



15

Conservación de Hormigón Histórico

Paul Gaudette y Deborah Slaton

- [Introducción al Hormigón Histórico.](#)
- [Historia de su uso y fabricación.](#)
- [Interiores históricos.](#)
- [Características del hormigón.](#)
- [Formas de deterioro.](#)
- [Conservación del hormigón.](#)
- [Mantenimiento y reparación.](#)
- [Resumen y referencias.](#)
- [Lecturas recomendadas.](#)

Introducción al Hormigón Histórico

El hormigón es un material de construcción extraordinariamente versátil utilizado para estructuras funcionales, ornamentales y monumentales desde la antigüedad. Compuesto por una mezcla de arena, grava, piedra triturada, u otro material grueso, ligada con cal o cemento, el hormigón sufre una reacción química y se endurece al añadir agua. Incluyendo armaduras se añade resistencia a la tracción a los elementos estructurales de hormigón. El uso de estas armaduras contribuye significativamente al rango y tamaño de los tipos de edificios y estructuras que pueden construirse con hormigón. Si bien los defensores del hormigón moderno de principios del siglo XX a menudo lo consideraban permanente, como todos los materiales, está sujeto a deterioro. Este Informe proporciona una descripción general de la historia del hormigón y su popularización en los Estados Unidos, examina las principales causas y modos de deterioro del hormigón y describe los enfoques de reparación y protección apropiados para el hormigón histórico. En el contexto de este Informe, se considera que el hormigón histórico es el hormigón utilizado en la construcción de estructuras de interés histórico, arquitectónico o ingenieril, ya sean antiguas o relativamente nuevas.

Breve historia de su uso y fabricación

Los antiguos romanos descubrieron que una mezcla de masilla de cal y puzolana, una ceniza volcánica fina, se endurecería bajo el agua. El cemento hidráulico resultante se convirtió en una característica importante de la práctica de construcción romana, y se usó en muchos edificios y proyectos de ingeniería como puentes y acueductos. La tecnología del hormigón se mantuvo viva durante la Edad Media en España y África. Los españoles introdujeron una forma de hormigón en el Nuevo Mundo en las primeras décadas del siglo XVI, conocido como "tapia" o "tabby". Este material, una mezcla de

cal, arena y conchas o agregados de piedra mezclados con agua, se colocaba entre moldes de madera, se aplastaba y se dejaba secar en capas sucesivas. Esta técnica fue utilizada más tarde por los colonos ingleses en la costa sureste de los Estados Unidos.



Figura 1. La casa Sebastopol en Seguin, Texas, es una casa de 1856 de estilo neogriego construida con hormigón de cal. El hormigón de cal o "limecrete" era un material de construcción popular, ya que se podía fabricar a bajo coste con materiales locales. En 1900, la ciudad tenía aproximadamente noventa estructuras de "limecrete", veinte de las cuales se conservan en la actualidad. Foto: Texas Parks and Wildlife Department.

La historia temprana del hormigón no es continua, con desarrollos en materiales y técnicas de construcción en diferentes continentes y en varios países. En los Estados Unidos, el hormigón tardó en alcanzar una aceptación generalizada en la construcción de edificios y no comenzó a ganar popularidad hasta finales del siglo XIX. Mucho más fácil fue su aceptación para su uso en sistemas de transporte e infraestructura. El canal Erie en Nueva York es un ejemplo del uso temprano del hormigón en el mundo del transporte en los Estados Unidos. El cemento hidráulico natural utilizado en la construcción del canal se extrajo de un depósito de piedra caliza encontrado en 1818 cerca de Chittenango, al sureste de Syracuse. El uso del hormigón en la construcción residencial se publicitó en la segunda edición de *A Home for All* (1853) de Orson S. Fowler, que describió las ventajas de la construcción mediante "muro de grava" para un público más amplio. La ciudad de Seguin, Texas, a treinta y cinco millas al este de San Antonio, ya tenía varios edificios de hormigón en la década de 1850 y llegó a llamarse "La Madre de las Ciudades de Hormigón", con aproximadamente noventa edificios de hormigón hechos con cal y grava locales (Figura 1).



Figura 2. Chatterton House fue el hogar del comerciante de correos en Fort Fred Steel, Wyoming, una de las fortalezas establecidas en la década de 1860 para proteger el Union Pacific Railroad. Las paredes de la casa se construyeron con áridos y cal, sin cemento. El uso de este material presenta retos especiales de conservación.

Impresionados por las ventajas económicas de la construcción de muros de grava vertida o "lechada de cal", la Oficina del Intendente General del Departamento de Guerra emprendió una campaña para mejorar la calidad de los edificios para los puestos militares fronterizos. Como resultado, se construyeron estructuras de lechada de cal en varios puestos occidentales poco después de la Guerra Civil, incluyendo Fort Fred Steele y Fort Laramie, ambos en Wyoming (Figura 2). Para la década de 1880, se había ganado suficiente experiencia con el hormigón sin reforzar como para permitir la construcción de edificios mucho más grandes. Un ejemplo notable de este período es el Hotel Ponce de León en St. Augustine, Florida.



Figura 3. La Lincoln Highway Association promovió la construcción de una carretera de superficie dura y continua de alta calidad en todo el país. Los Boys Scouts of America instalaron hitos kilométricos de hormigón a lo largo de la Lincoln Highway en 1928.

La construcción extensiva en hormigón también se produjo a través del sistema de fortificaciones costeras encargadas por el gobierno federal en la década de 1890 para las costas del Atlántico, el Pacífico y el Golfo. A diferencia de la mayoría de las construcciones de hormigón de esa época, los requisitos especiales de las fortificaciones costeras exigían muros de hormigón de hasta 20 pies de espesor, a menudo en sitios de difícil acceso. Las estructuras principales en las defensas costeras de la década de 1890 fueron construidas con hormigón en masa sin refuerzos internos, una práctica que fue reemplazada por el uso de armaduras de refuerzo en fortificaciones construidas después de aproximadamente 1905. El uso de hormigón armado en los Estados Unidos data de 1860, cuando S.T. Fowler obtuvo la patente para un muro de hormigón armado. A principios de la década de 1870, William E. Ward construyó su propia casa en Port Chester, Nueva York, utilizando hormigón reforzado con varillas de hierro para todos los elementos estructurales. A pesar de estos desarrollos, dicha construcción siguió siendo una novedad hasta después de 1880, cuando las innovaciones introducidas por Ernest L. Ransome hicieron que el uso del hormigón armado fuera más factible. Ransome hizo muchas contribuciones al desarrollo de la tecnología de construcción de hormigón, incluido el uso de barras de refuerzo corrugadas para mejorar la unión entre el hormigón y el acero, que patentó en 1884. Dos años más tarde, Ransome introdujo el horno rotatorio a la producción de cemento de los Estados Unidos. El nuevo horno tenía mayor capacidad y se quemaba de manera más completa y uniforme, lo que permitía el desarrollo de un cemento manufacturado menos costoso, más uniforme y más fiable. Las mejoras en la producción de hormigón iniciadas por Ransom llevaron a una mayor aceptación del hormigón después de 1900. La Lincoln Highway Association, incorporada en 1913, promovió el uso del hormigón en la construcción de un sistema de carreteras de costa a costa. El objetivo de la Asociación de Autopistas de Lincoln y el defensor de autopistas Henry B. Joy fue educar al país en la necesidad de buenas conexiones hechas de hormigón, con una Lincoln Highway mejorada como ejemplo. Se construyeron hitos kilométricos de hormigón en áreas remotas para enfatizar la superioridad del concreto sobre la tierra natural. La Asociación creía que a medida que la gente aprendiera sobre el hormigón, presionaría al gobierno para que construyera buenas carreteras en todos sus estados. El entusiasmo de los estadounidenses por unas buenas conexiones llevó a la participación del gobierno federal en la construcción de carreteras y la creación de rutas numeradas de los Estados Unidos en la década de 1920 (Figura 3).



Figura 5. Después de la Segunda Guerra Mundial, los arquitectos e ingenieros aprovecharon las mejoras en la producción del hormigón, el control de calidad y los avances en prefabricados para diseñar estructuras como el edificio del Cuartel de la Policía en Filadelfia, Pensilvania, construido en 1961. Foto: Cortesía del Departamento de Policía de Filadelfia.



Figura 4. Los paneles de hormigón altamente ornamentales en la fachada exterior de la Casa de Adoración de Baha'i en Wilmette, Illinois, ilustran el trabajo del fabricante John J. Earley, conocido como "el hombre que hizo el hormigón hermoso".

Durante los primeros años del siglo XX, Ernest Ransome en Beverly, Massachusetts, Albert Kahn en Detroit y Richard E. Schmidt en Chicago, promovieron el hormigón para su uso en edificios utilitarios en "estilo de fábrica" con un marco de hormigón visto con grandes zonas acristaladas. Las casas de hormigón armado de Thomas Edison en Union Township, Nueva Jersey (1908), proclamaron un énfasis funcional similar en la construcción residencial. A partir de la década de 1920, el hormigón comenzó a usarse con resultados de diseño espectaculares: los ejemplos incluyen el Meridian Hill Park de John J. Earley en Washington, D.C. ; el exuberante y elegante Templo Baha'i de Louis Bourgeois en Wilmette, Illinois (1920–1953), para el cual Earley fabricó el hormigón (Figura 4); y Fallingwater, de Frank Lloyd Wright, cerca de Bear Run, Pennsylvania (1934). Las mejoras continuas en el control de calidad y el desarrollo de procesos de fabricación innovadores, como el método de Shockbeton para el hormigón prefabricado, brindaron oportunidades crecientes para arquitectos e ingenieros. El Museo Guggenheim de Wright en la ciudad de Nueva York (1959); Geddes Brecher Qualls y el edificio de la sede de la policía de Cunningham en Filadelfia, Pensilvania (1961); y el elevado edificio de la terminal de Eero Saarinen en el Aeropuerto Internacional de Dulles en las afueras de Washington, DC, y la terminal de la TWA en el Aeropuerto de Kennedy en Nueva York (1962), ejemplifican el uso magistral del hormigón logrado en la era moderna (Figura 5).



Figura 6. La escuela Bailey Magnet en Jackson, Mississippi, fue diseñada como la Escuela Secundaria Jackson por la firma N. W. Overstreet & Town en 1936. El edificio aerodinámico ejemplifica la aplicabilidad del hormigón a la creación de una estética arquitectónica moderna. Fotografía: Bill Burris, Burris / Wagnon Architects, P.A



Figura 7. Los bajorrelieves detallados, así como las esculturas, como este león en la Escuela Bailey Magnet, podían usarse como ornamentación en edificios de hormigón. Los elementos esculturales de hormigón se fabricaban normalmente en moldes.

A lo largo del siglo XX, se construyó una amplia gama de estructuras de arquitectura e ingeniería utilizando el hormigón como una opción práctica y rentable, valorado también por sus cualidades estéticas. El hormigón *in situ* y el hormigón prefabricado se adaptaron fácilmente al estilo Streamline Moderne, como lo ejemplifica la Bailey Magnet School en Jackson, Mississippi, diseñada como Jackson Junior High School por N.W. Overstreet & Town en 1936 (Figs. 6 y 7). La escuela es uno de los muchos edificios de hormigón diseñados y construidos bajo el patrocinio de la Administración de Obras Públicas. Las estructuras recreativas y las características del paisaje también utilizaron el rango estructural y el carácter único del hormigón visto como ventaja, como se ve en el Lincoln Park Chess Pavilion de Chicago, diseñado por Morris Webster en 1956 (Figura 8), y la Fuente Ira C. Keller en Portland, Oregon, diseñado por Lawrence Halprin en 1969 (Figura 9). El hormigón también fue popular para los interiores de edificios, con características ornamentales y elementos estructurales expuestos reconocidos como parte de la estética del diseño (ver figuras 10 y 11).

Interiores históricos



Figura 10. El Club de la Ciudad de Berkeley tiene importantes espacios interiores y todas las características de la construcción en hormigón, incluido el vestíbulo y la piscina. Fotos: Una Gilmartin (izquierda) y Brian Kehoe (derecha), Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc.

El amplio uso del hormigón brindó nuevas oportunidades para crear espacios dramáticos y detalles arquitectónicos ornamentales en los interiores de los edificios, con un ahorro significativo de costes en comparación con las prácticas de construcción tradicionales. El

diseño arquitectónico del Berkeley City Club en Berkeley, California, expresaba elementos moriscos y góticos en hormigón en el interior del edificio (Figura 10). Utilizado como club social de mujeres, el edificio fue diseñado por la destacada arquitecta de California Julia Morgan y se construyó en 1929. Los techos abovedados, las columnas y los capiteles ornamentales del vestíbulo y los arcos ornamentales y el techo de vigas de la “zambullida” están todos contruidos de hormigón.



Figura 11. Tanto en una oficina (izquierda) como en un aparcamiento o en una tienda minorista (derecha), las estructuras de hormigón visto ayudan a caracterizar los interiores de estos edificios. Foto: Sociedad Histórica de Minnesota (izquierda).

El carácter histórico del interior de un edificio también se puede transmitir de una manera más funcional en términos de características y acabados concretos (Figura 11). La estructura de hormigón visto, columnas, capiteles y paneles abatibles, es una parte integral del carácter de este antiguo edificio comercial en Minneapolis. En los almacenes de hormigón y los edificios de fábricas de principios del siglo XX, las columnas de hormigón visto y los techos de losas de hormigón con acabado de tablero son características comunes que se ven en este almacén, ahora reformado para su uso como aparcamiento y tiendas.

Características del hormigón

El hormigón está formado por áridos finos (arena) y gruesos (piedra triturada o grava) una y pasta a base de cemento Portland y agua. El material predominante en términos de volumen es el árido. El cemento Portland es el aglutinante más utilizado en el hormigón moderno. Comercialmente, se fabrica mezclando piedra caliza con arcillas que contienen alúmina, sílice, cal, óxido de hierro y magnesio, y calentando los compuestos a altas temperaturas. El proceso de hidratación que se produce entre el cemento Portland y el agua da como resultado la formación de una pasta alcalina que rodea y une al árido como una masa sólida.



Figura 9. La fuente Ira C. Keller en Portland, Oregón, fue diseñada por Lawrence Halprin y construida en 1969. La fuente está construida principalmente con pilares de hormigón con texturas de tableros y elementos circundantes con dibujos geométricos, que facilitan el paso del agua. Fotografía: Anita Washko, Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc.



Figura 8. El pabellón de ajedrez en el Lincoln Park de Chicago fue diseñado por el arquitecto Morris Webster y construido en 1956. El pabellón es un elemento distintivo del paisaje, con su losa de hormigón armado en voladizo que proporciona cobertura para los jugadores de ajedrez.

La calidad del hormigón depende de la relación entre agua y ligante; el contenido del ligante; unos buenos áridos, duraderos y bien calibrados; la compactación durante la colocación; y un curado adecuado. La cantidad de agua utilizada en la mezcla afecta a la permeabilidad y resistencia del hormigón. El uso de un exceso de agua más allá de lo requerido en el proceso de hidratación da como resultado un hormigón más permeable, que es más vulnerable a la intemperie y al deterioro. Los aditivos se agregan comúnmente al hormigón para ajustar las propiedades de este, como el tiempo de fraguado o endurecimiento, los requisitos de agua, la trabajabilidad y otras características. Por ejemplo, la llegada de agentes aireadores en la década de 1930 proporcionó una mayor durabilidad al hormigón.

Durante el siglo XX, hubo un aumento constante en la resistencia del hormigón común a medida que los procesos químicos se entendieron mejor y las medidas de control de calidad mejoraron. Además, se reconoció la necesidad de proteger las armaduras contra la corrosión. Los requisitos para los recubrimientos de las armaduras de acero, el aumento del contenido de cemento, la reducción de la relación agua-cemento y los aditivos aireadores contribuyeron a una mayor resistencia y durabilidad del hormigón.

Mecanismos y formas de deterioro

Causas del deterioro

El deterioro del hormigón ocurre principalmente debido a la corrosión del acero embebido en él, la degradación del propio hormigón, el uso de técnicas o materiales inadecuados en la construcción o problemas estructurales. Las causas del deterioro del hormigón deben entenderse para seleccionar un sistema adecuado de reparación y protección.

Si bien el acero de refuerzo ha desempeñado un papel fundamental en la expansión de las aplicaciones del hormigón en la arquitectura del siglo XX, la corrosión de este acero también ha causado el deterioro de muchas estructuras históricas. Las armaduras de acero insertadas en el hormigón normalmente están rodeadas por una capa de óxido pasivante que, cuando está presente, protege al acero de la corrosión y ayuda a unir el acero y el hormigón. Cuando se altera el ambiente alcalino del hormigón (por encima de un pH de 10) y el acero se expone al agua, al vapor de agua o a una humedad relativa alta, se produce la corrosión de las armaduras. Una reducción en la alcalinidad puede deberse a la carbonatación, un proceso que ocurre cuando el dióxido de carbono en la atmósfera reacciona con el hidróxido de calcio y la humedad en el hormigón. La carbonatación comienza en la superficie expuesta del hormigón pero puede extenderse a la armadura de acero con el tiempo. Cuando la carbonatación llega al refuerzo metálico, el hormigón ya no protege al acero de la corrosión.

La corrosión de las armaduras de acero puede iniciarse y acelerarse si se agregó cloruro de calcio al hormigón como un acelerador de fraguado durante la construcción original, para provocar un curado más rápido. También puede ocurrir si el hormigón se expone más tarde a sales de deshielo, como puede ocurrir durante el invierno en los climas del norte. El agua de mar u otros ambientes marinos también pueden proporcionar grandes cantidades de cloruro, ya sea a partir de áridos lavados inadecuadamente o de la exposición del hormigón al agua de mar.



Figura 12. El faro de hormigón en la Estación de Luz de Kilauea Point, Kilauea, Kauai, Hawaii, fue construido alrededor de 1913. El hormigón, que fue una mezcla de buena calidad y alta resistencia en su día, está en buenas condiciones después de casi cien años de servicio. El deterioro en forma de desprendimiento relacionado con la corrosión de las armaduras de acero se ha producido principalmente en áreas de mayor ornamentación, como bandas y soportes de proyección (ver foto de primer plano).

Los daños en hormigón armado relacionados con la corrosión son el resultado del óxido, un producto del proceso de corrosión del acero, que se expande y por lo tanto requiere más espacio en el hormigón que el acero en el momento de su instalación. Este cambio en el volumen del acero da como resultado fuerzas expansivas, que causan agrietamiento y desprendimiento del hormigón adyacente (Figura 12). Otros signos de corrosión de las armaduras incluyen la laminación del hormigón (separación de láminas planas paralelas a la superficie) y la tinción de óxido (a menudo un precursor de la desintegración) en el hormigón cerca del acero.

La falta de mantenimiento adecuado de los elementos de construcción, como las cubiertas y los sistemas de drenaje, puede contribuir al deterioro relacionado con el agua del hormigón adyacente, particularmente cuando el hormigón está saturado de agua y luego expuesto a temperaturas de congelación. A medida que el agua en interior del hormigón se congela, se expande y ejerce fuerzas sobre este. La congelación y descongelación repetidas pueden provocar el agrietamiento y laminación del hormigón. Dicho daño aparece como una degradación de la superficie, que incluye descamación severa y microfisurado, extendiéndose por el hormigón. Esta condición se observa con mayor frecuencia cerca de la superficie del hormigón pero en ocasiones también puede ocurrir en su interior. Este tipo de deterioro suele ser más grave en las juntas, detalles arquitectónicos y otras áreas con mayor exposición de la superficie a la intemperie. En la segunda mitad del siglo XX, el hormigón ha utilizado aditivos aireadores (para incorporar burbujas de aire microscópicas) para brindar una mayor protección contra los daños causados por la congelación cíclica del hormigón saturado.

El uso de ciertos áridos también puede dar como resultado en el deterioro del hormigón. Las reacciones de áridos alcalinos (en algunos casos, reacción de sílice alcalina (ASR)) ocurren cuando los álcalis normalmente presentes en el cemento reaccionan con ciertos

áridos, lo que lleva al desarrollo de un gel cristalino expansivo. Cuando este gel se expone a la humedad, se expande y causa el agrietamiento del árido y la matriz de hormigón. Los áridos nocivos se encuentran sólo en ciertas áreas del país y pueden ser detectados a través de análisis por un geólogo experimentado. Los cementos de bajo contenido de álcali, así como las cenizas volantes, se utilizan en la actualidad en nuevas construcciones para evitar este tipo de reacciones donde pueda ocurrir este problema.

Problemas específicos del hormigón histórico

Los materiales y la mano de obra utilizados en la construcción de estructuras de hormigón históricas, en particular las construidas antes de la Primera Guerra Mundial, presentan en ocasiones numerosos problemas. Por ejemplo, cuando el árido consistía en ceniza de carbón quemado o ladrillo triturado, el hormigón tendía a ser débil y poroso debido a la alta capacidad de estos áridos para absorber agua. Algunos de estos áridos pueden ser extremadamente susceptibles al deterioro cuando se exponen a la humedad y la congelación y descongelación cíclica. El hormigón también se vio a veces comprometido por la existencia de agua de mar o arena de playa que no se lavó a fondo con agua dulce, una condición más común en las fortificaciones costeras construidas antes de 1900. El cloruro de sodio presente en el agua de mar y la arena de playa aceleran la velocidad de corrosión del hormigón armado.

Otro problema encontrado con el hormigón histórico está relacionado con la pobre consolidación del hormigón durante su colocación en los encofrados, o en moldes en el caso de la prefabricación. Este problema es especialmente frecuente en elementos altamente ornamentados. El hormigón de principios del siglo XX fue a menudo apisonado o vibrado con barra en su lugar, de forma similar a las técnicas utilizadas en la formación de piedra prefabricada. El hormigón mal consolidado a menudo contiene vacíos ("nido de gravas"), que pueden reducir la cubierta protectora del hormigón sobre las armaduras, atrapar agua y, si son lo suficientemente grandes y estratégicamente numerosas, reducir la resistencia localizada del hormigón. La tecnología de vibración ha mejorado con el tiempo y los agentes de fluidez también se utilizan hoy en día para abordar este problema.

Un tipo común de deterioro observado en el hormigón es el efecto de la intemperie debido a la exposición al viento, la lluvia, la nieve y el agua salada o la pulverización. La intemperie aparece como erosión de la pasta de cemento, una condición más frecuente en las regiones del norte donde las precipitaciones pueden ser altamente ácidas. Esto da como resultado la exposición de las partículas de áridos en la superficie del hormigón. Pueden producirse variaciones en la exposición del árido debido a la erosión diferencial o la disolución de la pasta de cemento expuesta. La erosión también puede ser causada por la acción mecánica del agua canalizada sobre el hormigón, como por la falta de goterones en molduras, alféizares y dinteles, o por un drenaje inadecuado. Además, el agua a alta presión cuando se usa para la limpieza también puede erosionar la superficie del hormigón.

En las estructuras de hormigón construidas antes de la Primera Guerra Mundial, el hormigón a menudo se colocaba en los encofrados en elevaciones verticales relativamente reducidas debido a las limitaciones en las técnicas de izado y vertido disponibles en ese momento. Las juntas entre diferentes ubicaciones de hormigón (a menudo denominadas juntas frías o líneas de elevación) a veces pueden considerarse una parte importante del carácter de un elemento de hormigón (Figura 13). Sin embargo, las juntas anchas pueden permitir que el agua se infiltre en el hormigón, lo que da como resultado una erosión de la pasta más rápida o en deterioro por congelación y descongelación del hormigón adyacente en climas fríos.



Figura 13. Fort Casey en Admiralty Head, Fort Casey, Washington, fue construido en 1898. Las líneas de elevación desde la colocación del hormigón son claramente visibles en las paredes exteriores y caracterizan el aspecto final.

A principios del siglo XX, el hormigón se colocaba en ocasiones en varias capas paralelas a la superficie exterior. Primero se creaba un hormigón base con encofrado y luego se aplicaba una capa de mortero más rica en cemento a la cara vertical expuesta del hormigón base. El mayor contenido de cemento en el hormigón de revestimiento proporcionó una capa exterior más resistente al agua y una superficie terminada. La aplicación de una capa superior rica en cemento, referida en algunas de las primeras publicaciones de hormigón como "impermeabilización", también se usó en las superficies superiores de las paredes de hormigón, o como la capa superior en las aceras. Con este tipo de construcción de hormigón, el deterioro puede ocurrir con el tiempo como resultado de una falta de adherencia entre capas, y puede proceder muy rápidamente una vez que la capa protectora rica en cemento comienza a romperse.

Es común que el hormigón histórico tenga una apariencia altamente variable, incluyendo color y textura de acabado. A menudo se encuentran en el hormigón visto diferentes niveles de exposición del árido debido a la erosión de la pasta. Esta variabilidad en la apariencia del hormigón histórico aumenta el nivel de dificultad en su evaluación y reparación.

Signos de fatiga y deterioro

Los signos característicos de fallo en el hormigón incluyen agrietamientos, desprendimientos, manchas y deflexión. El agrietamiento ocurre en la mayoría de los casos concretos, pero varía en profundidad, anchura, dirección, patrón y ubicación, y puede ser activo o latente (inactivo). Las grietas activas se pueden ensanchar, profundizar o desplazar a través del hormigón, mientras que las grietas latentes permanecen relativamente sin cambiar de tamaño. Algunas grietas latentes, como las causadas por la retracción temprana del hormigón durante el curado, no son un problema estructural, pero cuando no se reparan, pueden proporcionar canales que favorezcan la penetración de la humedad y un daño posterior. Las grietas superficiales aleatorias, también llamadas grietas de mapa debido a su parecido con las líneas en un mapa, generalmente están relacionadas con la contracción en edades tempranas, pero también pueden indicar otros tipos de deterioro, como la reacción de álcali-sílice. Las grietas estructurales pueden ser causadas por sobrecargas temporales o continuas, asentamientos diferenciales de cimentación, fuerzas sísmicas o deficiencias en el diseño original. Las grietas estructurales están activas si se aplican cargas excesivas a una estructura, si la sobrecarga continúa o si el asentamiento continúa. Estas grietas están inactivas si se han eliminado las sobrecargas temporales o si el asentamiento diferencial se ha estabilizado. Las grietas inducidas térmicamente resultan de los esfuerzos producidos por la expansión y contracción del hormigón durante los cambios de temperatura. Estas grietas ocurren con frecuencia en los extremos o esquinas de las estructuras de hormigón más antiguas que se construyeron sin juntas de expansión para aliviar tales tensiones.



Figuras 14. Las capas de hormigón arquitectónico que se han desprendido de la superficie se retiraron de un tanque de agua histórico durante la investigación realizada para evaluar las condiciones existentes. Fotografías: Anita Washko, Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc.

El desprendimiento (la pérdida de material de superficie) a menudo se asocia con la congelación y descongelación, así como con el agrietamiento y laminación del recubrimiento de hormigón sobre las armaduras de acero. El desprendimiento se produce cuando las barras de refuerzo se corroen y los subproductos de corrosión se expanden, lo que crea altas tensiones en el hormigón adyacente, que se agrieta y se desplaza. El desconchado también puede ocurrir cuando el agua absorbida por el hormigón se congela y descongela (Figura 14). Además, la degradación de la superficie o la descamación puede deberse a un inadecuado acabado, conformado u otros fenómenos de la superficie cuando la pasta de cemento rica en agua (lechada) sube a la superficie. El material resultante es vulnerable al desprendimiento de capas delgadas, o escamas. En algunos casos, el desprendimiento del hormigón puede disminuir la capacidad de carga de la estructura.

La deflexión es la flexión de las viguetas, vigas o losas estructurales, y puede ser una indicación de deficiencias en la resistencia y la solidez estructural del hormigón. Esta condición se puede producir por sobrecarga, corrosión de las armaduras o diseño y/o construcción inadecuados, como el uso de hormigón de baja resistencia o armaduras de tamaño insuficiente.

La tinción de la superficie del hormigón puede estar relacionada con la suciedad de contaminantes atmosféricos u otros contaminantes, la acumulación de suciedad y la presencia de crecimiento orgánico. Sin embargo, las manchas también pueden indicar problemas subyacentes más serios, como la corrosión de las armaduras, tratamientos de superficie anteriores inadecuados, la reacción de áridos alcalinos o la eflorescencia, la deposición de sales solubles en la superficie del hormigón como resultado de la evaporación del agua (Figura 15).

Planificando la conservación del hormigón

La importancia de un edificio o estructura de hormigón histórico, incluso si es relevante por su diseño, sus materiales y técnicas de construcción, o ambos, guía la toma de decisiones sobre la reparación y, si es necesario, los métodos de reconstrucción. La determinación de las causas del deterioro también es fundamental para el desarrollo de un plan de conservación y reparación. Con los edificios de hormigón histórico, uno de los desafíos más difíciles es conseguir suficiente tiempo durante la fase de planificación para analizar el hormigón, desarrollar mezclas y proporcionar el tiempo adecuado para

el envejecimiento de las maquetas para que coincidan con el hormigón original. Una comprensión de las técnicas de construcción originales (características del cemento, diseño de la mezcla, intención original del montaje, tipo de colocación, prefabricado versus vertido *in situ*, etc.) y los trabajos de reparación previos realizados en el hormigón es esencial para determinar las causas del deterioro existente y la susceptibilidad de la estructura a otros posibles tipos de deterioro. Por ejemplo, el hormigón vertido en elevaciones cortas (vertidos individuales) o construido en piezas prefabricadas tendrá numerosas uniones que pueden proporcionar puntos de entrada para la infiltración de agua. Las reparaciones anteriores inadecuadas, como la instalación de parches con un material incompatible, pueden afectar el rendimiento futuro del hormigón. Tales reparaciones previas pueden requerir de un trabajo correctivo. Al igual que con otros proyectos de conservación, generalmente se consideran tres enfoques principales para las estructuras de concreto históricas: **mantenimiento, reparación o reconstrucción**. El mantenimiento y la reparación logran mejor el objetivo de preservación de una intervención mínima y la mayor retención del tejido histórico existente. Sin embargo, cuando los elementos del edificio están severamente deteriorados o donde los problemas inherentes con el material llevan a fallas continuas, puede ser necesario reemplazarlos. Durante la planificación, la información se recopila a través de la investigación, la inspección visual y los estudios de laboratorio. Luego, el material debe ser revisado por profesionales con experiencia en el deterioro del hormigón para ayudar a evaluar la naturaleza y las causas de los problemas concretos, para evaluar los efectos a corto y largo plazo del deterioro y para formular enfoques de reparación adecuados.

Evaluación del estado de conservación



Figura 15. La evidencia del movimiento de humedad a través del hormigón es evidente en forma de depósitos minerales en la superficie de este. La congelación y descongelación cíclica de la humedad atrapada y la corrosión de las armaduras también han contribuido al deterioro de la columna de hormigón en esta cerca en Crocker Field en Fitchburg, Massachusetts, diseñada por los Hermanos Olmsted.

La evaluación del estado de conservación de un edificio o estructura de hormigón debe comenzar con una revisión de todos los documentos disponibles relacionados con la construcción original y las reparaciones anteriores. Si bien los planes y especificaciones para edificios de hormigón más antiguos no siempre están disponibles, pueden ser un recurso inestimable y se debe hacer todo lo posible para encontrarlos. Pueden proporcionar información sobre la composición de la mezcla de hormigón o sobre el tipo y ubicación de las armaduras. Si están disponibles, los documentos relacionados con reparaciones anteriores también deben revisarse para comprender cómo se realizaron dichas reparaciones y para ayudar a evaluar su rendimiento y vida útil. Las fotografías de archivo también pueden proporcionar una valiosa fuente de información sobre la construcción original.

Una inspección visual también ayudará a identificar y evaluar la extensión, los tipos y los patrones de fatiga y deterioro. El American Concrete Institute ofrece varias guías útiles sobre cómo realizar una inspección visual del hormigón. En general, la evaluación del estado de conservación comienza con una inspección visual general, seguida de una investigación detallada de áreas representativas para obtener información más concreta sobre los modos de deterioro.

Se pueden utilizar varios métodos de prueba no destructivos para evaluar las condiciones ocultas. Las técnicas básicas incluyen hacer sonar con un martillo manual (o

para superficies horizontales, una cadena) para ayudar a identificar áreas de laminación. Las técnicas más sofisticadas incluyen pruebas de ultrasonidos (Figura 16), georadar y otros métodos que caracterizan el espesor del hormigón y localizan huecos o laminaciones. Los instrumentos de detección magnética se utilizan para ubicar las barras de acero embebidas y se pueden calibrar para identificar el tamaño y la profundidad del refuerzo. Las mediciones de corrosión se pueden tomar usando pruebas con sulfato de cobre o técnicas de polarización lineal para determinar la probabilidad o la tasa de corrosión activa del acero de refuerzo.

Para evaluar más a fondo la condición del hormigón, se pueden extraer muestras para estudios de laboratorio para determinar los componentes y la composición del material, y las causas de deterioro. Las muestras deben ser representativas de las condiciones existentes, pero deben tomarse de lugares discretos. Los estudios de laboratorio del hormigón pueden incluir una evaluación petrográfica según la norma ASTM C856, práctica para el examen petrográfico de hormigón endurecido. El examen petrográfico, que consiste en estudios microscópicos realizados por un geólogo especializado en la evaluación de materiales de construcción, se realiza para determinar el contenido de aire, la relación agua-cemento, el contenido de cemento y las características generales del árido. Los estudios de laboratorio también pueden incluir análisis químicos para determinar el contenido de cloruro, contenido de sulfato y niveles de álcali del hormigón; identificación de áridos nocivos; y determinación de la profundidad de carbonatación. Se pueden realizar estudios de resistencia a la compresión para evaluar la resistencia del hormigón existente y proporcionar información para trabajos de reparación. Los estudios de laboratorio proporcionan una identificación general de los componentes y áridos del hormigón original, y evidencia de daños debidos a diversos mecanismos, entre los que se incluyen la congelación y descongelación cíclica, la reactividad del árido alcalino o el ataque de sulfatos. La información recopilada a través de estudios de laboratorio también se puede utilizar para ayudar a desarrollar un diseño de mezcla para la reparación del hormigón.

Limpieza

Al igual que con otras estructuras históricas, las estructuras de hormigón se limpian por varias razones: para mejorar la apariencia del hormigón, como medida de mantenimiento cíclico, o como preparación para reparaciones. Primero se debe considerar si la estructura de hormigón histórica debe limpiarse en absoluto. Si se requiere limpieza, se debe seleccionar el sistema más suave que sea efectivo.

Se utilizan tres métodos principales para limpiar el hormigón: métodos de agua, tratamientos de superficies abrasivos y tratamientos de superficies químicos. El agua a baja presión (menos de 200 psi) o la limpieza con vapor pueden eliminar efectivamente la suciedad de la superficie del hormigón sólido; sin embargo, se requiere cuidado en superficies frágiles o deterioradas. Además, los métodos de agua y vapor no suelen ser eficaces para eliminar las manchas o la suciedad severa. El lavado a presión con agua a alta presión a veces se usa para limpiar o remover recubrimientos de hormigón sólido y de alta resistencia, pero el lavado con agua a alta presión generalmente es dañino y no es apropiado para el hormigón en estructuras históricas.



Figura 16. Las pruebas de ultrasonidos se realizan en una losa estructural de hormigón para ayudar a determinar la profundidad del deterioro. En este método, se introduce un breve impulso de energía en la estructura y un transductor montado en la superficie impactada de la estructura recibe las ondas de entrada reflejadas o los ecos. Estas ondas se analizan para ayudar a identificar fallos y posible deterioro dentro del hormigón.

Cuando se usa con controles apropiados y a presiones muy bajas (generalmente de 35 a 75 psi), los tratamientos de superficie con microabrasivos que usan partículas muy finas, como el polvo de piedra caliza dolomítica, a veces pueden limpiar de manera efectiva. Sin embargo, la limpieza con microabrasivos puede alterar la textura y la reflectividad de la superficie del hormigón. Parte del hormigón puede dañarse incluso con partículas finas aplicadas a presiones muy bajas.

Los tratamientos químicos de la superficie pueden limpiarse eficazmente, pero también pueden alterar la apariencia del hormigón, blanqueándolo, eliminando la pasta, erosionando el árido o alterando la superficie. Los limpiadores detergentes o los limpiadores ácidos diluidos suaves pueden ser apropiados para eliminar manchas o suciedad severa. No se deben usar productos de limpieza que contengan ácidos fuertes como el ácido clorhídrico (muriático) o ácido fluorhídrico, que dañarán el hormigón y son perjudiciales para las personas, los animales, las características del sitio y el medio ambiente.

Para cualquier proceso de limpieza, se deben realizar muestras de prueba antes de su uso a gran escala. La intención del programa de limpieza no debe ser devolver la estructura a una apariencia similar. El hormigón puede envejecer con gracia, y mientras la suciedad no sea severa o perjudicial, muchas estructuras pueden ser apreciadas sin una limpieza extensa.

Métodos de mantenimiento y reparación

El mantenimiento del hormigón histórico a menudo se piensa en términos de limpieza apropiada para eliminar la suciedad o los materiales depositados poco atractivos. Sin embargo, la aplicación de un plan de mantenimiento general para una estructura histórica es la forma más efectiva de ayudar a proteger el hormigón histórico. Por ejemplo, la falta de mantenimiento de las cubiertas y los sistemas de drenaje puede promover daños relacionados con el agua en las características de hormigones adyacentes. El uso repetido de sales de descongelación en climas de invierno puede picar la superficie del hormigón antiguo y también puede promover la corrosión de las armaduras de acero. La protección inadecuada de los muros de hormigón próximos a calzadas y áreas de estacionamiento puede resultar en la necesidad de trabajos de reparación más adelante.

El mantenimiento del hormigón histórico implica la inspección regular de este para establecer las condiciones de referencia e identificar las reparaciones necesarias. Las tareas de inspección involucran el monitoreo de los sistemas de protección, incluyendo juntas de sellado, juntas de expansión y recubrimientos protectores; revisar las condiciones existentes para el desarrollo de la fatiga, tales como grietas y laminaciones; documentación de las condiciones observadas; y desarrollo y aplicación de un programa de reparación periódico.

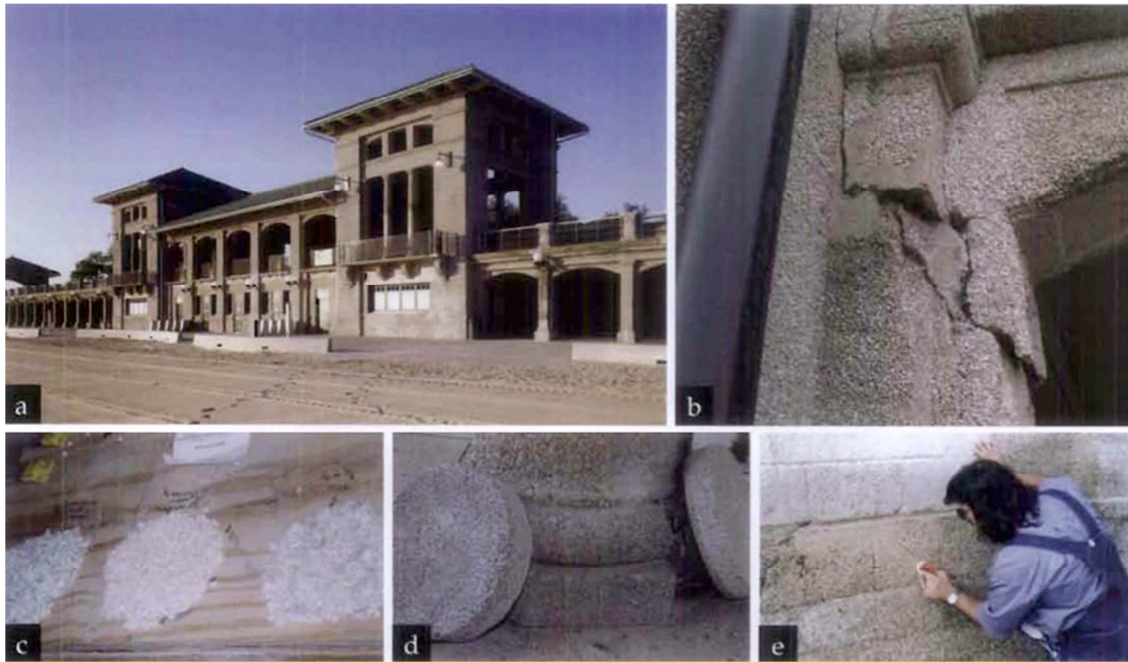


Figura 17. (a) La casa de la playa de la calle 63 se construyó en la costa de Chicago en 1919. El hormigón visto de las paredes exteriores de la casa se usó para muchos edificios en los parques de Chicago como una alternativa a la construcción en piedra, mucho más cara. Fotografía: Leslie Schwartz Photography. (b) El deterioro del hormigón incluyó agrietamiento, desconchado y laminación causada por la corrosión de las armaduras de acero y el daño del hormigón debido a la congelación y descongelación cíclica. (c) Se revisaron varios tamaños y tipos de áridos para que coincidieran con los materiales de hormigón original. (d) Se prepararon maquetas de la mezcla de reparación de hormigón para compararlas con el original. Se tuvo en cuenta el tipo y tamaño del árido, el color del cemento, las proporciones, la exposición del árido y el acabado de la superficie. (e) El artesano terminó la superficie para imitar la apariencia original en una maqueta en la estructura. Aquí, usó un cepillo de cerdas de nylon para quitar la pasta suelta y exponer el árido, creando una superficie variable para que coincidiera con el hormigón original.

Los sellantes son una parte importante del mantenimiento de las estructuras históricas de hormigón. Los sellantes elastoméricos, que han reemplazado a las masillas tradicionales a base de resina de aceite para muchas aplicaciones, se usan para sellar grietas y juntas para evitar la humedad y reducir la entrada de aire. Los sellantes se usan comúnmente en ventanas y perímetros de puertas, en interfaces entre el hormigón y otros materiales, y en accesorios a través de paredes o techos, como lámparas, letreros o accesorios de fontanería exteriores.

Cuando se utiliza para reparaciones de grietas en fachadas históricas, se debe considerar el aspecto final de la aplicación del sellante, ya que puede ser visualmente intrusivo. En algunos casos, se puede espolvorear arena sobre la superficie del sellador para ayudar a ocultar la reparación.

Los sellantes de poliuretano se usan a menudo para sellar juntas y grietas en estructuras de hormigón, pavimentos y pasillos; estos sellantes proporcionan una vida útil de hasta diez años. Los sellantes de silicona de alto rendimiento también se usan a menudo con el hormigón, ya que proporcionan una gama de capacidades de movimiento y una vida útil de veinte años o más. Algunos sellantes de silicona pueden manchar los materiales adyacentes, lo que puede ser un problema con el hormigón más poroso, y también pueden tender a acumular polvo y suciedad. La efectividad de estos productos para el sellado de juntas y grietas depende de numerosos factores, incluida la correcta preparación de la superficie y una aplicación adecuada. Los sellantes deben examinarse como parte de las inspecciones de mantenimiento de rutina, ya que estos materiales se deterioran más rápido que sus sustratos y deben reemplazarse periódicamente como parte del mantenimiento periódico.

Es posible que se requiera la reparación del hormigón histórico para abordar el deterioro debido a que el diseño y la construcción originales no proporcionaron una durabilidad a largo plazo, o para facilitar un cambio en el uso de la estructura. Los ejemplos incluyen aumentar el recubrimiento del hormigón para proteger las armaduras de acero y reducir la infiltración de agua en la estructura mediante la reparación de juntas. Cualquier mejora de este tipo debe evaluarse exhaustivamente para verificar su compatibilidad con el diseño y la apariencia originales. Se requiere cuidado en todos los aspectos de la

reparación histórica del hormigón, incluida la preparación de la superficie; instalación de encofrados; desarrollo del diseño de la mezcla de hormigón; colocación del hormigón, consolidación y curado.

Un programa de reparación adecuado aborda la fatiga existente y reduce la tasa de deterioro futuro, que en muchos casos involucra problemas relacionados con la humedad. El programa de reparación debe incorporar materiales y métodos compatibles con los materiales existentes en su carácter y apariencia, y que brinden un buen rendimiento a largo plazo. Además, los materiales de reparación deben envejecer de manera similar a los materiales originales. Para alcanzar mejor estos objetivos, los proyectos de reparación de hormigón se deben dividir en tres fases: desarrollo de procedimientos de reparación, reparaciones de prueba y evaluación de resultados, y trabajo de final de reparación.

Para cualquier proyecto de reparación de hormigón, el proceso de investigación, análisis de laboratorio, muestras de prueba, maquetas y reparaciones a gran escala permite el perfeccionamiento continuo del trabajo de reparación, así como la implementación de medidas de control de calidad. El proceso de reparación de prueba proporciona una oportunidad para que el propietario, el arquitecto, el ingeniero y el contratista evalúen el diseño de la mezcla del hormigón y las técnicas de instalación y acabado de las reparaciones desde el punto de vista técnico y estético. Los materiales y procedimientos de la reparación final deben coincidir con el hormigón original en apariencia y al mismo tiempo cumplir con los criterios establecidos de durabilidad. La información recopilada a través de reparaciones de prueba y maquetas es muy valiosa para mejorar y actualizar los documentos de construcción antes del inicio del proyecto general de reparación (Figura 17).

Preparación de la superficie

Al emprender la preparación de la superficie para la reparación de hormigón histórico, se debe tener cuidado en limitar la eliminación del material existente y al mismo tiempo proporcionar un sustrato apropiado para las reparaciones. Esto es particularmente importante cuando se trata de ornamentos y detalles finos. La preparación para reparaciones localizadas generalmente comienza con la eliminación del hormigón suelto para determinar el alcance general de la reparación, y luego se corta con sierra el perímetro del área de reparación. El área de reparación debe extenderse más allá del área de deterioro del hormigón en una extensión suficiente para proporcionar un sustrato sólido. Cuando se repara el hormigón con un árido expuesto u otra textura de superficie especial, un borde de corte de sierra puede ser demasiado visible. Para ocultar el borde de reparación, se pueden usar técnicas tales como cortar el borde del parche ligeramente a mano para ocultar la unión entre el hormigón original y el nuevo material de reparación. La profundidad a la cual se necesita eliminar el hormigón puede ser difícil de determinar sin un sondeo invasivo en el área de reparación. Por lo general, esta debe extenderse más allá del nivel de las armaduras, si está presente, de modo que el parche encapsule el acero de refuerzo, lo que proporciona un acoplamiento mecánico para la reparación.

Si el hormigón era originalmente de menor resistencia y calidad, la evaluación de la solidez actual es más difícil. El hormigón deteriorado y no sólido se elimina fácilmente con martillos neumáticos. La eliminación de hormigón en estructuras históricas se controla mejor mediante el uso de martillos más pequeños o herramientas manuales. El área de hormigón que se va a reparar y el acero de refuerzo expuesto se limpian, por lo general, mediante procedimientos de arenado y chorro de aire aplicados solo dentro del área de reparación. Las superficies de hormigón originales adyacentes deben protegerse durante este trabajo. En algunos casos, las restricciones del proyecto, como el control de polvo, pueden limitar la capacidad de limpiar completamente el hormigón y el acero. Por ejemplo, puede ser necesario usar un escariador neumático (un pequeño dispositivo de impacto neumático) y un cepillo de alambre en lugar de chorro de arena.

Cuando las armaduras existentes estén muy deterioradas puede ser necesario añadir barras adicionales, o si el acero de refuerzo no está presente en las áreas de reparación. Las armaduras expuestas y otros elementos de acero incrustados deben limpiarse, imprimarse y pintarse con un revestimiento inhibidor de la corrosión. El

material de reparación debe ser reforzado y unido mecánicamente al hormigón existente. Los materiales de refuerzo utilizados en las reparaciones con mayor frecuencia incluyen acero dulce, acero revestido con epoxi o acero inoxidable, según las condiciones existentes.

Encofrados y moldes

En ocasiones, se necesita un encofrado especial para recrear las características ornamentales del hormigón, que pueden ser complejas, en alto relieve o con detalles arquitectónicos, y para proporcionar acabados de superficie especiales, como texturas de tableros de madera. La construcción del encofrado en sí requiere de una gran habilidad. Los moldes reutilizables se pueden usar para la ornamentación de hormigón que se repite en la fachada de un edificio, o los elementos de hormigón prefabricado se pueden usar para reemplazar elementos arquitectónicos faltantes o irreparables. El encofrado para hormigón ornamental se crea a menudo mediante un proceso de cuatro pasos: se hace un molde del hormigón original; se prepara una réplica de yeso de dicha pieza; se fabrica un molde a partir de la réplica de yeso; y se fabrica la nueva pieza en hormigón. El encofrado y los moldes personalizados son a menudo realizados por empresas especializadas, como prefabricadores y fabricantes de piedra artificial. El proceso de conformación de características arquitectónicas o texturas especiales de la superficie es particularmente difícil si se necesita un desencofrado temprano (retirada del encofrado al inicio del proceso de curado del hormigón) para realizar el tratamiento de la superficie del hormigón. El tiempo para quitar el encofrado está relacionado con la ganancia de resistencia, que a su vez depende en parte de la temperatura y las condiciones climáticas. El desencofrado temprano en hormigón altamente detallado puede causar daños al nuevo hormigón que aún no ha ganado suficiente resistencia a través del curado.

Selección de los materiales de reparación y diseño de la mezcla

La selección y el diseño de los materiales de reparación adecuados es un componente crítico del proyecto de reparación. Este proceso requiere la evaluación del rendimiento, las características y las limitaciones de los materiales de reparación, y puede incluir pruebas de laboratorio de los materiales propuestos y las reparaciones de prueba. Los materiales deben seleccionarse para abordar el tipo específico de reparación requerida y para ser compatibles con las características especiales del hormigón original. Algunos materiales de reparación modernos están diseñados para tener una alta resistencia a la compresión y ser impermeables. Aunque son intrínsecamente duraderos, estos nuevos materiales pueden no ser apropiados para su uso en la reparación de un hormigón histórico de baja resistencia.



Figura 18. (a) El hormigón prefabricado con árido visto se hace sonar con un martillo para detectar áreas de deterioro. La corrosión de las barras de acero de refuerzo ha provocado el desprendimiento del hormigón adyacente. (b) Las muestras de áridos considerados para el uso en el hormigón de reparación se comparan con los materiales de hormigón originales en términos de tamaño, color, textura y reflectancia. (c) Se fabrican varios paneles de muestra utilizando el diseño de mezcla de reparación de hormigón seleccionado para comparar con el original del edificio, y el diseño de mezcla se ajusta en base a la revisión de las muestras. (d) Después de eliminar la zona afectada, la superficie de hormigón se prepara para la instalación de un parche. (e) Antes de la colocación del hormigón, se aplica un agente retardante a la cara interior del encofrado para retrasar el curado en la superficie. Una vez que el hormigón está parcialmente curado, se retira el encofrado y la superficie del hormigón se frota para eliminar parte de la pasta y exponer el árido para que coincida con el acabado original.

La durabilidad del hormigón, o la resistencia al deterioro, y los materiales y métodos seleccionados para la reparación dependen de su composición, diseño y calidad de la mano de obra. En la mayoría de los casos, un diseño de mezcla para un hormigón de reparación duradero debe usar materiales similares a los de la mezcla original. Los materiales preenvasados a menudo no son apropiados para la reparación de hormigón

histórico. El material de reparación del hormigón puede ser aireado o modificado con polímeros si está expuesto a la intemperie, y debe incorporar una selección adecuada de áridos y tipo de cemento, y contenido apropiado de agua y proporción de agua-cemento. Algunos aditivos, incluidos los modificadores de polímeros, pueden cambiar la apariencia de la mezcla de hormigón. El diseño del material de parcheo debe abordar las características requeridas para la durabilidad, manejabilidad, ganancia de resistencia, resistencia a la compresión y otros atributos de rendimiento. Durante la instalación, se requiere mano de obra cualificada para garantizar los procedimientos adecuados de mezcla, colocación, consolidación y curado.

Técnicas de combinación y reparación para hormigón histórico

Deben seleccionarse medidas de reparación que mantengan la mayor cantidad posible del material original, mientras se proporciona la eliminación de una cantidad adecuada de hormigón deteriorado para proporcionar un sustrato sólido para una reparación duradera. La reparación debe coincidir visualmente con el hormigón existente y debe ser similar en otros aspectos como la resistencia a la compresión, la permeabilidad y otras características importantes en el diseño de mezcla del hormigón (Figura 18).

La comprensión de las técnicas de construcción originales a menudo brinda oportunidades en el diseño de las reparaciones. Por ejemplo, las uniones entre el hormigón nuevo y el antiguo se pueden ocultar en los cambios de perfil de la superficie y en las juntas frías. La mezcla utilizada para la reparación deberá estar especialmente diseñada para imitar la apariencia del hormigón histórico original. Se requiere un alto nivel de mano de obra para el acabado del hormigón histórico, en particular para crear la superficie final.

Para adaptarse a las diversas características del hormigón original, se deben desarrollar mezclas de prueba. Estas mezclas deben tener en cuenta los tipos y colores de los áridos y la pasta presente en el hormigón original. Se pueden necesitar diferentes mezclas debido a las variaciones en la apariencia y composición del hormigón histórico. Las pruebas deben utilizar diferentes técnicas de conformación y acabado para lograr la mayor coincidencia posible con el hormigón original. Las pruebas iniciales deben realizarse primero en el sitio pero fuera de la estructura. Los diseños de mezcla que proporcionan la mejor combinación se instalan como reparaciones de prueba en la estructura y se evalúan después de que se hayan curado.

Lograr la compatibilidad entre el trabajo de reparación y el hormigón original puede ser difícil, especialmente dada la variabilidad que a menudo se presenta en los materiales y acabados de hormigón histórico. Las reparaciones con parches en lugar de aplicados con llana se recomiendan para garantizar una mayor durabilidad, ya que permiten mejores rangos de ingredientes de mezcla (como áridos gruesos) y una consolidación mejorada en comparación con las reparaciones con llana. Por lo general, no se recomiendan los recubrimientos de reducido espesor, ya que no brindan una reparación tan duradera como el hormigón. Sin embargo, en algunos casos, los recubrimientos de reducido espesor pueden ser apropiados para combinar con un tratamiento de superficie. La colocación y el acabado de la reparación son importantes para obtener una coincidencia correcta con el hormigón original. Para minimizar los problemas asociados con el curado rápido del hormigón, como el agrietamiento de la superficie, es importante utilizar métodos de curado adecuados y permitir suficiente tiempo.

Las grietas finas que no muestran signos de aumento de tamaño a menudo se pueden dejar sin reparar. El ancho de la grieta y la cantidad de movimiento generalmente limitan la selección de las técnicas de reparación de grietas disponibles. Aunque es difícil determinar si las grietas se mueven o no, y por lo tanto se debe suponer que la mayoría de las grietas se mueven, es posible reparar las grietas inactivas mediante la instalación de un mortero de reparación cementoso que coincida con el hormigón adyacente. En general, es conveniente no ensanchar las grietas antes de la aplicación del mortero. El mortero de reparación que contiene arena en la mezcla se puede usar para grietas más amplias; se puede usar mortero de reparación sin arena para grietas más estrechas.

Cuando es deseable restablecer la integridad estructural de una estructura de hormigón que involucra grietas latentes, la reparación con inyección de epoxi ha demostrado ser

un procedimiento eficaz. Dicha reparación se realiza sellando primero la grieta en ambos lados del muro con epoxi, poliéster, cera, cinta o cemento, y luego inyectando epoxi a través de pequeños orificios perforados en el hormigón. Una vez que el epoxi en la grieta se haya endurecido, el material de sellado de la superficie se puede quitar; sin embargo, este tipo de reparación suele ser bastante visible. Aunque puede ser posible inyectar epoxi sin dejar un residuo notable, este proceso es difícil y, en general, no se recomienda el uso de reparaciones de epoxi en áreas visibles de hormigón en estructuras históricas.

Las grietas estructurales activas (que se mueven a medida que se agregan o eliminan las cargas) y las grietas térmicas (que se mueven a medida que las temperaturas fluctúan) deben repararse de manera que se adapte al movimiento previsto. En algunos casos más extremos, es posible que haya que introducir juntas de expansión antes de realizar las reparaciones. Las grietas activas pueden rellenarse con selladores que se adhieren a los lados de las grietas y se comprimen o expanden durante el movimiento de la grieta. El diseño, el detalle y la ejecución de las reparaciones de selladores requieren una atención considerable, o restarán valor a la apariencia del edificio histórico. El fresado y la limpieza de una grieta, y la instalación de un sellador elastomérico para evitar la penetración de agua, se utiliza para tratar las grietas donde se anticipa el movimiento. Sin embargo, a menos que se encuentre en un área oculta del hormigón, esta técnica a menudo no es aceptable para estructuras históricas porque la reparación será visualmente intrusiva (Figura 19). Es posible que se deban considerar otros enfoques, como la instalación de una reparación de grietas de cemento, incluso aunque este tipo de reparación sea menos eficaz o tenga una vida útil más corta que la reparación de un sellador.

Sustitución

Si los componentes específicos de las estructuras de hormigón históricas no se pueden reparar, los elementos de reemplazo pueden moldearse para que coincidan con los históricos. La sustitución del hormigón original debe ser considerada cuidadosamente y vista como un método de último recurso. En algunos casos, como en el caso de unidades ornamentales repetidas, puede ser más rentable fabricar unidades de hormigón prefabricado para reemplazar los elementos faltantes. Los formularios creados para unidades prefabricadas o fabricadas *in situ* se pueden usar nuevamente en futuros proyectos de reparación.



Figura 19. Se usa una amoladora de alta velocidad para ensanchar una grieta en preparación para la instalación de un sellante. Este proceso se llama "fresado". Después de que se prepare la grieta, se instala el sellante para evitar la infiltración de humedad a través de la grieta. Aunque las reparaciones de sellantes pueden proporcionar una reparación duradera y hermética para grietas en movimiento, tienden a ser muy visibles.

Se requiere una cuidadosa combinación de la formulación, la colocación y el acabado para asegurar que las unidades de hormigón de sustitución coincidan con el hormigón histórico. A menudo hay una tendencia a hacer que el hormigón de sustitución sea más consistente en apariencia que el hormigón original. La consistencia puede contrastar con la variabilidad del hormigón original debido a las técnicas de construcción originales, el diseño arquitectónico o la exposición diferencial al clima. Las reparaciones de prueba y las maquetas se utilizan para evaluar el trabajo de sustitución del hormigón propuesto y para refinar las técnicas de construcción (Fig. 20).

Sistemas de protección

Recubrimientos y selladores penetrantes. Los sistemas de protección, como los selladores penetrantes o los revestimientos de película, se usan a menudo con estructuras no históricas para proteger el hormigón y aumentar la duración de la vida útil de las reparaciones. Sin embargo, los revestimientos de película a menudo son inapropiados para su uso en una estructura histórica, a menos que la estructura haya sido revestida históricamente. Los recubrimientos a menudo cambiarán el color y la apariencia de una superficie, e incluso pueden enmascarar acabados arquitectónicos y detalles ornamentales. Por ejemplo, la aplicación de un revestimiento sobre hormigón con un acabado de tablero de madera puede ocultar la textura de la madera de la superficie. Los recubrimientos pigmentados tampoco suelen ser apropiados para su uso sobre hormigón con árido visto, donde la superficie expuesta no recubierta contribuye significativamente al carácter histórico de la fachada. En los casos en los que se debe cambiar el color de un sustrato, como para modificar la apariencia de las reparaciones existentes, una alternativa a los recubrimientos pigmentados es el uso de tintes pigmentados. Muchos selladores penetrantes transparentes patentados están actualmente disponibles para proteger sustratos de hormigón. Estos productos hacen que las grietas finas y los poros dentro del hormigón sean hidrófobos; sin embargo, no hacen puentes ni rellenan grietas. Los selladores transparentes pueden cambiar la apariencia del hormigón, ya que las áreas tratadas se vuelven más visibles después de la lluvia en contraste con las áreas más absorbentes del hormigón original. Una vez aplicados, los selladores penetrantes no pueden eliminarse de manera efectiva y, por lo tanto, se consideran irreversibles. No deben usarse en hormigón histórico sin una consideración previa completa. Sin embargo, los selladores penetrantes transparentes proporcionan un medio importante de protección para el hormigón histórico que no es de buena calidad y puede ayudar a evitar reparaciones o reemplazos futuros más extensos. Por lo tanto, a veces son apropiados para uso en hormigón histórico. Una vez aplicados, estos selladores requerirán una re-aplicación periódica.



Figura 20. (a) El Monumento a Jefferson Davis en Fairview, Kentucky, construido desde 1917-1924, tiene 351 pies de altura y está construido de hormigón no reforzado. Las paredes del monumento tienen 8 pies de espesor en la base y 2 pies de espesor en la parte superior del muro. El acceso al monumento para la investigación se proporcionó mediante técnicas de rappel, mientras que los andamios apoyados y suspendidos se utilizaron para acceder al exterior durante las reparaciones. (b) El hormigón se deterioró severamente en lugares aislados, con desprendimientos y daños causados por la congelación y descongelación cíclica del agua atrapada. Además, las reparaciones anteriores se encontraban al final de su vida útil y se requirió la eliminación del hormigón deteriorado y las reparaciones anteriores fallidas. Se usaron pequeños martillos de trabajo para evitar daños al material adyacente al retirar el hormigón deteriorado. (c) Se realizaron muestras de campo para igualar el color, el acabado y la textura del hormigón original. Un desafío en la coincidencia de hormigón histórico es lograr variabilidad de apariencia. (d) La superficie completa después de las reparaciones muestra una variabilidad intencional de la superficie del hormigón para que coincida con el aspecto del original. Algunas imperfecciones del encofrado que normalmente se eliminarían al terminarse se dejaron intencionalmente en su lugar para replicar el acabado altamente variable del hormigón original. (e) El Monumento a Jefferson Davis después de completar las reparaciones en 2004. Fotografía e: Joseph Lenzi, Senler, Campbell & Associates, Inc.

Las membranas impermeabilizantes son sistemas que se utilizan para proteger superficies de hormigón como cubiertas, terrazas, plazas o balcones, así como superficies por debajo del nivel del suelo. Los sistemas abarcan desde membranas de brea de alquitrán utilizadas en edificios antiguos, hasta sistemas a base de asfalto o urea. En los edificios históricos, los sistemas de membrana se usan típicamente solo en superficies que originalmente estaban protegidas por un sistema similar y superficies que no son visibles. Las membranas impermeabilizantes se pueden cubrir con techos, pavimentos u otros acabados arquitectónicos.

Se recomienda realizar pruebas de laboratorio y de campo antes de la aplicación de un sistema de protección o tratamiento en cualquier estructura de hormigón; las pruebas son aún más críticas para las estructuras históricas porque muchos de estos tratamientos no son reversibles. Al igual que con otras reparaciones, las muestras de prueba son importantes para evaluar la efectividad del tratamiento y para determinar si dañará el hormigón o afectará su apariencia.

Protección catódica. La corrosión es un proceso electroquímico en el cual los electrones fluyen entre áreas catódicas (con carga positiva) y anódicas (con carga negativa) en una superficie metálica; la corrosión se produce en los ánodos. La protección catódica es una técnica utilizada para controlar la corrosión del metal al hacer que toda la superficie metálica sea el cátodo de una celda electroquímica. Esta técnica se usa para proteger las estructuras metálicas de la corrosión y, a veces, también se usa para proteger las armaduras del hormigón. Para el hormigón armado, la protección catódica se logra típicamente conectando un ánodo auxiliar al refuerzo de modo que toda la barra de refuerzo se convierta en un cátodo. En los sistemas de ánodo de sacrificio (pasivo), la corriente fluye naturalmente por acción galvánica entre el ánodo menos noble (como el zinc) y el cátodo. En los sistemas de corriente impresa

(activa), la corriente se imprime entre un ánodo inerte (como el titanio) y el cátodo. La protección catódica está destinada a reducir la tasa de corrosión del acero insertado en el hormigón, lo que a su vez reduce el deterioro general. Proteger el acero de la corrosión ayuda a evitar que el hormigón se agriete y se desprenda.

La protección catódica de corriente impresa es el medio más eficaz para mitigar la corrosión del acero y se ha utilizado en aplicaciones estructurales prácticas desde la década de 1970. Sin embargo, los sistemas de protección catódica de corriente impresa suelen ser los más costosos de instalar y requieren un monitoreo, ajuste y mantenimiento continuos sustanciales para garantizar una salida de voltaje adecuada (corriente de protección) a lo largo del tiempo. La protección catódica del ánodo de sacrificio se remonta a la década de 1800, cuando los cascos de los barcos estaban protegidos con esta tecnología. Hoy en día, muchas industrias utilizan el concepto de protección catódica con ánodo de sacrificio para la protección del acero expuesto a ambientes corrosivos. Es menos costoso que un sistema de corriente impresa, pero es algo menos efectivo y requiere una nueva aplicación del ánodo cuando se agota.

Re-alkalinización. Otra técnica disponible actualmente para proteger el hormigón es la re-alkalinización, que es un proceso para restaurar la alcalinidad del hormigón carbonatado. El tratamiento consiste en empapar el hormigón con una solución alcalina, en algunos casos forzándola dentro del hormigón al nivel de las armaduras por el paso de la corriente continua. Estas acciones aumentan la alcalinidad del hormigón alrededor del refuerzo, restaurando así el ambiente protector alcalino para las armaduras. La re-alkalinización se ha utilizado en los Estados Unidos durante poco más de una década. Al igual que los métodos de protección catódica de corriente impresa, es costoso. Sin embargo, es una operación que se realiza una sola vez y, por lo tanto, no requiere una nueva aplicación periódica. La evaluación cuidadosa de las condiciones existentes, las causas y la naturaleza de la fatiga, y los factores ambientales son esenciales antes de seleccionar e implementar un método de protección. No todos los sistemas de protección serán efectivos en cada estructura. Además, el nivel de intrusión causado por el sistema de protección debe evaluarse cuidadosamente antes de que se use en una estructura de hormigón histórica.

Resumen y referencias

En los Estados Unidos, el hormigón ha sido un material de construcción popular desde finales del siglo XIX y recientemente ha ganado un mayor reconocimiento como material histórico. La conservación del hormigón histórico requiere una comprensión profunda de las causas y los tipos de deterioro, así como de los materiales y métodos de reparación y sustitución. Es importante que se asigne tiempo adecuado durante la fase de planificación de un proyecto para proporcionar reparaciones de prueba y maquetas para evaluar la efectividad y la estética de las reparaciones. El diseño cuidadoso es esencial y, al igual que con otros esfuerzos de conservación, la habilidad de quienes realizan el trabajo es fundamental para el éxito de las reparaciones. La reparación exitosa de muchas estructuras de hormigón históricas en los últimos años demuestra que las técnicas y los materiales disponibles en la actualidad pueden extender la vida útil de dichas estructuras y ayudar a garantizar su conservación.

Agradecimientos

Paul Gaudette es ingeniero de Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc., en Chicago, Illinois. **Deborah Slaton** es restauradora de arquitectura de Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc., en Northbrook, Illinois. Todas las fotografías son de Paul Gaudette a menos que se indique lo contrario.

Los autores desean agradecer a William Bing Coney, autor de la primera edición de este informe de conservación, quien realizó la revisión de la edición actual. Además, los autores agradecen la asistencia de las siguientes personas como revisores pares de este informe: Arne Johnson y Una Gilmartin, Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc.; Robert Joyce, Quality Restorations, Inc.; Susan Macdonald, New South Wales Heritage Office; Miles T. Murray, Restruction Corporation; y Jack Pyburn, OJP / Architect, Inc. Anne E. Grimmer, Chad Randl, y Sharon C. Park, FAIA, de los Technical Preservation Services,

National Park Service, que ofrecieron valiosos comentarios durante el desarrollo del informe. Charles E. Fisher, del National Park Service, fue el editor técnico de este proyecto de publicación.

Esta publicación ha sido preparada en conformidad con la Ley Nacional de Preservación Histórica de 1966, según enmendada, que ordena al Secretario del Interior desarrollar y poner a disposición información sobre propiedades históricas. Los comentarios sobre esta publicación deben dirigirse a: Charles E. Fisher, Technical Preservation Publications Program Manager, Technical Preservation Services—2255, National Park Service, 1849 C Street, NW, Washington, DC 20240. Esta publicación no tiene derechos de autor y puede reproducirse sin penalización. Se deben proporcionar los procedimientos normales de crédito a los autores y al National Park Service. Las fotografías utilizadas en esta publicación no pueden utilizarse para ilustrar otras publicaciones sin el permiso de los propietarios.

Lecturas recomendadas

American Concrete Institute. *Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service*. ACI Committee 201, ACI 201.1R-92.

American Concrete Institute. *Guide to Evaluation of Concrete Structures before Rehabilitation*. ACI Committee 364, ACI 364.1R-07.

American Concrete Institute. *Concrete Repair Guide*. ACI Committee 546, ACI 546R-04.
American Concrete Institute. *Guide for Evaluation of Existing Concrete Buildings*. ACI Committee 437, ACI 437R-03.

Childe, H.L. *Manufacture and Uses of Concrete Products and Cast Stone*. London: Concrete Publications Limited, 1930.

Collins, Peter. *Concrete: The Vision of a New Architecture*. New York, New York: Faber and Faber, 1959.

Cowden, Adrienne B., comp. *Historic Concrete: An Annotated Bibliography*. Washington, D.C.: National Park Service, 1993.

Komandant, August E. *Contemporary Concrete Structures*. New York, New York: McGraw Hill, 1972.

Erlemann, Gustav G. "Steel Reinforcing Bar Specification in Old Structures." *Concrete International*, April 1999, 49–50.

Federal Highway Administration. *Guide to Nondestructive Testing of Concrete*. FHWA Publication Number FHWA-SA-97-105.

Gaudette, Paul E. "Special Considerations in Repair of Historic Concrete." *Concrete Repair Bulletin*, January/February 2000, 12–13.

Jester, Thomas C., ed. *Twentieth Century Building Materials*. New York, New York: McGraw-Hill, 1995.

Johnson, Arne P., and Seung Kyoung Lee. "Protection Methods for Historic Concrete at Soldier Field." *Preserve and Play: Preserving Historic Recreation and Entertainment Sites*. Washington, D.C.: Historic Preservation Education Foundation, National Council for Preservation Education, and National Park Service, 2006.

Macdonald, Susan, ed. *Concrete: Building Pathology*. Osney Mead, Oxford, U.K.: Blackwell Science, 2003.

McGovern, Martin S. "A Clear View of Sealers." *Concrete Construction*, January 2000, 53–58.

Morton, W. Brown III, Gary L. Hume, Kay D. Weeks, H. Ward Jandl, and Anne E. Grimmer. *The Secretary of the Interior's Standards for Rehabilitation & Illustrated Guidelines for Rehabilitating Historic Buildings*. Washington, D.C.: National Park Service, 1983, reprinted 1997.

"Repairing Cracks." *Concrete Repair Digest*, August/September 1992, 160–164. Condensed from ACI document 224.1R-93.

Slaton, Deborah. "Cleaning Historic Concrete." *Concrete Repair Bulletin*, January/February 2000, 14–15.