

Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera

Rómel G. Solís Carcaño¹, Éric Iván Moreno², Pedro Castro Borges³.

Recibido el 8 de febrero de 2005 - Aceptado el 23 de marzo de 2005

RESUMEN

El problema más importante que se observa en las construcciones de concreto es actualmente el deterioro por cargas ambientales. En las zonas costeras los principales agentes agresores son cloruros, sulfatos y humedad los cuales penetran a través de la red de poros del concreto. Algunos de estos agentes provocan daños directamente al concreto pero principalmente producen la corrosión del acero de refuerzo; esto provoca disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero y posteriormente, el agrietamiento y desprendimiento del concreto.

En el caso de viviendas de interés social el problema es aún más crítico debido a que las especificaciones de los materiales son menos rigurosas que las que se exigen para otros tipos de edificios de uso no habitacional. Además, por lo regular se utilizan elementos con secciones relativamente pequeñas, por lo que el recubrimiento del acero suele ser insuficiente para garantizar la vida útil de diseño.

El diseño y la construcción de vivienda tradicionalmente han dado énfasis a las condiciones de seguridad sin considerar su durabilidad. Esto ha ocasionado gran variabilidad en la calidad de estas construcciones, dependiendo del nivel tecnológico de las constructoras, así como también de sus propios intereses y experiencias.

Palabras clave: durabilidad, vivienda, concreto.

ABSTRACT

Up to date, the most important problem observed in concrete structures is the damage due to environmental loading. In coastal zones, the main aggressive agents are chlorides, sulphates, and moisture, which ingress through the concrete pore network. Some of these agents damage concrete directly but, mainly, they induce corrosion of the reinforcement; firstly, this corrosion reduces the element's performance due to the loss of steel cross-section area, and lately, cracking and spalling of concrete.

In the case of social interest housing, the problem is more pronounced because materials specifications are less rigorous than in the case of concrete buildings. Also, small concrete elements are usually employed; therefore, concrete cover is mostly insufficient to guarantee the design's service life.

Traditionally, in housing design and construction, safety conditions have been emphasized without taking durability into consideration. This fact has caused a great variability in the quality of these constructions, depending on the technological level of the construction firms, as well as in their own interest and experience.

Keywords: durability, housing, concrete.

¹ Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Ingeniería de la Construcción de la FIUADY.

² Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Estructuras y Materiales de la FIUADY.

³ Investigador del Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV Unidad Mérida.

ANTECEDENTES

El concreto ha sido el material de construcción más utilizado en el mundo durante el último siglo; las dos ventajas que ha tenido sobre su principal competidor, el acero, han sido: un menor valor del costo inicial y un menor requerimiento de desarrollo industrial para su producción; lo anterior lo ha hecho especialmente ventajoso en los países de menor desarrollo (Mehta y Monteiro 1998).

Durante muchos años se pensó que las construcciones hechas con concreto tendrían una vida ilimitada, y los diseñadores y constructores estuvieron principalmente interesados en las características asociadas con la resistencia mecánica del material. A partir de la década de los 80 se empezó a analizar con seriedad el hecho de que muchas construcciones no estuvieran manteniendo la seguridad y utilidad requeridas durante un tiempo suficientemente largo (Mehta 1997). Actualmente se puede considerar que el problema de las construcciones de concreto que más preocupa es la falta de durabilidad de las estructuras por cargas ambientales.

En el sureste de México (Moreno et al. 2003), las viviendas que se diseñan y construyen de manera industrial están hechas casi en su totalidad de concreto, ya sea fabricando y moldeando el material en la obra (para losas, muros, castillos, cadenas, cerramientos, pisos, etc.), o bien utilizando productos industrializados (como bloques para muros, viguetas y bovedillas para losas, etc.), o incluso elementos prefabricados (como paneles, losas, etc.).

El ACI 201 (ACI 2002) define la durabilidad del concreto como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, que el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales, cambian con el tiempo (Ratay 2000). El material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto (Figuras 1 y 2) que continuar utilizándolo se considera inseguro o antieconómico (Moreno et al. 2001).



Figura 1. Agrietamiento por corrosión de acero de refuerzo en columna.

Analizando el costo de una construcción durante todo su ciclo de vida, estructuras cuyo diseño no consideran adecuadamente las características de durabilidad de los materiales, tendrán cada vez mayores costos de reparación y sustitución de partes dañadas del material, lo que a la postre convertirán estos costos en una parte importante del costo total de la construcción (Helene 1997). Se ha calculado que más del 40% de los recursos totales de la industria de la construcción en países desarrollados se aplican a la reparación y mantenimiento de estructuras existentes (Mehta y Monteiro 1998).



Figura 2. Daño en cerramiento por corrosión del acero de refuerzo.

En países con recursos económicos insuficientes, como México, la dificultad para sustituir la infraestructura, cuando se alcanza el final de su vida de servicio, provoca en muchos casos la subutilización de las construcciones en condiciones inseguras; así como un costo excesivo de reparaciones correctivas periódicas al quedar descartada la opción de demoler y construir de nueva cuenta (Figura 3).



Figura 3. Condiciones inseguras causadas por la corrosión del refuerzo.

CARGAS AMBIENTALES

Los principales efectos que influyen adversamente en la durabilidad del concreto pueden clasificarse como agentes físicos o químicos (San Juan y Castro 2001). Entre los primeros, los más importantes son: el desgaste de la superficie ocasionada por abrasión o erosión (asociada al exceso de tránsito o a cualquier otro tipo de fricción); el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de sales contenidas en los poros del material (asociadas con el contacto con soluciones salinas, en cimientos o muros, por ejemplo); y la exposición a temperaturas extremas, como son las heladas o el fuego.

El segundo tipo de factores ocasionan reacciones químicas entre los agentes agresivos presentes en el ambiente externo y los constituyentes de la pasta de cemento, o incluso entre los mismos constituyentes del concreto (Figura 4). Entre los daños químicos más importantes están los provocados por: hidrólisis o disolución del hidróxido de calcio de la pasta de cemento (ocasionado por el contacto de aguas puras o suaves con contenido escaso o nulo del ión de calcio); diversas reacciones que producen la formación de productos expansivos como son: la reacción entre los álcalis contenidos en la pasta de cemento y ciertos materiales reactivos presentes en los agregados (en el caso en que éstos no cumplen con su condición de inertes); el ataque al concreto por sulfatos contenidos en el agua o el suelo, o por ácidos que son generados por diferentes actividades humanas (industriales, agrícolas, etc.); la presencia de cantidades importantes de MgO y CaO en el cemento que provocan un efecto expansivo al hidratarse; y la corrosión de metales embebidos en el concreto tales como ductos, tubos y, principalmente, acero de refuerzo.



Figura 4. Daños en muro por ascensión de la humedad.

CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Este último factor es el que con mayor frecuencia provoca daños en las edificaciones de concreto (Moreno et al. 2001), y entre ellas, especialmente a las viviendas. En este caso la durabilidad del concreto reforzado depende de las características del concreto y del acero, pero principalmente de la interrelación entre ellos. En condiciones normales, el concreto que envuelve al acero de refuerzo, conocido como *recubrimiento*, le confiere una buena protección, tanto física como química, a dicho refuerzo. El recubrimiento proporciona un ambiente alcalino que rodea al acero propiciando la formación de una capa de óxido, llamada *película pasivante*, que lo protege contra la corrosión (Page 1975).

Sin embargo, el recubrimiento no constituye una barrera perfecta y permanente contra los agentes agresivos del ambiente iniciadores de la corrosión (iones agresivos, humedad, dióxido de carbono y oxígeno, principalmente); lo anterior se debe a que la pasta de cemento es un material poroso que está constituido por dos fases: una sólida de minerales hidratados y una líquida contenida en el interior de los poros que se denomina la *solución de poro*. En promedio, la porosidad total del concreto es de

alrededor de 20% del volumen del material y depende, principalmente, de la relación agua/cemento, de la compactación y del curado (factores típicos que influyen en las principales propiedades físicas del material). El tamaño y la interconexión de los poros y de las grietas (que es otra respuesta natural del material) determinan la tasa de ingreso de los mencionados agentes.

La corrosión del acero de refuerzo ocurre, principalmente, por la destrucción de la película pasivante formada de manera natural en el acero. Esto ocurre por dos causas principales: que haya una cantidad suficiente de cloruros u otros iones despasivantes, o que disminuya la alcalinidad del concreto al reaccionar con sustancias del medio ambiente (Moreno 2000).

La corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico (reacción química con transferencia de electrones e iones) en el que se forman celdas de corrosión en la superficie del acero, debido a las diferencias en las concentraciones de iones disueltos. La transformación del hierro metálico corroído es acompañada de un incremento en el volumen que, dependiendo de su estado de oxidación, puede ser tan grande como 600% del metal original. Este incremento de volumen es la causa principal de la expansión y del agrietamiento del concreto que suelen observarse en las construcciones de la costa; más que cualquier otra que pudiera relacionarse con la resistencia del material ante la acción de las demás cargas (no ambientales).

Para que se produzca la corrosión del acero de refuerzo es absolutamente necesaria la presencia tanto de aire como de agua en la superficie del área catódica (región donde se produce la reducción y la corriente iónica entra al metal); además, es necesario que la película superficial de óxido de hierro que cubre el acero, sea removida del área anódica (región donde se produce la oxidación y la corriente iónica fluye hacia el electrolito).

Se ha encontrado que la capa pasivante del acero es estable cuando el pH de la solución de poro del cemento hidratado permanece por encima de 11.5. Puesto que el cemento hidratado contiene álcalis e hidróxido de calcio sólido, normalmente hay suficiente reserva alcalina para mantener el pH por encima de ese valor (Moreno 2001). Dependiendo del tamaño y la continuidad de los poros en la estructura de la pasta de cemento, el material tendrá una cierta permeabilidad y el CO₂ del medio ambiente podrá carbonatar la mayor parte del hidróxido de calcio de la pasta, dando como resultado que el pH en las cercanías del acero pueda ser reducido por debajo de 11.5, destruyendo así la pasividad del metal, y

procurando las condiciones para el proceso de corrosión (Moreno 2000).

En presencia de los iones de cloro, la película protectora puede ser destruida aún a valores considerablemente arriba de 11.5 de pH (dependiendo de la relación molar Cl⁻/OH⁻). Además, cuando grandes cantidades de cloro están presentes, el concreto tiende a retener más humedad, lo que también incrementa el riesgo de corrosión.

Puesto que el agua, el oxígeno y los iones de cloro juegan papeles importantes en la corrosión del acero embebido, es obvio que la permeabilidad del concreto es la clave para controlar los procesos involucrados en el fenómeno. Los parámetros de la mezcla de concreto para asegurar una baja permeabilidad son principalmente: la relación agua/cemento, un contenido adecuado de cemento y el uso de aditivos minerales. El ACI 318 (ACI 2002) especifica una relación agua/cemento máxima de 0,4 para concreto reforzado expuesto al ambiente marino; siendo igualmente esenciales para garantizar la baja permeabilidad de la mezcla, una compactación y un curado adecuados.

En la costa, la situación que más frecuentemente desencadena la corrosión es la presencia de cloruros. Éstos pueden ingresar al concreto por adición durante su fabricación por medio del uso de aditivos (como es el caso del acelerante de fraguado a base de CaCl₂, muy utilizado en México) o de agua y agregados previamente contaminados; o también pueden ingresar por medio de la acción del aerosol marino; en donde la velocidad y dirección del viento predominante juega un papel importante.

Los cloruros del exterior suelen penetrar por fuerzas de succión capilar o por difusión; por lo general ocurre por la combinación de ambos mecanismos, e incluso, de otros. Se ha estudiado el nivel necesario de los cloruros en el concreto para que se rompa la capa pasivante, y se ha encontrado que ese valor depende de muy variados factores (como el tipo de cemento, las condiciones de curado, la relación agua/cemento, etc., que son los mismos factores que definen la mayoría de las propiedades mecánicas y la calidad del material). El intervalo del nivel de cloruros iniciadores de la corrosión se puede considerar entre 0,2 y 2,0 kg/m³ de concreto, de acuerdo a investigaciones realizadas en diversos lugares del mundo en los últimos 30 años. En las costas de la península de Yucatán se han realizado estudios en probetas de concreto, encontrándose una concentración iniciadora de la corrosión entre 1,0 y 2,0 kg/m³ (Castro y Maldonado 1995, Castro et al. 1997).

VULNERABILIDAD DE LAS VIVIENDAS

El tipo de sistema estructural usado para vivienda, denominado *cajón*, está formado por placas verticales (para el subsistema de soporte) y placas horizontales (para los subsistemas de entepiso y azotea). Es un sistema altamente hiperestático lo que le da gran resistencia y rigidez, por lo que a diferencia de otros tipos de sistemas estructurales la probabilidad de falla o colapso es muy baja. Esto ha provocado que el diseño y principalmente la ejecución de las viviendas sea tomado como el trabajo más simple en la rama de la construcción; de aquí que las actividades constructivas se realicen, generalmente, con supervisión insuficiente, y en muchos casos sea en el personal obrero en quien recaiga la responsabilidad de la ejecución de los procesos; mientras que los profesionales realicen labores principalmente administrativas.

Los esfuerzos mecánicos que se presentan en los diversos elementos son relativamente bajos, ya que los espacios que cubren y rodean las viviendas son reducidos, comparados con otro tipo de construcciones. Esto da por resultado que los espesores de los elementos planos (como losas o muros) sean reducidos, y que las secciones transversales de los elementos lineales (como castillos, cadenas o cerramientos) presenten también pequeñas dimensiones. Como consecuencia de esto, el acero de refuerzo tiene siempre un recubrimiento escaso (Moreno et al. 2005), lo cual facilita que los agentes agresivos del ambiente iniciadores de la corrosión tengan un camino muy corto que recorrer para alcanzar el acero de refuerzo (Figuras 5 a 7).



Figura 5. Daño en cadena de cimentación por corrosión.

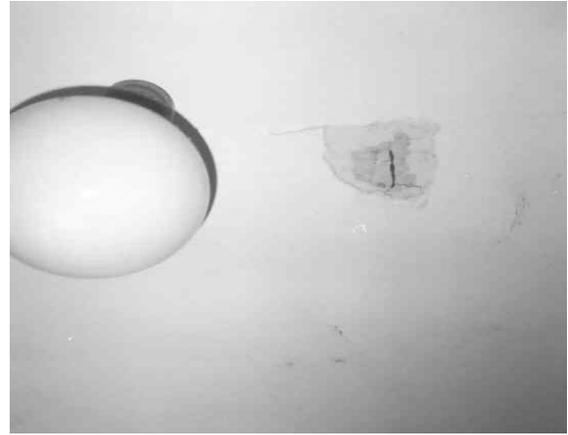


Figura 6. Daño en losa por corrosión del acero.



Figura 7. Daño en castillo ahogado por corrosión inducida por carbonatación.

Adicionalmente, por la misma causa antes señalada, la calidad especificada en el concreto (verificada por medio de la resistencia a la compresión) suele ser la menor de las que se usan para la construcción de estructuras (Moreno et al. 2005). Esto tiene como consecuencia un material altamente permeable que permite una alta tasa de penetración y avance de los agentes no deseables.

CONCLUSIÓN

De todo lo anterior, se puede concluir que las viviendas construidas en la costa presentan la mayoría de los factores que facilitan la corrosión del acero de refuerzo, por lo que su capacidad para resistir a la acción del tiempo reteniendo su calidad y condiciones de servicio puede ser mejorada, incluyendo en su diseño y construcción aspectos que ayuden a hacerlas más resistentes ante las cargas ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ACI Manual of Concrete Practice, (2002), American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
2. Castro P., L. Maldonado (1995). Initial Effort for Knowing and Controlling the Corrosion Problems in the Infrastructure of Mexican Southeast Coastal Zones, "CORROSION/95", NACE International, paper N° 21, Orlando Fla.
3. Castro P., Véleva L., and Balancán M. (1997), Corrosion of reinforced concrete in a tropical marine environment and in accelerated test, "Construction and Building Materials", Vol. 11, N° 2, pp. 75-81.
4. Helene P. (1997). "Manual para la Reparación, Refuerzo y Protección de las Estructuras de Concreto", 1ª edición, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, D.F.
5. Mehta, P. (1997). Durability-Critical Issues for the Future, "Concrete International", Vol. 19, N° 7, pp. 27-33.
6. Mehta K. y Monteiro P. (1998). "Concreto", 1ª edición, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, D.F.
7. Moreno E. (2000). La corrosión del acero de refuerzo inducida por la carbonatación del concreto. "Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán", Vol. 4, N° 2, pp. 43-48.
8. Moreno E. (2001). Valores de pH de la Pasta de Cemento Puzolánico Carbonatado. "Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán", Vol. 5, N° 1, pp. 33-38.
9. Moreno, E.I., Pérez, T., y Torres, A. (2001). Mecanismos de deterioro en ambientes marinos y urbanos, en "Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Preservación", Pedro Castro Borges, coord., pp. 13-31, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, D.F.
10. Moreno E., Solís R. and Cob E. (2003). Reinforcing Steel Corrosion in Houses due to Concrete Carbonation in Urban Tropical Environments, "CORROSION/2003", 58TH Annual Conference & Exposition, Paper No. 280, NACE International, Houston, Texas.
11. Moreno, E. I., Solís Carcaño, R. G., y López Salazar, L. (2005). Carbonation-Induced Corrosion in Urban Concrete Structures. "CORROSION/2005", 60TH Annual Conference & Exposition, Paper No. 263, NACE International, Houston, Texas.
12. Page, C. L. (1975). Mechanism of Corrosion Protection in Reinforced Concrete Marine Structures, "Nature", Vol. 258, pp. 514-515.
13. Ratay R. (2000). "Forensic Structural Engineering Handbook", Mc Graw-Hill, New York.
14. Sanjuán M., y Castro P. (2001). "Acción de los Agentes Químicos y Físicos sobre el Concreto", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México, D.F.