

La conservación-restauración de arte contemporáneo realizado con morteros de cemento y hormigón

1.- Introducción

El empleo de morteros inorgánicos de cemento y hormigón como materiales artísticos se difunde especialmente hacia los años cincuenta, tras la previa influencia de su empleo en la construcción por parte de arquitectos como Le Corbusier, Niemeyer, Tange y otros, que abren el camino hacia una nueva estética. Difusores de ésta serían también los constructivistas rusos, el grupo Stijl en Holanda y la Bauhaus en Alemania.

En general, puede decirse que el empleo de estos materiales en escultura oferta múltiples posibilidades plásticas al artista. El escultor puede definir la textura de la superficie mediante la elección de la del encofrado [figs. 1 y 2] y puede seleccionar los áridos y diseñar el color de la obra mediante la coloración de la masa o la elección de los áridos y del cemento. Además, en el caso del hormigón, puede lavarse la superficie antes de que fragüe y dejar al descubierto la textura pétrea de la grava.



Este tipo de obras aparece frecuentemente en espacios públicos. En las primeras décadas del siglo XX se desarrolla la idea de extraer el arte de los museos y situarlos en la calle. Con ello, el escultor comienza a proyectar sus obras de modo que participen del exterior. De este modo, muchas obras se convierten en esculturas-construcciones, para las que el empleo de estos materiales aporta soluciones hasta cierto punto más sencillas que las que proporciona el empleo de otros más costosos.

El hormigón se adapta especialmente bien a obras de carácter geométrico. Se ha empleado en obras de grandes dimensiones, donde la rugosidad del material no interfiere con la definición de la escultura que, generalmente, se visualiza a cierta distancia. La realización de estas obras suele exigir la participación de equipos pluridisciplinarios. Así, el *Elogio del Horizonte*, de Eduardo Chillida, constituye un magnífico ejemplo del empleo de este material en escultura abstracta. La obra pesa aproximadamente 500 toneladas y su ejecución requirió la participación del ingeniero José Antonio Fernández Ordóñez, que se ocupó del diseño del material a utilizar, incluyendo la armadura de acero sustentante de la obra. La mezcla de hormigón fue elegida entre más de veinte diseñadas por él

([http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3265/5103721.pdf%20\(consult%20?sequence=21\)](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3265/5103721.pdf%20(consult%20?sequence=21))). La construcción de la obra fue realizada por la empresa Entrecanales.

Uno de los más conocidos ejemplos de la utilización de hormigón en escultura de carácter figurativo es la figura de Cristo Redentor, realizada en hormigón armado recubierta de placas de saponita y situada a 709 m sobre el nivel del mar, en Río de Janeiro, en la cima del cerro del Corcovado. Entre las personas que colaboraron para la realización pueden citarse el ingeniero Heitor da Silva Costa (autor del proyecto), el artista plástico Carlos Oswald (autor del diseño final del monumento) y el escultor francés Paul Landowski, ejecutor de la cabeza y las manos de la escultura.

La realización de esta escultura revistió cierta complejidad, ya que pesa más de 1000 toneladas. Fue fundamental en esta labor la actuación del ingeniero, ya que la figura, con sus brazos abiertos, ha de resistir cargas y tensiones derivadas de su propio peso, así como del azote frecuente del viento.

En obras de menor tamaño, el artista puede explotar las cualidades táctiles del hormigón transfiriéndole también las del material del encofrado. Así, en Al otro lado del muro (1972, Museo de Arte Público de Madrid), de José María Subirach, el autor combina en una misma obra hormigón y piedra calcárea y contrapone la rugosidad del primero a la suavidad de las esferas de caliza.

Son muchos los artistas que eligen morteros de cemento como material escultórico. En numerosas ocasiones se mezcla el material con polvo de mármol y es empleado no sólo como mediante trabajo directo sino también en vaciados. Ricardo Tanga es un artista que utiliza cemento blanco con marmolina en la realización de sus esculturas y emplea ambos sistemas de trabajo en sus obras (<http://rt-esculturas.blogspot.com.es/>).

A pesar de la estabilidad de los materiales empleados, las esculturas realizadas con ellos pueden presentar ciertas patologías que serán estudiadas con posterioridad. En la actualidad, están desarrollándose metodologías de actuación que parten de los tratamientos que la industria aplica de manera general sobre edificaciones.

2. Tipos de morteros

Los morteros son materiales empleados tradicionalmente en construcción. Se han utilizado con el fin de unir elementos constructivos, como material de recubrimiento de éstos y para conformar piedra artificial (Mas i Barberà, 2006).

El mortero se compone de una mezcla de conglomerante, agua y arena (inerte). Los conglomerantes son las sustancias que ligan el resto de los materiales que participan en la formulación del material. Suelen emplearse como tales cemento, cales y yesos. En general, cuanto más conglomerante se emplee, mayor será la retracción del material. El agua actúa como

plastificante y da lugar al fraguado del conglomerante. El inerte (arena, polvo de ladrillo) es un elemento que reduce costes, a la vez que permite una menor contracción del material al fraguar. El mortero más utilizado es el de cemento, en el que se emplean este material, arena y agua. Tradicionalmente los morteros se designan de acuerdo al conglomerante utilizado:

- Morteros de cal. Se emplea cal apagada (hidróxido cálcico, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Pueden diferenciarse los morteros de cal aérea, donde ésta fragua al aire, y los de cal hidráulica que no necesita contacto con el aire para endurecer, con lo que puede fraguar bajo el agua.

- Morteros de cemento: Puede emplearse cemento gris o blanco.

- Morteros bastardos, también denominados mixtos. Participan varios tipos de conglomerantes (yeso y cal, cemento y cal).

- En la actualidad, también se comercializan morteros especiales, que presentan propiedades específicas acordes con las aplicaciones a las que se destinan. En ciertos tipos de morteros especiales, el conglomerante puede estar constituido por cemento mezclado con resinas sintéticas (p. ej. epoxídicas). Igualmente, se encuentran en el mercado morteros en cuya formulación participan fibras sintéticas.

3. Materiales constitutivos de los morteros de cemento y del hormigón

Como ya se ha indicado, los morteros de cemento se preparan, básicamente, en base al empleo de cemento, arena y agua. El hormigón podría definirse como un mortero de cemento en el que como carga se adiciona grava, además de arena (Nueva enciclopedia del encargado de obras, 2007).

3.1. Cemento. Tipos de cemento

Algunos de los cementos más empleados como materiales en escultura contemporánea durante los últimos años son el cemento Pórtland y los cementos blancos. A estos últimos suelen también añadirse pigmentos.

El cemento Pórtland fue diseñado por el albañil inglés John

Aspdin, quien lo patentó en 1824. A partir de entonces, el material ha ido sufriendo múltiples modificaciones y, en la actualidad, existe una gran variedad de cementos artificiales. Hoy en día, se conoce con esta denominación únicamente el cemento común, designado como I y II de acuerdo a la normativa vigente.

Su proceso de fabricación consiste en triturar finamente rocas calcáreas y arcillas en proporciones adecuadas, de manera que el compuesto de la caliza (CaO) se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos de la arcilla (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3). A continuación, el material se somete a calentamiento en hornos ($1450\text{-}1480^\circ\text{C}$). El producto resultante se denomina clínquer y está constituido básicamente por silicatos y aluminatos. Para finalizar, antes de la última trituración el material se muele con una pequeña proporción de yeso (alrededor del 3%), que actúa como retardante del fraguado. Además de estos productos, pueden incorporarse al material otras sustancias a fin de obtener cementos con otras características (caliza, cenizas, escorias, etc.).

Por tanto, cuando no se añade este yeso al cemento, el material fragua con gran rapidez (el tiempo puede reducirse a 5 minutos). Sin embargo cuando contiene yeso, suele iniciarse el fraguado a los 45 minutos de agregada el agua. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación son la finura de molienda, los aditivos, la cantidad de agua adicionada y la temperatura de los materiales en el momento en que se efectúa la mezcla de los mismos. Al final, puede decirse que el material se compone, fundamentalmente, de silicatos, especialmente de calcio, que fraguan y endurecen al hidratarse en contacto con agua.

La hidratación del cemento requiere cantidades mínimas ésta ($0.22\text{-}0.25$ kg de agua por kilo de cemento), aunque en la práctica se añade una cantidad mayor para que pueda trabajarse el material. En general, puede emplearse una relación agua/cemento de 0,4. Así, 100g de cemento se mezclarían con 40g de agua. Los silicatos que constituyen el cemento Pórtland, entran en contacto con el agua y se transforman en

silicatos de calcio hidratados. También se obtiene también portlandita (Ca(OH)_2), que reacciona con los sulfatos alcalinos presentes siempre en el cemento y da lugar a los hidróxidos correspondientes.

El fraguado y primer endurecimiento del material requiere un intervalo de temperaturas de entre 2°C y 40°C . Tras el fraguado, el hormigón se retrae ($0,35\text{mm/m}^3$). El curado del cemento requiere un tiempo de 7 días al menos. Por ejemplo, en el Elogio del Horizonte se eliminó el encofrado de madera tras una semana de reposo ([http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3265/5103721.pdf%20\(consult%20?sequence=21\)](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3265/5103721.pdf%20(consult%20?sequence=21))).

Existen diversos tipos de cementos. Algunos de ellos son los siguientes:

- El cemento blanco se emplea abundantemente en escultura, muchas veces en obras de pequeño tamaño, en ocasiones mezclado con polvo de mármol. Este material se obtiene empleando materias primas casi exentas de compuestos de hierro y manganeso, que son los que proporcionan el color gris al cemento Portland. Este tipo de cementos necesitan mayor proporción de agua que los Portland.

- Cementos expansivos. Ciertos cementos pueden tener formulaciones tales que evitan la retracción del material. Para ello, se incorpora cierta cantidad controlada de compuestos expansivos, principalmente Sulfoaluminato de Calcio ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$) y/u Óxido de Calcio (CaO).

En la formulación del hormigón puede incluirse cierta cantidad de fibras con el fin de evitar esta retracción. Las más utilizadas están constituidas por polipropileno, nylon, poliéster y polietileno.

- Cemento aluminoso. Este tipo de cemento se fabrica a partir de la mezcla de caliza y bauxita. El material presenta una resistencia inicial muy superior a la del cemento Portland y fragua más rápidamente. Además, con él podía elaborarse hormigón a muy bajas temperaturas. Por ello, entre 1950 y 1970, fue muy frecuente su empleo en la construcción. Sin embargo, se ha constatado la pérdida de resistencia del

material años después, así como la corrosión de las armaduras, especialmente cuando la obra se ve afectada por humedad ambiental, con lo que está prohibido su uso en elementos estructurales (aluminosis).

- Cemento puzolánico. Este material contiene una mezcla de clínker Pórtland, puzolana y una pequeña proporción de yeso. La puzolana es un producto de origen volcánico constituido por materiales silíceos o alumino-silíceos.

3.1.1. Aditivos de los cementos

Estas sustancias se añaden generalmente para reducir el coste de construcción del material, así como para modificar sus prestaciones. Algunos de los aditivos más empleados son los siguientes:

- Pigmentos: Los más utilizados suelen ser las tierras, que proporcionan una amplia gama de amarillos y pardos, así como óxido de cromo (verde), óxido ferroso (negro), sulfuro de cadmio (amarillo), y dióxido de titanio (blanco).

- Aireantes: Estos materiales producen pequeñas burbujas de aire de modo que proveen al material (usualmente hormigón) de espacio para que el agua presente en él, debido a la existencia de humedad ambiental, pueda expandirse al congelarse. De este modo se previene la disgregación del cemento u hormigón, por aumento del volumen del agua en su interior, derivado de su congelación. Los aireantes, sin embargo, reducen la resistencia del material. Algunos de los más empleados son tensoactivos.

- Plastificantes o reductores de agua: Aumentan la trabajabilidad del mortero sin necesidad de aumentar la cantidad de agua, con lo que producen hormigones de alta resistencia. Pueden actuar por procesos de tipo físico químico (p. ej. lignosulfato de calcio) o de tipo físico, facilitando el deslizamiento de las partículas de árido (tierra de diatomeas, bentonita, etc.).

- Aditivos hidrófugos: Estos productos proporcionan impermeabilidad a la masa, reduciendo así la capacidad de absorción de humedad de capilaridad.

– Las fibras sintéticas reducen la fisuración por retracción.

3.2. Agua

Como se ha indicado, una mayor presencia de agua en mezcla con cemento da lugar también a una mayor porosidad del material. De modo que se garantice una mayor perdurabilidad del hormigón armado, el agua a emplear ha tener un pH igual o mayor que 5 y presentar una concentración baja de ciertos compuestos: Pequeños contenidos de iones sulfato ($\leq 1\text{g/l}$) y de iones cloro ($\leq 6\text{g/l}$). No debe contener hidratos de carbono.

3.3. Áridos

Los áridos son materiales granulares de carácter inerte. Su empleo da lugar a la reducción de costes en el proceso y pueden aportar sus valores plásticos (cromatismo, textura). Asimismo, su empleo disminuye, en general, las retracciones en el hormigón.

La elección de la granulometría de los áridos debe tender a rellenar los huecos existentes de modo que se consiga la máxima compacidad pero disminuyendo la cantidad de cemento y, por tanto, agua, necesarios para recubrir los granos. Ya se ha explicado que el empleo de una gran cantidad de agua en la mezcla da lugar también a una mayor porosidad del material.

Pueden emplearse como áridos gravas ($> 4\text{ mm}$), arenas (gruesa $< 4\text{ mm}$, fina $< 2\text{ mm}$) y polvo ($< 0,08\text{ mm}$). Los áridos pueden tener origen natural o artificial. Los de origen natural pueden ser calizos, silíceos y graníticos. Los de origen artificial pueden ser escorias, cenizas, arcillas expandidas, etc. Los áridos no deben ser porosos, ya que aumentaría la sensibilidad del hormigón al agua.

De acuerdo a su forma, pueden clasificarse los áridos en rodados, que presentan una gran dureza y dan lugar al empleo de una menor cantidad de agua y en áridos obtenidos por machaqueo, que proporcionan un hormigón con mayor resistencia a la tracción.

3. 3.1. Relación árido – cemento

En general, la normativa vigente establece que la cantidad

máxima de cemento por m³ de hormigón ha de ser de 400kg (Polanco y Setién, 2013). Pueden producirse variaciones que dependerán, en muchos casos, de la agresividad del entorno.

Como se ha indicado, los áridos utilizados para configurar el hormigón han de presentar diversos tamaños a fin de logran una granulometría que garantice la compacidad del material (escasos huecos). Para reducir la cantidad de cemento de modo que ésta sea suficiente, debe reducirse la superficie de los granos de los áridos. Debido a que, para un volumen general dado, la superficie disminuye con el aumento del volumen de cada grano, debería recurrirse a emplear el mayor tamaño posible de árido. Existe una normativa relacionada con los tamaños de los áridos, que tiene en cuenta los huecos entre las armaduras y las dimensiones del molde a rellenar.

Por tanto, cuanto mayor es el tamaño del árido, menor cantidad de cemento y, por tanto, de agua necesita. Sin embargo, estas dimensiones vienen limitadas por la separación entre las varillas de acero constituyentes del mallazo o armadura, ya que el hormigón debe rellenar los huecos existentes entre estos elementos. Los áridos finos, también necesarios, proporcionan una mezcla más trabajable, pero necesitan una mayor cantidad de cemento y agua (por tanto dan lugar a una mezcla más porosa). En general, puede decirse que ha de lograrse la fórmula más conveniente tendiendo hacia la compacidad y teniendo en cuenta los diversos factores.

En la puesta en obra del hormigón se emplean encofrados, que pueden ser metálicos, de madera, etc. El hormigón se introduce en ellos por capas (tongadas) horizontales de reducido espesor. Las capas se unen entre sí mediante el medio de compactación elegido.

Para eliminar pequeñas bolsas de aire o agua en el hormigón, que podrían dar lugar a la aparición de coqueras, pueden emplearse diversos sistemas de compactación: Barra metálica (introducida en la masa del hormigón en repetidas ocasiones), por apisonado o por vibrado. En este último caso, pueden emplearse agujas vibradoras, vibradores eléctricos externos adosados al encofrado, etc. (Nueva enciclopedia del encargado

de obras, 2007).

El hormigón requiere un curado lento. Por ello, habitualmente se le protege del sol mediante tejadillos, riegos de la superficie, etc. El encofrado ha de retirarse después de 5-7 días, cuando el hormigón ya ha alcanzado cierta resistencia.

Una gran cantidad de obras de Chillida fueron realizadas en colaboración con José Antonio Fernández Ordóñez, como se ha indicado (ej. Lugar de Encuentros III, La Casa de Goethe, Elogio del Agua, Elogio del Horizonte, Monumento a la Tolerancia, etc.). A modo de ejemplo sobre los materiales que integran las mezclas, se aportan los empleados en la escultura Homenaje a Jorge Guillén I, realizada en 1980 (ubicada próxima a la entrada del Museo Chillida Leku de Hernani). En este caso se empleó cemento fundido, grava y arena roja, viruta de fundición y agua. La viruta de fundición se empleó en grandes porcentajes y la intención de este elemento era conseguir un hormigón con acabado oxidado. Por otra parte, parece ser que el hormigón utilizado es de aluminato cálcico, que se eligió por el color pardo que adquiere, aunque pierde resistencia con el tiempo, como se indicará posteriormente. En la formulación del hormigón, la relación agua/cemento es muy elevada con la intención seguramente de incrementar la porosidad del material de modo que permitiera la oxidación buscada en las virutas. En general, la elección y dosificación de los componentes del hormigón se justifica desde el punto de vista artístico, aunque puede comprometer la durabilidad de la obra.

3.4. Armaduras

El hormigón es un material muy resistente a las tensiones de compresión. Sin embargo, frente a la tracción se presenta como un material frágil. Resulta, por tanto, muy frecuente el empleo de refuerzos metálicos con el fin de incrementar la resistencia del material a este tipo de tensiones.

Cuando no lleva un refuerzo de acero el hormigón recibe la denominación de hormigón simple y, cuando lo tiene, hormigón armado.

Como se ha indicado en la introducción, las obras de grandes

dimensiones requieren la participación de ingenieros, especialmente de profesionales especializados en ingeniería estructural, de modo que aporten soluciones a realizaciones especialmente complejas por su tamaño o complejidad estructural. El diseño de la estructura de acero en este tipo de obras es clave, a fin de que garantice el mantenimiento de la obra.

El acero empleado con el hormigón puede emplearse en forma de malla, denominándose entonces mallazo la estructura realizada, o de varilla, designándose entonces como armadura. Generalmente, las varillas empleadas son corrugadas, ya que el carácter rugoso del material facilita la adherencia entre el hierro y el hormigón. Este tipo de acero está provisto de una gran ductilidad, con lo que puede decirse que no sufre daños al doblarlo o cortarlo y se suelda con facilidad. Las barras de acero corrugado están normalizadas. En nuestro país las regulan las normas (UNE 36068:1994- UNE 36065:2000 -UNE36811:1996). Estos elementos son producidos en una gama de diámetros que van de 6 a 40mm, identificándose, además, por la sección en cm², así como por su peso en kg/m.

Las mallas electrosoldadas se componen de alambres o barras lisas o corrugadas, de acero negro o inoxidable. Estas barras se cruzan entre sí perpendicularmente y los puntos de contacto están soldados con soldadura.

4. Causas y tipos de deterioro de cementos y hormigones

Algunos de los deterioros y sus causas más habituales son los siguientes:

4.1. Deterioro por empleo de cementos de escasa durabilidad. En este caso, puede ponerse como ejemplo el cemento aluminoso. Estos materiales presentan gran rapidez de fraguado y alta resistencia, aunque limitada en el tiempo (recuérdese la escultura Homenaje a Jorge Guillén I, de Chillida, ya mencionada).

4.2. Defectos técnicos de la puesta en obra del material.

Pueden citarse algunos de los más importantes: Excesiva porosidad del material debido al exceso de áridos que crean huecos (coqueras) o producida por exceso de agua en el amasado, y el exceso de cemento que da lugar a la aparición de fisuras de retracción. Estos defectos propician la corrosión de las armaduras.

Cuando se utiliza agua en exceso, su evaporación da lugar a la presencia de vacíos capilares, que aumentan la porosidad del hormigón y reducen su resistencia a la compresión. Como se ha indicado, en la formulación del hormigón interviene el empleo de cemento, además del inerte y agua. La resistencia química del hormigón está relacionada con su porosidad. Cuando es más compacto, absorbe pocos gases y líquidos agresivos procedentes de la contaminación atmosférica, por lo que también es más estable. Si además presenta armaduras metálicas, es fundamental llevar a cabo una adecuada formulación del hormigón de modo que se reduzca su porosidad y prevenir la corrosión de su armadura.

La existencia de agua suplementaria produce también un aumento del coeficiente de retracción del material, pudiendo producirse grietas en el mismo, con lo que aumenta, por tanto, también, su permeabilidad a los agentes atmosféricos. La retracción es la deformación del hormigón que se manifiesta mediante la disminución del volumen del material durante su proceso de fraguado. Se produce simplemente por la pérdida de agua. En general, la tendencia a la fisuración del hormigón puede reducirse mediante el empleo de una menor cantidad de agua en la mezcla. Por tanto, la proporción de cemento en la mezcla no puede ser muy elevada. En general, cuando se incrementa la cantidad de cemento en la mezcla, con el fin de elevar también la resistencia del hormigón, se produce, en contrapartida, una mayor retracción del material.

Además de la proporción de agua y de cemento, otros factores influyen sobre la retracción del material y, por tanto, sobre la aparición de fisuras, como el tipo de cemento, contenido en áridos, si es hormigón armado o no y la temperatura ambiental (Cedeño, Cuéllar, e Izurieta, 2009).

El factor más importante para evitar retracciones es el contenido del árido, ya que puede reducir las deformaciones. En general puede indicarse que, a mayor contenido de éste, menor cantidad de pasta (cemento-agua) y, por tanto, menor retracción.

Sobre la retracción del hormigón influye también el factor ambiental. Las fisuras de retracción plástica son características del hormigón fresco y son producidas por la rápida evaporación de la humedad en la superficie del material, debido a la existencia de una elevada temperatura ambiental o a la acción del viento. La retracción se dará con mayor facilidad en piezas pequeñas, ya que la deshidratación se produce de manera más rápida en ellas. Este tipo de fisuras suelen ser superficiales. Las fisuras de retracción de secado, que se producen a partir de las dos o tres semanas del vertido del hormigón, tampoco suelen ser profundas, aunque se dan excepciones. Este tipo de deterioro, como se ha indicado, se ve favorecido por un excesivo contenido en agua del hormigón.

La presencia de armaduras en el hormigón produce también una menor retracción del material, ya que la armadura contribuye a soportar las tensiones derivadas de esa retracción. Algunos hormigones especiales han sido formulados de tal manera que compensan la retracción.

Existen, por tanto, numerosos tipos de fisuras en el hormigón y algunas derivan también de las tensiones de compresión y tracción. Las fisuras del hormigón no son siempre peligrosas. Únicamente se consideran como tales las especialmente profundas o cuando el hormigón se encuentra en determinados ambientes.

4.3. Deterioros producidos por la acción de agentes químicos. Ya se ha comentado el efecto de la carbonatación por la acción del dióxido de carbono, derivado de la contaminación ambiental, en la corrosión de las armaduras.

Pueden producirse ataques de sustancias ácidas naturales o de origen artificial, como el ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico. Se producen reacciones químicas que dan lugar a la

disolución del cemento y a la eliminación de áridos finos, quedando expuestas las armaduras a la acción de los agentes agresivos.

La degradación por sulfatos se da también por sustancias naturales o artificiales. En la naturaleza pueden encontrarse diversos tipos de sulfatos (de sodio, magnesio, potasio o calcio) pero también derivan de la actividad industrial. Al penetrar en el hormigón forman compuestos de gran volumen que fisuran el hormigón. Esta fisuración favorece también la acción de otros agentes agresivos.

Como se verá en párrafos subsiguientes, la actividad de los cloruros (abundantes en ambientes marinos) puede dar lugar a la corrosión de las armaduras metálicas. Éstos penetran en el hormigón, a través de fisuras o debido a su porosidad, disueltos en agua. La corrosión en las armaduras produce un aumento de volumen de las mismas que da lugar a la fisuración del hormigón. La corrosión de las armaduras se manifiesta, entre otros signos, por la aparición de manchas parduzcas.

La humedad de capilaridad puede dar lugar al transporte de algunos de estos compuestos. Se produce el tránsito de sales solubles que se encuentran en el propio hormigón o en suelos en contacto con las estructuras y cristalizan en superficie. El agua se evapora y aparece la eflorescencia en la superficie de la pieza.

4.4. Degradación del hormigón por causas de tipo físico. Puede incluirse la abrasión por erosión de sólidos disueltos en agua de lluvia, o la acción de los ciclos de hielo-deshielo, golpes, vibraciones por tráfico de vehículos, etc. Origina desgaste superficial del cemento y los áridos finos.

4.5. Degradación del hormigón por causas térmicas. El hecho de que la armadura y el hormigón experimenten conductividad térmica distinta da lugar a diferencias de expansiones en ambos materiales, lo que origina fisuraciones (Cañabate, 2005).

4.6. Degradación del hormigón debido a la corrosión de las

armaduras. Efectivamente, la corrosión puede dar lugar a pérdidas volumétricas en el hormigón. A su vez, una mala formulación del hormigón y otros factores pueden desencadenar corrosión en la armadura. En general y, a priori, puede decirse que las armaduras se encuentran protegidas dentro del hormigón. Cuando la estructura de acero, la formulación del hormigón y las condiciones medioambientales son idóneas, la corrosión no debería actuar sobre el material o, al menos, debería hacerlo muy lentamente. En el proceso de puesta en obra de la mezcla y durante la hidratación del cemento, se libera hidróxido cálcico (portlandita), sódico y potásico, que otorgan carácter básico al hormigón, situando su pH entre 12,6 y 14 (Garces, Climent y Zornoza, 2008). Con estos valores de pH, el acero de las armaduras se encuentra pasivado, es decir, recubierto con una capa de óxidos, continua y compacta, que lo mantiene protegido de la corrosión (Construmática, 2016).

Sin embargo, la corrosión de las armaduras metálicas es uno de los tipos de deterioro más frecuentes en el hormigón y puede ocasionar graves daños a la obra. Esta patología se manifiesta mediante el desprendimiento del hormigón de una forma puntual o longitudinal y la aparición de manchas parduzcas en la zona afectada [figs. 3 y 4].



Son fundamentales dos tipos de procesos en el deterioro de las armaduras metálicas: la carbonatación de los compuestos hidratados del cemento y la acción de los iones cloruro. Estos factores de deterioro se ven potenciados por el fisuramiento o la porosidad del hormigón, que permite el paso de los agentes agresores del medio ambiente hasta las armaduras.

La carbonatación suele dar lugar a una corrosión de carácter más general. Se produce por un descenso de la alcalinidad del hormigón, debido a la acción de aguas de carácter ácido o, más habitualmente, a la reacción de algunos compuestos de carácter básico del hormigón con CO_2 ambiental, que en muchos casos debe su existencia a la contaminación atmosférica. Los compuestos de carácter básico, fundamentalmente hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), de sodio Na(OH) y de potasio K(OH) , como se ha indicado, actúan como protectores del acero en condiciones estables, debido a su elevado pH. Sin embargo, cuando el CO_2 procedente de la contaminación penetra en el hormigón disuelto en agua, se produce una carbonatación de estos hidróxidos y el pH empieza a decrecer, dando como resultado un medio más ácido que produce un constante y progresivo efecto corrosivo en el acero. Otros compuestos, como los aluminatos y silicatos de calcio, también se carbonatan. La carbonatación da lugar a una menor porosidad del mortero, con lo que supone una ventaja para éste cuando no existe una armadura interna.

Puede decirse que la temperatura y concentración de CO_2 atmosférico favorecen la carbonatación, mientras que la humedad intensa o ambientes muy secos producen el efecto contrario. Los mojados periódicos reducen la carbonatación, ya que saturan los poros del hormigón e impiden el paso del CO_2 . Los valores de humedad relativa que fomentan la carbonatación se sitúan entre el 60 y 70%. La composición del hormigón influye también sobre la carbonatación. Este proceso aumenta con una menor dosificación del cemento, ya que se incrementa entonces la porosidad del material y el CO_2 penetra con mayor facilidad.

Además de este tipo de corrosión más generalizada, puede darse en el hormigón una corrosión de carácter local, debido a la

acción de un agente agresivo. En estos casos se forma una pila en la que el ánodo es la zona donde se disuelve el acero, apareciendo picaduras. Sobre todo son los iones cloruro los que dan lugar a este tipo de corrosión (Bermúdez, 2007). En presencia de éstos, la velocidad de corrosión se incrementa notablemente. La aparición de los cloruros puede derivar de la propia formulación del hormigón durante su amasado o de la presencia de la pieza en un entorno marino. La contaminación por cloruros también puede deberse a la reacción de productos derivados de la combustión del PVC con el hormigón durante los incendios (Garcés, Climent y Zornoza, 2008). La penetración de los cloruros se da en mayor medida en presencia de humedad y con ciclos alternos de sequedad-humedad.

La corrosión del acero da lugar a los productos de oxidación del material que, en algunos casos, suponen un importante incremento de volumen. Esta alteración en el material da lugar a la aparición de fisuras y disgregaciones en el hormigón.

La corrosión de las armaduras de hormigón armado se produce casi exclusivamente en ambiente húmedo, ya que con ambiente seco es muy lenta (Joisel, 1981). Esta corrosión depende en gran medida también del grosor del hormigón que las recubre. Cuanto mayor es este grosor, mejor protección tienen las armaduras. Las armaduras mal recubiertas son generalmente aquellas cercanas a la superficie, donde les afecta en mayor medida la humedad y la acción del dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno. Algunas esculturas terminan acusando esta corrosión, que se traduce, en algunos casos, en el desprendimiento de placas de hormigón (por ejemplo aparecen en el Elogio del Horizonte de Eduardo Chillida).

En general, se tiende a aprovechar al máximo la sección del hormigón con la colocación de la armadura, de modo que todo el conjunto sea activo estructuralmente. Sin embargo, como se ha indicado anteriormente, la resistencia de la armadura a la corrosión disminuye con su proximidad al exterior. Por ello, existe una normativa relativa a esta distancia acorde con la función y situación del elemento de hormigón (García, Jiménez y Morán, 2000). Así, entre las recomendaciones del Comité

Europeo del Hormigón anteriores a 1970 y que posiblemente se han empleado en obras anteriores a esta fecha se indicaba, por ejemplo, que para el hormigón armado no expuesto a acciones agresivas habría de tener un recubrimiento mínimo de 1cm. El valor máximo para el recubrimiento de armaduras se situaba en 4cm. Si se superaba esa distancia debía intercalarse una malla próxima al paramento de modo que se evitara el riesgo de fisuras.

En el caso de hormigones porosos y permeables es muy difícil evitar la corrosión de las armaduras, sobre todo si la obra está expuesta a la humedad. En estos casos pueden emplearse armaduras inoxidables.

Actualmente, existen dispositivos que actúan como detectores de las armaduras de acero dentro del hormigón mediante el empleo de campos magnéticos, de manera que pueden facilitar el control de estos elementos.

5. Proceso de conservación-restauración de las esculturas de cemento y hormigón

La primera fase de todo proceso de conservación-restauración de cualquier pieza consiste en realizar una primera inspección de la misma, que aportará datos sobre sus aspectos plásticos y conceptuales, matéricos y sobre su estado de conservación.

Es de gran utilidad el empleo de diferentes métodos de análisis para obtener datos sobre la naturaleza de la sustancia que configura la escultura y los factores que han actuado sobre su estado de conservación. Algunos de los empleados con el fin de identificar la naturaleza constitutiva del cemento y los áridos, así como para obtener datos sobre la morfología de sus partículas son: Difracción de rayos X, análisis por dispersión de energía de rayos X, espectroscopia infrarroja, espectrometría de fluorescencia de rayos X, así como microscopía electrónica de barrido.

Resulta fundamental el estudio del estado de conservación de la estructura de la obra, de la armadura concretamente, con el fin de prevenir caídas y roturas de elementos.

También es importante conocer el grado de carbonatación de la

obra. Normalmente se emplea para ello fenolftaleína en agua y alcohol. En este caso ha de tomarse una muestra. Si no se ha carbonatado, la muestra adquiere una tonalidad rosada. En cualquier caso, la realización de esta prueba requiere personal especializado.

Puede resultar muy recomendable localizar las armaduras mediante el empleo de un detector.

5.1. Actuaciones de carácter conservador-restaurador habituales

Las actuaciones pueden integrarse dentro de los siguientes apartados fundamentales:

- Restauración de fisuras.
- Reintegración volumétrica.
- Tratamiento de la corrosión de las armaduras.
- Hidrofugantes y consolidantes.
- Realcalinización.
- Eliminación de sales.
- Protección catódica

– Restauración de fisuras

-Fisuras superficiales

Algunos tipos de grietas no comprometen la estabilidad estructural y son de carácter superficial. En muchos casos su aparición se debe a los movimientos del material derivados de las fluctuaciones de humedad y temperatura. En otros, puede tratarse de grietas de retracción del material durante su fraguado. En todo caso, la existencia de fisuras puede contribuir al ataque químico de la escultura, especialmente importante cuando la obra se encuentra al aire libre, con lo que, a veces, se restauran. Esta actuación sólo será eficaz si se trata de fisuras muertas, es decir, fisuras que no se mueven. Si son vivas y no se elimina la causa que las produce su restauración no evitará que la fisura vuelva a abrirse.

En esta labor pueden emplearse cemento o resinas sintéticas. El cemento o los morteros de reparación en general podrán integrarse más en cuanto a brillo y color con el mortero

original. Entre las resinas, es habitual el empleo de resinas epoxi, aunque en este caso es fundamental evitar el oscurecimiento del mortero original y los brillos que puede dejar la resina. En algunos casos es necesario abrir en V previamente la zona de entrada de la grieta para sanear la zona.

Si la grieta se haya situada en una pieza más o menos vertical o perpendicular al suelo, la primera inyección de material se realiza a partir de la parte más baja de la grieta, realizándose subsiguientes inyecciones de material hacia las partes altas, a la vez que se aprecia como el material va rellenando huecos. Las bocas de inyección y los bordes de la grieta podrán ir tapándose con masillas especiales, de modo que puedan retirarse una vez haya curado el material. En todo caso, es fundamental evitar que se engrase o manche el mortero original con los materiales empleados.

– Fisuras estructurales.

Este tipo de deterioro puede comprometer seriamente la estabilidad e integridad de la pieza. Su aparición puede deberse a un diseño estructural deficiente que no soporta las cargas y tensiones que actúan o han actuado sobre la pieza.

Igualmente, el daño estructural puede deberse a golpes e impactos que deforman la armadura de la pieza. En algunas ocasiones, cuando la deformación de la armadura es importante, será muy complicado volver a situar el elemento en su ubicación original, lo que puede aconsejar la sustitución total o parcial del elemento deformado (de acuerdo con el autor) y reparación de la armadura.

– Fisuras con formación de placas.

En estos casos, han de limpiarse y sanearse las superficies a adherir antes de aplicar el adhesivo sobre las mismas (limpieza con brocha o cepillo, utilización de aspirador o sopladora).

– Reintegraciones volumétricas

El sustrato sobre el que se aplique el nuevo mortero ha de estar limpio y debe haberse retirado de manera mecánica todo el material deteriorado, evitando en lo posible fisurar el

material original que se encuentre en buenas condiciones. Se emplearán encofrados cuando sea necesario. También ha de limpiarse la armadura exhaustivamente. Este tipo de actuación es probablemente la más habitual y fue llevada a cabo, por ejemplo, en el Monumento a la Tolerancia de Chillida (<http://www.dedalocultura.com/tag/monumento/>). En ocasiones también se ha de retirar la armadura deteriorada y colocar una nueva, cuando la parte corroída excede en sección el 10%. La nueva armadura se ha de solapar de alguna manera con la antigua y ha de ser igual al que se reemplaza (se evita la corrosión galvánica) (Custance-Baker, 2014; Macdonald, 2003). En muchos casos, las reintegraciones volumétricas no son efectivas y se deterioran y separan del original en poco tiempo.

En la actualidad, suelen emplearse como sustancias reparadoras formulaciones comerciales epoxi, no aconsejables en grandes extensiones, cuya posible composición, con adición de cargas, puede consultarse a personal especializado. Este tipo de resinas presenta una importante resistencia a la tracción y a la compresión y una buena adherencia al hormigón y al acero. Además, tienen una baja retracción, menor que la del hormigón. Pueden emplearse también inyectadas en grietas y fisuras y en la adherencia de acero a hormigón.

Además de estas formulaciones de resina, suelen utilizarse también los morteros a base de cemento u hormigón. El empleo de este material suele primar en la mayoría de las obras donde es fundamental conectar con el lenguaje plástico de la escultura. Deben realizarse pruebas con los materiales para igualar tonos y texturas y minimizar la retracción. A veces es necesario realizar varias mezclas con diverso color y el envejecimiento puede no resultar igual al del material original con el que se configuró la escultura. En el caso de la escultura contemporánea, si se conoce la formulación del hormigón debería repetirse a fin de que el nuevo volumen se integre con el mortero original y envejezcan de manera similar, en la medida de lo posible. Aun así, puede ser difícil reproducir el mismo color del mortero.

Entre los morteros preparados, suelen ser empleados, por ejemplo:

Morteros Parrot's Mix nº 4: Mezcla de ligantes hidráulicos y arena con diversos aditivos. Existe ya de color gris pero puede modificarse su color.

Sika Minipack Mortero de Reparación: Cemento, fibras sintéticas, áridos y aditivos. De color gris. Puede modificarse su color. Excelente trabajabilidad y buena adherencia. Se utiliza con el soporte húmedo. Primero se dispone el agua y después se añade el mortero. Vida de la mezcla: 1h. Se han utilizado estos materiales, reforzados con fibras sintéticas, por ejemplo, en la restauración de elementos escultóricos de fachadas (Šahmenkoa, Aispursb y Krasnikovsa, 2015).

-Corrosión de la armadura. Una vez eliminado el hormigón, la limpieza del refuerzo metálico se realiza con cepillos metálicos, lija, etc. y se aspira el polvo resultante. A veces, como se ha indicado, se reemplaza. Es aconsejable limpiar y acondicionar también el hormigón circundante a la armadura, retirando pequeños restos fisurados.

Generalmente se aplican tres tipos de productos a fin de proteger las armaduras:

-Protectores a base de resinas epoxi: Protegen totalmente la armadura al impermeabilizar completamente su contorno. Presentan una elevada adhesión al soporte. Conviene realizar la reconstrucción volumétrica cuando la resina no ha curado completamente, a fin de garantizar la adhesión del mortero.

-Dispersión de resinas con cemento: En este tipo de materiales el cemento se encuentra embebido en la resina acrílica o epoxídica generalmente. En este caso, el aporte alcalino de cemento quedará asegurado sobre la la armadura gracias a la adhesividad de la resina. La alcalinidad aportada genera la aparición de óxido pasivo alrededor de la armadura. Conviene reconstruir volumétricamente inmediatamente después, para garantizar la adherencia de morteros posteriores. Pueden aplicarse sobre soportes húmedos, ya que se trata de resinas en emulsión acuosa.

-Aplicación de resinas cargadas con partículas de cinc. Se obtiene así un recubrimiento anticorrosivo basado en la galvanización del acero.

Para evitar la corrosión, los inhibidores de la corrosión pueden aplicarse también sobre el mortero o en forma de partículas de en los orificios, de modo que pueden migrarán hacia el interior (Macdonald, 2003).

Si la protección de la armadura se realiza de manera parcial podría formarse una pila galvánica en ella.

En el deterioro del Monumento a la Tolerancia, de Chillida (Sevilla), la acción de la humedad junto a otros factores como las micciones fueron determinantes en la aparición de corrosión en la armadura, que a su vez derivó en pérdidas volumétricas En la restauración de la obra, en el año 2009, se optó por la retirada del hormigón hasta 2,5cm por debajo de la armadura y se cepilló ésta a fin de eliminar la corrosión. Se aplicó entonces resina para mejorar la adherencia del mortero de reparación con el que se reconstruyó la obra (<http://www.europapress.es/andalucia/sevilla-00357/noticia-ayuntamiento-restaura-crucero-santa-marta-monumento-tolerancia-disenado-chillida-20090515162211.html>).

-Conservación preventiva contra la humedad y consolidantes: En ocasiones se recurre al empleo de hidrofugantes, con el fin de reducir la acción de la humedad en la pieza. En estos casos debe tenerse en cuenta el posible cambio de color o brillo derivado del empleo del producto con lo que, antes de utilizarlo, deberían realizarse pruebas o incluso consultar al autor. Algunos autores desaconsejan su empleo debido a las causas mencionadas o a que incluso su empleo puede causar un mayor deterioro de las armaduras debido a que pueden actuar de manera no conveniente respecto a la humedad en la pieza. Algunos de los productos que se estudian en la actualidad son los silanos. Igualmente, se comercializan soluciones de silicato sódico para la impermeabilización de los hormigones. Ciertos autores recomiendan el empleo de recubrimientos acrílicos para evitar la carbonatación del hormigón reforzado (Serrano y Moreno, 2006).

Los consolidantes se han utilizado sobre todo para piedra, pero ciertos autores indican que podría resultar de interés experimentar en este campo con bioconsolidantes (biosilicatos o biocarbonato) (Custance-Baker, Macdonald, 2014). Algunos investigadores, por su parte, han estudiado el comportamiento como consolidante del tetraetil ortosilicato, también en mezcla con nanopartículas de hidróxido cálcico en los cementos Portland. Estos materiales aumentan la resistencia del mortero sin variar apenas brillo y color y reduciendo la porosidad y permeabilidad del material (Barberena-Fernández, 2012).

Tras la restauración de la obra *Untitled* (1971), de Donald Judd, situada en The Glass House, New Canaan (Connecticut), tras la aplicación de un consolidante, a fin de reforzar la cohesión del material, se aplicó un hidrorrepelente para evitar los efectos perniciosos de la lluvia sobre la obra.

-Realcalinización: Es un proceso electroquímico. Consiste en hacer pasar una corriente entre la armadura y un ánodo instalado con carácter temporal. Se producen iones hidróxido en la armadura. Así, se realcaliniza el mortero y se pasiva de nuevo la armadura (Oyarzabal, 1997).

Suele emplearse en piezas que han sufrido carbonatación, a fin de proteger la armadura de la corrosión. Es un método que es considerado poco efectivo por algunos investigadores debido a que en aquellas zonas donde se consigue elevar el pH sólo puede mantenerse durante unos dos años. En cualquier caso, otros autores hablan de la validez de este tratamiento, por lo que de momento y, a la espera de futuras investigaciones, debería ser tenido en cuenta (Cailleux y otros, 2006, citado en Custance-Baker, 2014; Macdonald, 2003).

Eliminación de cloruros: También se realiza de manera electroquímica. En este caso también se emplea una corriente continua y un ánodo temporal. Mediante esta corriente los cloruros pueden ser eliminados, ya que los iones son repelidos de la armadura, que está cargada negativamente. Los iones llegan al ánodo y se eliminan en el electrolito con el cual está en contacto. (Macdonald, 2003, Sharp y otros, 2002).

Para finalizar, algunos autores incluyen entre las medidas que

protegen las armaduras su protección catódica:

Esta actuación evita la corrosión de la armadura, aunque su empleo reviste algunos problemas, como el hecho de que en la conexión de los cables se pierde algo de mortero. Además, puede ser muy visible y requiere mantenimiento. Aun así, puede ser muy recomendable su empleo en obras situadas en zonas donde se prevé que la armadura puede ser atacada por cloruros (Custance-Baker, 2014; Macdonald, 2003).

6. Conclusiones

Como ha podido comprobarse, los tipos de deterioro que pueden surgir sobre escultura pública realizada con morteros de cemento y hormigón son múltiples y derivan, sobre todo, bien de la actuación de la climatología sobre la obra, bien de la formulación del propio hormigón o bien de las actuaciones vandálicas, aunque en ocasiones se combinan todos estos factores de degradación.

Solventar estos múltiples problemas que pueden surgir en el hormigón puede dar lugar a actuaciones de carácter especialmente intervencionista que supongan la retirada de importantes cantidades de material original (hormigón, armadura), que habrá de ser sustituido. En estos casos, puede resultar ciertamente complejo que el color y aspecto general del mortero nuevo se asemeje al primigenio, especialmente si no se dispone de datos sobre su formulación.

Agradecimientos:

Proyecto financiado por la Comunidad de Madrid Proyecto Geomateriales-2 (S2013/MIT-2914)