



**Revisión bibliográfica de rehabilitación de estructuras en concreto afectadas por
carbonatación**

Omar Camilo Muñoz Morales

María Camila Henao Aristizábal

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

Juan Fernando Velásquez Bedoya

M.Sc. Ingeniería Sísmica

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2023

Cita

(Muñoz Morales & Henao Aristizábal, 2023)

Referencia

Estilo APA 7 (2020)

Muñoz Morales, O., & Henao Aristizabal, M. C. (2023). *Revisión bibliográfica de rehabilitación de estructuras en concreto afectadas por carbonatación* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte X.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo y el título como tal, está dedicado principalmente a nuestras familias, por haber impulsado nuestro crecimiento profesional, por el apoyo incondicional y la comprensión, de que en muchos espacios no se pudieron compartir por cumplir nuestro propósito de enriquecer nuestro perfil profesional.

Familia su apoyo emocional y presencia a lo largo de este postgrado nos dio las fuerzas para seguir con nuestro objetivo en momentos complejos, donde no comprendíamos muchos de los temas y se requería nuestra completa atención. La emoción y alegría de ver nuestras metas cumplidas, son nuestro impulso de seguir adelante en nuestra vida, esperamos que nuestros pasos sirvan como el mejor de los ejemplos.

Agradecimientos

Plenamente agradecidos con la Universidad de Antioquía, por generar el espacio de aprendizaje con horarios asequibles, y permitir que personas de diferentes regiones del departamento pudieran desplazarse y realizar esta especialización; además de seleccionar a unos excelentes profesionales como docentes.

Agradecimientos a la planta de profesores por su excelencia profesional y empeño en capacitar al grupo; por enseñarnos la importancia del análisis y diseño de estructuras, siempre demostraron su empeño en transmitir su experiencia y conocimientos.

A nuestro primer profesor y asesor de esta monografía, el ingeniero Juan Fernando Velásquez, por recibirnos y guiarnos desde el inicio en este postgrado, mucha admiración por su trabajo y profesionalismo.

Al grupo de compañeros por la hermandad generada, por su apoyo, por tender la mano y contribuir en este proceso de aprendizaje.

Tabla de contenido

-	
Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1. Planteamiento del problema	11
2. Justificación.....	11
3. Objetivos	12
3.1 Objetivo general	12
3.2 Objetivos específicos.....	12
4. Marco teórico	13
4.1 Vida útil de una estructura	15
4.2 La corrosión.....	15
4.2.3 Periodos de tiempo de corrosión según el ACI.....	16
4.3 Alcalinidad en el concreto.....	17
5. Metodología	18
5.1 Carbonatación del concreto	18
5.1.1 Avance del frente de carbonatación	19
5.1.2 Modelo de avance de carbonatación	19
5.1.3 Pruebas de carbonatación.....	21
6. Procedimientos frente a la Carbonatación.....	23
6.1 Consideraciones de diseño y control de calidad:	23
6.2 Inspecciones periódicas y planes de mantenimiento	26
6.3 Rehabilitaciones	28

6.3.1 Tratamientos preventivos.....	28
6.3.2 Tratamientos correctivos:.....	30
6.3.3 Ejemplos de rehabilitación.....	35
7. Conclusiones	39
8. Recomendaciones.....	41
Referencias	42

Lista de tablas

Tabla 1 Determinación de coeficiente ambiental	20
Tabla 2 Determinación de coeficiente de aireantes	20
Tabla 3 Determinación de coeficiente conglomerante	21
Tabla 4 Recomendaciones de durabilidad en el concreto	25
Tabla 5 Recomendación frecuencias de inspecciones según CEB-FIB 1990	26

Lista de figuras

Figura 1 Proceso de carbonatación.	13
Figura 2 Prueba de fenolftaleína	14
Figura 3 Manchas de óxido	16
Figura 4 Proceso químico de carbonatación	18
Figura 5 Protección de las armaduras de acero de refuerzo	30
Figura 6 Escarificación del concreto	31
Figura 7 Instalación de fajas de refuerzos adicionados	32
Figura 8 Proceso de rehabilitación en tanque de agua potable	36

Siglas, acrónimos y abreviaturas

M.Sc	Magister Scientiae
UdeA	Universidad de Antioquia
NSR-10	Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10
ACI	American Concrete Institute
ALCONPAT	Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción
ARPHO	Asociación de Reparación Refuerzo y Protección del Hormigón.
cm	Centímetros
a/mc	Agua/material cementante

Resumen

La corrosión en el acero de refuerzo de las estructuras de concreto reforzado es un proceso que afecta la vida útil y resistencia de las construcciones construidas con este material. El seguimiento en el avance de los parámetros determinantes de este proceso y la ejecución de mantenimientos preventivos son fundamentales en la vida de servicio de estas estructuras.

La durabilidad de una estructura comienza desde su concepción misma, donde se determinan la clase de exposición y con ellos los parámetros para el diseño de las proporciones de los materiales a usar y los parámetros geométricos y mecánicos de sus elementos estructurales.

Un buen seguimiento de las estructuras, de acuerdo con las recomendaciones realizadas por el diseñador y/o constructor, definen los tratamientos a lo largo de la vida útil de la estructura. Si bien las construcciones no son eternas, la aplicación de tratamientos preventivos a lo largo de la vida de servicio de una estructura alarga la vida útil de estas.

Palabras clave: corrosión, carbonatación.

Abstract

Corrosion in the reinforcing steel of reinforced concrete structures is a process that affects the useful life and resistance of the constructions built with this material. The monitoring of the progress of the determining parameters of this process and the execution of preventive maintenance are fundamental to the service life of these structures.

The durability of a structure begins from its very conception, where the exposure class is determined as the parameters for the design of the proportions of the materials to be used and the geometric and mechanical properties of its structural elements.

According to the recommendations made by the designer and/or builder, good monitoring of the structures defines the treatments throughout the structure's service life. Although constructions are not eternal, the application of preventive treatments throughout the service life of a structure extends its useful life.

Keywords: corrosion, carbonation

Introducción

En el presente trabajo se realiza un compendio sobre el frente de carbonatación como fenómeno patológico que afecta las estructuras de concreto reforzado y cómo puede atenderse mediante ciertas recomendaciones a la hora del diseño y construcción; así como, por medio de la eventual rehabilitación de dichas estructuras. Se identifican las causas y consecuencias que se generan por los distintos ambientes y cómo afectan los elementos estructurales. Adicionalmente, se plantean diferentes metodologías de rehabilitación basados en la vida útil de las estructuras, para buscar prolongar su tiempo de uso.

Es importante realizar diseños y prácticas de construcción adecuadas para cada estructura, procurando evitar la corrosión del refuerzo, mediante el revestimiento y la capa pasivadora del acero para prevenir la pérdida de resistencia ante cualquier evento sísmico o agente externo.

1. Planteamiento del problema

La carbonatación es uno de los problemas que más afecta las diferentes estructuras, generándose un avance lento pero progresivo dependiendo de la zona en que se encuentre ubicado cada proyecto, lo que conlleva a analizar detalladamente cada factor que influye en el daño de los elementos estructurales, y que según Fagerlund, G, 2004, se evidencia que la corrosión es el factor que mayor incidencia presenta al momento de estudiar las causas de daño.

2. Justificación

En nuestro entorno es común encontrar estructuras ubicadas en diferentes ambientes, variando de acuerdo con el lugar o condición a la que se esté expuesta. Estos desencadenan en una serie de agentes químicos o físicos, que generan efectos negativos en las estructuras, desde su proceso de construcción o en el tiempo de uso de estas, dando lugar a daños que contribuyen a la disminución de su vida útil, afectando su capacidad de soportar cargas y perdiendo resistencia de sus materiales.

En las estructuras de concreto reforzado se han evidenciado daños o lesiones patológicas, que son generadas por diferentes factores, iniciando desde la concepción misma del proyecto, pasando por el proceso de vaciado y curado del concreto, hasta el uso mismo de la estructura. Lesiones que comienzan desde los poros y las fisuras en la zona no confinada de los elementos, convirtiéndose en un medio de acceso para que los diferentes agentes agresivos lleguen hasta el acero de refuerzo, permitiendo los procesos electroquímicos que facilitan el deterioro del acero y llevando a la estructura a tener un grado de vulnerabilidad mayor; la carbonatación es uno de los problemas que más inducen a la corrosión del acero, puesto que se genera por la combinación del dióxido de carbono presente en la atmósfera y algunos componentes del concreto o el agua que se aloje en los poros del elemento estructural.

Por lo que se hace fundamental estudiar y analizar los daños que se presentan en las estructuras de concreto reforzado, conociendo las diferentes alternativas de repotenciación o reparación que deben ejecutarse para mantener o alargar la vida útil de las estructuras y por ende salvaguardar la vida humana.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Realizar un compendio sobre el frente de carbonatación y su eventual rehabilitación en las estructuras en concreto reforzado afectadas por este fenómeno patológico.

3.2 Objetivos específicos

Revisar referencias bibliográficas que ayuden a conocer los métodos de repotenciación y/o reparación de daños causados por carbonatación.

Conocer los modelos matemáticos que ayudan a predecir el avance de daño causado por carbonatación en estructuras de concreto reforzado.

Reconocer las intervenciones y metodologías que deben implementarse para repotenciar y/o reparar las estructuras afectadas por carbonatación.

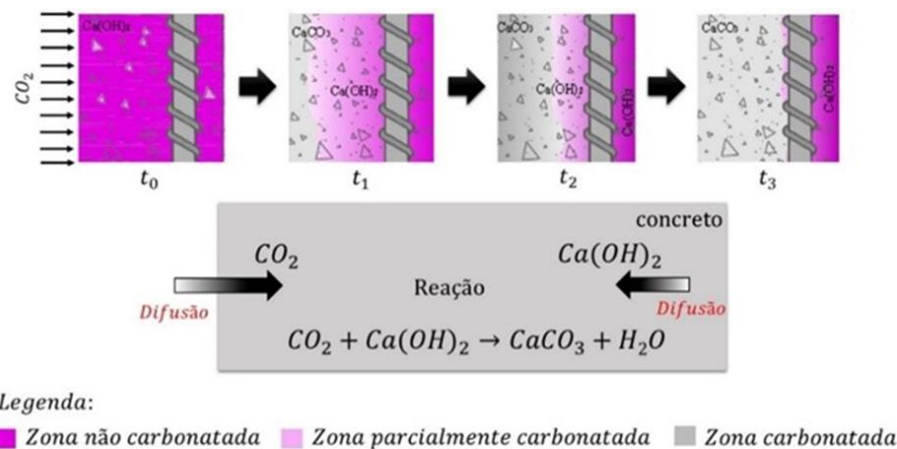
4. Marco teórico

La carbonatación es uno de los procesos químicos más importantes que afectan la mayoría de las estructuras de concreto reforzado, causando cambios en sus propiedades químicas y físicas. Donde influye principalmente el medio en el cual está sometida la estructura y las prácticas constructivas que se efectúan para correlacionarse con su durabilidad.

Según la ACI 116 la carbonatación es la reacción entre dióxido de carbono y un hidróxido o un óxido para formar un carbonato, especialmente en una pasta de cemento, mortero u hormigón. Este proceso fisicoquímico al darse con compuestos de calcio produce carbonato de calcio; el cual se da lenta y continuamente en las estructuras, afectando inicialmente el concreto de recubrimiento, donde el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmósfera penetra a través de los poros y reacciona con la humedad presente en estos, dando lugar a la reducción de pH del concreto (figura 1). Esto provoca la destrucción o descascaramiento de esta capa de pasivación que recubre el acero de refuerzo y posteriormente dar lugar a un nuevo fenómeno de corrosión de la armadura de refuerzo, que con el tiempo se convierte en un problema riesgoso para la estructura y por ende costoso de reparar.

Figura 1

Proceso de carbonatación.



Nota. Fuente <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/245/388#info>

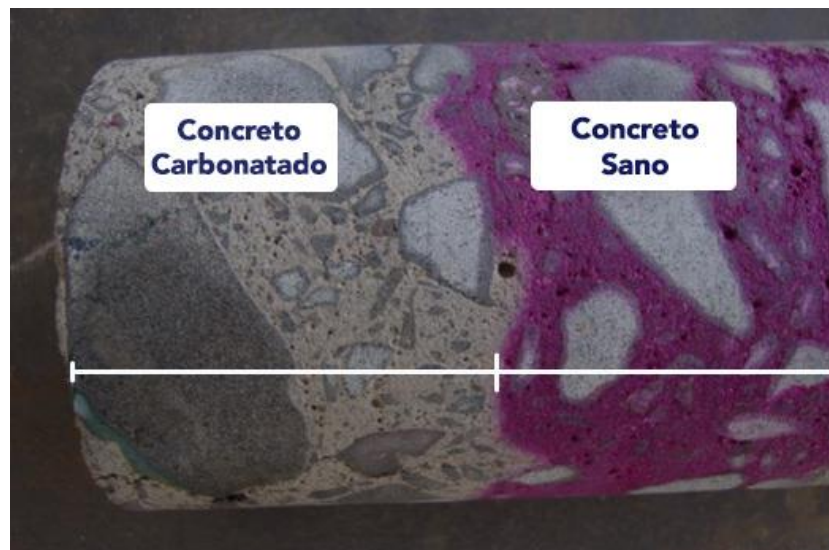
El grado de carbonatación se ve influenciado por diferentes factores directos de los materiales como lo son la permeabilidad y el contenido de calcio en la mezcla de concreto, puesto que “la pasta de cemento contiene entre un 25 y un 50 % en peso del cemento de hidróxido de

calcio” (Vidaud, 2012), por lo que se hace importante implementar buenas prácticas de construcción, manejando buena relación agua-cemento, niveles de compactación, y efectuando tipos y tiempos de curado adecuados, previniendo la generación de fisuras o grietas durante el fraguado (Bolívar & Cañón, 2015); también influyen factores externos tales como condiciones atmosféricas y ambientales (cantidad de CO₂, humedad relativa, temperatura), lo que en conjunto con el mal proceso constructivo acelera el avance del frente de carbonatación.

El pH se define como la escala con que se mide la alcalinidad o acidez de las sustancias o soluciones (ABINCO, 2011), presentando valores para un concreto normal entre 12-13, considerándose una mezcla con alta alcalinidad, debido a la combinación de Portlandita o hidróxido de calcio con álcalis de sodio y de potasio contenidos en las arcillas (Vidaud, 2012) y que al presentar reducciones significativas cuando comienza el proceso de carbonatación, puede llegar a valores alrededor de 9.5, lo que lo convierte en un estado crítico especialmente para el acero de refuerzo, ya que se provoca la destrucción de la capa de óxido pasivante que lo protege de la corrosión. La identificación de este problema es sencilla, puesto que se basa en la aplicación de fenolftaleína diluida en alcohol, buscando que el concreto muestre un cambio de color el cual indica que no hay presencia de carbonatación si se torna de color rosado y donde no haya cambios se concluirá que hay un grado avanzado del problema, tal como se muestra en la figura 2.

Figura 2

Prueba de fenolftaleína



Nota. Fuente: Blog Abinco. <http://blog.abinco.com.mx/posts/carbonatacion-en-estructuras-de-concreto#:~:text=En%20un%20concreto%20sano%20su,reduce%20por%20debajo%20de%2011>

4.1 Vida útil de una estructura

La vida útil de una estructura puede definirse como el tiempo o periodo en que esta mantiene su funcionalidad, seguridad y estética sin cambios o alteraciones; y para lo cual se pueden presentar dos tipos:

Vida útil de diseño: se especifica para la proyección de tiempo de una obra particular o aquellas que se rigen de normas y/o códigos establecidos.

Vida útil real: se presenta cuando las estructuras alcanzan un punto crítico de deterioro haciéndola inservible.

Durante la vida útil de cualquier estructura se pueden presentar diferentes factores que afectan directa o indirectamente sus propiedades, reduciendo considerablemente su durabilidad; y que a su vez dependen también del entorno o ambiente al cual se encuentre expuesta la edificación, por lo que se identifican dos causantes:

Internas: Se relacionan con cambios volumétricos del concreto, generados por deficiencias en la relación agua/cemento desde el proceso constructivo o pérdidas de agua.

Externas: Se pueden generar por acción de cargas o por agentes químicos presentes en el ambiente, que actúan en los concretos deteriorados o fisurados llevando a reacciones como la carbonatación.

4.2 La corrosión

El manual de rehabilitación de estructuras de hormigón, Troconis de Rincón et al., 1997, define la corrosión como un proceso electroquímico que provoca la degradación (oxidación) del acero en el hormigón; siendo uno de los fenómenos que más incide en el deterioro estructural, generándose por las afecciones en los recubrimientos de concreto de cada elemento y que se ve acelerado por la presencia de agentes externos del ambiente o agentes internos, incorporados al concreto (ver figura 3)

Figura 3

Manchas de óxido



Nota. Fuente Protección Catódica: "La cirugía del Hormigón" <https://www.prkks.es/blog/24-proteccion-catodica-del-hormigon>

El proceso de corrosión hace parte de los mecanismos de degradación de las estructuras de concreto reforzado, dentro del cual los principales son la corrosión bajo tensión y la corrosión de fragilización por hidrógeno. (Asociación ARPHO, 2022).

4.2.3 Periodos de tiempo de corrosión según el ACI

Según el ACI 222R-19, se pueden presentar diferentes situaciones para casos de corrosión en estructuras:

Periodo de iniciación: Este periodo va hasta el momento en que se presenta la despasivación de la armadura, la cual es generada por el proceso de carbonatación, o la contaminación tanto por cloruros como sales o sulfatos.

Vida útil de servicio o utilización: Este periodo comprende el momento en que se comienzan a generar fisuras o manchas de corrosión en el concreto de recubrimiento hasta el punto en que se desprenden o caen los pedazos de concreto.

Vida última o total: En este periodo se presenta pérdida de adherencia del concreto con el refuerzo de acero, reduciendo la resistencia y llevando al colapso parcial o total de la estructura.

4.3 Alcalinidad en el concreto

Durante los eventos presentados por los ambientes externos o incidencias internas del concreto, se evidencia la pérdida de pH del material llegando a valores menores o iguales a 9 (basados en los resultados de la prueba de fenolftaleína de la figura 2), provocando pérdida de la capa pasivante que protege el acero de refuerzo. Este fenómeno se genera por reacciones químicas, como lo es la carbonatación, donde entra en contacto el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 con el dióxido de carbono CO_2 que se filtra por los poros o fisuras presentes en el recubrimiento de concreto.

5. Metodología

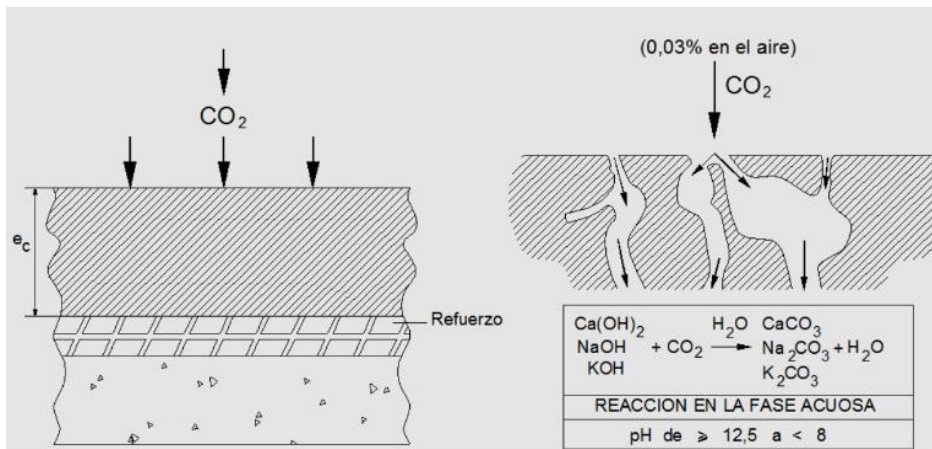
5.1 Carbonatación del concreto

Como se mencionó anteriormente la carbonatación se da por reacciones químicas, generadas por agentes externos que se filtran en las porosidades o fisuraciones de la capa de recubrimiento de concreto de los elementos estructurales, reduciendo la alcalinidad y afectando el acero de refuerzo, mezclándose el gas carbónico presente en el aire con el hidróxido de calcio del cemento.

En la figura 4, puede el avance del mecanismo de carbonatación cuando el dióxido de carbono (CO_2), reacciona con la humedad del ambiente, ingresando en los poros del concreto, generando la reacción química, convirtiendo el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) o cal hidratada en a carbonato de calcio (CaCO_3). Evidenciando un cambio de un pH alto, propio del Ca(OH)_2 a un pH neutro generado por el CaCO_3 .

Figura 4

Proceso químico de carbonatación



Nota. Fuente (Cerna & Galicia, 2010)

La carbonatación también puede producirse debido a concretos pobres, donde se presentan bajas coberturas de la capa de recubrimiento, dejando en ocasiones el acero de refuerzo expuesto a la intemperie, dando lugar a un proceso corrosivo más avanzado.

5.1.1 Avance del frente de carbonatación

La velocidad con que se dé el avance del frente de carbonatación es de vital importancia para determinar el tiempo en que puede llegar a presentarse la corrosión en el refuerzo de acero y donde entrarán en estudio 3 factores fundamentales: el contenido de humedad, la porosidad y el contenido de material alcalino.

Contenido de humedad: Este factor incide tanto en los agentes externos como en los internos. Externamente, las estructuras pueden encontrarse ubicadas en lugares donde las concentraciones de ambientes húmedos son mayores y que viene acompañada de otros factores como son el clima y la temperatura. Internamente la presencia de humedad que se encuentre alojada en las porosidades del concreto o la calidad del material, influyen en la aceleración de los procesos de reacciones químicas.

Porosidad: El correcto proceso constructivo o mezclas de materiales que se lleven a cabo para la elaboración de concretos, afectará considerablemente la calidad del producto, generando porosidades o fisuraciones por retracción, debido a malas relaciones de agua/cemento o curados ineficientes, lo que se traduce en zonas de alojamiento de humedad.

Contenido de material alcalino: Es importante mantener una alcalinidad alta en el concreto, puesto que permitirá que el acero conserve por más tiempo su capa pasiva, ayudando a disminuir el tiempo de corrosión.

Cabe resaltar que, en zonas urbanas e industriales también hay mayor incidencia para la presencia de dióxido de carbono CO₂ en el aire, puesto que las concentraciones incrementan en gran medida por las condiciones que se generan de las actividades económico-industriales.

5.1.2 Modelo de avance de carbonatación

Basados en los resultados de Sierra, 2005, el tiempo de propagación de la carbonatación en una estructura puede estudiarse mediante el modelo de Hakinnen con las siguientes expresiones:

$$d = K\sqrt{t}$$
$$t = (d/K)^2$$

Donde:

d: Es el espesor de la capa de concreto carbonatada [mm]

t: Tiempo que tardará en propagarse la capa carbonatada con espesor d [años]

K: Coeficiente de Carbonatación que depende de las condiciones del medio y está dado por:

$$K = C_{amb} * C_{aire} * a_{coef.cemento} * f'c^{b_{Coef.cemento}}$$

Donde:

C_{amb} : Nivel de exposición a la lluvia del elemento

Tabla 1

Determinación de coeficiente ambiental

Ambiente	Camb
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0.5

Fuente. (Sierra, 2005)

C_{aire} : Contenido de aire en el elemento

Tabla 2

Determinación de coeficiente de aireantes

Aire incluido [%]	Caire
< 4.5%	1
≥4.5%	0.7

Fuente. (Sierra, 2005).

f'c: Resistencia del concreto [N/mm²]

a,b: Coeficientes dependientes del conglomerante

Tabla 3

Determinación de coeficiente conglomerante

Conglomerante	a	b
Cemento Portland	1800	-1.7
Cemento Portland + 28% de cenizas volantes o puzolanas (o 70% de escorias)	360	-1.2
Cemento Pórtland + 9% de microsílíce	400	-1.2

Fuente. (Sierra, 2005).

5.1.3 Pruebas de carbonatación

La carbonatación por medios naturales, es uno de los procesos que se da más lentamente en las estructuras de concreto, lo que hace más difícil su evaluación y avance; sin embargo, se conocen dos tipos de métodos para determinar el desempeño del concreto frente al fenómeno de Carbonatación, definidos en el método de tortura y el método acelerado.

En el método de tortura se someten los materiales a condiciones agresivas, superando las que normalmente soportaría durante su vida útil; y los acelerados, que “aumentan la velocidad de aparición de daños, lo que generalmente se logra elevando la temperatura, la presión, la concentración de los agentes agresores y sus combinaciones.” (Salazar, F. 2023). La normatividad española UNE-EN 12390-12:2020 “Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón – Método de carbonatación acelerada” establece la metodología para la prueba en condiciones de exposición controlada, con un elevado nivel de dióxido de carbono al que se exponen los lados verticales de la muestra, con lo que se permite comparar la resistencia a la carbonatación de diferentes hormigones de la misma clase de resistencia y con las mismas condiciones ambientales.

Con los anteriores métodos no es posible analizar la profundidad de carbonatación que se ha logrado en los elementos, por lo que se recurre a la aplicación de compuestos químicos indicadores de pH como la fenolftaleína, permitiendo determinar fácilmente qué zonas del concreto no están carbonatadas, ya que se tiñen de un color rosa o fucsia intenso de acuerdo con el porcentaje de avance.

“Para los ensayos de profundidad de carbonatación se utiliza una solución de fenolftaleína pura disuelta en una solución de 70 mL de etanol y 30 mL de agua desionizada o un indicador alternativo adecuado que dé un cambio de color en el rango de pH de 8 a 11. Adicionalmente, se requiere de una lupa y un calibrador con una precisión de al menos 0,5 mm. También, las mediciones deben empezar de 0,5 h (horas) a 1,25 h (horas) \pm 5 min después de aplicar la solución indicadora.” (Salazar, F. 2023).

6. Procedimientos frente a la Carbonatación

6.1 Consideraciones de diseño y control de calidad:

Al momento del diseño de la estructura, en el reglamento NSR-10 se tratan los requisitos para la durabilidad, pero no se habla del proceso de carbonatación del concreto en lo correspondiente a lo reglamentado. Sin embargo, en la sección de comentarios de la NSR-10, CR4.2 — Categorías y clases de exposición se describe lo siguiente: (...) Pueden darse exposiciones, no contempladas en este Reglamento, que pueden aplicarse a elementos estructurales de una edificación como el ataque al acero de refuerzo por carbonatación del concreto o ataque físico por abrasión al concreto. En tales casos pueden aplicarse criterios mínimos como los señalados en el ambiente P1 (Baja permeabilidad). (AIS, 2010). De manera reglamentaria en la NSR-10, sólo se definen conceptos y requisitos para exposiciones a sulfatos solubles en agua (SO₄) en el suelo, sulfato (SO₄) disuelto en agua (TABLA C.4.2.1 — CATEGORÍAS Y CLASES DE EXPOSICIÓN) y contenido de iones de cloruros (TABLA C.4.3.1 — REQUISITOS PARA EL CONCRETO SEGÚN LA CLASE DE EXPOSICIÓN).

Realizando una comparación entre el reglamento NSR-10 y el ACI 318-19, este último en su numeral 19.3, de acuerdo con los parámetros de durabilidad del concreto, en el ACI 318-19 la categoría W (En contacto con el agua) se asemeja a la categoría P de la NSR-10. Mientras en el ACI se establecen tres categorías Wo (Concreto seco en servicio), W1 (Concreto en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad), W2 (Concreto en contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad), en la norma NSR-10 se determinan solo 2, Po y P1, donde Po = W1 y P1 = W2.

A la hora del diseño estructural es importante determinar, además de las cargas, a qué tipo de ambiente está expuesta la estructura; adicionalmente, la relación entre el agua y el material cementante cumple un papel determinante en las características de permeabilidad o conductividad hidráulica en un elemento estructural de concreto. De acuerdo con lo descrito en el ACI-318-19, una relación agua cemento baja, reduce la cantidad de poros, y por ende también la permeabilidad, impidiendo significativamente el avance de contaminantes disueltos en agua en el concreto. De acuerdo con la clase de exposición de la estructura tanto la norma ACI 318-19 como la NSR-10 dan parámetros mínimos de la relación agua-cemento (0.5) y también de la resistencia a la

compresión del concreto (17 Mpa para concreto en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad y 28 MPa concreto en contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad). (ver tabla 4).

La protección del concreto reforzado es un aspecto crítico para garantizar la durabilidad de las estructuras de hormigón. Existen variedad de métodos y técnicas, que se describirán más adelante, para proteger el acero de refuerzo del proceso de corrosión y además de otras formas de deterioro como lo es el desgaste. La selección del material a la hora del diseño juega un papel vital en la protección del hormigón y la armadura de refuerzo. (Asmara, 2023).

En la tabla 4 que se presenta a continuación, se muestran las recomendaciones de durabilidad a considerar dentro del diseño de elementos de hormigón, buscando su protección frente al proceso de carbonatación del concreto:

Tabla 4
Recomendaciones de durabilidad en el concreto

Referencia	Clase de Exposición	Subclase (Condición de exposición)	Designación (Clasificación)	Descripción	Rel. a/c máx.±			Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)			Resistividad húmeda mínima a 90 días (k-cm)			Recubrimiento mínimo (mm)		f _c min. MPa	Requisitos mínimos adicionales	
					Simpl e	Reforzad o	Presforzado	Sim ple	Reforzad o	Presforzado	Sim ple	Reforzad o	Presforzado	Reforzad o	Presforzado		Contenid o de aire por TMA (%)	Límites en los cementantes
AIS (2010)	Protección del refuerzo para la corrosión	Corrección Moderada	C1	Para esta clase de exposición con una moderada protección contra la corrosión del acero de refuerzo en un ambiente expuesto a la humedad		0.50		-	-	-	-	-	-	-	-	17	-	-
	Para concreto en contacto con agua	Baja Permeabilidad	P1	Para concreto en contacto con agua y que requiere baja permeabilidad		0.50		-	-	-	-	-	-	-	-	28	Ninguna	Ninguna
Borges et al. (2020)	No agresivo	Seco	C0	Concreto en ambiente seco o protegido de la humedad y no sometido a condensaciones. Con una humedad relativa < 40 %.	-	0.60	0.60	230	250	250	10	10	20	25	30	-	Todo tipo de cemento	-
	Rural / Urbana	Concreto en contacto con humedad alta	C1	Concreto en ambiente con alta humedad relativa > 80 %, independiente de la contaminación por CO ₂ y SO ₂ .	-	0.60	0.55	250	250	280	10	15	20	30	35	-	Cementos con contenido total de álcalis inferior a 0,6 %	-
		Concreto en contacto con humedad baja	C2	Concreto en ambiente con baja humedad relativa entre 40 % y 50 %, independiente de la contaminación por CO ₂ y SO ₂ .	-	0.55	0.50	250	280	300	20	25	30	35	40	-	Cementos con contenido total de álcalis inferior a 0,6 %	-
		Concreto en contacto con humedad moderada	C3	Concreto en ambiente con moderada humedad relativa entre 50 % y 80 %, con contaminación por CO ₂ y SO ₂ .	-	0.50	0.45	250	300	350	15	20	25	45	50	-	Cementos con contenido total de álcalis inferior a 0,6 %	-

Fuente. Elaboración propia.

Las técnicas de modificación del refuerzo, como la protección catódica y los sistemas de ánodo de sacrificio, son estrategias efectivas para mitigar la corrosión. Estos métodos crean un entorno electroquímico protector que reduce la velocidad de corrosión del acero de refuerzo. Las técnicas de modificación del hormigón, como el uso de hormigón con geopolímero y la aplicación de inhibidores en el proceso de fabricación del concreto, ofrecen enfoques alternativos para mejorar el rendimiento y la longevidad de las estructuras de concreto reforzado. (Asmara, 2023).

6.2 Inspecciones periódicas y planes de mantenimiento

Si bien la afectación de carbonatación depende del grado de penetración del agente contaminante, de acuerdo con el NSR-10 en su TABLA C.4.3.1 — requisitos para el concreto según la clase de exposición, para un ambiente P1, se define una relación agua cemento máxima de 0.5 y $f'c$ máximo de 28 MPa, sin ninguna consideración adicional.

Además, el recubrimiento juega un papel importante para la protección frente a las clases de exposición que se encuentren, donde para su determinación es necesario establecer márgenes o factores de seguridad, de acuerdo con tiempo de vida útil de una estructura (Salazar, 2023).

La conservación y el mantenimiento es un paso para contribuir en conservar y prolongar la vida útil de una estructura, inclusive muchas de las patologías que afectan a una construcción pueden ser mitigadas o corregidas con un acertado diseño tanto estructural como de mezclas, un buen control de calidad en la construcción y un seguimiento debido al plan de mantenimiento, por lo cual también es importante la aplicación de tratamientos preventivos a lo largo de la vida de servicio.

Bajo condiciones normales de servicio, para una estructura de hormigón convencional, según el modelo CEB-FIP 1990, referenciado por el ALCONPAT, se aconseja bajo los siguientes intervalos de tiempo, realizar inspecciones:

Tabla 5

Recomendación frecuencias de inspecciones según CEB-FIB 1990

Tipo de estructura	Frecuencia de Inspección [Años]
Edificios de vivienda y oficina	10
Edificios industriales	5 a 10
Puentes	2 a 6

Nota. (Husni, 2013).

Es diferente el periodo de inspección de una estructura ubicada en un ambiente marino, al igual que una en constante contacto con dióxido de carbono, el cual produce los efectos de Carbonatación, en ambientes urbanos se debe mantener un plan constante de revisión y mantenimiento para prevenir y vigilar los parámetros de corrosión; dichos parámetros deben medirse cada año por lo menos, y cuando se obtengan valores de despasivación con más del 75%, valor donde comienza a ser considerable el avance en la carbonatación, incluir acciones preventivas (Borges et al., 2020).

Adicionalmente se recomienda realizar mantenimientos preventivos por lo menos un año después de terminada la construcción de la estructura y acudir a prácticas preventivas para reducir la acción agresiva.

Estas inspecciones y planes ayudan a tener valores y respuestas actualizadas de la capacidad estructural de la edificación, con lo que se pueden estimar soluciones y/o comportamientos futuros, que ayuden a mitigar la gravedad de los efectos. (Husni, 2013).

Troconis de Rincón et al., 1997, determinan las siguientes etapas para una inspección en obra: a) elaboración de una ficha de antecedentes de la estructura y del medio ambiente (con base en información documental y/o visita previa), b) examen visual general de la estructura, c) levantamiento de daños, d) selección de zonas para examen visual detallado de la estructura y elaboración de plan de muestreo, e) selección de las técnicas de ensayo/medición/análisis más apropiados, f) selección de zonas para la realización de ensayos/mediciones/análisis físico-químicos en el hormigón, armadura y en el medio ambiente circundante, y f) ejecución de mediciones, ensayos y análisis físico-químicos en el hormigón y/o en la armadura de refuerzo.

De acuerdo con los análisis de las inspecciones se determinan dos tipos de deficiencias en las estructuras, a) en el hormigón, b) en el acero de refuerzo, de ello se define el tipo de tratamiento, reparación, rehabilitación o reforzamiento al que debe someterse.

El proceso de corrosión hace parte de los mecanismos de degradación de las estructuras de concreto reforzado, dentro del cual los principales son la corrosión bajo tensión y la corrosión de fragilización por hidrógeno. (Asociación ARPHO, 2022).

6.3 Rehabilitaciones

En la reglamentación colombiana no existe una norma para el caso de reparación, reforzamiento o rehabilitación de estructuras de hormigón; sin embargo, en la norma europea UNE EN 1504 se definen los productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de concreto. A nivel de Latinoamérica se creó la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción (ALCONPAT), mientras que en España se creó La Asociación de Reparación Refuerzo y Protección del Hormigón (ARPHO), ambas con constantes contribuciones científicas y técnicas en la resolución de problemas que presentan las estructuras en relación a la protección, reparación, refuerzo y recuperación de las construcciones en concreto reforzado.

En el proceso de rehabilitación de una estructura, se presentan dos tipos de intervenciones enmarcadas en tratamientos preventivos o tratamientos correctivos, dependiendo del grado de deterioro de la estructura y la armadura de refuerzo, donde se considera el proceso de corrosión del acero como el estado límite y al que se dividen la aplicación de los tratamientos preventivos y correctivos. (Arango-L, 2022).

6.3.1 Tratamientos preventivos

Dentro de los tratamientos preventivos más empleados, está la aplicación de revestimientos o capas protectoras, para los cuales se presentan diferentes metodologías de aplicación.

La protección inicial de la armadura de refuerzo es la definición del espesor de recubrimiento, la aplicación de revestimientos a la superficie del hormigón ofrece una capa adicional de protección. Al emplear diversos métodos y técnicas, las estructuras pueden preservarse adecuadamente, asegurando su longevidad, integridad estructural y resistencia a la corrosión. (Asmara, 2023).

La aplicación de polímeros sobre la superficie del elemento, logran penetrar aproximadamente entre 1 y 3 cm, y su finalidad es el sello de los poros en el concreto. Mientras que la aplicación de hidrófugos, actúan como repelente de la humedad, debido a su base de silicona, lo que permite a su vez resistir el desgaste.

Dentro de los métodos de prevención y protección del concreto reforzado, se encuentra el tratamiento anti carbonatación (que transpirable, y repele la suciedad), las impregnaciones

hidrófugas (con la función de repeler la penetración de agua y los iones cloruro), las impermeabilizaciones (fundamentales para evitar las entradas de agua) y las protecciones catódicas (para controlar el proceso electroquímico de la corrosión). (Asociación ARPHO, 2022).

Una de las técnicas de protección del concreto reforzado frente al proceso de corrosión del acero de refuerzo es aumentar la pasivación del acero de refuerzo o disminuir la velocidad de corrosión de la estructura por el ingreso de iones cloruro, sulfatos o el proceso de carbonatación, a través de la aplicación de inhibidores de corrosión. Estas sustancias químicas pueden ser agregadas tanto en la fabricación del concreto o de aplicación en el tiempo de servicio. (Asmara, 2023).

Algunas de las mezclas inhibidoras de la corrosión más populares son, emulsión de éster de amina orgánica, nitrito de calcio y sal de ácido alquenildicarboxílico orgánico. (Asmara, 2023)

La aplicación de inhibidores de carbonatación migratorios, es un tratamiento no agresivo para el concreto; este se emplea cuando ya se presenta un avance de la carbonatación, pero sin aún evidenciarse daño a la estructura, con esto se logra frenar el proceso de oxidación y aumentar la resistencia de las armaduras de acero; además proteger de las reacciones anódicas y catódicas. (Asociación ARPHO, 2022).

La aplicación de inhibidores de carbonatación migratorios es un tratamiento no agresivo al hormigón, este se emplea cuando ya se produjo el proceso de la carbonatación sin aun presentar un daño a la estructura. Los mismos frenan el proceso de oxidación, aumenta la resistencia de las armaduras de acero, además de protegen de las reacciones anódicas y catódicas. (Asociación ARPHO, 2022).

Una de las técnicas de rehabilitación de estructuras afectadas por la carbonatación es la aplicación de revestimientos cementosos que ayudan a alcalinizar nuevamente el concreto. Dentro de los productos de este tipo más modernos, una capa de 3 milímetros de espesor, puede equivaler a 28 centímetros de recubrimiento. (Asociación ARPHO, 2022). Dentro de los productos con la propiedad de realcalinizar el concreto carbonatado se encuentra el MasterProtect 126, el cual es un revestimiento cementoso que se puede aplicar con brocha, que aparte de realcalinizar, genera además una protección al proceso de carbonatación, al ingreso de cloruros y al ciclo de hielo y deshielo. Enmarcado en el cumplimiento de la norma española EN 1504-2:2004, la cual especifica las claves para la reparación y protección del hormigón. (Master Builders Solutions, 2022).

Es importante resaltar que, para obtener mejores resultados en la protección del concreto, los inhibidores de corrosión deben añadirse durante su fabricación, para lograr aumentar la capa de pasivación de la armadura. Al emplear estos diversos métodos y técnicas, las estructuras de concreto reforzado pueden protegerse adecuadamente, asegurando su vida útil, integridad estructural y resistencia a la corrosión. (Asmara, 2023)

La aplicación efectiva de tratamientos preventivos, permite reducir costos y periodos de mantenimientos correctivo en la estructura.

En la figura 7 se muestra un resumen de técnicas para controlar la corrosión; como se mencionó anteriormente se puede recurrir a métodos definidos directamente para el acero u otros indirectos aplicados al concreto.

Figura 5
Protección de las armaduras de acero de refuerzo



Nota. Fuente (Troconis de Rincón et al., 1997)

6.3.2 Tratamientos correctivos:

La aplicación de tratamientos correctivos se divide en dos casos; 1) si el recubrimiento de concreto a perdido su propiedad protectora al acero de refuerzo y no se puede corregir mediante tratamientos preventivos y 2) si el acero de refuerzo está comprometido por el proceso de corrosión. Por lo anterior para determinar los mantenimientos correctivos, es importante contar con

diagnósticos previos, donde se estudie y revise detalladamente el problema y las causas que originaron la carbonatación en el elemento, identificando la profundidad que se ha alcanzado en varios puntos o sectores de la estructura.

Para el caso del hormigón afectado por carbonatación, lo primero es analizar o medir el valor del pH del concreto y con ello determinar la profundidad de carbonatación; donde se establece si el concreto carbonatado ya llegó al refuerzo. Uno de los métodos de reparación es la escarificación del concreto carbonatado, el cual ha perdido la propiedad pasivante que protege el acero de refuerzo, y remplazarlo con un mortero de reparación con alta resistencia que se asemeje a las condiciones iniciales del elemento estructural.

Generalmente, para los morteros se usan materiales compuestos por agregados finos y cementantes, los cuales pueden ser orgánicos, tales como acrílicos, epóxicos y poliuretanos, inclusive con aditivos de cenizas volantes y fibras sintéticas que ayudan a obtener mejores resultados. Con estos se logra alcalinizar nuevamente el concreto.

Figura 6

Escarificación del concreto



Nota. Fuente (Husni, 2013).

Para el segundo caso, si la profundidad de carbonatación llega al refuerzo, se debe realizar la medición de corrosión del acero y determinar el tipo de tratamiento analizando el grado de corrosión, para posteriormente seleccionar el método de reparación más óptimo, como puede ser el cambio de dicho acero incluyendo el concreto a su alrededor, ya que las deficiencias en el acero se dan por un deterioro inicial en el hormigón.

Figura 7

Instalación de fajas de refuerzos adicionales



Nota. Fuente (Husni, 2013).

El proceso de corrección consta de la eliminación del concreto deteriorado, la preparación de la superficie incluyendo el acero de refuerzo, pasivación de la armadura de refuerzo la cual depende del grado de corrosión. Posteriormente la selección del mortero de reparación tanto estructural como de inyección para sello de fisuras. (Asociación ARPHO, 2022).

Para este tipo de tratamiento y adición de un nuevo mortero de reparación es de vital importancia retirar la capa de concreto contaminado para lograr una reparación adecuada, evitando agravar el problema, ya que se pueden generar celdas locales de corrosión.

Los casos anteriormente mencionados son sólo algunos ejemplos de problemas de carbonatación y tratamientos de mitigación, ya que se pueden encontrar problemáticas con mayor grado de dificultad, requiriendo de soluciones más avanzadas de tipo reforzamiento estructural.

En el ámbito del reforzamiento estructural son aplicables los lineamientos determinados en el documento ATC - 40 (Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings), promovido por la CALIFORNIA SEISMIC SAFETY COMMISSION. Además del documento FEMA 273, promovido por la Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency y el ATC.

Dentro del contexto de la rehabilitación, es relevante tener en cuenta que se están modificando los parámetros o variables de: rigidez, resistencia, masa, capacidad dúctil, y conocimiento de movimiento. También dentro de la rehabilitación es posible el planteamiento de modificar el parámetro de amortiguamiento, tratando de lograr que la construcción les haga frente

a las fuerzas sísmicas, logrando reducir la sollicitación de daño mediante la instalación de dispositivos ubicados estratégicamente en la edificación. (Gallego & Sarria, 2010).

Cuando se evalúa la vulnerabilidad estructural de las construcciones y se concluye que las mismas son vulnerables a cierto tipo de sismo, es necesario intervenir con una rehabilitación, principalmente para edificaciones con categorías esenciales. Antes de ejecutar la rehabilitación, es fundamental conocer cuáles son las variables que se encuentran por debajo de los niveles de seguridad mínima. Al realizar una rehabilitación si se interviene una variable contraria a lo necesario, conlleva a tener un efecto diferente al esperado. (Gallego & Sarria, 2010).

La vulnerabilidad es algo intrínseco en la estructura, mientras que el peligro sísmico es algo directo de la naturaleza. Al tratarse de rehabilitación, se habla de la reducción de la vulnerabilidad, con la cual directamente se trata de reducir el riesgo sísmico. La finalidad de la rehabilitación es llevar a una estructura dependiendo de la evaluación presentada de un nivel de vulnerabilidad alto, a un nivel bajo. (Gallego & Sarria, 2010).

Los métodos de rehabilitación de estructuras deben buscar incrementar las variables rigidez y resistencia, o ambas, ya que aumentar la rigidez involucra aumentar la resistencia al requerir mayores áreas de acuerdo con las cuantías de acero se requiere mayores áreas de acero. Es de suma importancia que cuando se realicen este tipo de intervenciones la estructura se evalúe de manera global, por ejemplo, analizando si las cimentaciones son capaces de soportar las nuevas sollicitaciones, al igual de no dejar elementos débiles como columnas cortas, pisos débiles e irregularidades. (Gallego & Sarria, 2010).

A nivel de Europa específicamente en España, como métodos de reforzamiento de estructuras, las técnicas más comunes para incrementar la resistencia y ductilidad de los elementos son: a) encaquetado o encamisado en columnas y vigas. b) encamisado con planchas de acero. c) empleo de fibras de carbono o vidrio. d) empleo de postensado externo. e) inclusión de muros de resistencia al corte, d) inclusión de marcos metálicos con arriostres. (Asociación ARPHO, 2022)

Los tipos de reforzamientos más comunes a nivel global son: a) adición de muros de corte, b) adición de arriostamientos, c) incremento de espesor de muros, d) reducción de masa de la edificación, e) inclusión de aisladores en la base, h) inclusión de amortiguadores. Mientras que, a nivel local, Colombia, entre los métodos más utilizados se encuentran: a) encamisado de vigas, b)

encamisado de columnas, c) encamisado de nudos viga-columna, d) refuerzo con fibras, e) refuerzo de la cimentación. (PROCEMCO, 2023 a).

Bajo la normatividad colombiana sismorresistente, NSR-10, el capítulo A.10, establece los criterios y procedimientos a seguir para evaluar la vulnerabilidad sísmica y para adicionar, modificar o remodelar el sistema estructural, de edificaciones construidas y diseñadas antes de la vigencia de este reglamento. Su alcance define para reparaciones y cambios menores, cambio de uso, vulnerabilidad sísmica, modificaciones y reforzamiento estructural. (AIS, 2010)

La instalación de refuerzos mediante la utilización de fibras de carbono o de vidrio, tiene las siguientes características: tienen elevada durabilidad, son laminares o en hojas, además manejan bajos espesores si se relacionan con las láminas metálicas, no cargan a la estructura ya que los mismos son ligeros, y contribuyen ante determinados daños estructurales. En relación a la resistencia al fuego, se debe tener presente que la resistencia del adhesivo es baja frente a ese fenómeno, lo que implica una detallada revisión de los elementos instalados en la estructura. (Asociación ARPHO, 2022).

El documento técnico ACI 440.2R-17 (ACI, 2017) presenta una guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de concreto. Dentro de la filosofía de diseño, se debe considerar que estos elementos estructurales deben resistir al colapso, en el caso del retiro de la fibra, por condiciones de vandalismo, daño, incendios entre otros. Lo que conlleva a realizar estudios de cálculos previos de patología estructural. A la hora de realizar el diseño, se deben determinar las propiedades físicas y mecánicas de las fibras, de acuerdo con las fichas técnicas del proveedor, las principales corresponden a la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la deformación máxima a la ruptura. (RP Consultoría & Proyectos, 2022).

Existen cuatro mecanismos de falla en el reforzamiento con fibras de carbono a saber: 1) aplastamiento, 2) ruptura de las fibras, 3) delaminación del recubrimiento y 4) despegue de la interfase adhesivo-concreto. Dentro del documento ACI 440.2R-17, estos dos últimos es donde más se referencia, ya que consideran que son frágiles. Generalmente los refuerzos con fibras de carbono van instalados cerca a los nudos y en las zonas de las rótulas plásticas con la finalidad de mejorar la ductilidad y tratar de evitar las rótulas plásticas. (RP Consultoría & Proyectos, 2022).

La finalidad al rigidizar la estructura es mejorar el comportamiento inelástico considerando además las rótulas plásticas. Dentro del reforzamiento por encamisado de elementos estructurales,

se debe garantizar el criterio de columna fuerte viga débil, por ello cada vez que se aumenta la sección en la viga se debe hacer en la misma proporción en sus dimensiones. El concreto nuevo utilizado en este proceso debe ser de baja retracción el mismo no puede presentar fisuras. Se recomienda que el recubrimiento debe estar determinado dentro de lo establecido en el reglamento NSR-10 en sus capítulos C.7.6 y C.7.7, es importante garantizar dentro de este proceso, un puente de adherencia del concreto viejo con el nuevo que será aplicado. (Ingeniero alexander solarte, 2020).

Mediante ensayos experimentales se ha determinado que el encamisado con fibras de vidrio incrementa la capacidad dúctil de una sección, así como su integridad manteniéndose intacto ante un siniestro (Gallego & Sarria, 2010).

Al momento de realizar una rehabilitación, repotenciación o una obra nueva, se debe tener presente que el hormigón pretensado, es débil ante el proceso de corrosión, lo cual puede ocasionar un colapso inminente. (Asociación ARPHO, 2022). Lo cual implica tener presente una buena consideración a la hora de realizar los diseños de elementos estructurales con esta característica.

6.3.3 Ejemplos de rehabilitación

6.3.3.1 Depósito de agua potable

En la provincia de León España, la empresa Azul Construcción Repair S.A, ejecutó en el año 2019, la rehabilitación de un tanque de agua potable, que, dada la vida de servicio del mismo. Este presentaba lesiones patológicas como fisuras y desprendimiento de material, lo que generaba adicionalmente un avance en el frente de carbonatación, conllevando a una pérdida de su resistencia estructural.

El ambiente de exposición externo en el que se encontraba el tanque corresponde a una zona urbana con poca afectación de contaminación por CO₂, por lo tanto, la tasa de avance en el frente de carbonatación en consideraciones de diseño era baja. Sin embargo, para aumentar su vida útil era necesario considerar parámetros en el diseño de la mezcla de concreto que se aplicaría para la rehabilitación, procurando la adherencia y buen comportamiento entre lo nuevo y lo existente para que funcionara adecuadamente como un tratamiento preventivo. En el ambiente de exposición del depósito por el líquido contenido, cobra relevancia el almacenamiento de este, ya que contiene un alto grado de humedad y se mezcla el agua con productos químicos, como lo es el cloruro. El

tanque, por lo tanto, requiere de cuidados especiales en relación a la permeabilidad, la cual debería ser prácticamente nula. La rehabilitación ejecutada constó inicialmente de la recuperación estructural superficial, con la atención de las fisuras por medio de la inyección de mortero de reparación en las mismas; posteriormente la reparación de los vacíos generados por los desprendimientos, se trataron con una lechada fluida estructural, que permitió realizar los adecuados resanes. Hasta este punto solo hay una reparación y consolidación de la estructura, por lo que se hace necesaria la aplicación de un reforzamiento estructural.

Como también se presentaban falta de resistencia estructural, para darle aumentarla se optó por reforzar con cables de postensado revestido. Sin embargo, una de las debilidades del postensado es el proceso de corrosión del acero, por lo que se busca proteger el refuerzo existente y el instalado en el estado de servicio del tanque ante las acciones de permeabilidad, iones cloruro y la carbonatación, para ello se realizó una protección adicional con la aplicación de un inhibidor de corrosión migratorio disminuyendo en un 90% la velocidad de corrosión de las barras de acero y se incluye el revestimiento de un realcalinizador de hormigón para aumentar el pH y generar mejor calidad en la propiedad pasivante del concreto.

La aplicación del revestimiento con el realcalizador del concreto, de acuerdo a ensayos realizados en el producto, el avance del frente de carbonatación puede reducirse a una quinta parte, generando además una protección adicional para la permeabilidad y el ingreso de iones cloruro hasta el acero de refuerzo. La aplicación de 3 mm del realcalinizador representan en un concreto patrón, una protección de 28.2 cm al frente de carbonatación.

Figura 8

Proceso de rehabilitación en tanque de agua potable



Nota. Fuente <https://mbcc.sika.com/es-es/quienes-somos/referencias-de-obras/deposito-de-agua-potable>

6.3.3.2 Edificación Portuaria

Mediante la empresa constructora REEPOX, se ejecutó el proyecto de protección del concreto frente al ambiente marino del Edificio Lonja Sanlúcar de Barrameda, ubicado en la provincia de Cádiz España, estructura correspondiente una edificación portuaria de manejo pesquero, cuyo año de finalización de la obra fue el 2020.

La estructura está expuesta a un ambiente agresivo al concreto, en una combinación actuante entre iones cloruro, sales y carbonatación. Por lo cual su grado de exposición hace que su deterioro sea mucho más alto, en comparación con otras construcciones de hormigón en otro tipo de ambiente.

Las lesiones patológicas encontradas propias de la corrosión del acero, variaban desde el avance del frente de carbonatación con la pérdida de la propiedad pasivante del concreto, el proceso de corrosión del acero de refuerzo, dada la exposición a los iones cloruro y sales propios del ambiente marino y por el proceso de carbonatación, hasta fisuración y desprendimiento del concreto de recubrimiento, propios de la expansión que se genera en el proceso de corrosión del acero.

La rehabilitación se planeó principalmente en la reparación estructural sectorizada, teniendo presente el estudio y auscultación de las diferentes áreas. Para la cual fueron retirados los recubrimientos en las zonas más graves, donde ya el acero se encontraba en proceso crítico de corrosión, remplazando el refuerzo además de instalar un nuevo mortero, mortero con la inclusión de un pasivador cementoso, para aumentar la alcalinidad del concreto y la protección frente al avance del frente de carbonatación.

Con la finalidad de evitar la propagación de los daños en el concreto y proteger la zona rehabilitada y el resto de la estructura por la acción del ambiente de exposición, se aplicaron 1500 litros de inhibidor de corrosión migratorio y 8000 kg de realcalinizador de hormigón. El inhibidor en su aplicación penetra hasta el refuerzo disminuyendo en un 90% la velocidad de corrosión del acero con una vida útil de 24 años, mientras que el realcalinizador de hormigón, genera una barrera protectora ante este proceso, genera además una protección al ingreso de los iones cloruros abundantes en el tipo de ambiente de exposición de la estructura.

En esta obra no sólo se aplica la rehabilitación estructural propiamente de un tratamiento correctivo, sino también la protección y el aumento de la vida útil de la edificación de forma

integral a base de tratamientos preventivos para la protección de la edificación a un ambiente agresivo, como lo es el ambiente marino.

7. Conclusiones

- La funcionalidad y vida útil de una estructura está definida por el tiempo para el cual está diseñada, dependiendo de este parámetro, se deben definir inicialmente tanto el diseño de la mezcla de cemento y los recubrimientos del acero de refuerzo.
- En los manuales de mantenimiento de una estructura se definen los tiempos de inspección y la ejecución de mantenimientos predictivos y preventivos, como parte fundamental en la conservación y/o alargamiento de la vida útil de esta. Es fundamental la entrega de estos por parte de los diseñadores y constructores del proyecto.
- El ensayo principal para la detección en el proceso de carbonatación es la medición de la profundidad mediante la medición del pH. A pesar de que haya avances en las tecnologías, sigue siendo la más confiable.
- Si bien el ensayo del avance de corrosión es importante para conocer el grado de oxidación del refuerzo, es determinante en la definición de los tratamientos el ensayo de alcalinidad. Un inicio del proceso de corrosión en el acero de refuerzo determina un remplazo del refuerzo y la aplicación de los tratamientos correctivos.
- La evidencia de lesiones patológicas relativas a la corrosión de las armaduras de refuerzo en un área específica de una estructura, no significa que la totalidad de la misma sufra el mismo avance en el deterioro. Por lo cual son importantes los estudios y análisis sectorizados, con la finalidad de determinar y discriminar los grados de avance de manera sectorizada, y con ello los tratamientos preventivos o correctivos que deban realizarse en cada área.
- Las obras de rehabilitación deben prever también el comportamiento a futuro y contemplar el aumento de la vida útil de una estructura. Las zonas que no son rehabilitadas deben ser atendidas con tratamientos preventivos con la finalidad de evitar futuras evidencias patológicas, visualizadas en la aplicación de la primera rehabilitación.
- En la proyección de una estructura inicialmente se debe tener presente el grado de exposición al que estará sometida. Ya que este parámetro indica las características en el diseño de la mezcla de concreto, como es la relación agua material cementante, la resistencia a la compresión, la clase de cemento, la aplicación de aditivos, como además del espesor del recubrimiento del acero de refuerzo.

- Para la construcción de toda estructura, es de vital importancia manejar las buenas prácticas constructivas, principalmente con la relación agua/material cementante y tiempos de curado, lo que conlleva a tener buen comportamiento de los materiales ante los ambientes que se expongan durante su servicio; adicionalmente, procurando cumplir con los estándares mínimos de recubrimiento para el acero de refuerzo, evitando que ante los eventos sísmicos y la presencia de fisuras, haya un avance del frente de carbonatación.
- Otro factor importante es cumplir con los tiempos de mantenimientos e inspecciones periódicas durante la vida útil de la estructura, lo que permitirá reconocer los cambios y/o comportamientos que se presenten en los elementos, para posteriormente aplicar métodos de prevención y corrección, anticipándose a los efectos de daño estructural que puedan darse en el acero de refuerzo.
- Dentro de las consideraciones de una estructura, se encuentra el factor tiempo, desde el momento de proyectar la estructura, se debe considerar el ambiente de exposición y definir los parámetros de durabilidad y vida útil de la estructura, y plasmar estos en el diseño de la mezcla y los recubrimientos.

8. Recomendaciones

- Antes de la proyección de una estructura tanto en hormigón como en acero, es fundamental conocer las condiciones ambientales y de exposición de la estructura, con la finalidad de considerar la vida útil de esta. Por lo cual se recomienda realizar previamente ensayos de campo, como la exposición al CO₂, cloruros y sulfatos, parámetros indispensables en el diseño de la mezcla de concreto.
- En los estudios de patología, se recomienda realizar estudios o análisis sectorizados de una estructura, ya que los avances de deterioro pueden ser diferentes para cada área, y son determinantes en los costos de una rehabilitación, tanto en los tratamientos preventivos como correctivos que deban ejecutarse.
- Se recomienda seguir los manuales de mantenimiento definidos por el diseñador y el constructor. Un buen seguimiento en estos manuales ahorra costos a la hora de ejecutar un mantenimiento correctivo. Esto incluye la medición de la profundidad de carbonación y realizar los cálculos de avance para establecer los tratamientos preventivos, antes de llegar a los tratamientos correctivos. Los tratamientos correctivos son los más complejos y costosos en relación los preventivos, lo ideal es realizar un seguimiento a los avances de profundidad de carbonatación y evitarlos.

Referencias

- ABINCO. (2011). *Carbonatación en estructuras de concreto*. <http://blog.abinco.com.mx/posts/carbonatacion-en-estructuras-de-concreto#:~:text=En%20un%20concreto%20sano%20su,reduce%20por%20debajo%20de%2011>
- ACI - American Concrete Institute. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI-440.2-R17)*. Farmington Hills: McMaster University Library.
- ACI - American Concrete Institute. (2019). *Guide to Protection of Reinforcing Steel in Concrete against Corrosion (ACI 222R-19)*. Farmington Hills: McMaster University Library.
- ACI - American Concrete Institute. (2019). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318-19)*. Bogotá: Seccional Colombiana del Instituto Americano del Concreto (ACI).
- ACI - American Concrete Institute (2000). *Cement and Concrete Terminology (ACI 116R-00)*. Michigan, USA.
- AIS – Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). *Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente NSR-10*.
- Arango-L, J. F. (2022). *Patología de la construcción: fundamentos* (primera edición). ALION, Medellín.
- Asmara, Y. P. (2023). *Concrete Reinforcement Degradation and Rehabilitation Damages, Corrosion and Prevention*. INTI International University. Nilay
- Asociación ARPHO. (2 de diciembre de 2022). *ARPHO: Webinar "Aumentado la vida útil de edificios con la reparación y refuerzo de sus estructuras"* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=kXopi9azuRQ&t=3s>
- ATC – Applied Technology Council (1996), *ATC 40 Report, "The Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings"*. Redwood City, California.
- Borges, P., Briceño, J., Torres, A., (2020). *Recomendaciones generales sobre durabilidad*. ALCONPAT Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, México.
- Cañón, S. (2015). *Análisis de patología fenómeno de carbonatación en puentes de concreto, en las localidades de Teusaquillo, Engativá y Fontibón*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C

-
- Cerna, M., Galicia W., (2010). *Vida útil en estructuras de concreto reforzado desde el punto de vista de comportamiento del material*. Universidad Privada Antenor Orrego (UPAO), Trujillo.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR. (2014). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*.
- E.F. Félix., R. Carrazedo., E. Possan. (2017). *Análisis paramétrico de la carbonatación en estructuras de hormigón por Redes Neuronales Artificiales*. Revista ALCONPAT. Recuperado de <https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/245/388#info>
- E. Vidaud., (2012). *La carbonatación en el concreto reforzado*. Revista CYT, Instituto mexicano del cemento y del concreto A.C.
- Fagerlund, G. (2004). *REHABCON - Strategy for maintenance and rehabilitation in concrete structures, Work Package 2.3: evaluations of alternative repair and upgrading options: Final Report. (Report TVBM (Intern 7000rapport); Vol. 7177)*. Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- Gallego, M., Sarria, A., (2010). *El concreto y los terremotos: conceptos, comportamiento, patología y rehabilitación* (segunda edición). ASOCRETO Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Bogotá, D.C.
- Husni, R., (2013). *Reparación y refuerzo. Boletín técnico N°2*. Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción ALCONPAT. http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/bol2_capa.pdf
- INGENIERO ALEXANDER SOLARTE. (11 de mayo 2020). *Reforzamiento de Estructuras en ETABS (Parte 1/2)* [Archivo de Vídeo]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=pN8wVNDkRy0&list=PLIdIS4TOqESC-6XCQ0XnNjCmZ_yS0gfnN&index=4&t=34s&ab_channel=INGENIEROALEXANDERSOLARTE
- MAPEI. (2019). *Manual de refuerzo estructural*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider47/line-technical-documentation-documents/manual-refuerzo-estructural.pdf?sfvrsn=df98f675_16
- Master Builders Solutions. (2022). *Ficha técnica MasterProtect 126*. <https://assets.construction-chemicals.mbcc-group.com/es-es/masterprotect-126.pdf>
- PROCEMCO. (12 de septiembre 2023 a). *Ciclo Virtual: Reforzamiento y actualización sísmica de edificaciones en concreto* [Archivo de Vídeo]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=LpWj-rOSZ-8&ab_channel=PROCEMCO

RP Consultoría & Proyectos. (31 de enero de 2022). *Empleo de fibras de carbono como alternativa en el reforzamiento estructural empleando el ACI 440.2R* [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=spU-ITBzU80&t=68s>

Salazar, L. (2023). *Evaluación de la Resistencia a la Corrosión debida a Carbonatación en Concretos con Cementos Pórtland adicionados con Caliza y Arcilla Calcinada*. Universidad nacional de Colombia, Bogotá, D.C.

Sierra, I., (2005). *Diagnóstico, evaluación y modelo de rehabilitación de estructuras en concreto sometidas a carbonatación y corrosión*. Universidad de los Andes, Bogotá.

Troconis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., & Díaz, I. (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de concreto reforzado*. CYTED Red DURAR.

UNE - Asociación Española de Normalización. (2020). *UNE-EN 12390-13:2014. Ensayos de hormigón endurecido Parte 12: Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón Método de carbonatación acelerada*. Madrid, España.