetración del agua), K (Coeficiente de absorción capilar) Pe (Porosidad efectiva). El ensayo se realiza sobre especímenes de espesor $H \leq 50$ mm, luego de un pre-acondicionamiento de secado a 50°C por 48 horas (hasta peso constante) y posterior enfriamiento en desecador. Luego de registrar su peso inicial, W_0 , la muestra es colocada sobre una esponja húmeda en el interior de una cubeta de fondo plano, teniendo cuidado de que el nivel del agua sólo llegue a 3 mm por encima de la parte inferior de la probeta de ensayo. El cambio de peso ($W_t - W_0$) de la probeta por unidad de área expuesta del espécimen (A) se registra en intervalos de tiempo.

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones:

$$m = t / (z^2) \text{ s/m}^2 \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde z representa la profundidad de penetración del agua al tiempo t.

$$K = \frac{(W_t - W_0) / A}{\sqrt{t}} \text{ (kg/m}^2 \text{ s}^{1/2}) \quad (\text{Ec. 10})$$

$$Pe = \frac{k \sqrt{m}}{1000} \text{ (\%)} \quad (\text{Ec. 11})$$

Ensayo de absorción de agua

Aunque las normas recomiendan el uso de especímenes de diámetro y espesor de 75 mm, pueden ser utilizadas otras dimensiones. Estos se someten a un pre-acondicionamiento de secado a 105°C por 72 horas (o menos, hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador durante 24 horas, aunque es más conveniente usar un secado de 50 °C con el fin de no dañar el gel de cemento. Luego de pesada la probeta, W_0 , se sumerge en agua cuyo nivel debe estar 25 +- 5 mm por encima

del nivel superior de la probeta. Al cabo de 30 minutos se retira, se seca el agua exterior y se pesa nuevamente W_f . El agua absorbida se expresa en porcentaje, según:

$$\% \text{ Agua absorbida} = \frac{(W_f - W_o) 100}{W_o} \quad (\text{Ec } 12)$$

Ensayo de porosidad (Porosidad Total)

Este ensayo puede efectuarse de manera independiente, es decir, sobre testigos separados. En cualesquiera de los casos, el espécimen, luego pre-acondicionado, se sumerge en agua totalmente durante 24 horas, mínimo, al cabo de las cuales se registra su peso fuera (saturado de agua) y dentro de agua (sumergido en agua). Finalmente, el espécimen se seca a 105 °C hasta peso constante y se registra su peso. La porosidad total se expresa en porcentaje, así:

$$\% \text{ Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^\circ\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} \quad (\text{Ec. } 13)$$

Este valor de la porosidad no contiene más que una mínima parte de los poros de aire. Por lo tanto, si se quiere obtener la porosidad total se debe saturar totalmente el espécimen, hervido varias horas y luego proceder a enfriarlo lentamente antes de registrar su peso "saturado", o bien, hacer vacío en la cámara donde se tiene sumergida la probeta.

Criterios de Evaluación

En cuanto al porcentaje de porosidad

<=10%	Indica un concreto de buena calidad y compacidad.
10%-15%	Indica un concreto de moderada calidad.
>15%	Indica un concreto de durabilidad inadecuada.

Ensayos para la evaluación de la armadura

1) Localización de la armadura y espesor de recubrimiento

a) Información Preliminar

Antes de iniciar la actividad de campo se debe disponer de los planos definitivos de la estructura por estudiar, donde se indique con precisión la ubicación de la armadura, los diámetros de las barras y el espesor del recubrimiento. También es necesario conocer

la posición y características de otros elementos metálicos embebidos en el concreto.

b) Localización de la armadura

Se procede a localizar la armadura realizando un barrido rápido con el sensor del pacómetro en sentido perpendicular a la dirección tentativa de la armadura, de manera que el eje mayor del sensor sea paralela a la armadura hasta observar un pivoteo de la aguja (pacómetro analógico).

Luego se invierte el barrido en la misma dirección hasta encontrar la máxima deflexión de la aguja que indicará la posición del acero. Después, para la ubicación definitiva de la armadura, se hará girar el sensor pivoteándolo con centro en algunos de los extremos, hasta encontrar la deflexión máxima de la aguja, que indicará la dirección correcta de la armadura en el eje del lado mayor del sensor; este eje deberá marcarse sobre la cara del elemento con un producto indeleble.

La armadura principal será localizada de igual forma siguiendo el procedimiento anterior

c) Determinación de la profundidad de la armadura

Se determinará el recubrimiento o la capa de protección, según la armadura involucrada. Para cualquiera de los casos es importante colocar, previo al ajuste del dial, el sensor sobre la barra elegida en los tramos que no interfieran con otros aceros, para concentrar la respuesta magnética solo en la barra en la que se desea determinar.

2) Medición de Potenciales

a) Seleccionada la superficie por evaluar debe tenerse libre acceso a una sección de la armadura de refuerzo del concreto. En caso de no existir, deberá perforarse la estructura hasta descubrir el acero de refuerzo, una vez localizado deberá haber garantía de continuidad eléctrica del acero al momento de efectuar las mediciones.

b) Limpiar la superficie seleccionada y la del acero expuesto para la conexión.

c) Localizada la distribución del acero de refuerzo, trazar sobre la superficie

del concreto unas cuadrículas múltiples con espaciamiento entre nodos uniformes. El espaciamiento seleccionado dependerá de la rigurosidad de la inspección y de la ubicación del refuerzo.

- d) Efectuar la conexión del electrodo de referencia al negativo del voltímetro. El acero de refuerzo se conecta al positivo del voltímetro, como se indica en la figura 19 (medición de potenciales) así leerá en la pantalla su polaridad.
- e) Los nodos de la cuadrícula serán los puntos de la referencia para la ubicación del electrodo para la medición. En estos puntos se colocará sobre la superficie del concreto una esponja plana delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-concreto. Colocar el electrodo sobre la esponja, efectuar y registrar la medida.
- f) Elaborar un plano de la superficie y ubicar los valores resultantes de las mediciones del potencial. Trazar las líneas de isopotenciales correspondientes hasta elaborar un mapa de potenciales como se indica en la Figura 19.

Criterios de evaluación

Las medidas de potencial informan sobre la probabilidad de corrosión de la armadura de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados a la luz de la información disponible sobre las condiciones de humedad, contaminación, calidad del concreto, etc.

3) Velocidad de Corrosión

En las áreas de medida seleccionadas, se realiza una perforación para hacer contacto con la armadura y se sitúa el sensor sobre la superficie del concreto a través de una esponja y otro medio que asegure un buen contacto.

Debido a la variabilidad propia de las medidas de corrosión, se deben adoptar criterios estadísticos de muestreo para tener un valor medio o, al menos, detectar las zonas de mayor corrosión. Los criterios de

muestreo se adoptan de forma similar a otros tipos de ensayo, después de haber efectuado el levantamiento de daños de la estructura y la localización correspondiente de la armadura. Como además la velocidad de corrosión varía con el grado de humedad del concreto y la temperatura, es conveniente realizar, al menos tres medidas a lo largo de un año, con el fin de caracterizar la influencia de las distintas variaciones estacionales. A efectos de predicción se utilizará el valor medio de los datos obtenidos.

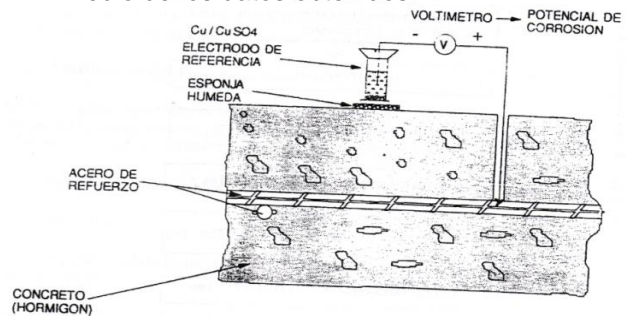


Figura 18. Medición de Potenciales. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

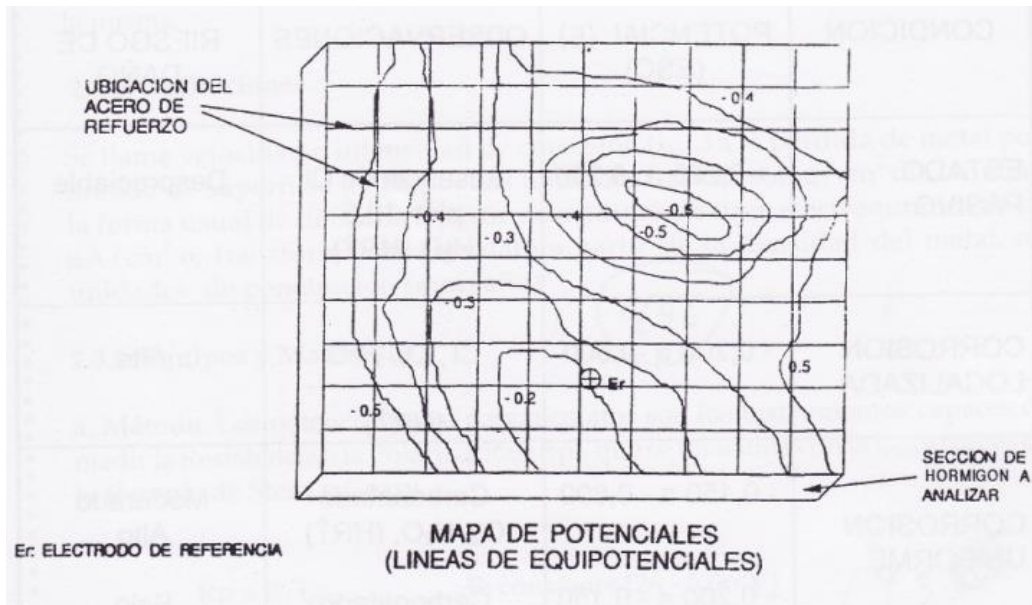


Figura 19. Mapa de Potenciales. Red Durar, Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.

Introducción

En el siguiente informe se presentan los fundamentos de las estructuras de concreto, los conceptos básicos, y las técnicas para realizar una evaluación satisfactoria sobre el daño debido a la corrosión de las estructuras de concreto armado.

El objetivo general es desarrollar una herramienta computacional en Visual Basic para la evaluación simplificada y detallada de la corrosión en las estructuras de concreto.

Con este programa se pretende brindar una herramienta sencilla para el usuario que le permita aplicar fácilmente el método de evaluación simplificada y la inspección detallada de la corrosión de estructuras de concreto.

Dar a conocer en el programa el grado de deterioro y su urgencia de intervención es uno de los objetivos principales al que se desea llegar con este software computacional.

Con el programa se ofrecerá información de una manera práctica sobre la corrosión de las estructuras de concreto armado.

Finalmente, se utilizarán datos de evaluaciones, pruebas e inspecciones de un estudio realizado de una estructura de concreto para aplicarlo al programa.

Metodología

Para realizar este proyecto se procedió a investigar los métodos de evaluación de estructuras afectadas por corrosión para automatizarlos en el programa Visual Basic 6.0. Específicamente el Método Simplificado y la Inspección Detallada.

Los pasos aplicados en el Método Simplificado son los siguientes:

- Inspección: El programa ofrece formularios para guiar al usuario en la inspección, indicando cuáles son los principales aspectos en que debe recopilar información, en los que se encuentran la Ficha de Descripción del Medio, Historial de Vida en Servicio, Datos Particulares de la Estructura y la Descripción del Medio.
- Índice Simplificado de Corrosión (ISC): Para el cálculo de este índice es necesario determinar primero el Índice de Daños por Corrosión (IDC) y el Índice de Agresividad Ambiental (AA), el programa facilita el cálculo de ambos índices automatizando el cálculo o escogencia de los parámetros correspondientes. Además, determina el Nivel de Corrosión que se determina con el valor final del ISC.
- Índice Estructural: para este índice primero se debe determinar la tipología estructural del elemento, ya sea un elemento sometido a flexión o un elemento sometido a flexocompresión. Luego, se debe determinar el Índice de Armado Transversal que en el espaciado y diámetro que forman los aros. Seguidamente se debe valorar el Índice de Armado Longitudinal que se basa en el Índice de Armado Transversal calculado anteriormente y de la mayor o menor posibilidad de estallido del recubrimiento por corrosión de las armaduras principales. El valor del Índice Estructural es el mismo del Índice de Armado Longitudinal.
- Índice de Daño Estructural (IDE): el cálculo de este índice está basado en los resultados del Índice de Simplificado de Corrosión y el Índice Estructural. También se debe

determinar si la consecuencia del fallo es leve o importante. El programa automáticamente ofrece el valor del IDC ya sea despreciable, medio, severo y muy severo. Además de la Urgencia de Intervención en años.

- Informe: en esta fase se recopila toda la información brindada al programa, con la facilidad de guardar la información para archivar y mostrar los datos a un posible tercero.

En lo que se refiere a la Inspección Detallada los pasos son los siguientes:

- Plan de muestreo: después de reconocer la estructura por medio de la inspección debe hacerse una división de ella en zonas, el programa facilita la clasificación de acuerdo a ciertas características y/o condiciones, que sean representativas dentro del conjunto de la estructura.
- Con el plan de muestreo se pretende la clasificación de la inspección y está orientada a facilitar la determinación de las causas que han originado los daños por corrosión.
- Ensayos: Inicialmente se ofrece la información de las limitaciones, ventajas, los objetivos y el equipo por utilizar en cada ensayo con la finalidad de que se escojan los ensayos que cumplan con los objetivos de la investigación y además según con el tiempo y recursos disponibles. Posteriormente se analizan por medio de los formularios de ensayos los resultados obtenidos, dando una evaluación según los parámetros determinados.
- Informe: en esta fase se recopila toda la información brindada al programa, con la facilidad de guardar la información para archivar y mostrar los datos a un posible tercero.

Resultados

Como resultado de este análisis surge un programa computacional que facilita la ejecución del análisis del Método Simplificado y de la Inspección Detallada.

Los resultados obtenidos de una evaluación e inspección de una estructura de mampostería⁴⁶ y el resultado de utilizar el software para dicho análisis se presentan seguidamente.

Una de las principales limitaciones del estudio que se analizará es que no existía documentación de la obra: planos visados y estudios de suelo. Además, se carece de información acerca de la procedencia de todos los materiales utilizados en la obra; la obra fue construida antes del CSCR-02 por lo que no se rige por especificaciones y normas ahí establecidas, con respecto de los materiales y sistemas constructivos.

El análisis de esta estructura incluyó un diagnóstico, en donde se hizo un reconocimiento total de la obra, seguido con el levantamiento de información en el sitio, para asignar medidas reales a la edificación. Además, se realizó una ficha de descripción y antecedentes de la estructura y también una de descripción del medio.

Asimismo, el análisis incluye una Inspección Visual clasificada de daños. En lo que compete a ensayos se llevo a cabo: Resistencia a la compresión del concreto, determinación de profundidad carbonatada en concretos, ensayo de porosidad y el Martillo Schmidt o esclerómetro, en el caso del acero se realizó la prueba de ubicación de acero mediante el Pachómetro analógico. En lo que se refiere a ensayos realizados en el laboratorio se analizaron el ensayo de compresión de núcleos de concreto, ensayo de porosidad, ensayo de carbonatación.

En primera instancia el programa realizado muestra una ventana en donde el usuario debe marcar si desea utilizar el Método Simplificado o la Inspección Detallada. Método Simplificado.

Método Simplificado

A continuación se detalla el uso del programa en la inspección.

Inspección

Primeramente, se utiliza el programa para acomodar la información de la inspección:

Descripción del proyecto:

En la Figura 20 se muestra cómo se utilizó el formulario denominado “Descripción del proyecto” para describir lo básico de la estructura.

Historial de vida en servicio:

En la Figura 21 se muestra como se utilizó el formulario denominado “Historial de vida en servicio” para describir los antecedentes de la estructura.

Datos particulares de la estructura:

En la Figura 22 se muestra la información descrita en el formulario “Datos particulares de la estructura”, para describir las técnicas de construcción.

Descripción del medio:

En la Figura 23 se observa el formulario “Descripción del medio” para describir los posible contactos químicos que tuviera la estructura.

⁴⁶ Alberto José Blanco, Arturo José Gamboa Solís, Jorge Luis Picado Sánchez, “Evaluación, Diagnóstico y Análisis de una Estructura de Mampostería

Descripción del proyecto

I. Datos generales del proyecto

Informe N°: 1

Nombre del proyecto: Edificio de apartamentos

Ubicación: Lourdes Montes de Oca

Fecha: 14 de febrero del 2006 Elaborado por: Ing. Andrea Aguilar

Datos generales de la estructura

Tipo de estructura:

- Edificación
- Puente
- Muelle
- Muro de contención
- Tanque de almacenamiento
- Plataforma petrolera
- Otro

Descripción básica de los componentes: Mampostería combinado con una estructura de acero

Fecha de construcción de la estructura: Hace 10 años

Uso general de la estructura: No se le dio ningún uso

Atrás

Figura 20. Formulario Descripción del proyecto

Historial de vida en servicio

Historial de vida en servicio

Fecha de puesta en servicio: No se puso en servicio

Resistencia del hormigón a la compresión en obra:

Anomalías observadas durante la construcción: con respecto a su comportamiento estructural

Anomalías anteriormente detectadas: Ninguna

Inspecciones rutinarias: No se hacían

Tipos de mantenimiento: Ninguno

Reparaciones: Cambio de placa en muro colindante

Atrás

Figura 21. Formulario Historial de vida en servicio

Datos particulares de la estructura

Tipos de cemento: Tipo de agua:

Naturaleza de los áridos:

TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN

En obra
 Concreto reforzado
 Prefabricado
 Pretensado
 Postensado

Tecnología de fabricación en obra:

Método de compactación:

Método de curado:

Figura 22 Formulario Datos particulares de la estructura

Descripción del medio

Agentes físico-químicos en contacto con la estructura

Atmósfera:

Agua:

Suelo:

Otro

Alta temperatura Corrientes de interferencia
 Agentes químicos Atmósfera específica

Húmedad relativa:

Temperatura:

Régimen de vientos:

Figura 23. Formulario Descripción del Medio

Índice Simplificado de Corrosión (ISC)

Para determinar el ISC se utilizó la ecuación 1, para ello se debió establecer primero los siguientes índices:

Índice de Daños por Corrosión:

Para este índice son varios indicadores que se deben determinar primero, Anexo # 1 se pueden observar la información para determinar este valor.

Para la profundidad de carbonatación se escoge el Nivel I, porque como se puede observar en el Anexo # 1 tabla 10 "Profundidad de Carbonatación", la profundidad de carbonatación es de 0 a 0,5cm, por lo tanto, se considera nula.

En el caso de los cloruros, no se cuenta con valores de un ensayo de nivel de cloruros, sin embargo, se sabe que la estructura no se encuentra en un medio marino, ni tampoco se encuentra sumergida, pero la estructura puede estar afectada debido a que no se encuentra impermeabilizada y está en contacto con el agua de lluvia, por lo tanto, es posible que se encuentre con contenido de cloruros no relacionado al marino, es por esto que se considera un el Nivel II de cloruros.

En lo que se refiere a la Fisuración por corrosión en el Anexo # 1 en la tabla 1 "Inspección visual, Clasificación Simplificada de Daños", se especifica la existencia de grietas mayores a 5mm de espesor horizontales de 40-50cm y, además, la

presencia de red de grietas a lo largo del acero expuesto, por lo tanto se le asigna el Nivel IV "Fisuración Generalizada y Estallidos".

A continuación se designa el valor en lo que se refiere la resistividad, se sabe que son los parámetros del material más influyente en la intensidad de corrosión, por lo que con los datos dados en el Anexo # 1 tabla 1 se denota que la intensidad de corrosión sí está presente en la estructura, dice lo siguiente "Corrosión en la parte inferior de la viga con intensidad media, aunque esta creciendo por la gran cantidad de agua", además, en varias ocasiones se denota la existencia de alta intensidad de oxidación, por lo tanto, como la intensidad de corrosión es proporcional a la resistividad se procede a darle el Nivel III, pues se presenta una intensidad de corrosión media

Referente a la Pérdida de sección, en el Anexo # 1, Tabla 1 y 1.1 se denota la delaminación en el concreto expuesto, además se observan los aros afectados a 2cm de la cara externa de la viga, y se menciona que hay gran cantidad de acero expuesto, por lo cual se denotará una pérdida de sección del 5-10%, es decir, Nivel III.

Se conoce que la estructura está ubicada en una zona donde se encuentra lejos de los volcanes, por lo tanto el Índice de Sulfatos es el Nivel I.

IDC Índice de daños por corrosión

En la siguiente ventana se muestran 6 indicadores que reflejan no solo el estado actual de la estructura, sino la previsible evolución del deterioro

INDICADOR	NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	NIVEL IV	Valor
Profundidad de carbonatación [X_{CO_2}]	$X_{CO_2} = 0$	$X_{CO_2} < c$	$X_{CO_2} = c$	$X_{CO_2} > c$	1
Nivel de cloruros [X_{Cl}]	$X_{Cl} = 0$	$X_{Cl} < c$	$X_{Cl} = c$	$X_{Cl} > c$	2
Fisuración por corrosión en el recubrimiento [w]	Sin fisuras	Fisuras < 0.3mm	Fisuras > 0.3mm	Fisuración generalizada y estallidos	4
Resistividad (Ωm) [ρ]	> 1000	500 - 1000	100 - 500	< 100	2
Pérdida de sección [Φ]	< 1%	1 - 5%	5 - 10%	> 10%	3
Intensidad de corrosión [$\mu A/cm^2$] [I_{corr}]	< 0.1	0.1 - 0.5	0.5 - 1	> 1	3
Porcentaje de Sulfato en el agua SO_4	0.00-0.10	0.10-0.20	0.20-0.50	Mayor a 0.50	1

IDC
2.3

Calcular

Aceptar

Cancelar

Figura 24. Formulario IDC

Según lo supracitado, la Intensidad de corrosión se denota en el Anexo 1, Tabla 1 como intensidad de corrosión media, es decir Nivel III.

En la Figura 19 se muestra el formulario creado para calcular el IDC, con los parámetros antes definidos, en el formulario se muestra señalado con círculos rojos los índices escogidos, el valor obtenido es de 2.5.

Índice de Agresividad Ambiental

En la Figura 25 se observa el formulario para determinar este índice. Se ha escogido la opción XC4, que es ciclos húmedos y secos, ya que la estructura se encuentra expuesta tanto al sol como a la lluvia sin ninguna protección ni impermeabilizante.

Por lo tanto el peso (valor numérico) de este índice es de 3.

Resultado ISC

En la Figura 26 se muestra un formulario que brinda la información sobre el resultado del ISC. Como se puede observar el valor ISC es de 3, por lo tanto, la corrosión que diagnóstica el programa es de corrosión media.

Designación	Descripción del ambiente	Ejemplos
1. – Sin riesgo de corrosión.		
X0	Para hormigones en masa, todos los ambientes excepto donde hay acciones de deshielo, abrasión o ataques químicos	Hormigón en interiores de edificio con niveles de humedad muy bajos
2. – Corrosión inducida por carbonatación.		
Cuando el hormigón armado está expuesto a ambientes húmedos, la exposición debe ser clasificada de la siguiente forma: Nota: las condiciones de humedad a considerar en el recubrimiento de hormigón, en algunos casos, pueden ser las mismas que las del ambiente circundante. En estos casos la clasificación de dicho ambiente debe ser la adecuada. Esta observación no es válida en el caso de existir una barrera entre el hormigón y el ambiente.		
XC1	Seco o permanentemente húmedo	Hormigón armado en el interior de edificios con humedad relativa baja. Hormigón permanentemente sumergido.
XC2	Húmedo, raramente seco	Superficies de hormigón sometidas a contacto con el agua durante largos periodos. Cimentaciones.
XC3	Humedad moderada	Hormigón armado en el interior de edificios con humedad relativa moderada. Hormigón en exteriores protegidos de la lluvia.
XC4	Ciclos húmedos y secos	Superficies de hormigón en contacto con agua, no incluidas en la clase XC2.
3. – Corrosión inducida por cloruros de origen distinto del marino.		
XD1	Moderadamente húmedo	Superficies de hormigón expuestas a los cloruros contenidos en aire.
XD2	Húmedo raramente seco	Piscinas. Hormigón expuesto a la acción de aguas industriales que contienen cloruros.
XD3	Ciclos húmedos y secos	Partes de puentes expuestos a salpicaduras que contienen cloruros.
4. – Corrosión inducida por cloruros de origen marino.		
XS1	Exposición a la acción de la sal contenida en el aire pero no en contacto con el agua de mar.	Estructuras cerca del mar o en la costa.
XS2	Permanentemente sumergidas	Parte de estructuras marítima.
XS3	Zonas expuestas a la acción de la marea o salpicaduras.	Parte de estructuras marítimas.

Valor AA

Clase

XC4

Peso

3

ACEPTAR

CANCELAR

Figura 25. Formulario Agresividad Ambiental

Resultado ISC

Resultado

ISC = 3

Calcular

Diagnostico

El índice simplificado de corrosión se asocia con un nivel de corrosión según la siguiente tabla

Nivel de corrosión	Valor de ISC
Corrosión despreciable	0-1
Corrosión baja	1-2
Corrosión media	2-3
Corrosión alta	3-4

Nivel de corrosión Corrosión media

ACEPTAR CANCELAR

Figura 26 Formulario ISC

ÍNDICE ESTRUCTURAL (IE)

Para el cálculo de este índice el programa ofrece dos opciones, ya sea para analizar elementos sometidos a flexión o sometidos a flexocompresión.

Se procede a analizar el muro que se encuentra sometido a flexocompresión que con la prueba del pachómetro se ubicó el acero horizontal y vertical como se muestra en el anexo #1, Tabla 2 Ubicación del Acero Estructural.

Índice de Armado Transversal

Como se muestra en la Figura 27 se valoró este índice en dos, en Cuadro 16 se tabulan los resultados de λ .

Espaciado de aros	400 mm
Diámetro armadura principal (# 3)	9,525 mm
Espaciado/diámetro armadura principal (λ)	42

Como se puede observar en el Cuadro 14 $\lambda > 10$ puesto que la separación de los aros es de 40cm y la varilla del armado principal es #3. Por lo tanto, el valor de IAT es de 2 (Figura 27).

IAT Índice de armado transversal (Elementos flexocompresión)

IAT Índice de armado transversal

El índice de armado transversal para elemento en flexocompresión, se estima con la siguiente tabla se debe escoger un valor entre uno y tres.

ϕ_t	$\lambda = \text{espaciado de aros} / \phi_t \text{ armadura principal}$	
	$\lambda \leq 10$	$10 < \lambda$
> 8	1	2
≤ 8	2	3

IAT

Aceptar

Cancelar

ϕ_t Diámetro de los aros o cercos

VALOR IAT

Figura 27 Formulario Índice de Armado Transversal

Índice de Armado Longitudinal

Para el cálculo de este índice, primero se debe utilizar el valor de IAT, que como se muestra en la Figura 27 el valor asignado es de 2.

Seguidamente se debe considerar si el índice de desprendimiento es mayor o menor a 0.75. Para este caso, en el Anexo #, tabla 1 y 1.1 se denota que el recubrimiento de la estructura es de 2.5cm ya que no se pudo contar con planos que indiquen con precisión los espesores de recubrimiento, como el muro en su mayoría es de mampostería se sabe que la sección es de 12 cm, el cálculo de este índice se encuentra en el Cuadro 15.

CUADRO 17 CÁLCULO ÍNDICE DE DESPRENDIMIENTO	
Sección reducida	10
Sección bruta	13
Índice de desprendimiento (Sección reducida/sección bruta del soporte)	0,769

Como se observa en el Cuadro 17, el valor del Índice de Desprendimiento es de 0,769 por lo tanto es mayor a 0,75.

Luego este índice es funcional al espaciado del acero longitudinal respecto al diámetro de la armadura principal, dicho cálculo se muestra en el Cuadro 18.

CUADRO 18 CÁLCULO DEL ESPACIADO RESPECTO AL \varnothing	
Espaciado	800 mm
\varnothing (#3)	9,525 mm
$5 * \varnothing$	47,625 mm

Por lo tanto el espaciado $>5\varnothing$, $800 > 47,625$, considerando estos parámetros se considera que el valor del IAT es de 2, por lo que el Índice Estructural es de 2.

En la Figura 28 se muestra el formulario para considerar este índice.

Índice de Daño Estructural (IDE)

Una vez calculados el Índice Simplificado de Corrosión y el Índice Estructural, se procedió a determinar el Índice de Daño Estructural.

Figura 28 Formulario Índice de Armado Longitudinal

Para valorar este índice primero se debió establecer si el fallo de la estructura es leve o importante. Como se mencionó en los capítulos anteriores, se considera una falla leve cuando las consecuencias del fallo de la estructura no son serias, o bien, son lo suficientemente pequeñas y se considera importante en el caso de haber riesgo para la vida o importantes daños materiales. Teniendo en cuenta estos factores se considera que el fallo de la estructura es importante debido a que si la estructura es habilitada van a hacer uso de ellas para apartamentos y en un eventual daño puede verse en riesgo la vida humana. En la Figura 29 se muestra los resultados del IDC, el cual tiene una S de significado Severo, es decir, que el Índice de Daño Estructural es severo, además, la Urgencia de Intervención valor señalado con la flecha es de dos a cinco años.

A continuación se le asigna al programa dar el informe final del análisis que se mostrará en la Figura 25 en formato de Word en la próxima página:

Indice de daño estructural

INDICE DE DAÑO ESTRUCTURAL

El índice de daño estructural está basado en un modelo de calificación semi-empírico que tiene en cuenta los diversos factores del problema. Se estima con base al índice simplificado de corrosión (ISC) y al índice estructural (IE) estimados previamente que se muestran a continuación:

ISC

IE

A continuación debe marcar si el fallo del elemento se considera como de consecuencias leves o importantes con base a la importancia de la misma estructura y en la importancia del elemento como elemento soportante o principal

Consecuencia del fallo

Leve

Importante

IDE

EVALUAR

TABLA

Atrás

Urgencia de intervención (años)

Figura 29 Formulario IDC

INFORME FINAL
DATOS GENERALES

Informe No 1

Nombre del proyecto = Edificio de apartamentos
Ubicación = Lourdes de Montes de Oca
Fecha = 14 de febrero del 2006
Elaborado por Ing. Andrea Aguilar Brenes
Tipo de estructura = Edificación
Fecha de construcción = Hace 10 años

DATOS PARTICULARES DE LA ESTRUCTURA

Tipo de cemento = No hay dato
Naturaleza de los áridos = No hay dato
Método de curado = No hay dato

HISTORIAL DE VIDA EN SERVICIO

Resistencia del concreto a la compresión = No hay dato
Anomalías observadas = Métodos y sistemas constructivos combinados de forma extraña con respecto de su comportamiento estructural, Ninguna
Inspecciones rutinarias = No se hacían
Tipos de mantenimiento = Ninguno
Reparaciones = Cambio de placa en muro colindante

DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

Atmósfera = Urbana
Agua = Potable
Suelo = Natural
Humedad relativa = 71%
Temperatura = 20.7°C
Régimen de vientos = 33.5km/h

ISC INDICE SIMPLIFICADO DE CORROSIÓN

IDC Índice de daños por corrosión
Profundidad de carbonatación = $X_{co2} = 0$, Nivel I
Nivel de cloruros = $X_{cl} < C$, Nivel II
Fisuración por corrosión = Fisuración generalizada y estallidos , Nivel IV
Resistividad = 500 - 1000 , Nivel II
Pérdida de sección = 5 - 10% , Nivel III
Intensidad de corrosión = 0,5 - 1 , Nivel III
VALOR IDC = 2.5

AA Índice de agresividad ambiental
Corrosión inducida por carbonatación Clase = XC4 , Ciclos húmedos y secos , Peso = 3

ISC Resultado ISC
Valor ISC = 3
Nivel de corrosión = Corrosión media

IE ÍNDICE ESTRUCTURAL

Elemento sometido a flexocompresión
Diámetro del acero que forma los aros > 8mm
Espaciado de aros/diámetro de la armadura principal > 10mm
IAT = 2
Índice de desprendimiento ≥ 0.75
Espaciado > 5 veces el diámetro principal del armado
IAL = II
IE = 2

IDE ÍNDICE DE DAÑO ESTRUCTURAL

Consecuencia del daño = Importante
IDE = S
Índice de daño estructural severo
Urgencia de intervención = de 2 - 5 años

Inspección Detallada

Para este método lo primero que se analizará es el plan de muestreo, como se puede observar en la Figura 30.

Figura 30. Formulario Plan de Muestreo

En el Plan de Muestreo se escogieron tres zonas: la Zona N°1 se refiere a las paredes, concreto reforzado, medio seco y grado de deterioro severo.

La Zona N°2 se refiere a la losa, en concreto reforzado, medio húmedo y grado deterioro severo.

Por último, la Zona N°3 se refiere a la viga, concreto reforzado, medio seco y grado de deterioro severo.

Una vez realizado el plan de muestreo se procede a realizar la clasificación de daños que se realiza marcando los daños que se notaron en la inspección, dependiendo de la descripción que se encuentra en la tabla mostrado por el formulario (Figura 31).

El programa según el tipo de daño indica también cuáles son las causas y los

detalles que el usuario debe dar en la inspección, los daños son:

Daño = Delaminación

Causas = Presión interna por corrosión de la

armadura, o por una fuerza externa aplicada

Detalles dados por la inspección = Superficie

afectada, profundidad

Daño = Grietas y fisuras

Causas = Sobrecargas, contracción,

corrosión

Detalles dados por la inspección = Dirección,

ancho, longitud y profundidad

Daño = Manchas de humedad

Causas = Esguerramiento externo o interno,

condensación

Detalles dados por la inspección = Superficie

afectada

Daño = Manchas de óxido
 Causas = Corrosión de la armadura, del alambre de amarre
 Detalles dados por la inspección = Localización, intensidad, posible daño asociado

Daño = Red de grietas
 Causas = Cambio diferencial de volumen de hormigón superficial e interno
 Detalles dados por la inspección = Ancho de grietas, tamaño de red y superficie afectada

La determinación se encuentra en la Figura 31

Clasificación simplificada de daños

Con la ayuda de la inspección visual se debe marcar en la siguiente tabla los daños que se pueden apreciar, con la columna de descripción se facilitará esta tarea. Con forme se marque el daño aparecerán sus causas y los detalles que se deben dar con la inspección.

DANO	DESCRIPCIÓN
Grietas o fisuras	Rotura del concreto, superficial o profunda
Red de grietas	Grietas estrechas y cortas formando una red
Gel de exudación	Gel viscoso saliendo a través de los poros del concreto
Eflorescencia	Costra blanca en la superficie del concreto
Manchas de óxido	Manchas de color marrón – rojiza
Manchas de humedad	Zona superficial del concreto con indicios de humedad
Protuberancia ("Pop-Out")	Daño localizado superficial
Concreto fofo	Sonido hueco al golpe del martillo
Delaminación	Fragmento de concreto separado de la masa
Intemperismo	Desgaste de la superficie del concreto, lavado de la pasta del cemento
Nidos de abeja (Cangrejas)	Vacios entre los agregados gruesos

Clasificación daños

Daño = Eflorescencia
 Causas = Lixiviación de hidróxidos con o sin formación de carbonatos
 Detalles dados por la inspección= Superficie afectada, cantidad de depósito

Daño = Delaminación
 Causas = Presión interna por corrosión de la armadura, o por una fuerza externa aplicada
 Detalles dados por la inspección= Superficie afectada, profundidad

Daño = Grietas y fisuras
 Causas = Sobrecargas, contracción, corrosión
 Detalles dados por la inspección= Dirección, ancho, longitud y profundidad

Aceptar

Cancelar

Figura 31 Formulario Clasificación de Daños

Luego de llevar a cabo la Inspección Visual y la Clasificación Simplificada de Daños, que se consideran como una inspección realizada se procede a escoger los ensayos, según los recursos y el tiempo disponible.

Los ensayos que se realizaron en el concreto son los siguientes:

- Esclerometría
- Profundidad de carbonatación
- Resistencia a la compresión
- Porosidad

En la Figura 32 se muestra el formulario donde se escogieron los resultados correspondientes.

Luego se procede a completar los formularios de ensayo.

El primer ensayo que se analizará es la Esclerometría. Para este, los resultados comenzaron a dar parecidos y muy altos, por lo que se decidió no tomar en cuenta los valores obtenidos. Por percibir un posible fallo en el equipo.

Luego se procede a realizar el ensayo de Profundidad de carbonatación, que como se muestra en la Figura 34, la profundidad de carbonatación es nulo en diez años de vida que tiene la estructura. Por lo tanto, la evaluación dada por el programa es "Concreto de elevada resistencia a la carbonatación".

Evaluación del concreto

A continuación se presentan algunos ensayos recomendados para la evaluación del concreto. En los botones se encuentra información de cada ensayo al finalizar el usuario debe marcar cuáles ensayos ha decidido utilizar

Información

Resistividad Profundidad de carbonatación

Ultrasonido Concentración de cloruros

Esclerometría Resistividad a la compresión

Porosidad

Ensayos a utilizar

Resistividad

Ultrasonido

Esclerometría

Profundidad de carbonatación

Concentración de cloruros

Resistencia a la compresión

Porosidad

Cancelar Aceptar

Figura 32 Formulario Ensayos Evaluación del concreto

Para el acero se realizó el ensayo de localización de la armadura, como se observa en la Figura 33.

Evaluación de la armadura

Evaluación de la armadura

A continuación se presentan algunos ensayos recomendados para la evaluación de la armadura. En los botones se encuentra información de cada ensayo al finalizar el usuario debe marcar cuáles ensayos ha decidido utilizar

Información

Localización de armadura

Medición de potenciales

Velocidad de corrosión

Ensayos a utilizar

Localización de la armadura y espesor de recubrimiento

Medición de potenciales

Medición de la velocidad de corrosión

Aceptar

Cancelar

Figura 33 Formulario Ensayos de Evaluación de la Armadura

PROCEDIMIENTO

Toma de testigos

La sección será un corte transversal donde un extremo corresponderá a la superficie expuesta a la atmósfera. El testigo puede ser cilíndrico o una sección extraída. El tiempo de exposición de la superficie a evaluar no podrá ser mayor de 15 minutos (fractura fresca).

En caso de que no pueda extraerse un testigo o porción, se procederá a taladrar una o varias secciones manual o mecánicamente hasta la profundidad de interés, dejando el lugar libre de material suelto y polvo, lo cual expondrá la superficie para el análisis.

Determinación de la profundidad de carbonatación

Una vez seleccionada la probeta y estando su superficie libre de polvo, se aplicará por automatización el indicador ácido-base en forma uniforme.

Luego de la aplicación, antes de transcurridos 15 minutos, se efectuará la medición de la longitud (profundidad) de la zona incolora desde la superficie, determinándose, con precisión los valores máximos/mínimos del frente incoloro y la media aritmética, de un mínimo de medición, en función del tamaño de la probeta. El procedimiento no debe tardar más de 20 minutos. Deberá levantarse un registro preciso sobre la ubicación de los testigos, tonalidad visualizada, profundidad de carbonatación medida e indicar explícitamente el tipo de indicador utilizado. Igualmente se efectuará un registro fotográfico donde sea pertinente.

Criterios de evaluación

a) NIVEL DE pH

En función del indicador ácido-base seleccionado se establecerá el pH del frente incoloro en la muestra.

La fenoftaleína es el indicador más comúnmente utilizado y su rango de viraje está entre pH 8,2 y pH 9,8. Varía su tonalidad de incoloro a violeta rojizo.

La timoftaleína es otro indicador que podrá utilizarse, ya que su rango de viraje está entre pH 9,3 y pH 10,5 con tonalidades de incoloro a azul.

En el botón con nombre figura, se puede acceder la figura que muestra los indicadores, su rango de viraje, el pH y las especies predominantes.

b) CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

Uno de los modelos más sencillos que permite predecir la velocidad de carbonatación del concreto armado es el que relaciona la profundidad de carbonatación con la raíz cuadrada del tiempo de exposición.

$$K_{CO_2} = X_{CO_2} \cdot \sqrt{t}$$

Donde:

K_{CO_2} = Constante de carbonatación, mm

X_{CO_2} = Profundidad de carbonatación, mm.año^{-0,5}

t = Tiempo en años

Este modelo no debe ser aplicado directamente a estructuras con menores de 3 años de vida, en cuyo caso se recomiendan dos o más medidas con un intervalo mínimo de 6 meses.

Datos obtenidos

X =

t (años) =

K =

Evaluación

Concreto de elevada resistencia a la carbonatación

Figura 34 Formulario Ensayo Profundidad de Carbonatación

Para el ensayo de resistencia a la compresión se cuenta con los siguientes datos:

- Prueba 1: 10,48 MPa
- Prueba 2: 8,91 MPa
- Prueba 3: 12,59 MPa

Por lo tanto, el promedio es de 10,66 MPa. En la Figura 35 se muestra el formulario de este ensayo.

En la Figura 36 se muestra los resultados obtenidos con el formulario diseñado para este ensayo.

Como se muestra en la Figura 36 el programa brinda un resultado de 30.39% de porosidad total. La evaluación da el resultado de concreto de durabilidad inadecuada.

Figura 35 Formulario Ensayo Resistencia a la Compresión

La Figura 35 permite observar que la resistencia mínima es de 11.14 MPa, en la evaluación se puede observar que el concreto es de baja durabilidad y que no cumple con la mínima resistencia a la compresión.

Luego se procede a determinar el ensayo de porosidad total.

Los datos con los que se cuentan son los siguientes:

- W saturado = 686,90 g
- W 105°C = 581,47 g
- W sumergido = 340 g

PROCEDIMIENTO

Ensayo de porosidad (Porosidad Total)

Este ensayo puede efectuarse de manera independiente, es decir sobre testigos separados. En cualquiera de los casos, el espécimen luego pre-acondicionado se sumerge en agua totalmente durante 24 horas mínimo, al cabo de las cuales se registra su peso fuera (saturado de agua) y dentro de agua (sumergido en agua). Finalmente, el espécimen se seca a 105 °C hasta peso constante y se registra su peso. La porosidad total se expresa en porcentaje, así:

$$\% \text{ de Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}}$$

Este valor de la porosidad no contiene más que una mínima parte de los poros de aire. Por lo tanto, si se quiere obtener la porosidad total se debe saturar totalmente el espécimen, hervir éste varias horas y luego proceder a enfriarlo lentamente antes de registrar su peso "saturado" o, bien hacer vacío en la cámara donde se tiene sumergida la probeta.

Datos obtenidos

W saturado = 686.9

W 105°C = 581.47

W sumergido = 340

% Porosidad total = 30.39

Calcular

Evaluación

Concreto de durabilidad inadecuada

Evaluar

Regresar

Figura 36 Formulario Ensayo Porosidad Total

Por último, en lo que se refiere al ensayo de la localización de la armadura, el programa ofrece las indicaciones para realizar el ensayo adecuadamente.

Los resultados obtenidos en el ensayo se encuentran en el Anexo # 1 Tabla 2.

El programa ofrece la facilidad de un informe final donde se recopila toda la información dada en el transcurso del análisis.

El análisis se muestra en la próxima página.

INFORME FINAL

Plan de muestreo

Zona N° 1

Exigencia estructural = Columna, paredes o placa aislada

Técnica de construcción = Concreto reforzado

Medio = Seco

Grado de deterioro = Severo

Zona N° 2

Exigencia estructural = Viga, losa o placa corrida.

Técnica de construcción = Concreto reforzado

Medio = Húmedo

Grado de deterioro = Severo

Zona N° 3

Exigencia estructural = Viga, losa o placa corrida.

Técnica de construcción = Concreto reforzado

Medio = Seco

Grado de deterioro = Severo

Clasificación daños

Daño = Delaminación

Causas = Presión interna por corrosión de la armadura, o por una fuerza externa aplicada
Detalles dados por la inspección= Superficie afectada, profundidad

Daño = Grietas y fisuras

Causas = Sobrecargas, contracción, corrosión

Detalles dados por la inspección= Dirección, ancho, longitud y profundidad

Daño = Manchas de humedad

Causas = Esguerramiento externo o interno, condensación

Detalles dados por la inspección= Superficie afectada

Daño = Manchas de óxido

Causas = Corrosión de la armadura, del alambre de amarre

Detalles dados por la inspección=

Localización, intensidad, posible daño asociado

Daño = Red de grietas

Causas = Cambio diferencial de volumen de hormigón superficial e interno

Detalles dados por la inspección= Ancho de grietas, tamaño de red y superficie afectada

Ensayos para la evaluación del concreto a utilizar

Profundidad de Carbonatación

Profundidad de carbonatación = 0

Tiempo en años = 10

Constante de carbonatación = 0.00

Evaluación = Concreto de elevada resistencia a la carbonatación.

Resistencia a la compresión

Promedio de la resistencia a la compresión de los testigos 10.66

Mínima resistencia a la compresión entre los testigos de la muestra 8.91

Resistencia mínima a la compresión = 8.9111.14

Evaluación = Concreto de baja durabilidad

Evaluación = No cumple con la mínima resistencia a la compresión

Porosidad

Ensayo de porosidad total

Peso saturado = 686.9

Peso a los 105°C = 581.47

% de porosidad total = 30.39

Evaluación = Concreto de durabilidad inadecuada

Ensayos para la evaluación de la armadura a utilizar

Evaluación del estado de la armadura

Diagrama esquemático del elemento con la profundidad de la armadura en cada uno de los sitios seleccionados

Análisis de los resultados

El programa se acoplo bien a los resultados de la estructura. “Evaluación, Diagnóstico y Análisis de una Estructura en Mampostería”⁴⁷ los resultados que desplegó el programa se analizarán a continuación.

En los resultados de la evaluación por medio del Método Simplificado, el Índice de Daños por Corrosión está valorado en 2.5 donde se puede deducir que la estructura no está afectada por carbonatación ni cloruros sino por las grietas y exposición del acero (Figura 24), además, el Índice de Agresividad Ambiental da un resultado de 3 (Figura 25), esto es porque la estructura está expuesta al medio ambiente, siendo víctima de humedad y constante contaminación se denota el resultado del Índice Simplificado de Corrosión que se puede observar en la Figura 26, el resultado es de 3, lo que implica que la estructura sufre de una corrosión media que como se puede determinar en el Cuadro 3, es considerable el daño. Por lo tanto, predispone una mala evaluación de una estructura que ha sido abandonada por muchos años. Además, es fundamental el que la estructura esté expuesta al medio ambiente sin ningún tipo de protección ni impermeabilizante.

Los Índices de Armado Transversal y los Índices de Armado Longitudinal ambos dan un resultado de 2, lo que implica que el Índice Estructural tiene un valor de 2, este valor toma en cuenta la forma en que está distribuido el acero tanto horizontalmente como verticalmente.

Los resultados del Índice Simplificado de Corrosión y del Índice Estructural se unen para dar un solo resultado del Índice de Daño Estructural, que el programa lo calculo automáticamente como Severo, lo cual

coincide con la evaluación que se dio con el Índice Simplificado de Corrosión.

Por último, el Método Simplificado da la recomendación de una Urgencia de Intervención de 2 a 5 años (figura 29), por lo tanto, la urgencia no debe ser inmediata, sin embargo, si se quiere volver a reestablecer la estructura la intervención debe ser lo más pronto posible.

En la Inspección Detallada, se puede observar en la Clasificación de Daños Figura 31, que los daños más significativos son las grietas, red de grietas, figuración y sobre todo el acero expuesto.

Con esta información se procedió al análisis de los ensayos realizados, el resultado del ensayo de carbonatación denota que es un concreto con elevada resistencia a la carbonatación. El programa analizó el resultado de penetración nula debido a la carbonatación y ese es la evaluación que despliega. Por lo que cual se deduce que la estructura no está afectada debido a este parámetro.

Los resultados de la Resistencia a la Compresión, denota resultados muy diferentes y no satisfactorios, porque como se muestra en la Figura 35, el resultado que despliega el programa es de baja durabilidad y no cumple con la resistencia mínima.

El programa coincide con el ensayo de Porosidad Total, ya que el resultado es el mismo que brinda la Resistencia a la Compresión, como muestra la figura 36, que da como resultado “Concreto de durabilidad inadecuada”.

⁴⁷ Alberto José Blanco, Arturo José Gamboa Solís, Jorge Luis Picado Sánchez, “Evaluación, Diagnóstico y Análisis de una Estructura de Mampostería

Conclusiones

1. El desarrollo de este proyecto consistió en construir una aplicación que permite la evaluación de la corrosión en las estructuras de concreto armado. Dicho proceso de evaluación se basa en el Método Simplificado y en la Inspección Detallada. Estas consideraciones permiten predecir el comportamiento de las estructuras afectadas por corrosión.
2. Los métodos automatizados en el programa (Método Simplificado e Inspección Detallada) implementan los criterios de evaluación de la corrosión en estructuras de concreto armado acoplado a las estructuras y ambiente españoles dejando un margen de error para las estructuras de Costa Rica. Por lo que se propone adaptar al país vocabulario y zonas climáticas que no están contempladas en los métodos españoles.
3. Los conocimientos acerca las estructuras a evaluar y de los ensayos a realizar son imprescindibles, si se pretende hacer uso de esta aplicación. La evaluación se deja a juicio del ingeniero a cargo, pues el programa solamente revela el resultado de lo que el usuario establece.
4. El programa facilitó el análisis de la estructura afectada por la corrosión. Tanto con el Método Simplificado como con la Inspección detallada se concluye:
 - la estructura tiene una corrosión severa y que el concreto es de baja durabilidad.
 - la Urgencia de Intervención de la estructura analizada debe ser de dos a cinco años.
 - los concretos de la estructura analizada no presentan problemas de carbonatación.
 - el valor del Índice Simplificado de Corrosión suministrado por el programa permite determinar una Corrosión Media en la estructura estudiada.

Apéndice

Como parte del apéndice se presenta el Manual de Usuario creado con el propósito de que al usuario se le facilite la utilización del software computacional.

Anexos

En este capítulo se presentará, las tablas de los resultados del análisis de una estructura de mampostería, la cuál se uso para aplicarla al programa y evaluar la estructura de una manera automatizada el Método Simplificado y la Inspección Detallada.

La investigación que se anexará se llama “Evaluación, Diagnóstico y Análisis de una Estructura en Mampostería” que fue realizada por los autores Alberto José Blanco, José Gamboa Solís, Jorge Luis Picado Sánchez.

Referencias

Libros

Arthur H. Nilson, 1999, **“DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO”**, Colombia: Editorial Mc Graw Hill.

Andrés Torres Acosta 1997, **“DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO CON CRITERIOS DE DURABILIDAD”**, México, Publicación Técnica No. 181.

Angélica del Valle Moreno 1997, **“EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO”**, México, Publicación Técnica No 182.

Red DURAR 2000, **“MANUAL DE INSPECCIÓN, EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO”**, España, Comité editorial: Gladis Trocónis de Rincón, Aleida de Carruyo.

ACI 318, 2006, Costa Rica: Comité ACI y ICCYC.

Ing. Carlos Alberto Civello, **“CORROSIÓN EN ARMADURAS DE HORMIGÓN ARMADO”**, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón

Irma Ocampo, **“AUMENTO DE LA VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CORROÍDAS, MEDIANTE REALCALINIZACIÓN”**, México

Geocisa, CONTECVET, 2002, **“MANUAL DE EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS AFECTADAS POR CORROSIÓN DE LA ARMADURA”**, Madrid

Rojas M. Gustavo., 2007, **“MANUAL DE USUARIO EECC VERSIÓN 1.0”**

Alberto José Blanco, Arturo José Gamboa Solís, Jorge Luis Picado Sánchez, 2006 **“EVALUACIÓN, DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS DE UNA ESTRUCTURA DE MAMPOSTERÍA”**

Villón Béjar Máximo, 1999, **“DESARROLLO DE APLICACIONES CON VISUAL BASIC”**, Costa Rica, Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Consultas personales

Rojas, G. 2007. **FUNDAMENTOS DE VISUAL BASIC**. Cartago ITCR. Comunicación Personal

Rojas, G. 2007. **EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO** Cartago ITCR. Comunicación Personal

Páginas Web

- <http://scielo.unam.mx/pdf/iit/v7n1/v7n1a05.pdf>
- <http://www.vector-corrosion.com/>
- <http://www.ndtjames.com/spanish/catalog/corrosionTesting/index.html>