

Análisis crítico de los factores que intervienen en la corrosión de las armaduras de hormigón

JOSE CALLEJA, Dr. en Ciencias Químicas

0. INTRODUCCION

La importancia de la corrosión metálica en general queda de manifiesto cuando se consideran los cientos de miles de toneladas de acero estructural que se destruyen anualmente en el mundo, y los miles de millones de pesetas de pérdidas que tal destrucción ocasiona.

Los diversos Congresos sobre corrosión y protección de las estructuras metálicas son bien explícitos al respecto, y en el 1.º Nacional, celebrado en Madrid, en junio de 1972, se dieron cifras estadísticas bien elocuentes.

La importancia que la corrosión de las armaduras del hormigón tiene para la edificación, para la construcción en general y para las obras públicas, no se evalúa ciertamente por el tonelaje de acero destruido, que es relativamente insignificante, sino por el volumen de elementos, estructuras y obras afectadas, y por las correspondientes implicaciones técnicas, económicas y a veces judiciales.

Los casos de destrucción o de inutilización de obras por corrosión de armaduras no constituyen, en general, una proporción elevada del volumen total de hormigón armado hecho en el mundo, pero por ser este volumen enorme, el de hormigón destruido por corrosión de armaduras es muy considerable. Por otra parte, cuando se produce corrosión, ésta y sus consecuencias suelen ser graves. Lo cual hace suponer fundadamente que la valoración en pesetas de las pérdidas anuales por corrosión de armaduras del hormigón puede llevar a cifras mundiales sorprendentes. De aquí que las medidas para evitar esas consecuencias de la corrosión deban ser, ante todo, preventivas. Sucede, como en medicina, que es siempre preferible prevenir que curar. Pero es que, además, evitar la corrosión a priori es casi siempre posible, fácil y barato; detenerla o reparar sus efectos a posteriori, casi nunca es factible, y cuando lo es, resulta muy difícil y caro. En todo caso, la solución es de las que pueden llamarse "de paños calientes". La conclusión a que esto lleva es que el constructor debe atenerse siempre a lo que pudiera llamar "código de buena práctica" para precaver y evitar en la medida de lo posible, a corto y largo plazo, la corrosión de las armaduras del hormigón que fabrica. Esto, evidentemente, cuesta a veces dinero; pero ese dinero debe considerarse como el abono de una prima de seguro contra la corrosión, puesto que ésta es, en gran parte, un fenómeno aleatorio, como lo pueda ser un accidente de carretera.

La corrosión del acero puede considerarse como “la vuelta a la naturaleza” del elemento hierro. Este se encuentra, en estado natural, en forma combinada: óxido, sulfuro, carbonato, y al sacarlo de tal estado se le comunica una energía potencial que tiende en todo momento a convertirse en actual. De aquí surge una inestabilidad permanente que amenaza al hierro y al acero de forma continua y que tiende a destruirlos, haciéndoles pasar del estado elemental al que se les ha llevado mediante los procesos siderúrgicos, al estado combinado en el que de forma natural se encuentran.

El paso de un estado a otro es favorecido, y acelerado, por condiciones ambientales propicias; éstas vienen dadas por la presencia conjunta y operante de oxígeno y de agua —aire y humedad—, ayudada a veces por factores coadyuvantes, como suelen ser las temperaturas más altas, la presencia de electrólitos, y en particular la de determinados iones, como son los cloruros y los medios ácidos, en contacto con el hierro o el acero, y la acción electrolítica de corrientes nómadas o vagabundas, procedentes de conducciones mal aisladas.

La oxidación y destrucción del hierro en presencia de aire y de humedad, o su permanencia en estado inalterado, son fenómenos electroquímicos, en el sentido de que, frente al medio ambiente, el hierro adopta siempre un potencial electrolítico de equilibrio con dicho medio. Este potencial puede ser activo o de disolución —con el que el hierro se oxida o disuelve—, o pasivo —de inactividad—, con el que el hierro se mantiene en estado metálico inalterado. El estado pasivo “natural” del hierro, en los medios que lo permiten, se debe a una finísima película de óxido, continua, adherente, impenetrable y estable, que lo recubre y protege. Cuando el medio cambia en un determinado sentido, o aparecen factores o acciones “despasivantes”, la película protectora de óxido se destruye total o parcialmente, el potencial deja de ser pasivo, y el hierro al desnudo queda activo y sujeto a ataque y corrosión.

La pasta pura de los cementos en general, y por lo tanto los morteros y hormigones hechos con estos cementos, tienen un pH elevado, comprendido entre 9,5 y 12,5 aproximadamente, es decir, proporcionan un medio alcalino o de alta basicidad. En tales condiciones se forma sobre el hierro en contacto con estos materiales la película protectora de óxido pasivante, con carácter estable. De aquí que uno de los procedimientos baratos y eficaces para proteger en determinadas circunstancias al hierro contra la corrosión, es recubrirlo de cemento. Esta protección, de carácter químico, será tanto mayor y más duradera cuanto mayor sea el pH de la pasta del cemento, y cuanto mayor sea la “reserva alcalina” de la misma, es decir, la cantidad de cal de hidrólisis que el conglomerante libere en su hidratación. Esto es así porque dicha cal de hidrólisis es la que mantiene el pH en valores altos —y por tanto la pasividad del hierro—, incluso en presencia de agentes externos disolventes o neutralizantes de la cal, como pueden ser las aguas ácidas o carbónicas agresivas, naturales o artificiales. Si la reserva alcalina es pequeña se puede agotar pronto en tales condiciones, y a partir de entonces el pH puede disminuir y comenzar la corrosión de las armaduras.

Los morteros y hormigones confieren también a las armaduras otra protección de tipo físico o mecánico. Es la que deriva del espesor, y sobre todo de la compacidad e impermeabilidad del recubrimiento. Este actúa de barrera entre el ambiente exterior y las armaduras, impidiendo en mayor o menor grado que el aire y la humedad —factores indispensables para la oxidación—, y los posibles agentes electrolíticos despasivantes, puedan penetrar hasta los hierros. En la medida en que el recubrimiento sea eficaz en este sentido, estarán protegidas las armaduras.

La presencia de compuestos tales como cloruros, sulfatos y sulfuros, y en general electrolitos ácidos o salinos en el hormigón, bien porque los contuviera alguno o algunos de los materiales de partida, bien porque deliberadamente se hayan empleado en su elaboración, o bien porque se encuentren en el medio en cuyo contacto esté el hormigón y hayan penetrado a través de su masa hasta las armaduras, junto con aire y humedad, provocan la despasivación del acero y su corrosión, generalmente intensa y rápida. Por eso ésta es mayor y más frecuente en el caso de hormigones armados expuestos a ambientes marítimos, o a aguas y terrenos salinos, o a desagües urbanos, o en ambientes y atmósferas industriales. En todos estos casos las medidas de protección preventivas deben ser extremadas al máximo.

Visto así, en exposición rápida y esquemática, por qué, cómo, cuándo, en qué medida y con qué consecuencias se puede producir el fenómeno de la corrosión de las armaduras del hormigón, cabe decir ahora, de acuerdo con la experiencia, que cuando la corrosión se produce con carácter demoledor, ello no es debido, en general, a una sola causa, aunque suela haber una principal, sino a una conjunción de varias. La lista de las posibles y más frecuentes apunta tanto al proyecto y cálculo como a los materiales y a las características del hormigón, a la ejecución, curado y conservación del mismo, y a las condiciones de servicio. Tal lista sería algo así como un “código de mala práctica”, contrario al anteriormente citado y preconizado.

Dejando a un lado el proyecto y el cálculo, en los que se deben prever la posibilidad y la probabilidad de corrosión de armaduras del hormigón en servicio, en lo que sigue se va a pasar revista a los materiales.

1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSION DE LAS ARMADURAS

1.1. Los cementos

Si la protección que la pasta cementante confiere a las armaduras depende de su pH elevado y de su gran reserva alcalina, según se ha expuesto, es evidente que los cementos más adecuados en tal sentido son los de tipo portland puros, sin adiciones de ninguna clase. Y tanto más, cuanto mayor sea el grado de saturación de cal del clínker de que proceden, lo cual es función, en general, de la categoría resistente, a corto y largo plazo, del cemento resultante.

Los cementos a base de clínker portland que contienen adiciones activas pueden seguir siendo de tipo portland, o de tipo puzolánico o siderúrgico, según la cuantía y naturaleza de la adición —puzolana natural o artificial, o escoria siderúrgica—. Dado que estas adiciones fijan cal de hidrólisis en el proceso de hidratación y endurecimiento del cemento, reducen la reserva alcalina de la pasta cementante, y en ocasiones pueden incluso dar lugar a una disminución del pH, lo cual tiende a facilitar o acentuar la corrosión del acero debida a otras causas. Así, pues, los cementos de tipo puzolánico y siderúrgico protegen a las armaduras en menor medida en que lo hacen los cementos de tipo portland puros.

Los cementos puzolánicos a base de puzolanas naturales, que en general son rocas traquíticas alcalinas, aportan a la pasta los álcalis de éstas, factor positivo desde el punto de vista de la protección de las armaduras y que compensa en cierto modo al factor negativo de la menor reserva alcalina por fijación de cal.

Por otra parte, los cementos siderúrgicos, y los puzolánicos con cenizas volantes, suelen contener sulfuros, y los siderúrgicos a veces también cloruros y otras sales, cuando las escorias de horno alto empleadas en su fabricación se granulan y templean con agua de mar. En tal caso estos cementos son portadores de iones despasivantes que pueden poner en peligro la integridad del hierro de las armaduras. Con frecuencia se dan casos en los que se producen en ellas corrosiones localizadas e intensas, debido a este motivo.

Los cementos de tipo aluminoso, a base de aluminatos cálcicos y prácticamente exentos de silicatos, dan pastas cementantes con un pH algo más bajo que las de los portland, y con una reserva alcalina mucho menor, al carecer casi de cal de hidrólisis. La protección que confieren a las armaduras es, por lo tanto, aún menor que la que dan los otros tipos de cemento.

Algunos cementos aluminosos, por las materias primas empleadas en su fabricación, pueden contener también sulfuros, lo que les coloca en la misma situación desfavorable de los cementos siderúrgicos, desde el punto de vista de la protección a las armaduras, con la agravante del menor pH y de la reserva alcalina muy escasa de sus pastas. A ello se deben los casos de corrosión registrados en diversos países, citados en la bibliografía y descritos en informes técnicos sobre el tema. Estos casos dieron lugar, en su tiempo, a medidas drásticas en los países implicados. Para subsanar estos inconvenientes se puede exigir a los cementos aluminosos —como a los siderúrgicos— un contenido máximo muy bajo de sulfuros.

Los cementos aluminosos, cuando se emplean en condiciones o en ambientes no adecuados, pueden experimentar transformaciones químicas que suelen repercutir desfavorablemente en el estado de protección de las armaduras, puesto que por cesión de agua sus pastas se hacen más permeables y los hormigones correspondientes más penetrables por agentes corrosivos. Ello exige evitar tales transformaciones, lo que a su vez implica emplear altas dosificaciones de cemento —no menores de 400 kg/m³—, relaciones agua/cemento muy bajas, —no superiores a 0,4—, y utilizar áridos adecuados exentos de compuestos micáceos ricos en álcalis, lo que supone en la mayoría de los casos eliminar de ellos por lavado la fracción menor de 0,2 mm, o de 0,5 mm. Ello requiere también extremar el curado, desde el punto de vista de la humedad, y sobre todo de la temperatura —la cual no debe rebasar los 25-30°C—, durante las primeras 24, o mejor, 48 horas.

No obstante lo que precede, no se debe desdeñar el hecho de que los cementos puzolánicos, los siderúrgicos y los propios aluminosos, en ciertas condiciones y medios son capaces de proporcionar hormigones químicamente más resistentes que los de tipo portland, frente a determinados ambientes agresivos. En la medida en que estos hormigones resistan mejor de por sí y químicamente a dichos ambientes, podrán dar a las armaduras subyacentes una mayor protección física. En esto juega un papel muy importante la calidad del hormigón (materiales, dosificación, puesta en obra, compactación y curado). Así, pues, desde el punto de vista del tipo de cemento más idóneo, según las circunstancias puede establecerse un compromiso entre la durabilidad del hormigón frente al medio y la protección que el hormigón y el propio cemento puedan dar a las armaduras.

Un fenómeno químico que puede influir de manera negativa en la protección que el hormigón normalmente confiere a las armaduras es la carbonatación de la pasta cementante, a lo largo de la vida de servicio del material. La acción del dióxido de carbono sobre la cal de hidrólisis del cemento y sobre la cal de los silicatos hidratados, transformándolas en carbonato cálcico, da por resultado la disminución del pH de 12,5 a menos de 9, y aun a 7 y menos de 7 —condiciones ácidas—, según la concentración de CO₂ en el ambiente.

A $\text{pH} > 10$ la película de óxido pasivante es estable y protege al hierro; pero a $\text{pH} < 9$ esta película es inestable, no pasiva ni protege, y como consecuencia se produce la corrosión. Esto tiene lugar cuando la carbonatación profundiza hasta alcanzar las armaduras. La carbonatación influye, pues, por la velocidad con que se produce, y por el espesor que la capa carbonatada va alcanzando a lo largo del tiempo. Este espesor —en mm— es aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo —en meses—; en la constante de proporcionalidad influye la relación agua/cemento y la resistencia del cemento a 7 días —en kp/cm^2 —.

La influencia de la carbonatación depende de la mayor o menor facilidad de difusión del CO_2 a través del hormigón, y a partir de su superficie o cara vista. A su vez, en esto intervienen las condiciones ambientales y la estructura porosa del hormigón.

La variable más influyente —pero no la única— de las condiciones ambientales es la humedad. Para que se produzca carbonatación con velocidad e intensidad apreciables se precisa una cierta película de humedad óptima sobre el hormigón, la cual no existe para humedades relativas del ambiente inferior a 30 %; tampoco para humedades relativas superiores a 80 %, o en el caso de hormigones sumergidos o francamente mojados. El hormigón a la intemperie, sometido a la acción de la lluvia, se carbonata menos rápida y profundamente que el mismo hormigón a la intemperie, pero protegido de esa lluvia. De aquí que la máxima carbonatación se produzca para humedades relativas comprendidas entre 50 y 70 %. En estas condiciones corren más peligro las armaduras por efecto de la carbonatación, y también en ambientes industriales con abundantes humos de chimeneas.

En cuanto a la estructura porosa del hormigón, en ella influye su calidad y composición —cementos, aguas, áridos (sin contar aditivos)— y sobre todo la relación agua/cemento: para relaciones a/c de 0,45:0,60:0,80 los espesores de las capas carbonatadas suelen estar en la proporción de 0,4:1:2 mm, con independencia del tiempo transcurrido. La carbonatación es también más lenta y menos intensa cuanto mayor es la cantidad de cemento en el hormigón y mejor la calidad del conglomerante. Esta calidad, por fijar ideas de algún modo, se podría cifrar en la finura, en el contenido de cal —CaO— y/o en las resistencias mecánicas a 7 días.

El tratamiento por curado húmedo, en tanto que factor determinante de la calidad del hormigón, influye tanto más favorablemente en evitar o retardar la carbonatación, cuanto más largo es. Los tratamientos cortos son tanto más perjudiciales cuanto más lentos —o menos resistentes— son los cementos.

En definitiva, la carbonatación profunda puede despasivar al hierro, y en condiciones ambientales desfavorables y con hormigones de mediana o baja calidad, provocar su oxidación con formación de herrumbre expansiva que da lugar a roturas del hormigón, dejando las armaduras al descubierto.

Hasta el momento se han tratado aspectos de la composición de los cementos, que pueden considerarse de naturaleza química. Pero hay otras características físicas que también cuentan a la hora de valorar las posibilidades de protección de aquéllos a las armaduras. Ante todo está la estabilidad: expansión y retracción. Ambas pueden afectar a la adherencia entre el acero y el hormigón, y a la fisurabilidad de éste, y guardan relación con las resistencias mecánicas y con el módulo de elasticidad de la pasta cementante. Para cada tipo de cemento influyen de forma directa en la retracción, la finura del mismo y la relación agua/cemento de la pasta. Los cementos muy finamente molidos dan pastas más retráctiles y fisurables. Una fisura, y más aún una grieta en el recubrimiento de una armadura, es una vía de acceso fácil para los agentes corrosivos: aire, humedad y electrolitos.

Por otra parte, las relaciones agua/cemento altas dan lugar a pastas, morteros y hormigones porosos y permeables y, en consecuencia, poco protectores frente a dichos agentes. En todo caso, en la compacidad e impermeabilidad de un hormigón, como factores protectores de sus armaduras, a igualdad de lo demás influye la eficacia del sistema de puesta en obra y compactación.

En cuanto a la cantidad de cemento portland en el hormigón, cuanto mayor sea, mayor es también la reserva alcalina del hormigón en conjunto, y la protección que éste da a las armaduras por tal concepto; pero mayor es también la capacidad de retracción del material, y mayor puede llegar a ser su fisuración y su permeabilidad, sobre todo si la relación agua/cemento no es muy baja. Debe existir, pues, un compromiso entre ambos aspectos, de forma que se suele dar una gama de dosificaciones más favorables, con valor individual óptimo desplazable en uno u otro sentido, según las circunstancias. Por supuesto que las dosificaciones de cemento bajas favorecen, en general, la corrosión de las armaduras del hormigón que las contiene.

1.2. Los áridos

Los áridos se consideran en general como inertes, y deben de serlo, aunque no siempre lo sean. Los áridos opalinos —que contienen sílice hidratada amorfa— son reactivos con los álcalis del cemento, y dan lugar a procesos de carácter expansivo, que debilitan o destruyen el hormigón, perjudican a la buena adherencia entre éste y el acero, y pueden causar grietas en los recubrimientos. Todo ello favorece la penetración de los agentes corrosivos y la pérdida de pasividad de las armaduras. Hay que evitarlos.

Los áridos que contienen piritas u otros sulfuros son alterables por oxidación, produciendo expansiones y roturas del hormigón. Estas hacen que se desprenda el recubrimiento en las esquinas y bordes de los elementos estructurales, dejando las armaduras al descubierto y sujetas a fuerte corrosión. Existen casos recientes en los que se ha podido comprobar tales hechos, por lo que tales áridos deben asimismo desecharse.

Hay veces en que los áridos han de ser lavados. Un caso es el de los áridos micáceos que perjudican al hormigón de cemento aluminoso, como ya se ha indicado —por los álcalis que contienen las micas— y que deben ser desposeídos de la fracción inferior a 0,2 mm, o a 0,5 mm, en la que se concentran dichos álcalis. En general, los superfinos de los áridos son perjudiciales, además, porque, al retener más agua, dan lugar a una mayor retracción hidráulica —con la consiguiente mayor fisurabilidad—, a una mayor permeabilidad y a una peor adherencia. Todo ello favorece la corrosión de las armaduras. Otro caso es el de las arenas de playa. Empleadas sin lavar, o mal lavadas, equivale a introducir el enemigo dentro del hormigón, puesto que las sales que contienen actúan como despasivantes del hierro y éste se corroe intensa y rápidamente.

Emplear áridos idóneos, o lavar los disponibles, cuando lo requieren —como tomar cualquier otra precaución anticorrosiva— no siempre es posible. A veces es difícil o caro, y en todo caso es enojoso. Pero ello no cambia las cosas: con áridos impregnados de sales se tendrá corrosión inevitablemente; más pronto o más tarde, más intensa o más atenuada, más rápida o más lenta, pero siempre. Se insiste en esto porque las posibles —y buenas— soluciones técnicas no son en todas las circunstancias soluciones económicas aceptables —o no se quiere considerarlas como tales—. Se sabe de casos, en localidades donde se construye en la zona litoral, en los que, por escasez e inadecuación de los áridos, dada la especial geología del terreno, se emplean arenas de mar o arenas con sulfuros, con la inevitable corrosión de las armaduras del hormigón, e incluso de las instalaciones y

conducciones en los edificios. Se ha propuesto en tales casos utilizar áridos adecuados de machaqueo, del interior; lavar a fondo las arenas de playa; emplear áridos de los que se nutren las centrales hormigoneras de la zona. Todo inútil: no se acepta nada de esto, por difícil o por costoso pero, eso sí, se pretende evitar la corrosión; es decir, se pretende el milagro. En tales casos hay que llegar al convencimiento de que, o se hace un hormigón todo lo caro que sea menester, o no se hace, o se ha de correr fatalmente el riesgo de la corrosión y sus consecuencias. Y si se evaluaran los costos de todo orden que pueden acarrear éstas, tal vez se llegara a la conclusión de que el hormigón bien hecho no era tan caro como en un principio parecía. El sobreprecio es el importe de la prima del seguro contra la corrosión a que se aludía al comienzo. Y hay que pensar que toda obra tiene dos precios: de recién acabada, y a n años vista.

1.3. Las aguas

Las aguas naturales, empleadas para el amasado del hormigón, deben ser idóneas. Si contienen determinadas sustancias o iones disueltos pueden, como en el caso de los áridos, introducir agentes corrosivos. De aquí que en las instrucciones para hormigones se establezcan límites máximos admisibles para el contenido de tales iones y sustancias. Estas limitaciones son: sulfatos (SO_4^{2-}) menos de 1 gramo por litro; cloruros (Cl^-) menos de 6 gramos por litro.

Por principio, no se deben emplear en el amasado del hormigón que va a ser armado aguas de mar, terrestres salinas, o contaminadas con residuos industriales, aún cuando las primeras pudieran ser aceptables para hormigón en masa.

1.4. Los aditivos

Antes de entrar en el examen crítico de los llamados “cuarto componente del hormigón”, vaya por delante que este examen va a ser objetivo y sin prejuicios: los aditivos pueden ser o no ser buenos y recomendables, según la finalidad que se persiga y las circunstancias en que se empleen. En todo caso, deben usarse con conocimiento, control y, lo que es más importante, experimentación previa en el caso concreto en que se vayan a utilizar.

Desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras del hormigón hay aditivos que directa o indirectamente pueden producirla o favorecerla, y los hay que pueden atenuarla o evitarla. Destacan entre los primeros, los llamados aceleradores del fraguado y del endurecimiento; suelen contener, como sustancia principal, cloruro cálcico. Este, como todo cloruro soluble, es un despasivante del hierro en el hormigón, y por lo tanto un agente corrosivo en potencia. Se suele utilizar en el hormigonado in situ a bajas temperaturas, en épocas o climas fríos, y en prefabricación.

Son numerosísimos los casos, algunos aparentemente anecdóticos, que se han dado y se siguen dando en el mundo de verdaderos desastres causados por el uso indiscriminado o incontrolado del cloruro cálcico: desde el empleo en la fabricación de tuberías de gran diámetro y longitud de hormigón pretensado, hasta la utilización en simples viguetas del mismo material. En muchos de estos casos, a la acción despasivante del acero en el hormigón se sumó la existencia de pilas galvánicas de corrosión por concentración, creadas por un heterogéneo reparto del aditivo. En otros casos las dosis excesivas de producto dieron lugar a muy fuertes y rápidas corrosiones generalizadas y localizadas.

¿Hay dosis tolerables y no tolerables? Es decir, ¿se puede hablar, en general, de una dosis máxima, por debajo de la cual se tenga la garantía de que no se va a producir corrosión? La respuesta es afirmativa o negativa, según opiniones. El criterio más prudente es, sin embargo, que considerada la corrosión de las armaduras como un fenómeno aleatorio sujeto a una probabilidad, en función de variables circunstanciales no conocidas, o no del todo conocidas en todos los casos, no puede establecerse un umbral de concentración de cloruro cálcico en el hormigón, por debajo del cual pueda asegurarse que no se va a producir corrosión en ninguna circunstancia. Antes bien, se debe pensar que posibilidad de corrosión la habrá siempre, y que sólo su probabilidad será una u otra, según factores y condiciones no siempre identificables y valorables. Este carácter, realista, de riesgo aleatorio que tiene la corrosión, es el que justifica los gastos en medidas preventivas que como prima de un seguro se hacen para evitarlo. Técnicamente y hasta doctrinalmente se podría apoyar tal criterio, e incluso explicar por qué dosis más altas de cloruro cálcico producen a veces escasa o menor corrosión, mientras que dosis más bajas la producen más intensa. La bibliografía técnica sobre el tema es muy abundante en ejemplos de una casuística muy completa al respecto.

Aparte de lo indicado conviene no olvidar que todos los aditivos de tipo salino, a igualdad de lo demás, contribuyen a aumentar la retracción del hormigón.

Otros aditivos protegen en cierta medida, indirectamente, a las armaduras contra la corrosión. Son todos aquéllos que, por su naturaleza y acción fluidificante o plastificante, aumentan la trabajabilidad del hormigón fresco y la compacidad del hormigón endurecido, permitiendo reducir la relación agua/cemento del primero y la porosidad y permeabilidad del segundo. Con ello contribuyen a dificultar el acceso de los agentes agresivos al contacto con las armaduras.

Por su efecto reductor de la relación agua/cemento y por otras acciones de naturaleza físico-química —los fluidificantes—, contribuyen también a disminuir la retracción y la fisuración, y con ellas la consiguiente facilidad de corrosión de las armaduras.

Atención especial requiere el hecho de que estos aditivos son, en cierta medida, retardadores del fraguado, y que para contrarrestar el efecto retardador se les suele combinar con aceleradores del tipo del cloruro cálcico; en tal caso, su acción protectora de las armaduras puede quedar anulada, o incluso sustituida por una acción contraria.

Pero entre los aditivos protectores contra la corrosión los hay —o los puede haber— de acción directa: son los inhibidores de corrosión. Estos pueden actuar sobre un hormigón armado normal o incluso que contenga agentes corrosivos. Su acción es la de mantener incólume frente a ellos la película de óxido que recubre al hierro, y por lo tanto la pasividad de éste. Deben ser compatibles con el comportamiento del cemento en los tres aspectos de fraguado, estabilidad y resistencias. Se sabe poco de ellos, por lo que en el Departamento de Química del I.E.T.c.c. se viene realizando desde hace dos años un trabajo de investigación sobre el tema que forma parte de una tesis doctoral. Por constituir materia de una de las comunicaciones presentada bajo esta ponencia, se tratará de ello con más detalle en la exposición correspondiente.

1.5. Los aceros

En los hormigones armados y pretensados la armadura, es decir el acero, sería el cuarto componente normal, con lo cual los aditivos, si los hubiera, pasarían a ser el quinto.

El fundamento de estos hormigones estriba en la eficaz colaboración entre el propio hormigón y el acero; dicha colaboración se basa en una mutua adherencia. La buena adherencia constituye una excelente protección contra la corrosión de las armaduras, mientras que una adherencia escasa o deficiente puede ser causa de dicha corrosión y, en todo caso, facilitarla y acelerarla. A su vez la corrosión puede mermar o destruir la adherencia. Esto último es así, porque los productos de corrosión tienen, en general, un volumen mayor que el que corresponde a la suma de los volúmenes de las sustancias a partir de las cuales se forman; es decir, se producen con carácter expansivo y causan presiones locales que pueden agrietar y romper el recubrimiento de hormigón. Por la misma razón son esponjosos y porosos y, no solamente no protegen al acero subyacente impidiendo o dificultando el acceso a él de los agentes corrosivos, sino que, por el contrario, pueden facilitar la penetración de éstos, dando lugar a corrosiones puntuales o localizadas, intensas más que extensas.

El estado de la superficie del acero —lisa, corrugada, con herrumbre suelta o adherida, regularmente repartida o no, y en espesor uniforme o variable—, en tanto en cuanto que es un factor determinante de la mejor o peor adherencia entre el acero y el hormigón, es también un elemento condicionante de la posibilidad y probabilidad de corrosión en unas circunstancias dadas. De aquí que se deban usar como armaduras redondos o alambres limpios, al menos de la herrumbre gruesa o mal adherida.

La naturaleza, calidad y condiciones de los aceros empleados en los hormigones armados, y sobre todo en los pretensados, tienen una gran importancia a efectos de su corrosión. Aceros con características aparentemente muy semejantes, y de los que en principio se podía esperar un comportamiento similar en circunstancias análogas, lo tienen muy diferente, según su composición y su naturaleza metalográfica.

Por otra parte, los aceros —en tensión— utilizados en el hormigón pretensado, que por lo común suelen ser trefilados y estirados en frío, son más sensibles a la corrosión que los aceros empleados en el hormigón armado. Una razón más para extremar las precauciones anticorrosivas en el caso del hormigón pretensado. Asimismo, en igualdad de condiciones, el acero dulce se corroe más que el de alta resistencia a la tracción.

Aparte de la calidad del acero, la uniformidad de ésta es una condición indispensable para el mejor comportamiento anticorrosivo de las armaduras, ya que toda heterogeneidad, tanto de ellas como del medio —hormigón—, puede ser causa de la formación de pares galvánicos de corrosión.

Respecto de las armaduras no oxidables, cabe decir que en la mayoría de los hormigones armados in situ o prefabricados no existe una ventaja especial en su empleo. Si existe, en cambio, cuando se trata de elementos de muy poco espesor, o de hormigón con aire ocluido o, mucho más específicamente, cuando, como en el caso del hormigón prefabricado, las armaduras han de ser muy superficiales para evitar roturas de piezas o elementos. Y, dentro de esta misma línea, las armaduras llamadas “de piel” para evitar la fisuración, deberían ser de acero inoxidable.

El acero inoxidable puede serlo por sí mismo, o en función de los recubrimientos, metálicos o no, de que vaya previsto. El acero inoxidable per se, más comunmente utilizado, es el austenítico normal, templado o estirado en frío, cuyo precio suele ser ocho veces el del acero dulce. Las características de adherencia de ambos al hormigón pueden ser muy diferentes en un mismo caso. De los revestimiento metálicos, el de níquel y el zinc por galvanizado electrolítico no se suelen utilizar para armaduras de hormigón, aunque el segundo es más uniforme, delgado y eficaz que el obtenido por galvanizado

en caliente, bien por inmersión o por zincado en polvo. Son estos tipos de revestimientos los que se suelen aplicar a las armaduras para hormigón, los cuales encarecen los aceros en un 30 a 50 %.

En cuanto a la eficacia del galvanizado, que en el caso de estructuras de acero aéreas o enterradas es evidente, no lo es tanto en el caso de las armaduras del hormigón. Hay las más diversas y aun contrarias opiniones al respecto, y las publicaciones sobre el tema suelen ser partidistas y poco objetivas, lo cual hace aún más difícil el enjuiciamiento. En este sentido, la experimentación comparativa, exhaustiva y a corto, mediano y largo plazo, en las condiciones reales de cada circunstancia, diría la última palabra fidedigna acerca del asunto.

En lo que concierne a los revestimientos no metálicos, los combinados de asfalto y resina epoxy no son comercialmente aplicables a las armaduras, mientras que los de fosfatos o pinturas protegen contra la corrosión a corto plazo. Los compuestos de látex y betún para la impregnación por inmersión en caliente se han empleado con cierto éxito en productos de hormigón con aire ocluido.

En cuanto a la cantidad de acero en el hormigón —kilogramos de armadura por metro cúbico—, debe ser la adecuada, sin que en ningún caso constituya un exceso inútil. Además, y dentro de lo viable, las armaduras deben presentar la menor superficie total posible, lo cual no reza, naturalmente, con la condición corrugada o no de los redondos de acero. Las ataduras y sujeciones a base de estribos deben ser lo más perfectas que pueda lograrse, pues ello tiene una importancia decisiva en cuanto a eficacia y costo de mantenimiento, en el caso de implantar un sistema de protección catódica a una obra o estructura armada o pretensada.

1.6. El hormigón

Hasta el momento no se ha mencionado la clase o naturaleza del hormigón, en relación con la corrosión de las armaduras. Es oportuno hacerlo ahora, indicando que, a igualdad de lo demás, cualquier acción corrosiva producida por agentes internos o externos con respecto al hormigón, presenta mayor importancia y gravedad en el caso del pretensado que en el del armado. Primero, por el estado de tensión de las armaduras; segundo, por el menor diámetro de estas —alambres en vez de redondos—; y tercero, por los menores espesores de recubrimiento.

El estado de tensión de los alambres tiene como consecuencia el combinar a veces la corrosión normal con otros tipos de ella más complicados y más graves —corrosión bajo tensión, intergranular o fisurante, fragilización del acero por el hidrógeno, etc.—, que dan lugar a rápidas y repetidas roturas frágiles de las armaduras. El menor diámetro de éstas facilita y anticipa tales roturas. Los recubrimientos más delgados facilitan también, en principio, el acceso de los agentes corrosivos al contacto con los alambres. Se dice en principio, porque no es menos cierto que el hormigón pretensado, prefabricado o hecho in situ, es, en general, un producto más cuidado y vigilado, en cuanto a materiales y ejecución, que el hormigón estructural armado corriente.

A propósito de los recubrimientos, y en relación con lo que precede, cabe decir que, a efectos de protección de las armaduras, es mucho más eficaz un recubrimiento compacto, impermeable y adherente, que un recubrimiento grueso. Por esta razón, en los hormigo-

nes pretensados de gran calidad, hechos en taller, con materiales, ejecución y control muy cuidados y vigilados, se alcanzan grados de compacidad, tales que permiten espesores de recubrimiento bastante menores que en el caso del hormigón armado; aun a pesar de que el estado de tensión de los alambres y su menor diámetro facilitan la corrosión acelerada y la rotura, cuando la acción corrosiva se produce, tal como se acaba de indicar.

La capacidad de fisuración del hormigón es otra característica de la que depende la posible corrosión de las armaduras.

La condición del pretensado se opone a la fisuración y a la accesibilidad que ésta pudiera proporcionar a los agentes corrosivos.

En el caso del pretensado, en que la capacidad de fisuración suele figurar como variable de proyecto, la fisurabilidad debe estar en razón inversa de las condiciones corrosivas del medio. Y, en todo caso, debe existir un acuerdo entre el espesor del recubrimiento y la probabilidad de fisuración, así como entre el número y tamaño —longitud, anchura y profundidad— de las fisuras, el grosor del recubrimiento y la agresividad del ambiente.

El tratar de compaginar un espesor de recubrimiento grueso de las armaduras principales en el caso del hormigón armado, con una menor retracción superficial, a base de las llamadas “armaduras de piel”, con objeto de evitar la corrosión, parece ser dudosamente operante a la larga, puesto que si estas armaduras se corroen y el recubrimiento suplementario se desprende, las nuevas circunstancias suelen ser peores para las armaduras internas, de lo que serían en ausencia de tal arbitrio.

El riesgo de fisuración en general se previene, en parte, mediante el empleo de aditivos y/o cementos idóneos, y dosificando estos últimos de forma no excesiva, como ya se ha indicado anteriormente. Los cementos deben elegirse de tal manera que sean lo más parecidos posible a los que en otros países se llaman “de expansión controlada” o de “retracción compensada”.

Como consecuencia de lo expuesto cabe añadir que todas cuantas precauciones son necesarias para evitar la corrosión de las armaduras en el hormigón armado, y más, deben adoptarse y extremarse en el caso del hormigón pretensado.

1.7. La ejecución

De poco sirve tener un buen paño, si se corta mal el traje. Con excelentes materiales idóneos y con dosificaciones bien estudiadas, sólo se consiguen resultados satisfactorios si todo ello va acompañado de una buena ejecución del hormigón y de un riguroso control de la misma.

Además de compacto e impermeable, para proteger debidamente a las armaduras el hormigón debe ser homogéneo al máximo. Homogéneo en sí mismo, y en todos y cada uno de sus materiales. Toda heterogeneidad —no sólo producida por un desigual reparto de un

aditivo, o debida a falta de uniformidad en la calidad de los aceros, como se mencionaba antes sino de cualquier otro tipo, puede ser, como en los casos citados, origen de pilas o elementos galvánicos y asiento de corrosión.

Así, pues, los cambios de áridos, o de cemento, o de dosificación, se deben evitar al máximo, y en todo caso hay que tenerlos en cuenta, a efectos de corrosión de armaduras, con objeto de tomar, si procede, medidas compensatorias. Del mismo modo, en el transporte del hormigón, en su vertido, en su puesta en obra y en la compactación, se debe evitar toda segregación o sedimentación de materiales y, en lo posible, las exudaciones o rezumados, y las pérdidas de lechada a través de encofrados poco estancos. Hay que procurar que no se produzcan coqueras, sobre todo en contacto con las armaduras o en las proximidades de ellas.

Todo cuanto precede ha tenido por objeto poner de relieve la influencia que los diversos materiales constitutivos del hormigón, y sus características, pueden tener en favor o en contra de un aceptable comportamiento anticorrosivo de las armaduras, tanto del armado como del pretensado. Simultáneamente se ha intentado señalar una serie de reglas o preceptos bien conocidos de todos, para conseguir un tal comportamiento, a base de lo que se pudiera llamar acción preventiva. Reglas y preceptos que, bien expuestos, ordenados y completados, pudieran constituir el punto de partida de un código de buena práctica para la protección preventiva contra la corrosión de las armaduras del hormigón. La medida en que se haya conseguido será un índice del acierto o no en el enfoque y exposición del tema.