



Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico

O. Hernández-Castañeda y C.J. Mendoza-Escobedo

División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM e Instituto de Ingeniería, UNAM
E-mails: ohcastaneda@correo.unam.mx y cjm@pumas.iingen.unam.mx

(recibido: abril de 2005; aceptado: agosto de 2005)

Resumen

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 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.

Descriptores: Durabilidad del concreto, diseño por durabilidad, estructuras de concreto, infraestructura, optimización de recursos, desarrollo sustentable.

Abstract

Dam ages for durability in infrastructure have not only affected the concrete structures behavior, they also have economic repercussions that are key points to determine the profitability of a project in occasions. This article analyzes the advantages to apply in the constructive practice the design for durability of a concrete structure. Philosophy of the design by durability is presented, a tool and technological concept that, well applied, it can drive to the industry of the construction to have an optimization of materials during the XXI century, being able to build structures with a longer life and smaller maintenance costs, with the purpose that the construction participates in more measure to achieve a sustainable development in our country.

Keywords: *Durability concrete, durability design, concrete structures, infrastructure, resources optimization, sustainable development.*

Introducción

El concreto elaborado con cemento Pórtland es un material con una historia relativamente reciente. Debido a su consistencia rígida, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras de concreto con problemas, ante sus condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza,

éstos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen. El estado de arte actual del tema es bastante amplio; no obstante, el espíritu científico con tinua alimentándose de preguntas y nuevos retos.

¿Cómo incrementar la vida útil de las estructuras sin un costo excesivo?, ¿Qué materiales mejoran el desempeño del concreto ante medios agresivos?, ¿En qué medida los nuevos productos del mercado permiten este fin?, ¿Los materiales empleados en determinada región son adecuados para lograr estructuras durables en medios agresivos?, ¿Es viable aplicar estos nuevos productos o sistemas en México? ¿Qué consecuencia y costo tiene el hacerlo? El tema rebasa el campo técnico y contempla otros aspectos. Financieramente hablando ¿Qué rentabilidad tiene un proyecto durable y con una vida útil considerable?

A nivel mundial, el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de construcción, seguirá siéndolo; gran parte de la infraestructura de los países está elaborada con él, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo. Es un tema con implicaciones socioeconómicas. El Reino Unido, un país desarrollado, destina 40% de la inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento, 4% de su Producto Interno Bruto (Neville, 2001). Un país subdesarrollado como el nuestro, ¿Cuánto destina? El ahorro que pueda lograr un país en 30 años por investigar y construir ahora estructuras durables puede ser un detonante fundamental en el futuro, dada la escasez de materiales y recursos. Acaso, ¿No destinará mayores recursos un país o una empresa a la investigación, a la capacitación de personal o a construir nueva infraestructura o a otros aspectos igualmente importantes que aquel país o empresa que lo destina al mantenimiento y reparación de su infraestructura o bienes inmobiliarios?

Los problemas de durabilidad han afectado diversos tipos de estructuras, las cuales una vez que se presentan ya no son funcionales ni eficientes y están destinadas a no cumplir con su vida de servicio estimada. Los problemas de durabilidad no se limitan a su diseño inicial y construcción, tienen una fuerte intervención en la operación, ocasionan costos y pérdidas económicas para el propietario o inversionista, ya sea por reparación de las zonas afectadas, por la sustitución de elementos que se han deteriorado o

por costos operativos imputables a remodelaciones o mantenimientos periódicos. Según Buffenbarger (1998), tan sólo en Estados Unidos los problemas de durabilidad que afectaban las estructuras de transporte intermodal tuvieron un costo de \$20 billones de dólares en 1986.

Por tal motivo, al hablar de durabilidad, se debe tener un enfoque holístico que integre los aspectos más relevantes para la construcción de estructuras de concreto con alta durabilidad. Es un tema actual que con el transcurrir del tiempo acaparará mayor atención en varios ámbitos: profesional, financiero y académico, provocado por el alto impacto socioeconómico que tiene en la infraestructura.

En México, se tienen áreas con medios agresivos al concreto, por lo que debido a la escasez de espacio o situaciones específicas es necesario construir importantes estructuras de infraestructura en esas áreas, razón por lo que es indispensable conocer y dominar el tema.

Durabilidad e infraestructura

Históricamente, el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; gracias a este medio 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 por qué del deterioro del concreto y 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 empezaron a surgir antes de la mitad del siglo XX, por lo que la problemática no es nueva; sin embargo, las obras que se han realizado en las décadas más recientes siguen presentando problemas de esta naturaleza, ya que no se ha difundido lo suficiente, por el rechazo al tema, dada su complejidad y también a 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 futuro representa ahorros considerables.

En las obras de importancia nacional, empresarial o personal, es necesario considerar la durabilidad del material con el que pretendemos construir una estructura. El hecho de hacerlo, es 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 a cuidar que en un reactor nuclear o que 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, Sección Centro y Sur de México, 1996).

La naturaleza, intensidad y mecanismo implicado en cada uno de los diferentes ataques pueden variar considerablemente, dependiendo de las condiciones de exposición de la estructura de concreto.

Estadísticamente resulta difícil determinar las causas de problemas de durabilidad en estructuras de concreto. A principios de la década de los 80's se realizó en España un estudio al respecto, los resultados son interesantes e indican la importancia de cada etapa (Figura 1). Sanjuan y Castro (2001) estiman hasta en un 30% la falla debida a deficiencias en la selección de los materiales. Al parecer en México no se tienen estudios similares. Dichos datos indican que para lograr un concreto durable se deben considerar todos los aspectos de calidad de materiales y proveedores, así como un conocimiento de las condiciones de servicio para un correcto diseño y un adecuado proceso constructivo.

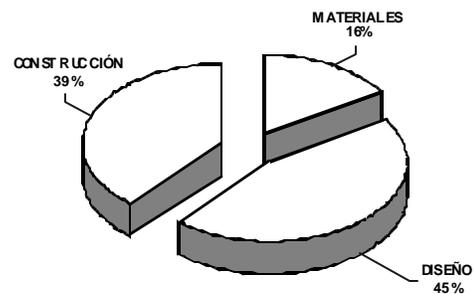


Figura 1. Causas que producen problemas de durabilidad

Los agentes que afectan la durabilidad del concreto son de diversa índole, pueden ser clasificados en dos categorías: los agentes externos son los que se encuentran en el medio ambiente o se deben a condiciones de servicio, entre ellos se encuentran los iones de cloruro, el dióxido de carbono, sulfatos, bacterias, abrasión y ciclos de congelamiento y deshielo. Los agentes internos se hallan dentro del mismo concreto, como los iones de cloruro incorporados en determinados aditivos

y los álcalis del cemento que reaccionan con agregados potencialmente reactivos.

Se pueden clasificar por su origen: agentes físicos, químicos, biológicos y mecánicos. Los físicos son debidos a cambios en el medio ambiente (congelamiento-deshielo, cargas, etc.). Entre los agentes químicos destacan los ataques por sulfatos, ácidos, agua de mar y cloruros, estos últimos inducen a la corrosión electroquímica del acero de refuerzo.

Los biológicos pueden ser microorganismos, algas y moluscos. Los mecánicos se deben a las condiciones a que se expone el concreto (por ejemplo, abrasión y erosión). En ocasiones, estos agentes se presentan simultáneamente, por lo que se pueden tener combinaciones interesantes. Obviamente el efecto del daño se debe a cuestiones intrínsecas y extrínsecas del concreto, como es la calidad del mismo y el grado del agente activo al que se encuentra expuesto.

La importancia de los agentes agresivos está en función del entorno en que se encuentran, velocidad de penetración y medio de transporte. Dichos agentes agresivos pueden ser gases, líquidos o partículas que forman parte de los suelos adyacentes al concreto. En la literatura del tema se incluyen los siguientes aspectos:

- Exposición al ataque químico.
- Corrosión del acero de refuerzo y otros metales embebidos en concreto.
- Reacciones químicas de agregados.
- Congelamiento y deshielo.
- Abrasión.

Normatividad de la durabilidad

Es hasta las últimas décadas que en los reglamentos y normas de construcción se ha incluido el diseño de estructuras por durabilidad. Actualmente, recibe atención especial en los Reglamentos Nacionales de Construcción de los siguientes países: Japón, Australia y Nueva Zelanda, así como en el Reglamento Europeo (Aitcin, 1998). En México, las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones del

Distrito Federal (RCDF) incluyen por primera vez un apartado sobre el tema (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2004). Debido a su importancia y a los problemas que se han detectado, la tendencia es incluir cada vez más la durabilidad del concreto en los Reglamentos de Construcción de los países, para que en el futuro se traduzca en obras con concreto durable y con un mejor desempeño ante sus condiciones de servicio.

Impacto socioeconómico de la durabilidad en la construcción

Históricamente, la industria de la construcción ha tenido experiencias, que aunque a veces amargas por sus costos socioeconómicos han aportado a la ingeniería civil conocimientos técnicos de gran valor al enfrentarlas. El avance científico y tecnológico actual de la durabilidad del concreto es resultado de la experiencia y del ingenio humano para entender los procesos físicos y químicos, así como para evaluar, modificar y evitar en la medida de lo posible tales daños. A continuación, se presentan algunos casos históricos e interesantes relacionados con la durabilidad.

Corrosión

Es un problema internacional, en 1990 se realizó un estudio del impacto que producen los costos económicos originados por la corrosión, el resultado fue que entre el 2 y el 5% del PNB de cada país se destina a subsanar los problemas de corrosión. Según Castro *et al.* (1995), entre un 15 y 25% se pudo haber evitado si se hubiese aplicado la tecnología existente para contrarrestarla. A la fecha, en México no se tienen datos que permitan determinar la situación actual. De acuerdo con Avila *et al.* (1986), se ha detectado que más del 90% de las industrias presentan deterioros por corrosión. Orozco (1998), detectó que los costos por corrosión rebasan el 8% del PIB estatal (Yucatán).

A) En el puente Penhalm en Lincoln (Inglaterra) con 350 m de largo se presentaron problemas. Una carretera de doble sentido soportada por columnas había sido construida en 1957, en un tiempo donde era imposible prever el gran incremento que tuvo el uso de las sales descongelantes en los

caminos para permitir el paso de vehículos en temporadas con nevadas, lo cual sucedió en la década de los 60's. La penetración de las sales en el pavimento había causado una corrosión severa del acero de refuerzo en el concreto de los puentes carreteros. El costo era excesivo, aun si se reparaba austeramente. El reporte concluía con que se habían encontrado otros casos similares en la misma Inglaterra.

En Estados Unidos el uso de sales descongelantes aumentó de 0.6 millones de toneladas en 1950 a 10.5 millones de toneladas en 1988. Adicionalmente a la corrosión originada por las sales descongelantes en los puentes se tiene el daño por corrosión provocado en los automotores, en 1974 se reportó que el costo de los daños ascendía a 5 billones. La rehabilitación de estos puentes ha sido una importante práctica de ingeniería.

B) El Centro Pompidou (París, Francia) mostró señales de corrosión severa en 1981, a menos de 5 años del término de su construcción. El monitoreo de la corrosión empezó en 1979, cuando los primeros efectos se encontraron en el exterior de la armadura metálica. La protección al fuego se realizó con mantas de fibra mineral cubiertas con hojas de acero inoxidable. Los nodos fueron protegidos con concreto y capas plásticas para prevenir la penetración del agua. Al parecer, el agua penetró de un modo u otro durante el verano de 1978-1979, congelando el agua atrapada y propiciando desconchamientos. Debido al peligro que representaba para el público la caída del aislamiento contra fuego, se removieron las capas, dejando a la estructura de acero protegida solamente con un recubrimiento metálico de zinc de espesor de 7.5 μm .

C) En diciembre de 1979, el puente Point Peasant en Ohio, EU, colapsó matando a 46 personas. La causa del desastre fue la falla del acero de refuerzo por corrosión bajo esfuerzo.

Los puentes no son las únicas estructuras susceptibles a corrosión, pero sí proveen un

buen ejemplo de los efectos catastróficos de los problemas más triviales de corrosión.

D) La intrusión de los iones de cloruro que provocan corrosión en el acero de refuerzo, en conjunto con la carbonatación no se contempló en Estados Unidos. De acuerdo a un estudio realizado en 1984 la infraestructura tenía serios daños.

Solamente en puentes se consideraba que 253,000 tenían las losas de plataforma deterioradas, con todo y que algunos no tenían más de 20 años de edad. Se calculó que anualmente se tendrían 3,500 nuevos puentes deficientes. El país más desarrollado y rico del mundo no tenía presupuesto para hacer las reparaciones necesarias, por lo que se creó un nuevo impuesto adicional. A través del decreto ISTE A se gastaron a lo largo de 6 años hasta diciembre de 1997, 20,000 millones de dólares anualmente para hacer frente a las reparaciones y todavía quedaron puentes pendientes por reparar (Rivera-Villarreal, 2001).

Reacción álcali – sílice

Requiere presencia de humedad, de ahí que es más susceptible de detectarse en estructuras hidráulicas o marinas. La reacción es estimulada por ciclos de secado y humedad. El fenómeno ha sido conocido desde hace varios años.

El primero en detectarse fue en la planta hidroeléctrica Buck, en Virginia, EU en 1922, diez años posteriores al término de su construcción. En 1935, estudios petrográficos indicaron que las expansiones y las grietas se originaron por las reacciones entre los álcalis del cemento y la filita usada en el agregado grueso.

Stanton, en 1940, publicó una descripción del fenómeno de su experiencia en California. Después de 10 años de investigación intensa acerca del deterioro originado por la reacción álcali-sílice, el problema se había identificado en 14 estados de EU (Campbell, 1991). Este fenómeno se ha reportado en varios países como Dinamarca, Gran Bretaña, Alemania, África del Sur, Canadá, Chipre, Nueva Zelanda e Islandia.

Existe el caso de la presa Val de la Mare en la Isla Jersey, Gran Bretaña, que se construyó entre los años 1957 y 1962, época en que no se tenían antecedentes en Gran Bretaña de daños ocasionados por la reacción álcali-sílice. Probablemente por este motivo no se consideraron medidas preventivas a pesar de que los agregados tenían sílice reactiva (calcedonita) y parte del cemento suministrado tenía alto contenido de álcalis (más del 1% como Na_2O).

Nueve años después de construida (1979) se convirtió en la primera estructura que presentaba la reacción álcali-sílice en las Islas Británicas. La presa fue desahuciada. Toda una inversión de gran magnitud y tiempo se interrumpió por el desconocimiento de dicha reacción entre los componentes de la pasta de cemento y de los agregados.

Los costos económicos resultaron caros debido a que en 1983 se estudiaba la posibilidad de reponerla, es decir, realizar nuevamente un proyecto hidráulico y exploraciones geológicas de encontrar un sitio adecuado para sustituirla (Mena, 1983).

En México, se ha considerado el requisito de evitar el desarrollo de la reacción álcali-sílice, sobretodo en estructuras de concreto hidráulicas de importancia que tengan contacto con el agua, como son, obras hidráulicas para riego, con trol de ríos y generación de energía eléctrica, obras marítimas y centrales nucleoelectricas. En este caso se ha prevenido con cemento Pórtland con bajos contenidos de álcalis, puzolanas administradas en forma in di vid ual o cementos puzolánicos (Mena, 1983).

EL ACI Sección Centro y Sur de México (1996), realizó una zonificación territorial de nuestro país identificando las zonas que poseen agregados potencialmente reactivos.

Ataque por sulfatos

Dada sus características, las estructuras más expuestas a este tipo de ataque son las hidráulicas, como canales y tuberías, así como los cimientos en torres de transmisión y pavimentos de carreteras.

Un caso interesante que demuestra la importancia de considerar los diversos aspectos de la durabilidad es la presa Alcova, sobre el río North Platte, en Wyoming, EU, presa de terraplén que tiene 81m de altura. La construcción inició en 1935 y concluyó en 1938. Dicha presa cuenta con un vertedor de canal abierto revestido de concreto. Con el paso de los años el deterioro progresivo del concreto en el piso del vertedor originó erosión y descascamiento severos. En 1967, se decidió reparar el vertedor y se tomaron corazones para indagar las causas.

La resistencia a la compresión fue de 414 kg/cm^2 ; no obstante, la resistencia a la tensión era solamente del 2.2 % de la de compresión (9 kg/cm^2), el módulo de elasticidad resultó de 177,859 kg/cm^2 , es decir, la mitad de lo esperado.

El estudio petrográfico mostraba que el concreto había sido alterado por ataque de sulfatos. Se encontraron depósitos blancos de sulfoaluminato de calcio (etringita) en cantidades moderadas y espaciadas en todas las superficies de las muestras. También se encontraron algunos depósitos de gel de sílice, generalmente concentrados en unos cuantos guijarros. Por su parte, el concreto de las paredes estaba sano y no presentaba daño alguno por esta razón.

En esa época existía un manantial que nacía en la ladera de la colina situada a la izquierda del vertedor, que fluía hacia el extremo inferior de la estructura en una corta distancia y desaparecía bajo el suelo. El análisis químico del agua indicó que tenía un contenido de sulfato soluble igual a 1,370 ppm; otras aguas subterráneas de la misma zona, tenían suficiente cantidad de sulfatos solubles para ejercer un ataque. La conclusión fue que el deterioro se atribuía principalmente al ataque de los sulfatos presentes (Harboe, 1983).

Diseño por durabilidad

Ningún diseñador o propietario espera que los sistemas con tra incendios o la instalación eléctrica funcionen adecuadamente sin inspección y mantenimiento; sin embargo, es un supuesto no hablado o escrito que las estructuras de concreto servirán indefinidamente sin ninguna atención.

La experiencia ha mostrado que el costo por no considerar la durabilidad es mayor al que se invierte si se le considera (Taylor, 2002 y Uribe, 1999, 2001).

El diseñar una estructura por durabilidad aporta ventajas técnicas y económicas (Cuadro 1). Técnicamente permite que la estructura tenga un mejor desempeño ante sus condiciones de servicio, y por tanto, la disminución en las reparaciones, hecho que en términos económicos minimiza costos operativos y de mantenimiento.

- ★ Mejor desempeño y conservación ante las condiciones de servicio.
- ★ Mayor vida útil.
- ★ Menores costos de mantenimiento y operativos
- ★ Menor valor presente del costo de la construcción y de sus costos de mantenimiento.
- ★ Coadyuva a la rentabilidad del proyecto al reducir costos excesivos por reparaciones.

Cuadro 1. Ventajas del diseño por durabilidad en una estructura

Frecuentemente, se ha expresado que el costo de proveer una vida útil y larga a las construcciones, resulta prohibitivo y requiere una gran inversión de recursos que se pueden destinar a otros aspectos. Un buen diseño que considera los riesgos del ambiente, no es más caro que el diseño que los ignora.

Taylor (2002), expuso un caso de estudio que consiste en el deterioro de una planta existente y la construcción de una fundidora de aluminio en Sudáfrica, que demuestra que considerar la durabilidad es una decisión inteligente y necesaria.

El propietario de una planta de fundición se acercó al *Instituto del Cemento y del Concreto (Cement and Concrete Institute, C&CI)* de Sudáfrica, solicitando asesoría para especificar su nueva planta de fundición a fin de asegurarse que no tuviera los mismos costos excesivos de mantenimiento que la planta ya existente, la cual fue construida cerca del mar usando concreto con una durabilidad inadecuada para su ambiente. El ambiente marino, la solución de cloruros empleada en el proceso y el gas de flúor producido en el proceso de la propia

planta, contribuyeron al deterioro prematuro de la estructura de concreto. El mantenimiento y reparación de la primera construcción seguía creciendo, por lo que el propietario decidió realizar una inversión adicional en la construcción de la nueva planta para asegurar que ésta no presente el mismo grado de deterioro y costos de mantenimiento exagerados de la primera.

La nueva planta de fundición se diseñó, especificó y construyó con criterios de durabilidad. La construcción duró dos años y ya en operación se realiza un monitoreo periódico.

El propietario indicó que el dinero adicional invertido para asegurar un concreto más durable era significativo en términos del precio del concreto, pequeño en términos del costo total de la construcción y muy pequeño en términos del costo total del proyecto. El propietario consideró que su dinero había sido bien invertido porque el riesgo de reparaciones futuras había sido reducido.

La construcción realizada por operadores competentes, mano de obra calificada y una buena supervisión no tiene costos adicionales inherentes a su desempeño, y como resultado, su mejor funcionamiento no es más caro que el diseño que no contempla tales condiciones. Los beneficios por considerar la durabilidad son mayores que los costos iniciales. El costo de los ingredientes de un buen concreto no es diferente al costo de los mismos ingredientes para realizar un concreto pobre.

Son los costos de mantenimiento y reparaciones a largo plazo los que pueden incrementar su costo final. Esto frecuentemente sucede cuando la construcción se realiza inicialmente con ningún o escaso control de calidad.

Es importante tener una visión de estadista y comprender que el verdadero ahorro de una estructura diseñada por durabilidad se verá en la operación de la misma (largo plazo). La figura 2 muestra la comparación entre una estructura tradicional, es decir, sin considerar la durabilidad y una estructura diseñada por durabilidad, la primera requiere una menor inversión inicial, pero a través del tiempo requiere inversiones periódicas

para seguir brindando servicio. En cambio, la estructura diseñada por durabilidad tiene una inversión inicial mayor, pero no necesita mantenimientos ni reparaciones mayores para seguir dando servicio, no acarrea costos operativos. Para el caso de pavimento hidráulico colocado en una avenida muy transitada, no necesitará reparaciones, por lo que no originará retrasos a los automovilistas o transporte público, no costará horas/hombre, ni costos administrativos por licitaciones. Si el caso es un hotel, no se cerrarían habitaciones por reparaciones ni pérdida de imagen del mismo. Las reparaciones de la infraestructura y los costos que acarrea son mayores a los de la inversión inicial adicional que se destinaría a una estructura para diseñarla por durabilidad.

Mantenimiento y durabilidad

Para lograr bajos costos de mantenimiento y obtener ahorros a largo plazo se requieren tomar varias estrategias, entre ellas:

- Óptima selección de materiales.
- Procedimientos de diseño y construcción bien planeados, organizados y llevados a buen término.
- Programas de mantenimiento.

El plan de mantenimiento está definido por la naturaleza de las construcciones de concreto

reforzado, donde realizar una inspección periódica es difícil. Las técnicas de inspección deben ser consideradas por el diseñador desde el principio, ya que algunos problemas pueden detenerse a tiempo si se identifican y tratan adecuadamente, antes de que se extiendan en proporción epidémica. Por ejemplo, en el caso de la nueva planta de aluminio, ésta se monitorea con criterios de durabilidad. Otro ejemplo es la delaminación de las fachadas, si se detecta a tiempo se puede detener un problema que podría dañar completamente la fachada.

Costos de mantenimiento imputables a durabilidad

Toda vez que los procesos deletéreos que involucran la durabilidad requieren tiempo para mostrarse macroscópicamente, con frecuencia se detectan cuando ya están avanzados y su reparación tiene un mayor costo. Incluso en algunos casos es preferible realizar una demolición total de la estructura que ejecutar un mantenimiento mayor.

Debido a que actualmente ya se tiene una infraestructura construida, es de vital importancia invertir nuevamente en su mantenimiento, con las repercusiones de que los recursos destinados para este fin podrían destinarse a otros aspectos. En países subdesarrollados estos recursos se pueden aplicar en otras necesidades sociales o en incrementar o mejorar la infraestructura.

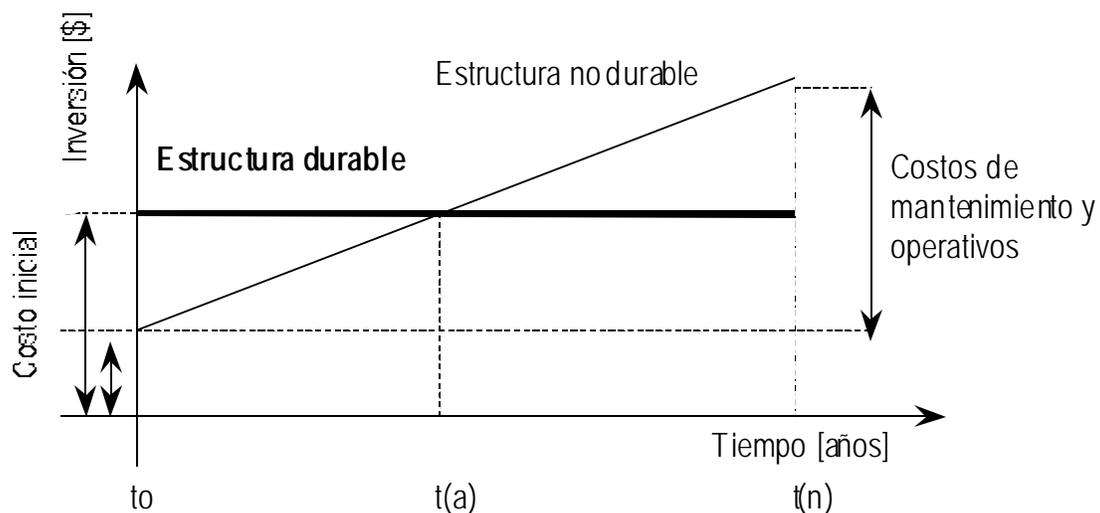


Figura 2. Comparación inversión vs tiempo entre estructura durable y no durable

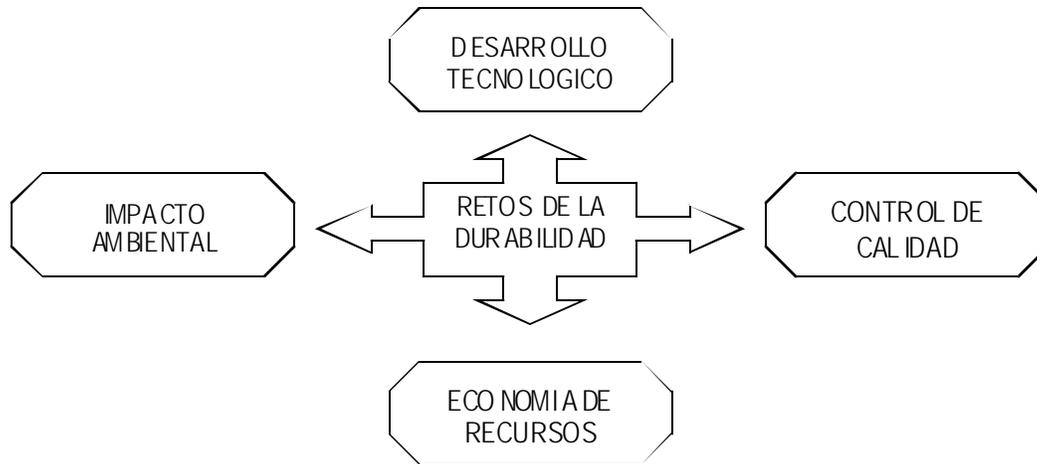


Figura 3. Retos de la durabilidad

Retos de la durabilidad

En la durabilidad del concreto se involucran varios aspectos. Dada la importancia de la construcción en las economías de los países y el impacto que ésta tiene en el desarrollo de los mismos, no es de extrañarse que la construcción, y en particular la construcción con concreto, llame la atención de diversos sectores.

La ingeniería civil y la construcción se enfrentan a nuevos retos para este siglo XXI. La situación económica de los países y la preocupación por el deterioro del medio ambiente originado por la conducta humana ha llegado al ámbito de la construcción desde años atrás, hecho que es benéfico e irreversible. Los principales retos (Figura 3) a enfrentar son los descritos a continuación:

1. Desarrollo tecnológico

El desarrollo tecnológico de otras áreas puede retroalimentar a la tecnología del concreto, por ejemplo, la química, con el concreto polimérico, resinas epóxicas, látex, desmoldantes para cimbra que prolonguen la vida de ésta y que sean biodegradables, aditivos de concreto mejorados y el desarrollo de otros más potentes pueden mejorar las propiedades químicas del propio cemento y del concreto. La microbiología es otra rama científica que apenas anuncia su entrada para apoyar a la tecnología del concreto. Por ejemplo, Ramachan-

dran *et al.* (2001), han reportado una biotecnología innovadora utilizando precipitación mineral inducida microbiológicamente para componer al concreto. De sus pruebas experimentales, concluye que el bacilo *pasteurii* incrementa la resistencia a la compresión en el mortero de cemento Pórtland.

Otra área es la metalurgia, con el desarrollo de un acero más económico y resistente a la corrosión, aunque a la fecha sólo se tiene en proyectos de investigación. Recientemente el mercado ya ofrece instalaciones hidráulicas elaboradas con acero inoxidable, que requieren poco mantenimiento. Otras áreas de investigación por desarrollar es el análisis de confiabilidad, es decir, modelos para mejorar la seguridad de una estructura dada, modelos matemáticos para los diversos ataques (sulfatos, congelamiento-deshielo, corrosión, etc).

El objetivo es generar nuevas ideas de otras áreas para aplicaciones creativas en la tecnología del concreto y en la construcción, hecho que puede tener efectos profundos y benéficos en la elaboración de concreto, incluyendo la renovación de nuevos métodos de pruebas, especificaciones y lineamientos.

La forma de elaborar concreto a través de los años ha cambiado, desde su forma clásica de hacerlo con cemento Pórtland, agua potable, arena y gravas limpias y resistentes. En la década de los 50's del siglo pasado, las mezclas se

dosificaban por volumen. En 1990, los materiales especificados para el proyecto del Gran Cinturón de Unión en Dinamarca fueron los siguientes: cemento Pórtland, cenizas, humo de sílice y de 3 a 4 aditivos químicos, además de tener los cuidados necesarios para evitar la reactividad de los agregados.

El cemento Pórtland especial, tiene bajo contenido de C_3A , y un nivel máximo de C_3S y el calor de hidratación se optimiza gracias a los dos materiales silicosos añadidos, todo ello para satisfacer el requerimiento de durabilidad de 100 años para el túnel y puente de concreto. Se requirió una permeabilidad al cloro mínima y una resistencia a los sulfatos máxima, sin importar el bajo contenido de cloro y de sulfatos de las aguas del Gran Cinturón, así como lo moderado del clima. Las aditivos químicos se agregaron para asegurar la resistencia al congelamiento, para evitar el retardo o la aceleración del fraguado durante la fabricación, así como para proporcionar la trabajabilidad al concreto fresco con bajo contenido de agua que se requiere (Idorn, 1992).

Esta ingeniería de materiales se aplicó en un gran proyecto de ingeniería en un país desarrollado en 1990, a la fecha (2006), continúan las investigaciones, nuevas técnicas se proponen, las mezclas de escoria de alto horno, los cementos con grandes contenidos de aluminio, los cementos con adherencias cerámicas, los métodos de refuerzo con fibras, recubrimientos epóxicos, aditivos a base de litio para restringir las reacciones álcali-agregado, etc.; todas ellas podrán parecer exóticas a primera instancia; sin embargo, pueden conquistar mercados en el futuro, principalmente porque ofrecen una economía de recursos.

Es recomendable destinar más recursos a la investigación, algunos países desarrollados lo han hecho durante décadas (Canadá, Unión Europea, Japón, Estados Unidos, etc.). En nuestro país se tiene una escasa investigación de materiales, existen entidades públicas y universidades que las realizan, pero con recursos muy limitados.

En el ámbito privado, las empresas cementeras y concreteras son las únicas que están realizando investigaciones.

2. Control de calidad

La tendencia es mejorar el control de calidad a través de un monitoreo continuo a una estructura para observar sus propiedades físico-químicas, debido a que la mecanización y racionalización de las construcciones y la fabricación industrial de elementos de concreto prefabricado han hecho de la supervisión clásica insuficiente e imposible de aplicar como medio de control de calidad. El monitoreo puede convertirse en la prueba más estricta en toda la historia del concreto. Taylor (2002), asegura que la vigilancia clásica se reemplazará por un registro instrumental adecuado y sensible.

La construcción de concreto es indispensable para la infraestructura, industria y vivienda, con lo cual, se satisfacen los requerimientos de la población, por lo que reafirma la necesidad de proveer un buen concreto a las construcciones, una tecnología de materiales adecuada y soportada con un conocimiento científico.

Idorn (1992), anunció: *"el concreto certificado para una mayor durabilidad que sea elaborado con la calidad requerida, será un elemento básico en el desarrollo de las políticas de economía de recursos en todo el mundo"* y Mehta lo ratifica en el 2001. El paradigma mundial es lograr un concreto óptimo mediante un mejor control de calidad y una tecnología del concreto avanzada, soportada con un mayor conocimiento científico.

Los productores de concreto y los constructores cada vez aceptan más los modernos sistemas de control de calidad, como el ISO 9000 o los propuestos por el ACI.

Una clave fundamental es la capacitación de los profesionales que construyen con concreto, aquellos que realizan el proyecto y las especificaciones, que están en la obra y que tienen el control de la misma, o que están en la planta de premezclado, aquellos que realizan o evalúan las pruebas y reciben los resultados del laboratorio de materiales.

El esquema de la certificación ha penetrado ampliamente en la industria de construcción como

modelo a seguir. Actualmente, las empresas con creteras, las cementeras, los laboratorios de materiales y algunas constructoras ya están certificadas o están en proceso; sin embargo, todavía existe un porcentaje importante de empresas que no lo están. El objetivo es que la mayoría o todas las empresas y laboratorios de materiales involucrados en la construcción a mediano plazo cuenten con este respaldo.

3. Economía de recursos

La perspectiva y visión de la construcción actual es distinta a la de hace algunos años, las sequías en algunos países han mostrado que el agua no es inagotable, las compañías de cemento se han percatado de que las canteras no se amplían constantemente, y la carencia de agregado de buena calidad ha obligado a distancias más largas de transportes que requieren más tiempo y elevan los costos. Por lo que otro reto es la economía de recursos.

Los tiempos actuales conllevan a la economía de recursos a maximizar su beneficio y optimizar su desempeño.

La poca durabilidad del concreto es de interés público; la falla de estructuras daña a la infraestructura y a la industria. Se ha avanzado porque se han tenido experiencias dolorosas, como enuncia correctamente Uribe (1999): *"El valor de la experiencia obtenida en el pasado nos permite generar las soluciones para nuestros problemas futuros"*.

4. Reducir el impacto ambiental

De acuerdo a Hawken y sus colaboradores (1999) sólo el 6% de flujo total de los materiales, algo así como 500 mil millones de toneladas al año, termina en productos deseados, mientras que la mayoría de los materiales vírgenes son regresados al ambiente en forma de desperdicios dañinos, ya sean líquidos, gaseosos o sólidos. Obviamente el desarrollo industrial en los últimos 200 años no consideró una visión holística de largo plazo del impacto de los subproductos no deseados por la industria.

La humanidad está aprendiendo que *"en un mundo finito el modelo de crecimiento ilimitado, el uso no restringido de recursos naturales y la contaminación*

ambiental no controlada es a final de cuentas una receta para la destrucción del mismo planeta" (Mehta, 2001).

Impacto ambiental del concreto

La producción mundial de concreto al año es de 1600 millones de toneladas, que contabiliza aproximadamente el 7% de la carga global del dióxido de carbono en la atmósfera. El cemento Pórtland no sólo es uno de los materiales más empleados en la construcción, es el responsable de una gran cantidad de gases de invernadero. La producción de una tonelada de cemento requiere aproximadamente de 4 GJ de energía y la manufactura del clinker de cemento Pórtland descarga aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera. La extracción de materias primas de las arcillas y calizas, así como combustible como carbón, frecuentemente resultan en una deforestación excesiva y pérdida de suelos. Se estima que globalmente al año se consumen 10^{10} toneladas de arena, grava y roca triturada. El concreto también requiere grandes cantidades de agua, se estima que el agua de mezclado requerida asciende anualmente a 10^9 de metros cúbicos.

La escasez de materiales durables también tiene consecuencias ambientales serias. El incrementar la vida de servicio de los productos es una solución sencilla y a largo plazo para preservar los recursos naturales de la tierra. Las estructuras de concreto normalmente se diseñan con una vida de servicio de 50 años, pero la experiencia ha mostrado que en ambientes urbanos o marinos algunas estructuras se deterioran a los 20 años. Freyermuth (2001), ha sugerido que la vida de diseño de las estructuras se incremente hasta 100 o 120 años, y para puentes urbanos, al menos a 150 años de vida de servicio.

La tendencia hacia el diseño de la infraestructura basada en el costo del ciclo de vida no sólo maximiza el regreso del capital disponible, sino también los recursos naturales disponibles. El impacto ambiental de la industria del concreto puede reducirse si se incrementa la productividad del recurso mediante la conservación de materiales y energía para elaborar el concreto.

La conservación del cemento es el primer paso en la reducción del consumo de energía y emi-

siones de gases de invernadero. Para incrementar la productividad del recurso se requiere minimizar el consumo de cemento, mientras se debaten las demandas futuras para más concreto. Ello debe ser la prioridad para una industria de concreto viable. A excepción de los cementos Pórtland mezclados que contienen aditivos minerales, ningún otro cemento hidráulico parece satisfacer la colocación, endurecimiento y características de durabilidad de los productos basados en cemento Pórtland.

El consumo mundial de cemento para el 2010 se estima que alcance los 2 mil millones de toneladas, además de existir suministros adecuados de subproductos cementantes y puzolánicos que puedan emplearse como sustitutos del cemento para eliminar la necesidad de la producción de más clinker de cemento Pórtland (Mehta, 2001).

La industria mexicana del cemento ha implementado medidas para la reducción del dióxido de carbono descargado a la atmósfera; sin embargo, la filosofía debe ser disminuir la descarga al máximo.

Conservación del agregado

En Norteamérica, Europa y Japón, cerca de dos tercios de desperdicios de construcción y demoliciones consisten de mampostería y escombros de concreto viejo, hecho que representa una oportunidad para mejorar la productividad del recurso mediante el uso de agregado grueso, derivado de desperdicios de demolición y construcción. En algunas partes del mundo, las arenas dragadas pueden ser procesadas como agregados finos. El reciclaje de los desperdicios en lugar del proceso de materiales vírgenes está siendo particularmente económico en los países donde la tierra es escasa y los costos de disposición de los desperdicios son muy altos.

El agregado de concreto reciclado, particularmente los agregados de mampostería reciclados, tienen una porosidad más alta que el agregado natural. Por consiguiente, para una determinada consistencia, los requerimientos de agua para elaborar concreto fresco tienden a ser más altas y las propiedades mecánicas del concreto endure-

cido se ven afectadas. El problema puede resolverse empleando mezclas de agregado natural y reciclado o por el uso de aditivos reductores de agua y ceniza vol ante en el concreto.

Conservación de agua

Hasta ahora, el agua es abundante casi en cualquier parte y es utilizada libremente para todos los propósitos de la industria de la construcción. De hecho, los reglamentos y normas de construcción recomiendan el uso de agua potable para mezclar y curar concreto, pero ahora la situación ha cambiado. Como uno de los mayores consumidores industriales de agua, es imperativo para la industria del concreto emplearla más eficientemente. El concreto premezclado emplea mucha agua para limpiar las ollas o tractocamiones del concreto premezclado. La mayoría del agua industrial reciclada puede usarse para elaborar concreto, al menos que se indique lo contrario en las especificaciones de proyecto o pruebas.

El agua tratada también se puede usar para agua de curado y lavado de implementos. Se pueden tener ahorros considerables si en el curado con agua se emplean compuestos textiles con un tejido absorbente de agua en el interior y una membrana impermeable en el exterior o con curadores diseñados para este fin.

Incuestionablemente, el desafío que la industria del concreto encara para el siglo XXI es lograr un modelo sustentable de crecimiento. La tarea es formidable, pero las ideas y ejemplos de esta sección muestran que pueden lograrse mediante un cambio de paradigma de la cultura de una construcción acelerada a una cultura de conservación de energía y materiales.

Conclusiones

Con las investigaciones realizadas en el campo de la durabilidad del concreto se ha incrementado nuestro conocimiento del tema, es indudable que aportan nuevos productos y resultan en mejoras importantes para la construcción de estructuras de concreto, y a su vez, perfeccionan los métodos de reparación inducidos por estos tipos de daños en las estructuras actuales.

Es necesario que la información sea difundida entre los actores y protagonistas de la construcción, aquellos individuos responsables del diseño, construcción y mantenimiento de las estructuras.

En la medida que se tenga un mayor conocimiento y conciencia del tema por parte de los profesionales de la construcción, se podrá tener en un futuro estructuras más durables en aquellas áreas de gran agresividad al concreto. Así se pueden optimizar recursos y lograr estructuras con mantenimientos menos frecuentes y costosos a los actuales, eliminando simultáneamente problemas sociales de desalojo de edificios y riesgos que atenten con vidas humanas.

El reto de la tecnología del concreto es proyectar estructuras de concreto reforzado capaces de lograr vidas útiles superiores a las actuales. Nuestro país debe impulsar esta investigación y aplicarla en el mediano plazo, con el objetivo a largo plazo de lograr efectivamente un desarrollo sustentable en la infraestructura nacional, y en general, en la industria de la construcción. La meta está definida, hoy tenemos que dar el primer paso.

La durabilidad del concreto constituye una solución de alto rango y un factor vital para mejorar la productividad del recurso en la construcción.

El desarrollo de los nuevos proyectos de ingeniería debe ser integral, es decir, que contemple aspectos técnicos, económicos y ambientales; así como la evaluación del proyecto, la tecnología del concreto y el impacto ambiental. Los retos y desafíos aquí planteados tienen el objetivo de que en el presente y en el futuro se realicen acciones concretas para lograrlos.

El desarrollo tecnológico, el control de calidad, reducir el impacto ambiental de la construcción y la economía de recursos, son conceptos que solamente se entienden cuando existe una conciencia real de las acciones y repercusiones por transformar el ambiente de forma inteligente con ingeniería civil bien planeada, con una construcción llevada a buen término, pero sobretodo, con un compromiso social.

Agradecimientos

El presente artículo se elaboró en la Coordinación de Estructuras del Instituto de Ingeniería, UNAM. El primer autor agradece ampliamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) su apoyo moral y económico.

Referencias

- ACI-201R-92 (1997). *American Concrete Institute Guide to Durable Concrete*.
- ACI Sección Centro y Sur de México (1996). Guía para la durabilidad del concreto. Suplemento Mexicano del Informe del Comité ACI 201. Guía del Consumidor de Concreto Profesional.
- Aitcin-Pierre C. (1998). *High-Performance Concrete*. Cap.17. E & FN Spon. EU & Canadá. pp.461.
- Avila J. y Genescá J. *Más allá de la herrumbre. La ciencia desde México*. No.9. Fondo de Cultura Económica, pp.39-41.
- Buffenbarger J.K. (1998). Durability of Concrete Structures. Emphasis on Corrosion and Reaching Specified Services Lives with Corrosion Inhibitors. Concrete Technology Update, Issue, No.1, July. Master Builders Technologies, Inc.
<http://mbt-la.com/MB/static/TechArticles>.
- Campbell-Allen (1991). *Denison and Roper Harold, Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair*. Logman Scientific and Technical, Cap.1.
- Castro B.P. y Castillo R. (1995). Corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Construcción y tecnología*, México, Agosto.
- Freyermuth C.L. (2001). Life-Cycle Cost Analysis for Large Segmental Bridges. *Concrete International*, V.23, No. 2, febrero, pp.89-95.
- Harboe E.M. (1983). Resistencia del concreto a los sulfatos: experiencias de campo. *Revista IMCYC*, abril, México.
- Hawken P., Lovins E. y Levins H. (1999). *Natural Capitalism-Creating the next Industrial Revolution*. Little brown and Co.
- Idorn-Gunna M.I. (1992). Durabilidad del concreto y economía de recursos. *Construcción y Tecnología*, Marzo, pp. 46-48, (1ª parte) y abril, pp. 44-46 (2ª y última parte).
- Mehta-Kumar (2001). Reducing the Environmental Impact of Concrete. *Concrete International*. October.

- Mena-Ferrer M. (1983). Reacción álcali sílice en el concreto: causas, efectos y medios de prevención. *Revista IMCYC*, agosto, México.
- Neville A. (2001). Maintenance and Durability of Concrete Structures. *Concrete International*. November.
- Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto. RCDF (2004)*. Gaceta Oficial del Distrito Federal, 6 de octubre pp.124-128.
- Orozco J. (1998). Cálculo de las pérdidas económicas por corrosión en el Estado de Yucatán y su impacto en el PIB estatal. CINVESTAV. Documento inédito. Referenciado por Castro P. *et al.* en Corrosión de Estructuras de Concreto Armado. Cap. I.
- Ramachandran-Santhosh K. *et al.* (2001). Remediation of Concrete Using Micro-Organisms. *ACI Materials Journal*, V.98, January-February, pp. 3-9.
- Sanjuán M.A y Castro-Borges P. (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. *Revista IMCYC*. p 1.
- Taylor-Peter C. (2002). Designing Concrete for Durability-A case Study. *Concrete International*, Mayo, pp.39-43.

- Uribe-Afif R. y Flores M.J.J. (1999). Durabilidad del concreto y análisis de costos. *Construcción y tecnología*, pp.46-53.

Bibliografía sugerida

- Carrión-Viramontes J. *et al.* (1999). *Estudios de corrosión en puentes de concreto*. IMT, SCT, pp. IX.
- Hernández-Castañeda O. (2004). Construcción de estructuras de concreto en medios agresivos. Tesis de maestría en ingeniería (Construcción). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.
- Rivera-Villarreal R. (2001). Prefacio del libro: Corrosión en estructuras de concreto armado. Castro Borges P. *et al.* 2a ed.
- Uribe-Afif R. y Flores M.J.J. (2001). Durabilidad del concreto en el análisis de costos de un proyecto. Cap. 10. En: *Infraestructura de concreto armado: Deterioro y Opciones de Preservación*.IMCYC, pp.133-139.

Semblanza de los autores

- Oscar Hernández-Castañeda*. Ingeniero civil con maestría en ingeniería (construcción), ambos por la Facultad de Ingeniería, UNAM. Ha participado en proyectos de investigación relacionados con la tecnología del concreto en el Instituto de Ingeniería, UNAM desde 1998; donde ha elaborado dos informes técnicos premiados y un artículo publicado. Ex becario CONACYT y ex participante del programa "Jóvenes hacia la investigación" de la Coordinación de Investigación Científica. Ha colaborado en el sector público (Pemex Refinación y Secretaría de Comunicaciones y Transportes) y en el sector privado, actualmente se desempeña en la empresa Nox-crete, S.A. de C.V.
- Carlos Javier Mendoza-Escobedo*. Ingeniero civil con maestría en ingeniería (estructuras). Ha realizado, coordinado y publicado varios proyectos de investigación sobre estructuras y tecnología del concreto, tanto para sector público como privado, desde 1967. Ha dirigido una diversidad de tesis de licenciatura y posgrado. Actualmente imparte cátedra en la Facultad de Ingeniería, UNAM, es investigador y ex Subdirector del Instituto de Ingeniería, UNAM.