

INTRODUCCION A LA DURABILIDAD y PATOLOGÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO

Traversa, L.P.^(1,2), Villagrán Zaccardi, Y.A.^(1,3)

(1) LEMIT - 52 entre 121 y 122 s/n 1900 La Plata – Tel. +54 221 4831141 - direccion@lemit.gov.ar

(2) CICPBA; (3) CONICET

RESUMEN

El hormigón como material estructural brinda amplias posibilidades de diseño. Es un material con ventajas económicas, técnicas y durables por sobre otros materiales estructurales. Si bien la durabilidad del hormigón armado es prolongada, esta circunstancia muchas veces hace ignorar la necesidad de tareas de mantenimiento adecuadas y periódicas. Son varias las causantes posibles para el deterioro del hormigón armado. Existen mecanismos de degradación físicos, químicos, electroquímicos y biológicos. Estos dependerán del ambiente y las condiciones de exposición. En este trabajo se desarrollan brevemente los mecanismos de degradación del hormigón armado, y se hace hincapié en los parámetros que deben ser tenidos en cuenta para preservar la funcionalidad de las estructuras con interés patrimonial.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material constituido básicamente por agregados y pasta de cemento pórtland. Eventualmente puede incorporar aditivos químicos, adiciones minerales activas, fibras metálicas o de polipropileno, etc. En la actualidad, los cementos también incorporan distintas adiciones, por ejemplo, escoria granulada de alto horno, filler calcáreo, puzolanas.

Los agregados son, en la mayoría de los casos, materiales originados en la trituración (natural o artificial) de rocas y habitualmente se dividen en dos fracciones: agregado grueso y agregado fino (arena). También existen agregados livianos y pesados (naturales o artificiales), que dan origen a hormigones de menor o mayor peso por unidad de volumen para usos específicos. La pasta de cemento, aglomerante del hormigón, está formada por cemento y agua. Agregados, cemento y agua se mezclan para constituir una masa plástica y trabajable, que permite ser moldeada de acuerdo a la forma elegida, que luego endurece, desarrolla resistencia y se constituye en un material poroso (Fig. 1).

El cemento y el agua de mezclado se combinan químicamente por un proceso denominado hidratación, del cual resulta el fraguado y endurecimiento gradual del hormigón. La hidratación continúa sólo bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura, originando una estructura con menor volumen de poros y mayor segmentación de los capilares, incrementando consecuentemente la resistencia mecánica del hormigón y la durabilidad.

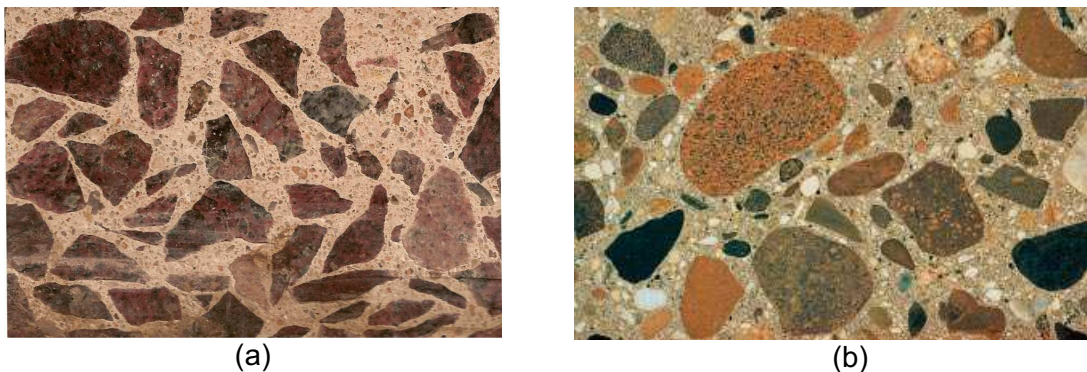


Figura 1. Cortes de hormigón, (a) elaborado con piedra granítica partida, y (b) con rodados. En ambos casos se observan poros y microporos, como así también la zona de interface agregado-pasta.

La palabra "hormigón" aparece citada por primera vez en el año 1788, en el Diccionario de las Nobles Artes para la Instrucción de Aficionados de España, definiéndolo como "Argamasa compuesta de piedrecillas menudas, cal y betún que dura infinito". Es importante esta definición, ya que desde ese momento se incorpora implícitamente el concepto de durabilidad del material.

El hormigón presenta una dualidad en lo que respecta a su comportamiento resistente. La resistencia de rotura a compresión es muy superior a la resistencia a tracción, con relaciones promedio del orden de 10. Esta situación hace que el hormigón sea ideal para soportar esfuerzos de compresión y presente una cierta deficiencia en lo que respecta a los esfuerzos de tracción. Se desarrolla, entonces, el hormigón armado (Fig. 2), material compuesto de hormigón reforzado con armaduras metálicas que absorben, cuando están convenientemente dispuestas, los esfuerzos de tracción que el hormigón por sí solo no puede resistir.

Desde un amplio marco teórico dado por muchos experimentos y experiencia práctica, se han formulado leyes que permiten calcular las dimensiones y cuantías de los elementos de hormigón armado para soportar cargas, con adecuados niveles de seguridad. Las propiedades fundamentales que permiten al hormigón y al acero actuar en combinación son la adherencia entre ambos materiales, de modo que se pueden transmitir los esfuerzos sin dar lugar al deslizamiento de la barra, y por otro lado a la protección contra la corrosión de las barras que brinda la alcalinidad del hormigón ($\text{pH} \approx 13$).



Figura 2. Estructura en hormigón armado siguiendo lineamientos de la construcción en perfilería metálica. Pacific Coast Borax Company, Alameda, California, 1893.

El hormigón y el hormigón armado particularmente han tenido su mayor desarrollo a fines del siglo XIX y ha sido el material que ha posibilitado grandes desarrollos de la ingeniería y la arquitectura del siglo XX (Fig. 3). Los nuevos desarrollos vinculados con este material, en especial, la introducción de aditivos químicos de última generación a las mezclas, hacen prever que en el siglo XXI se siga empleando el hormigón para las obras de arquitectura e infraestructura.

Entre las obras singulares realizadas con hormigón armado, debe mencionarse el primer edificio construido por Auguste Perret, en París. Las obras de Perret, muestran la necesidad de encontrar una estética propia para el nuevo material, siendo los principios impulsados por Le Corbusier, los exaltadores de la estética-funcional que ya había sido introducida por los ingenieros. El nuevo material se mimetizó, entonces, con la esencia del movimiento moderno, que resulta imposible de pensar sin la existencia del hormigón armado. El Ingeniero Freyssinet, pionero y considerado el principal impulsor del pretensado en las estructuras de hormigón, realiza por esos años sus primeras experiencias.



Figura 3. Edificio de la Calle Raynouard (A. Perret), París, 1930; y Casa Curuchet (Le Corbusier), La Plata, 1949-1953.

DURABILIDAD DE MATERIALES Y VIDA ÚTIL DE ESTRUCTURAS

El envejecimiento, entendido como el deterioro de una o todas las propiedades del material, es un proceso natural e inevitable, debido a la evolución natural hacia formas más estables. Desde el punto de vista del empleo de los materiales, el principal problema no es el deterioro en sí, sino su velocidad. Para que el material resulte económicamente viable, esta velocidad debe implicar tiempos menores de alteración que la vida útil de la estructura de la cual forma parte.

El concepto antes citado entra en contradicción con la creencia que el hormigón tiene una duración ilimitada. Esta creencia nos llega desde el Imperio Romano, donde se empleó en estructuras un material compuesto por cenizas volcánicas, cal, piedra y agua, existiendo hasta nuestros días ejemplos dignos de mencionar como el Panteón (27 AC) (Fig. 4), ejecutado en hormigón liviano, entre otras.

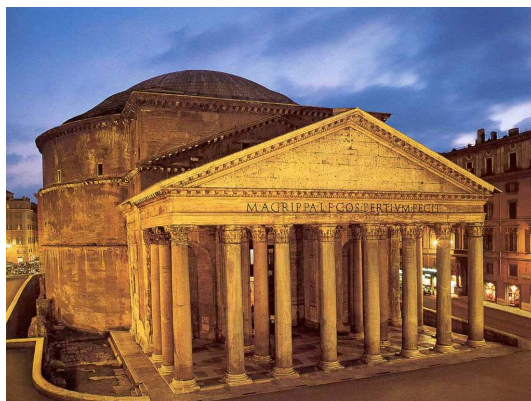


Figura 4. Panteón Romano

ESQUEMA GENERAL DE DEGRADACIÓN QUÍMICA Y ELECTROQUÍMICA

El modelo que esquematiza los procesos de degradación del hormigón armado incluye dos periodos diferenciados:

- Período de iniciación: tiempo que tardan en ponerse en contacto las sustancias agresivas y reactivas. En algunas reacciones, el tiempo necesario para su manifestación es elevado ya que las velocidades de transporte de las sustancias agresivas en el hormigón son relativamente lentas, dependiendo directamente del tipo de sustancia, del diámetro y conectividad de la red de poros capilares, de la temperatura y del contenido de humedad.
- Período de propagación: tiempo durante el cual se producen las reacciones, cuyos resultados pueden llegar a un deterioro inaceptable para la seguridad, funcionalidad o estética de la estructura. En la mayoría de los procesos de degradación, y en particular en los químicos, las temperaturas elevadas aceleran el proceso, pudiendo existir otros factores que modifican positivamente o negativamente la velocidad de degradación.

El hormigón es un material poroso, con vías de acceso abiertas al ingreso dentro de su masa de sustancias que están en contacto, y también, naturalmente, al egreso desde su masa al exterior de sustancias en condiciones de recorrer los poros y capilares en sentido inverso. El ingreso y circulación de materia en el hormigón se produce por distintos mecanismos (Fig. 5): por permeabilidad, es decir fluidos sometidos a una presión, por absorción capilar (capilaridad), por difusión (diferencia de concentraciones).

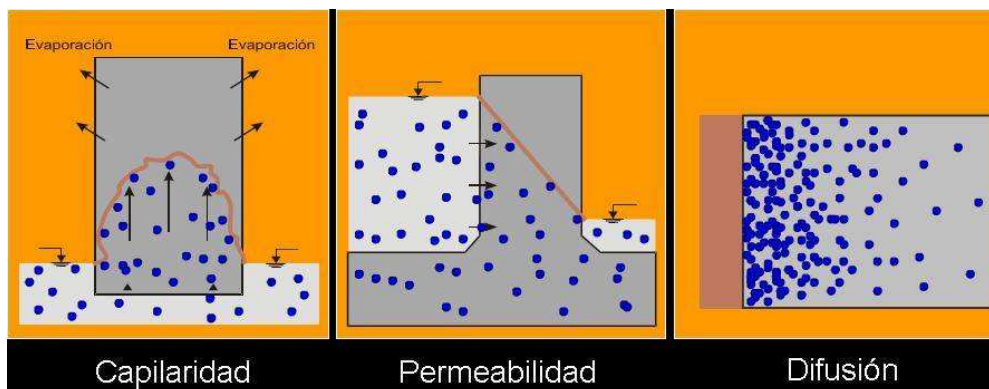


Figura 5. Mecanismos de Transporte: capilaridad, permeabilidad y difusión.

Si un líquido se encuentra en contacto con hormigón no saturado, las diferencias de humedad pueden dar lugar a la aparición de tensión capilar y con ella, al movimiento de líquido hacia el interior de la masa del hormigón por absorción capilar. En esta situación, pueden arrastrarse sales contenidas en suelos húmedos o apenas en contacto. Resulta de sumo interés respecto a la durabilidad de estructura bajo ciclos de mojado y secado.

También puede originarse el ingreso de sustancias agresivas disueltas en la solución de poro del hormigón por difusión debido a una diferencia de concentración. Este mecanismo se manifiesta, por ejemplo, en atmósferas con cloruro como lo es la zona marina.

La permeabilidad del hormigón se ve afectada por varios factores. El pasaje de agua por la masa del hormigón disuelve hidróxidos, que pueden combinarse con el dióxido de carbono del aire y depositarse en forma de carbonatos (eflorescencias). Si se desea obtener hormigones de baja permeabilidad es esencial trabajar con bajas razones agua/cemento (a/c). Muchos otros factores afectan del mismo modo a la porosidad del hormigón (tamaño máximo de agregado, adiciones minerales, grado de hidratación, finura de la arena, fisuración, carbonatación).

Respecto a la hidratación, el factor a tener en cuenta es el curado (manteniendo una alta humedad y temperatura templada), que permita la reducción del diámetro de los capilares por parte de los productos de hidratación, que van ocupando los espacios vacíos y disminuyendo la conectividad de los mismos.

En resumen, se puede plantear que los mayores contenidos unitarios de agua y las mayores razones a/c producen hormigones más porosos, lo cual significa una mayor absorción y permeabilidad. En determinadas condiciones desfavorables, como en el caso de bajas temperaturas (congelación del agua), o cuando la obra está en contacto con sustancias con agresividad química o físico-química, puede significar una mayor facilidad para el ataque al hormigón y, por consiguiente, el deterioro de la estructura.

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS PROCESOS QUÍMICOS Y ELECTROQUÍMICOS DE DEGRADACIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO.

Las reacciones químicas que producen la degradación del hormigón, como así también las electroquímicas que alteran las barras empotradas son conocidas, existiendo tecnologías para atenuarlas o evitarlas. A continuación se realiza una descripción general de los principales procesos de degradación, que pueden tener importancias relativas según la ubicación o emplazamiento de la estructura, uso, accidentes.

Alteración por ataques ácidos

Esta forma de degradación del hormigón, a través de la disolución de los compuestos hidratados del cemento pórtland (Fig. 6), se observa particularmente en estructuras ubicadas en ambientes industriales en contacto con ácidos. Esta situación es sumamente desfavorable en los casos en que la sustancia agresiva fluye y se renueva constantemente, combinándose efectos convectivos y erosivos. El hormigón es naturalmente alterado por sustancias ácidas, de manera que la única solución tecnológica posible es su protección mediante membranas o revestimientos resistentes a los ácidos.

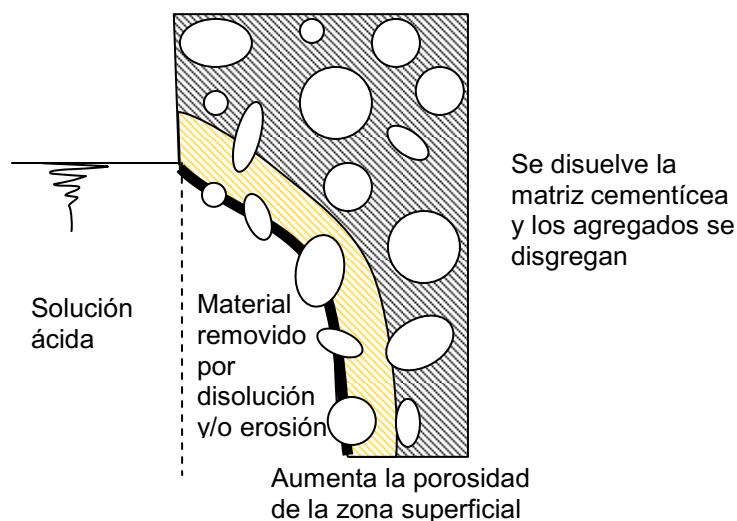


Figura 6. Esquema de Ataque por Ácidos

Biodegradación Liquénica

Se ha detectado la acción de los ácidos orgánicos secretados por diversas especies de líquenes que colonizan las superficies carbonatadas del hormigón. Los líquenes secretan ácido oxálico como producto del metabolismo secundario, que se combina con el calcio para dar como resultado oxalato de calcio. Además, los líquenes degradan físicamente la superficie colonizada, debido al crecimiento del talo dentro del material cementíceo, y frente a ciclos de mojado y secado con agua de lluvia, se originan tensiones de tracción en el material, con la subsecuente fisuración y/o desprendimientos de pequeñas láminas. Entonces, puede plantearse que las colonizaciones liquénicas son perjudiciales principalmente en la estética de las superficies colonizadas por las pátinas y manchas irregulares que originan, pero también por alteraciones químicas y mecánicas.

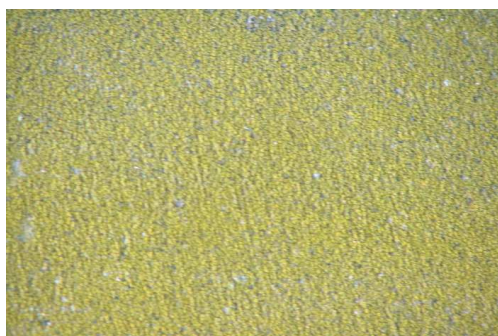


Figura 7: Vivienda colonizada por Caloplaca Citrina

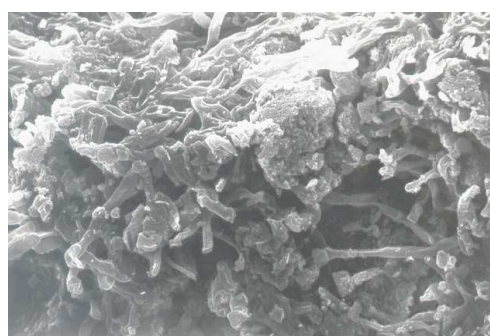


Figura 8: Imagen de microscopio electrónico de barrido de Caloplaca Citrina

Alteraciones debidas al ataque por sulfato

El sulfato es una sustancia agresiva existente en aguas y suelos de contacto. Reacciona con el compuesto aluminato del cemento pòrtland hidratado, originando principalmente etringita y en menor medida, yeso. Ambos compuestos expansivos.

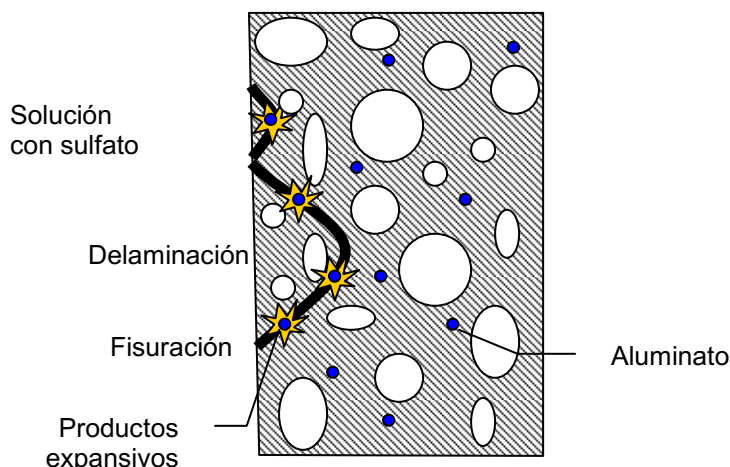


Figura 9. Esquema de ataque por sulfato

La experiencia indica que un hormigón compacto sólo sufre efectos superficiales mientras que si es poroso el efecto destructivo se produce en toda la masa con ablandamiento y desintegración superficial acompañados por expansión y reducción de resistencia, ya que los sulfatos por alguno de los mecanismos de ingreso pueden penetrar profundamente en el hormigón.

En el caso de los hormigones porosos, las aguas sulfatadas pueden ingresar a la masa de hormigón y depositar allí sus sales por evaporación del agua, si el hormigón está sometido a efectos alternados de mojado y secado. El aumento de volumen de los cristales, producido por los mencionados ciclos puede eventualmente llenar los poros del hormigón y desarrollar presiones suficientes para producir la desintegración de la masa.

Sin embargo, desde hace muchos años, el tema es conocido y se han empleado técnicas para evitar o disminuir el ataque y sus consecuencias. En especial se han utilizado hormigones impermeables (bajas razones a/c) con el uso de cementos de bajo contenido de aluminato tricálcico. Existen diques y canales construidos en suelos sulfatados desde hace más de 50 años con comportamiento satisfactorio empleando adiciones minerales activas naturales. En los últimos años no se han reportado estructuras afectadas por esta patología, con excepción de algunas defensas costeras en las cuales se han visualizado alteraciones por ciclos de mojado y secado (destrucción física del material al cristalizarse el sulfato).

Reacción álcali-sílice (RAS)

En la mayoría de los casos de RAS, las sustancias reactivas y agresivas se encuentran dentro del hormigón, y solamente es necesaria la presencia de agua y tiempo para que ambas se pongan en contacto y reaccionen. En algunos pocos casos, la sustancia agresiva ingresa desde el exterior, por ejemplo en estructuras en contacto con agua de mar, incrementando el contenido de álcalis que aporte el cemento Pórtland.

En Argentina existen amplias áreas productoras o proveedoras de agregados para hormigón en los que se ha detectado la presencia de sílice amorfa (agregados de reacción rápida), o cuarzo tensionado (de reacción lenta) (Tabla 1). Además, las fábricas de cemento pórtland elaboran productos con contenidos altos de álcalis, si bien existen algunas que producen cementos pórtland con bajo contenido de álcalis.

Por lo expuesto, son muchas las estructuras que se han visto afectadas a lo largo de su vida útil por la RAS (Fig. 10). En particular pueden mencionarse diques, acueductos, pavimentos, pistas de aeropuertos. En 1950, se informa sobre la primera estructura afectada (pavimento elaborado con arena natural con calcedonia) y a lo largo de los últimos años se han reportado numerosos ejemplos significativos.

Tabla 1. Rocas y componentes mineralógicos con antecedentes de RAS en Argentina.

Tipo de roca	Componentes mineralógicos	Zona o Provincia
Basalto Tholeítico	Vidrio volcánico	Zona Mesopotámica
Arenas y gravas de los Ríos Paraná y Uruguay	Limonitas, areniscas, calcedonia, ópalo	
Areniscas síliceas	Ópalo y Calcedonia	Zona Chaqueña
Arenas y gravas de Río	Areniscas y limonitas	Zona Noroeste
Rocas graníticas y rodados del Río Dulce	Sílice modificada vidrio volcánico	Santiago del Estero
Arenas y gravas de Río	Areniscas y limonitas	Zona de Cuyo
Gneiss	Cuarzo tensionado	Provincia de Córdoba
Calizas	Carbonatos con sílice amorfa	
Calizas	Carbonatos con sílice amorfa	Provincia de Buenos Aires
Dolomitas	Carbonatos	
Rocas graníticas	Cuarzo tensionado	
Rocas metacuarcíticas	Cuarzo tensionado	
Gravas y arenas de río	Cuarzo tensionado	
Arenas de mar	Calcedonia, chert, ópalo, vidrio volcánico	Costa de Buenos Aires, Río Negro, Chubut, Santa Cruz
Ignimbrita	Vidrio volcánico	La Pampa
Arena y gravas de ríos patagónicos	Vidrio volcánico, cuarzo tensionado	Zona Patagónica
Arenas y gravas de ríos y glaciares	Vidrio volcánico, cuarzo tensionado	
Riolitas	Sílice microcristalina, calcedonia y vidrio volcánico	

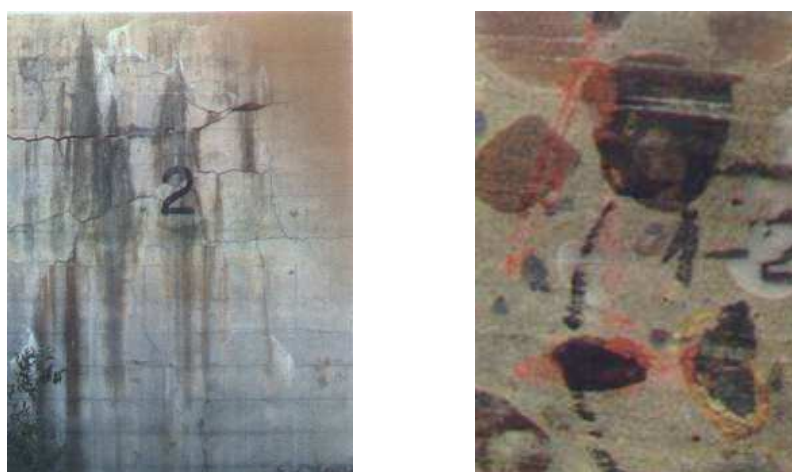


Figura 10. Detalle de una estructura afectada por RAS, debido a la presencia de ópalo y calcedonia (Edad: 10 años).

Congelación y Deshielo

En estructuras localizadas en zonas húmedas y frías, se producen ciclos de congelación y deshielo, ocasionando tensiones internas en el hormigón húmedo. En estos casos, la dosificación de hormigones requiere un estudio adecuado y el uso de técnicas para que su comportamiento permita una vida útil prolongada de la estructura con bajos costos de mantenimiento. El efecto destructivo del proceso de congelación y deshielo sólo existe cuando se encuentra agua libre en cantidad suficiente (del orden del 90% del volumen de vacíos) en los poros y capilares del hormigón (Fig. 11).

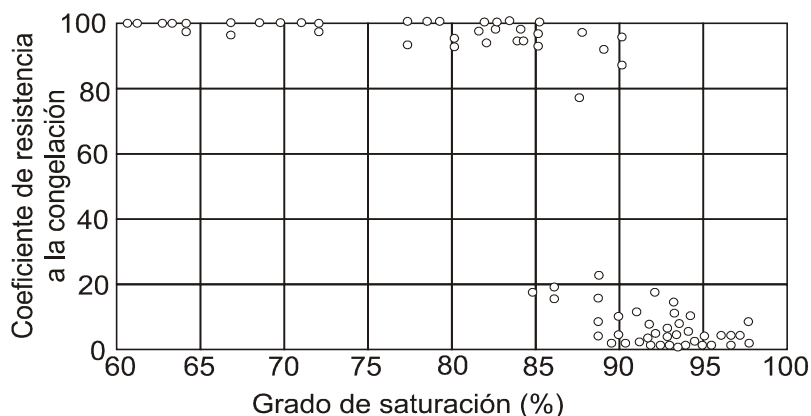


Figura 11. Influencia de la saturación del hormigón en su resistencia a la congelación

El aumento de volumen debido a la transformación del agua en hielo provoca un crecimiento de la presión hidrostática del agua libre restante, que ejerce sobre las paredes de los capilares tensiones más fuertes cuanto más intenso es el frío. La rotura se produce, entonces, cuando el esfuerzo ejercido es superior a la resistencia a tracción de la pasta.

El aire intencionalmente incorporado (introducido bajo la forma de burbujas de 10 a 100µm de diámetro) actúa como vaso de expansión y limita la presión hidrostática. Estas cavidades suplementarias deben estar adecuadamente repartidas en la masa de la pasta, siendo eficaces cuando su volumen supera el 4% del volumen del hormigón y la separación entre las burbujas es menor de 200µm.

El aire intencionalmente incorporado aumenta la durabilidad del hormigón endurecido, pero no protege al hormigón fresco contra la congelación temprana, siendo la única solución proteger el hormigón contra las bajas temperaturas mientras esté fresco. Es aconsejable alcanzar resistencia mínimas de 12-13 MPa para soportar los efectos de la congelación. Para ello, se puede utilizar cemento de alta resistencia inicial o aditivos químicos.

Acciones provocadas por efectos del mojado y secado

Los cambios de volumen del hormigón originados en variaciones de su contenido de humedad constituyen una de las causas más frecuentes de fisuración de las estructuras, especialmente de aquellas que tienen grandes superficies expuestas a la intemperie. Estas fisuras pueden alterar el comportamiento estructural y afectan la durabilidad, ya que son vías de ingreso para sustancias agresivas al hormigón.

Las variaciones de volumen, especialmente la contracción por secado, producen diversos efectos perjudiciales. Si existen restricciones, se produce fisuración. En efecto, poco relevante es tomar precauciones para disminuir el volumen de poro y capilares, si durante la colocación del hormigón se forman fisuras que permiten el fácil acceso del agua y sustancias agresivas.

Además, los esfuerzos diferenciales producidos por diferencias del contenido de humedad entre distintas porciones de la estructura o como consecuencia de variaciones diferenciales de volumen de los materiales componentes del hormigón, tenderán a destruir la estructura interna y la adherencia entre pasta y agregados.

Las causas del fenómeno de contracción y expansión pueden interpretarse de manera sencilla si se recuerda que el gel de cemento endurecido tiene una estructura porosa y aumenta de volumen cuando absorbe agua y se contrae al perderla. Las rocas que se emplean como agregados también tienen, aunque en mucho menor grado, cambios volumétricos al modificarse el contenido de humedad. En consecuencia, los cambios de volumen del hormigón resultarán de la suma de sus componentes.

Efectos Térmicos

Como la mayoría de los materiales de construcción, el hormigón varía de volumen en función de la temperatura. En promedio su coeficiente de dilatación térmica puede estimarse en $11 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Esto significa una gran tensión si existen restricciones de deformación. El problema es de importancia en el caso de chimeneas y recipientes industriales que han de estar sometidos permanentemente a temperaturas variables.

Otro deterioro debido a efectos térmicos es el que pueden causar incendios accidentales. El hormigón no es combustible, pero la matriz se deshidrata a grandes temperaturas y pierde cohesión. Además, durante un incendio se producen fisuras y cambios mineralógicos en los agregados. La fisuración también se ve acrecentada por el choque térmico del agua utilizada para la extinción del foco.

Corrosión de armaduras

El hormigón confiere a las barras de acero empotradas una protección de doble naturaleza: por un lado es una barrera física que la separa del medio ambiente y por otro, una barrera química que permite formar una película pasiva sobre su superficie (capa de óxidos muy adherente y compacta). Esta solución acuosa contiene álcalis, a los que se debe su alta alcalinidad. Inicialmente se consideró que el hidróxido de calcio ($\text{pH} \sim 12.5$) era el componente que originaba esa alcalinidad; sin embargo, se ha demostrado que el pH del líquido de poros alcanza valores entre 13 y 14, lo cual se debe, fundamentalmente, a la presencia de hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. La cantidad relativa de cada uno de esos iones depende fundamentalmente de la composición química y grado de hidratación del cemento, empleo de adiciones minerales y de la relación agua/cemento.

La película pasiva protege a las armaduras frente a la corrosión, incluso en presencia de humedad y oxígeno. Sin embargo, esta película puede destruirse localmente o en toda la superficie de la barra debido a: disminución de la alcalinidad por carbonatación, lixiviación de hidróxido de calcio y de álcalis por circulación de agua en juntas de construcción, fisuras o sectores con hormigón de mala calidad (oquedades, alta relación agua/cemento), o la

presencia de cloruro en una determinada concentración crítica (Fig. 12). Como consecuencia de alguno de los factores antes mencionados, la barra en el hormigón comenzará a corroerse siempre que exista alta humedad y disponibilidad de oxígeno (Fig. 13).

La disponibilidad de oxígeno en la interfase hormigón/armadura es un factor que puede controlar la velocidad de corrosión. Esta disponibilidad disminuye sensiblemente cuando los poros capilares están saturados, limitando la velocidad de corrosión en armaduras activas.

Por lo tanto, la electroquímica del proceso requiere por un lado un cierto contenido de humedad para disponer del electrolito conformado por la solución de poro, y por otro que ese contenido de humedad no alcance al grado de saturación del hormigón para no limitar la disponibilidad de oxígeno para formar la herrumbre.

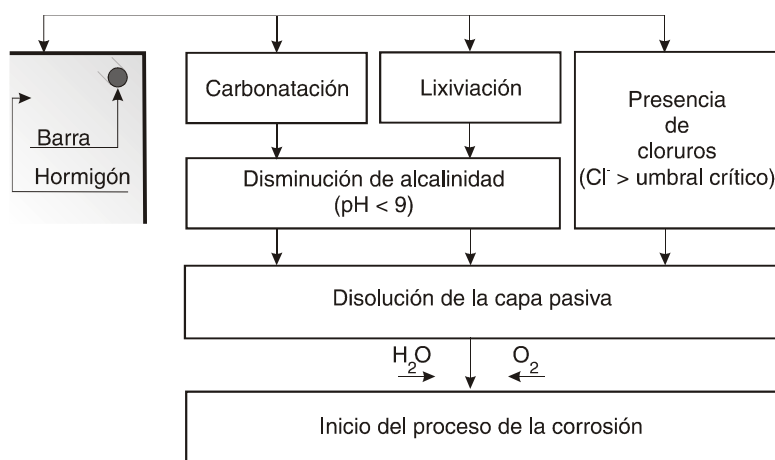


Figura 12. Esquema del proceso de corrosión



Figura 13. Desprendimientos y disminución de sección por corrosión en puente vial.

a) Carbonatación

Se ha determinado experimentalmente que el espesor carbonatado es función directa de las características intrínsecas del hormigón de recubrimiento, en particular de su red de poros capilares y del tiempo de exposición. La evolución de la profundidad de carbonatación es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. De esta forma, los incrementos de profundidad son menores con el transcurso del tiempo.

Algunas evaluaciones realizadas en estructuras expuestas en atmósferas extremadamente agresivas (alta temperatura, baja humedad relativa y cloruro en el ambiente), confirman que el espesor carbonatado es inversamente proporcional a la resistencia a compresión del hormigón. Esto resulta lógico teniendo en cuenta que ambas propiedades son función de la estructura porosa del hormigón. En las mismas experiencias, también, se han verificado diferencias significativas entre los espesores carbonatados medidos en hormigones ubicados en el interior y exterior de las estructuras. En estos casos el espesor está relacionado por la cantidad de CO_2 existente en las atmósferas en contacto y por la presencia de humedad del lugar.

La carbonatación modifica significativamente el volumen de poro del hormigón. Experiencias de laboratorio indican reducciones de hasta un 38% en el volumen de poro en los hormigones más sensibles como son los de altas razones agua/cemento y curados al aire.

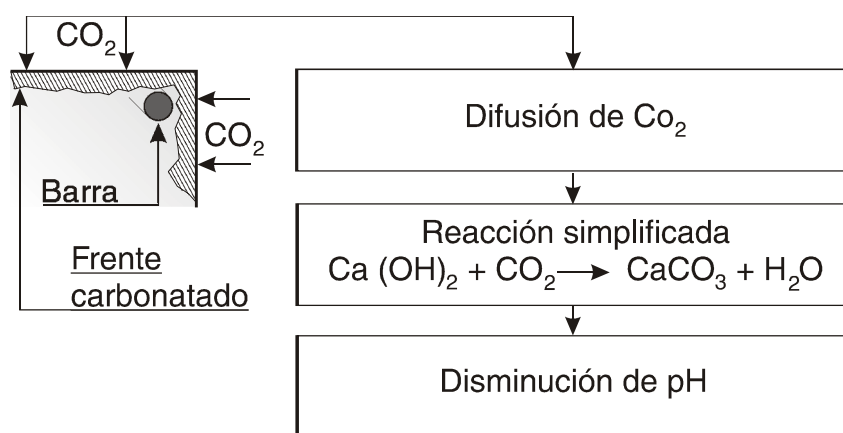


Figura 14. Esquema del proceso de carbonatación.



Figura 15. Fisuración por corrosión por carbonatación en hormigón de baja resistencia.

b) Cloruro

Si en las cercanías de la barra la cantidad de cloruro en el líquido de poros supera una determinada concentración denominada *umbral crítico*, la película pasiva formada sobre la superficie del metal se altera. Esta alteración da origen a la formación de una celda electroquímica en la cual el área alterada actúa como ánodo, iniciándose el proceso de corrosión.

El cloruro puede incorporarse al hormigón con los materiales componentes y/o por procesos de difusión, permeabilidad o capilaridad, cuando el material se encuentra expuesto a atmósferas, aguas o suelos húmedos que contengan cloruro. El porcentaje de cloruro que incorporan los materiales componentes del hormigón, en particular los agregados y aditivos, es fácilmente controlado. En cambio, la velocidad a la que el cloruro ingresa desde el ambiente al hormigón endurecido puede ser controlado solamente actuando sobre la porosidad y la conectividad de poro del hormigón de recubrimiento, o empleando alternativas de protección adicionales (membranas, revestimientos).

Las arenas de playas o médanos son comúnmente empleadas en la costa atlántica bonaerense en la ejecución de hormigones. Estas arenas presentan contenidos variables de cloruro, que dependen fundamentalmente del lugar de extracción. Previo a su uso, el contenido de cloruro en las arenas debe ser eliminado o disminuido mediante lavado. Esta técnica no siempre se ha empleado en las obras ejecutadas en la costa bonaerense.

En los aditivos, el contenido de cloruro se encuentra totalmente limitado. En la Argentina, en el año 1963 se prohibió el uso del cloruro de calcio en hormigones pretensados o armados y se limitó al 1,5% en peso de cemento la proporción de cloruro de calcio a emplearse en hormigón simple. El Código Británico para el Empleo de Hormigón Estructural, recién en 1977, reconoció las consecuencias de su empleo. A pesar de esto, son numerosos los casos de estructuras patrimoniales corroídas por cloruro, en ambientes sin agresividad química.

El cloruro presente durante la etapa de mezclado del hormigón, reacciona particularmente con el aluminato tricálcico del cemento para formar complejos de cloroaluminatos, y por lo tanto, se fijan y se reduce su efecto perjudicial. Algunas investigaciones han mostrado que la fase ferrítica también se combina con el cloruro. Sin embargo, el cloruro retenido vuelve a ser liberado cuando el hormigón se carbonata, originando la doble agresividad por cloruro y por disminución de la alcalinidad.



Figura 16. Estructuras en ambientes marinos afectadas por corrosión

Uno de los objetivos más frecuentes ha sido determinar el umbral crítico de cloruro, por encima del cual se despasivan las armaduras. Los valores experimentales obtenidos hasta el presente varían entre límites amplios, debido principalmente a las variables intervinientes y a las diversas metodologías utilizadas. En la Fig. 17 se ha representado la relación entre el contenido de cloruro necesario para iniciar el proceso corrosivo (umbral crítico), la humedad relativa, la calidad del hormigón y la reducción de alcalinidad (carbonatación). El valor umbral usualmente referido es 0,4% en peso de cemento.

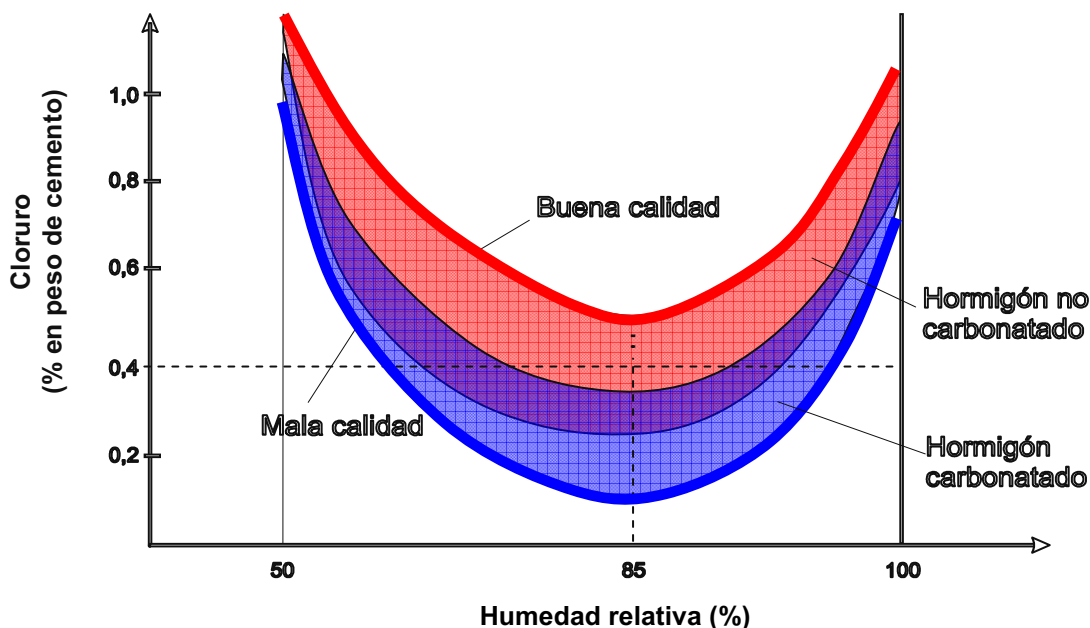


Figura 17. Umbral de cloruro en función de la humedad relativa y la calidad del hormigón

c) Atmósferas corrosivas

La agresividad atmosférica define la velocidad y causas de la corrosión de armaduras. En la Tabla 2, se muestra el comportamiento de aceros expuestos durante el mismo tiempo a distintas atmósferas. Las pérdidas en peso informadas para cada una de las atmósferas, son relativas a la obtenida en la definida como rural desértica. Los valores consignados para la atmósfera marina corresponden a muestras estacionadas a diferentes distancias de la costa mientras que en la industrial, se refieren a atmósferas en las cuales las industrias instaladas originan distintos tipos y grados de contaminación. Desde el punto de vista de la corrosividad, se pueden clasificar las atmósferas en tres tipos.

Tabla 2. Pérdidas en peso de aceros expuestos en distintas atmósferas

País	Localidad	Atmósfera	Pérdida relativa
Egipto	Khartoum	Rural (Desértica)	1
Suecia	Abisco	Rural (Ártica)	3
Nigeria	Aro	Rural (Tropical)	8
Irán	Basrah	Rural (Semidesértica)	9
USA	State College, Pa	Rural	25
Alemania	Berlín	Urbana	32
USA	Kure Beach, N. C.	Marina	38
Inglaterra	Calshot	Marina	41
Sudáfrica	Congellia	Marina	50
Escocia	Motherwell	Industrial	55
Inglaterra	Sheffield	Industrial	78
Inglaterra	Frodingham	Industrial	100

c.1) Atmósfera Rural:

La atmósfera rural no contiene contaminantes químicos agresivos al hormigón armado. Sin embargo, según las características de la zona, pueden presentar distintos tipos de

agresividades, por ejemplo en climas áridos casi no existen precipitaciones pluviales, pero puede haber una humedad relativa ambiental elevada y, ocasionalmente, condensación. En los trópicos, además de las altas temperaturas, el ciclo diario incluye una humedad relativa ambiental elevada, luz solar intensa y prolongados períodos de condensación durante la noche. En emplazamientos protegidos, por ejemplo por vegetación, la humedad proveniente de la condensación puede persistir mucho tiempo después de la salida del sol. Estas condiciones crean un entorno altamente corrosivo.

La incidencia de manifestaciones patológicas en estructuras ubicadas en atmósferas rurales debiera ser baja. Sin embargo, se registran porcentajes nada despreciables de estructuras con grados incipientes de corrosión. Los mismos son atribuibles a diferentes deficiencias constructivas por desconocimiento, omisión o falta de control de las tareas constructivas. También, se han detectado diseños estructurales inadecuados que no permiten el drenaje rápido de las aguas de lluvia, o falta de mantenimiento y de limpieza de desagües, lo cual conduce al desarrollo de procesos incipientes de corrosión.

c.2) Atmósfera Urbana

Las atmósferas urbanas prácticamente presentan incrementos en el contenido de dióxido de carbón (CO_2) originado por la actividad humana.

Los procesos de corrosión se desencadenan en las atmósferas urbanas por carbonatación del hormigón de recubrimiento y/o por procesos de lixiviación. En ambos casos, es de fundamental importancia, no solo la calidad del hormigón de recubrimiento sino también su espesor. En el caso de la lixiviación cuenta también el diseño estructural vinculado con el escurrimiento de las aguas de lluvias.

Se detectan numerosos problemas de corrosión en estructuras para edificios construidas en los últimos 25 años. En las citadas estructuras el cálculo de las mismas fue realizado empleando métodos de rotura, que unido al uso generalizado del hormigón visto y menores controles por una mayor confianza en el material, pueden haber sido las causales de los problemas de corrosión ocurridos antes de cumplir la vida útil prevista. En contraste, se han observado estructuras de edificios ejecutadas con aceros lisos, que no presentan signos de corrosión luego de más de 75 años de construidas.

c.3) Atmósfera Marina

El ambiente marino en su totalidad debe ser considerado como severo desde el punto de vista de la durabilidad del hormigón armado, ya que la presencia de sales en el agua como así también en la atmósfera que rodea a las estructuras, interactúan con el hormigón y con las armaduras.

El aerosol marino contiene partículas finas conteniendo cloruro, las que son transportadas por el viento y se depositan sobre las superficies expuestas. La magnitud de la carga salina decrece rápidamente con la distancia desde el mar, y se ve sensiblemente afectada por los vientos y los obstáculos.

El agua de mar presenta valores de salinidad total del orden de 3.5% con oscilaciones entre 0.05 y 0.2%, según la época del año. En zonas portuarias o estuarias las diferencias pueden ser más notables debido a los desagües y aportes pluviales. Los iones en el agua de mar

que afectan al hormigón armado, son fundamentalmente el cloruro, el sulfato y el magnesio. Debe mencionarse que el agua de mar también contiene oxígeno y anhídrido carbónico disueltos, cuyos porcentajes varían sensiblemente en función de las condiciones locales.

La zona marina se subdivide a su vez en subzonas (Fig. 18), donde la agresividad es diferente según el grado de contacto directo con el agua de mar. Las mismas son:

- Zona de atmosférica: En esta zona el hormigón no se encuentra en contacto directo con el agua de mar, recibiendo la carga del aerosol marino y lluvias. La presencia de sales decrece al aumentar la distancia al mar. Dichos niveles dependen altamente de la presencia de obstáculos, tipo de costa y vientos predominantes.
- Zona de salpicaduras: Se encuentra ubicada sobre las zonas de mareas y está sujeta regularmente a la humectación directa con agua de mar procedente de las olas. Presenta ciclos de mojado y secado.
- Zona de mareas: Está comprendida entre los niveles de marea alta y baja, por lo cual el hormigón armado se encuentra sumergido cíclicamente cada día en agua de mar.
- Zona sumergida: Es la zona ubicada por debajo del nivel de marea baja, por lo cual el material se encuentra permanentemente sumergido y saturado.
- Zona enterrada: Esta zona corresponde al fondo marino, por lo cual el material se encuentra en contacto con suelos saturados.

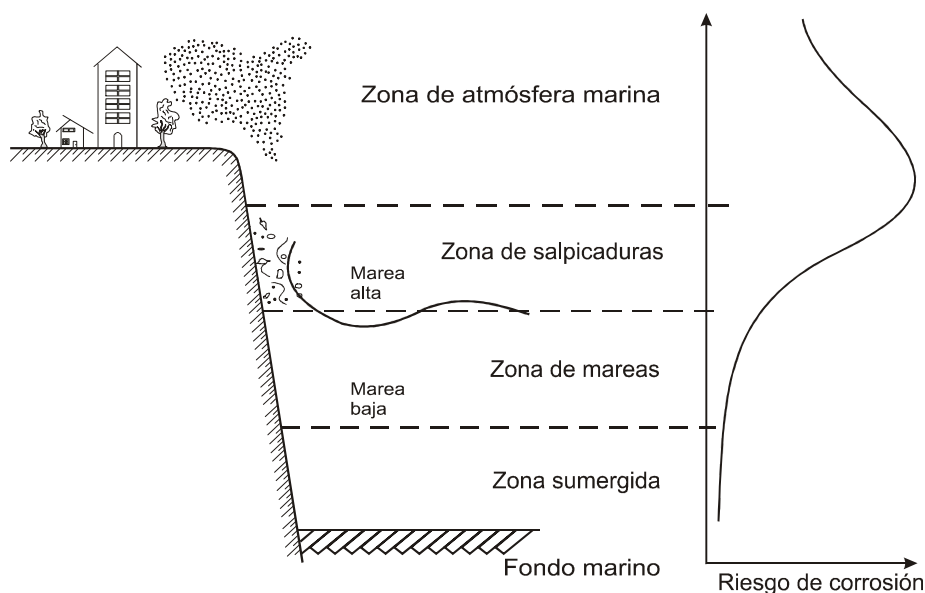


Figura 18. Clasificación de las zonas de exposición marina y esquema de variación del riesgo de corrosión

En la Fig. 18 se indica además un esquema de la variación del riesgo de corrosión según las zonas de exposición marina. De la misma surge que las estructuras más afectadas se encuentran ubicadas en la zona de salpicaduras y en la zona de atmósfera marina, a partir de la conjunción de una mayor aireación y el ingreso de cloruro al hormigón.

Los conceptos antes mencionados, fundamentalmente, los vinculados con los aspectos de la influencia del medio de exposición sobre el hormigón han sido incorporados después de muchos años en la reglamentación sobre la construcción de estructuras de hormigón. El CIRSOC-201-2005, incorpora las clasificaciones de los ambientes corrosivos, u otros de

agresividad química y física, y define taxativamente condiciones del hormigón como razón agua/cemento máxima, resistencia mínima, incorporación mínima de aire (en hormigones sometidos a congelación y deshielo), tipo y contenido mínimo de cemento (en ambientes con sulfato), parámetros de transporte como velocidad de succión capilar y penetración de agua a presión en el hormigón.

PATOLOGÍA DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Estudios realizados en el LEMIT sobre un total de 177 estructuras evaluadas en el período 1975/1990, indica que dentro de la causa Materiales, las sub-causas Durabilidad y Corrosión de armaduras son del orden del 22%. En la Tabla 4 se informan los resultados obtenidos.

Tabla 4. Principales causas de deterioro en estructuras de hormigón armado construidas en Argentina y porcentajes relativos (Información Período 1975/90)

Causas de deterioro		Casos evaluados	
		(N°)	(%)
Proyecto	a) Deficiencias de cálculo	15	19
	b) Sobrecargas (acciones no tenidas en cuenta)	10	
	c) Fundaciones inadecuadas	10	
Materiales	a) Características inadecuadas del hormigón	31	44
	b) Durabilidad	12	
	c) Corrosión de armaduras	29	
	d) Materiales inadecuados	6	
Construcción	a) Fallas de control	19	22
	b) Falta de control	12	
	c) Fallas en construcciones linderas	8	
Uso y Mantenimiento	a) Sobrecargas	11	10
	b) Modificaciones del medio ambiente	6	
Otros	a) Siniestros	5	5
	b) Derrumbes	3	

La alta incidencia porcentual de la causa Materiales debe ser atribuida a la incorporación de las subcausas "características inadecuadas del hormigón", "durabilidad" y "corrosión de armaduras". Este hecho hace elevar el porcentual correspondiente y plantea diferencias con datos de encuestas europeas o relevamientos más recientes realizados en Brasil, donde en la causa Materiales se incluyen exclusivamente al empleo de materiales inadecuados y muchas de las subcausas de durabilidad se incorporan a la de Proyecto.

Aparte de los problemas de durabilidad intrínsecos del hormigón armado, las estructuras pueden disminuir su vida útil debido a causas de proyecto, de construcción o de cambios de uso durante su vida en servicio.

En la Tabla 5, se informa un relevamiento de estructuras de hormigón armado afectadas por problemas de corrosión. El mismo fue realizado en el área costera (máximo 200 metros de la línea de mareas) de la Provincia de Buenos Aires, en la cual los vientos predominantes (que arrastran cloruro) tienen dirección mar-costa. El porcentaje detectado de estructuras afectadas es significativo, pero similar al reconocido a nivel internacional para las mismas condiciones de exposición. En otros emplazamientos marinos donde el viento predominante es desde el continente hacia el mar la problemática de la corrosión es menor o prácticamente nula, como ocurre en el la Costa Patagónica. Allí, se presenta además una baja humedad relativa.

Tabla 4. Estructuras afectadas por problemas de corrosión

Localidad	Edificios		
	Inspeccionados (N°)	Altura (pisos)	Afectados (%)
San Clemente	15	3-10	20
Las Toninas	2	3-4	50*
Santa Teresita	20	>4	15
Mar del Tuyú	2	<3	0
San Bernardo	15	3-10	10
Mar de Ajó	10	>3	10
Pinamar	15	3-10	13

(*) Signos iniciales de corrosión en uno de los edificios inspeccionados

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y DE CONTROL

Prácticamente todos los relevamientos realizados sobre estructuras ubicadas en ambientes moderadamente agresivos, muestran manifestaciones patológicas tempranas del hormigón y del acero debidas a deficiencias en el espesor y/o calidad del hormigón de recubrimiento.

Existen diversos parámetros que deben tenerse en cuenta durante la etapa de diseño y ejecución de las estructuras de hormigón armado, para disminuir la cinética de los procesos de alteración:

- a) Formas y detalles constructivos: Durante la etapa del proyecto debe tenerse en cuenta, entre otras consideraciones, la ubicación de drenajes adecuados y evitar la existencia de superficies horizontales o tomar precauciones especiales de protección. Además, podría preverse en ambientes extremadamente agresivos, la posibilidad de reemplazos parciales de partes afectadas durante la vida en servicio de la estructura.
- b) Limitación del ancho de fisuras: Debe tratarse que el ancho máximo de las fisuras sea menor a 0,4mm. En el caso de estructuras en las cuales se esperan deformaciones significativas con la consecuente fisuración debe prestarse especial atención a este aspecto, ya que las fisuras permiten el ingreso directo de sustancias agresivas y agua.
- c) Colocación y compactación del hormigón: La disposición de las armaduras debe permitir una correcta colocación y compactación del hormigón. En consecuencia, deben preverse con antelación los puntos de inserción para el vibrador, especialmente en el caso de secciones fuertemente armadas con capas cruzadas de barras.
- d) Curado: El tipo de curado que se adopte debe impedir la desecación prematura de la superficie del hormigón. Una vez que se ha secado resulta inútil cualquier medida subsecuente de curado. Son medidas adecuadas para un curado eficiente, mantener el encofrado durante el mayor tiempo posible, cubrir las superficies expuestas con láminas de curado y usar membranas de curado o impregnaciones temporales.
- e) Control de calidad: Las medidas antes descriptas deben ser adecuadamente supervisadas en obra mediante un control de calidad estricto.

En lo que respecta a los materiales empleados en la ejecución del hormigón (agregados, cementos y aditivos), se han detectado incumplimientos respecto al aseguramiento de su calidad, lo cual originó patologías de la estructura a lo largo de su vida útil y en algunos casos extremos el colapso de las mismas. Es importante destacar aquí que el material final de la estructura es el hormigón endurecido, y su calidad no puede asegurarse si se controla

únicamente al hormigón fresco. Las condiciones constructivas son tan importantes respecto a sus consecuencias, como las de los materiales constituyentes, la relación agua/cemento o la trabajabilidad del hormigón.

En estructuras construidas en los últimos 20 años, se han detectado frecuentemente incumplimientos en los procesos de compactación y curado del hormigón, originando diversos problemas de durabilidad y en especial los vinculados con la circulación de agua en la red capilar del hormigón. En lo que respecta a la corrosión de armaduras, puede plantearse que la misma se encuentra condicionada principalmente por las características del hormigón de recubrimiento.

CONSIDERACIONES FINALES

El hormigón armado como material es una herramienta que permite libertades difícilmente alcanzables con otros materiales, por razones técnicas o económicas. Por ello, significa presenta una alta participación en el patrimonio construido desde su desarrollo a fines del siglo XIX. A pesar de su concepción de material durable, no resulta ser inalterable infinitamente. Numerosos mecanismos de deterioro que han sido descriptos brevemente en este trabajo.

A pesar de esto, continúa siendo uno de los materiales que menores tareas de mantenimiento y conservación requiere. Pero esta confiabilidad ha resultado contraproducente, sobre todo en las últimas décadas, respecto a lo que el material es capaz de soportar. La industria de la construcción ha sobreestimado sus durabilidad y las manifestaciones patológicas son una consecuencia de ello.

Si bien una estructura con patología es técnicamente reparable, la afección de la estructura casi siempre no puede ser eliminada completamente. De este modo, además de una reparación, debe siempre preverse un plan de mantenimiento más asiduo al convencional. En estructuras con valor patrimonial debe considerarse además el costo patrimonial de la intervención.

Respecto a la durabilidad del hormigón armado, puede concluirse que el diseño de las estructuras de hormigón armado (arquitectónico y estructural), cobra una significativa importancia en su relación con su emplazamiento. Este concepto se aparta del enfoque tradicional que centra exclusivamente el comportamiento durable de las estructuras sobre la calidad de los materiales. Es conocido que los problemas de desagüe o estancamiento de agua, que se encuentran fuertemente vinculados con el diseño estructural, son factores determinantes en la durabilidad. Los diseños simples y robustos de las estructuras originan, en la mayoría de los casos, un comportamiento adecuado respecto a su durabilidad.

Por todo lo expuesto, se considera que el análisis adecuado de las características de agresividad del emplazamiento de las estructuras, como así también el cumplimiento de pautas de calidad en la etapa de diseño y en la ejecución permitirá que las estructuras de hormigón armado no se vean afectadas por problemas de durabilidad ni presenten patologías antes de cumplir la vida útil prevista en el proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DI MAIO A.A., SOTA J.D., y TRAVERSA, L.P., "PATOLOGIA DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN: ANALISIS DE ALGUNOS DE LOS CASOS MÁS RELEVANTES OCURRIDOS EN LA ARGENTINA EN LOS ÚLTIMOS AÑOS", *III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad*, La Habana, Cuba, Octubre de 1995.
- TRAVERSA, L. P. Y CIVELLO, C.A., "PROBLEMAS DE CORROSION EN ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO UBICADAS EN EL ATLÁNTICO BONAERENSE", *Proceeding Colloquia'7 AATH "Durabilidad de estructuras en ambientes marinos"*, Mar del Plata, 1992.
- GIOVAMBATTISTA, A., TRAVERSA, L. P. Y VIOLINI, D., "ALTERABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO EN AMBIENTES INDUSTRIALES Y EN AMBIENTES MARINOS", *Proceedings Colloquia'85*, Buenos Aires, 1985.
- TRAVERSA, L., GIOVAMBATTISTA, A., DI MAIO, A. Y EPERJESI, L., "PERFORMANCE OF CONCRETE STRUCTURES IN ARGENTINE ENVIRONMENTS", *Symposium "Structures for the Future. The Search for Quality"*, IABSE, Río de Janeiro, Brasil, 1999.
- TRAVERSA, L., GIOVAMBATTISTA, A., DI MAIO, A. Y EPERJESI, L.P., "COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DE EDADES DIFERENCIADAS: ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRUCTURAS CONSTRUIDAS EN LA PCIA. DE BUENOS AIRES, ARGENTINA", *Proceeding V Congreso Iberoamericano de patologías de las construcciones y VII congreso de control de calidad CONPAT 99*, Montevideo, Uruguay, 1999.
- IRASSAR E.F., "ATAQUE QUÍMICO AL HORMIGÓN", en "Durabilidad del hormigón estructural", Ed. Irassar, E.F., AATH, La Plata, Argentina, pp.97-156
- TRAVERSA, L. ROSATO, V., "ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA COLONIZACIÓN DE LÍQUENES EN LAS SUPERFICIES DEL HORMIGÓN", *Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón*, N° 6, 1998.
- GIOVAMBATTISTA A., BATIC O., TRAVERSA L.P., "REACTIVITY OF ALKALIS AND SANDSTONES CEMENTED WITH OPAL AND CHALCEDONY", *7eme Conference International sur la Reaction Alkali-Granulant*, Ottawa, Canadá, 1986.
- GIOVAMBATTISTA A., BATIC O. Y TRAVERSA, L.P., "REACCION ALCALI-SILICE, IMPLICANCIAS TECNOLÓGICAS, ECOLÓGICAS Y ECONÓMICAS EN LA OPTIMIZACIÓN DE LAS SOLUCIONES INGENIERILES", *Proceedings Colloquia'85*, Buenos Aires, 1985.
- ROSTAN S., "VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN", *Revista Hormigón N° 36*, Julio-Diciembre 2000.
- REGLAMENTO ARGENTINO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN- CIRSOC-201. Ed. INTI. 2000.
- CIVELO, C., Y TRAVERSA L. P., "DIFUSION DE CLORUROS EN HORMIGONES ENDURECIDOS", *Proceeding 10ª. Reunión Técnica AATH, Olavaria*, 1991.
- TRAVERSA, L. P., "CORROSION DE LAS ARMADURAS EMPOTRADAS EN EL HORMIGÓN POR PRESENCIA DE CLORUROS" *Revista Industria y Química*, 318, 1995
- TRAVERSA L. y DI MAIO A., "CORROSIÓN DE ARMADURAS EN EDIFICIOS PARA VIVIENDAS. ANÁLISIS DE ALGUNOS CASOS EVALUADOS EN EL LEMIT", *Proceeding "Primer Seminario de Tecnología del Hormigón en la Vivienda del Mercosur"*, UTN Fac. Reg. Santa Fe y AATH, Santa Fe, 1997.
- Traversa L. P. and Di Maio A.A., "DEGRADATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES", *Proceeding 14th. Edition "Comportarea in situ a Constructiilor"*, Rumania, Septiembre de 2002, pp. 37-42.
- Traversa L.P., Zicarelli S. y Di Maio A.A., "ANÁLISIS DE ALGUNOS FACTORES QUE INFLUENCIAN LA DIFUSIÓN DE CLORUROS EN EL HORMIGÓN", *XV Reunión Técnica y Seminario de Hormigones Especiales*, AATH, Santa Fe, Octubre 2003.
- Di Maio A.A., Lima L.J. and Traversa L.P., "CHLORIDE PROFILES AND DIFFUSION COEFFICIENTS IN STRUCTURES LOCATED IN MARINE ENVIRONMENTS", *Journal Structural Concrete, fib*, Vol. 5, N° 1, 2004, pp. 1-4.
- Traversa L.P. and Di Maio A.A., "EVALUATION AND RECOMMENDATIONS TO REPAIR STRUCTURES LOCATED IN MARINE ENVIRONMENT", *Proceeding XV Edition of Congress "Comportarea in situ a constructiilor"*, Bucarest, Rumania, 22-24 Septiembre 2004, pp. 293-300.