ASPECTOS BÁSICOS DE LA DURABILIDAD DE HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND

PROCESOS QUÍMICOS DE DETERIORO EN EL HORMIGÓN

Los procesos de deterioro del hormigón provocados por reacciones químicas están vinculados, por lo general, a las interacciones químicas entre los agentes agresivos del ambiente externo y los constituyentes de la pasta de cemento. Existen, sin embargo algunas excepciones como las reacciones álcali agregados, la hidratación diferida de los óxidos cristalinos de calcio y magnesio (CaO, MgO) cuando se encuentran en excesiva cantidad y la corrosión electroquímica de las armaduras embebidas en el hormigón.
Es menester aclarar que cualquier acción de naturaleza química sobre el hormigón que tienda a disminuir la alcalinidad de la solución de poros (aguas puras o ligeramente ácidas), colocará al material en una situación de equilibrio químico inestable, deteriorándolo.

REACCIONES	COMPUESTOS FORMADOS	FENÓMENOS	ALTERACIONES EN EL HORMIGÓN
A - Hidrólisis (lixiviación)	disolución de los compuestos de la pasta de cemento endurecida (CH, S-C-H)	Aumento de la porosidad y permeabilidad	Reducción de la alcalinidad Pérdida de la masa Aceleración del proceso de deterioro Reducción de la resistencia y rigidez
	Remoción de los iones Ca^{2+} como productos de reacciones solubles	Aumento de la porosidad y permeabilidad	Reducción de la alcalinidad Pérdida de masa Aceleración del proceso de deterioro Reducción de la resistencia y la rigidez
B - Intercambio iónico entre los componentes del fluido agresivo y los de la pasta de cemento hidratada	Remoción de los iones Ca^{2+} como productos de reacción insolubles no expansivos	aumento de la porosidad y permeabilidad	Reducción de la alcalinidad Pérdida de la masa Aceleración del proceso de deterioro

			Reducción de la resistencia y la rigidez
	Reacciones de substitución que reemplazan los iones Ca2 + en el S-C-H	Modificación y debilitamiento de la estructura del S-C-H	Reducción de la resistencia y rigidez
C - Formaci ón de productos expansivos (RAS, corrosión del acero, formación de yeso y/o estringita, hidratación del CaO y/o MgO del cemento	Poco solubles en agua y expansivos	Generación de tensiones internas	Reducción de la resistencia y rigidez Fisuras, pop-outs Descascaramien-tos Deformaciones

ACCIÓN DE LAS AGUAS PURAS

Se considera que un agua es agresiva para el hormigón cuando esta:

a) tiene pocas o ninguna sustancia disuelta (aguas puras o desmineralizadas) actuando como disolvente en el hormigón (lixiviación).
b) tiene sustancias o compuestos capaces de reaccionar con los compuestos del hormigón como por ejemplo ácidos, sulfatos, sales, etc.

Por AGUAS PURAS se reconocen aquellas que tienen pocas o ninguna sustancia disuelta como por ejemplo:

- Deshielos de glaciares
- Fusión de nieve
- Agua de lluvia
- De determinados pantanos
- Aguas a grandes profundidades
- Provenientes de ciertos procesos de condensación industrial.

CARACTERÍSTICAS Y ACCIÓN de las aguas puras

- Bajo contenido de Ca2 + ó MgO
- PH próximo a 7 (ni ácidas ni básicas)
- Actúa como disolvente e inicia la hidrólisis (por percolación o saturación)
- Inicia la disolución de los compuestos que contienen Ca
- Los aluminatos de calcio hidratados generan como productos finales gel de alúmina e hidróxido de calcio
- La desaparición del CH facilita el avance de la reacción disolvente
- Expone a los demás componentes a la descomposición química.

CONSECUENCIAS en el hormigón

- Disminución del PH
- Pérdida de la masa
- Incremento de la porosidad y la permeabilidad del hormigón
- Caída de la resistencia mecánica

LIXIVIACIÓN

Es el proceso mediante el cual se produce la disolución de compuestos de hormigón en la fracción de cemento hidratado.
Depende de la situación o estado del agua: a)reposo b) corriente constante c) filtrante
En el caso a) la hidrólisis de los componentes con calcio alcanza la saturación (equilibrio químico) y los procesos se detienen.
En los casos b) y c) a acción agresiva del agua aumenta, pues la posibilidad que ésta percole a través del hormigón, particularmente bajo presión,. determina que los procesos de disolución y degradación sean continuos. Esta situación en particular da lugar a otro fenómeno que se enuncia a continuación:
EFLORESCENCIAS
El agua que filtra a través del hormigón, rica en CH disuelto, alcanza la superficie de la estructura y se evapora haciendo que los cristales de CH precipiten formando depósitos salinos de color blanco. El fenómeno en si representa un problema estético más que de durabilidad. Sin embargo, indica que una importante lixiviación está ocurriendo en el hormigón.

ACCIÓN DE LAS DISOLUCIONES LIGERAMENTE ÁCIDAS

El hormigón de cemento portland, en general, no resiste el ataque ácido excepto cuando estos provengan de soluciones ligeramente ácidas, particularmente cuando esté expuesto ocasionalmente.
La acción de los ácidos sobre el hormigón endurecido (considerado como sustancia alcalina) no es, ni más ni menos, que la conversión de todos los compuestos cálcicos(CH,S-C-H,C-A-S-H) en sales cálcicas del ácido actuante.
Cuando estas sales son de GRAN SOLUBILIDAD pueden ser removidas fácilmente por lixiviación incrementando la porosidad del material, destruyendo así la estructura del cemento endurecido.
Cuando las sales de calcio resultantes son de BAJA SOLUBILIDAD y además no experimentan cambios de volumen, la corrosión del hormigón es mucho más lenta debido a la acción protectora de la película que forman dichas sales al precipitar sobre la superficie del hormigón.
De este modo un parámetro muy importante como es la VELOCIDAD DE REACCIÓN está condicionado a los siguientes elementos:

- Agresividad del ácido
- Según sean ácidos fuertes o débiles
- Solubilidad de la sal cálcica resultante
- Condición o estado del agua (reposo, corriente renovada, filtrante)
- PH

- Temperatura
- Concentración de protones en la disolución

ÁCIDOS QUE FORMAN SALES DE SOLUBLES	CALCIO DE CARACTERÍSTICAS INSOLUBLES
1- Clorhídrico	5- Carbónico
2- Nítrico	6- Fosfórico
3- Sulfúrico	7- Sulfuroso
4- Carbónico	8- Cítrico
	9- Tartárico y Oxálico

CARACTERÍSTICAS:

1- Es un ácido fuerte y la solubilidad de la sal de calcio en agua a 0 °C es 595 g/l .
Luego de realizado el ensayo con martillo de rebote Schmidt en hormigones de distinta porosidad (ver fig. 5 y 6), se comprueba el alto grado de agresión producido.
Es un ácido usualmente encontrado en industrias químicas.
2- Es un ácido fuerte y la solubilidad de la sal en agua a 0 °C es de 1020 g/l . Al igual que el ácido anterior provoca una marcada disminución de la resistencia y se encuentra por lo general en las industrias químicas.
3- Es un ácido fuerte de características particulares, pues es muy agresivo para el hormigón, en cualquier concentración, a pesar de la baja solubilidad de sus sales resultantes. Ejerce una doble acción. Por un lado ataca la pasta de cemento debido a sus características ácidas. Por otra, puede dar lugar a la formación de yeso el cual, al reaccionar con los aluminatos de calcio hidratados forma estringita, produciendo una desintegración adicional a causa de la fisuración y del aumento de la porosidad.

4- Este ácido débil que presenta rasgos propios porque sólo forma sales con el $Ca(OH)2$ y nunca con la alúmina. Puede encontrarse en concentraciones importantes en las aguas naturales, subterráneas, en agua de mar y en lugares donde se descomponen sustancias orgánicas por la acción de microorganismos.
Es perjudicial cuando el PH es inferior a 7 pues estaría indicando concentraciones perjudiciales de $CO2$. Este ácido experimenta dos equilibrios iónicos: para una pequeña concentración forma carbonato de calcio, para una concentración mayor, forma bicarbonato ácido de calcio que es soluble en agua con la característica de que esta reacción es reversible, de tal manera que con la presencia de determinada cantidad de $CO2$ se produce un nuevo ataque al $Ca(OH)2$ del cemento hasta que se recomponga el equilibrio. El resultado final es la formación del bicarbonato de calcio soluble en agua y el ataque al hormigón. Este $CO2$ en exceso, sobre el $CO2$ de equilibrio, capaz de transformar a todo o parte del carbonato de calcio formado en bicarbonato de soluble, se conoce con el nombre de $CO2$ agresivo.
5- Según lo señalado anteriormente, si la concentración de $CO2$ libre es menor que la de equilibrio (no hay $CO2$ agresivo), el ácido carbónico reaccionará

precipitando carbonato de calcio que colmata los poros del hormigón y produce un ligero incremento de la resistencia mecánica superficial.
6- Acido débil que experimenta tres ionizaciones.
7- Acido débil que experimenta dos ionizaciones.
8- Acido orgánico y débil
9- El ácido Tartárico es orgánico y débil. El Oxálico es fuerte y también orgánico.

ACCIÓN DE LAS SALES EN DISOLUCIÓN ACUOSA

Las sales pueden clasificarse en neutras, ácidas o básicas, en función del PH resultante de su disolución acuosa.
Las sales neutras procedentes de un ácido fuerte y una base fuerte, cuando se disuelven en agua no experimentan reacción de hidrólisis y, por consiguiente, el PH de las disoluciones acuosas es igual a 7.
Las sales ácidas procedentes de un ácido fuerte y una base débil, cuando se disuelven en agua, descomponen el agua (hidrólisis) y proporcionando un PH menor a 7.
Para estudiar la acción de las sales, en disolución acuosa, sobre los compuestos del cemento portland se ha de tener en cuenta la correspondiente a los diferentes iones que proporcionen al medio acuoso. Así, en el caso de sales neutras, se debe considerar la acción del anión, por una parte, y la delo catión, por otra. En los casos de sales ácidas, además de las acciones del catión y anión mencionadas, se deberá tener en cuenta el carácter ácido de los protones (H+) cedidos a la solución.

RECOMENDACIONES Y MEDIDAS PRÁCTICAS

Factores que influyen y modifican el grado de ataque de aguas agresivas en contacto con el hormigón:
a) Por parte del hormigón:
- Tipo y contenido de cemento
- Características de los agregados
- Dosificación, trabajabilidad
- Compasidad, permeabilidad, absorción (a/c)
- Existencia de defectos (fisuras)
- Curado o edad del hormigón a la que se pone en contacto con las sustancias agresivas

etc.

b) Por parte de la estructura:
- Situación de la estructura (recubierta o embutida en terrenos permeables)
- Sumergida en agua
- Características geométricas

etc.

c) Por parte de las aguas agresivas:
- Características de la solución (PH, residuo, contenido de CO_2 agresivo, dureza, tipo de aniones y cartiones presentes, etc.)

- Situación de la solución (en reposo, agua corriente que se renueva permanentemente, que exista presión hidráulica unilateral, etc.)
- Duración del período de contacto de la solución con la estructura de hormigón

Temperatura de la solución

d) En general:

- El hormigón de buena calidad, compacto y de baja relación agua/cemento (baja permeabilidad) resiste aceptablemente soluciones ligeramente ácidas.
- Deben evitarse la inmersión del hormigón en estas soluciones y de no ser posible, minimizar el tiempo de contacto.

Ningún hormigón de cemento portland, independientemente de su composición, resistirá por largo tiempo un ataque ácido fuerte (PH<4.5).

Medidas preventivas para disminuir o evitar la acción corrosiva sobre el hormigón:

a) Diseño adecuado de la estructura:

- Evitar el uso de secciones delgadas
- Utilizar secciones con formas redondeadas eliminar, en lo posible, las aristas
- Minimizar las áreas de contacto y las zonas de turbulencia

b) Fabricar hormigones compactos (de baja porosidad y permeabilidad), haciendo uso de todas las recomendaciones que brinda la tecnología del hormigón:

- Resistencia a compresión mínima (fc > 21.0 MP)
- Relaciones agua/cemento bajas (en caso de ataque fuerte, a/c < 0.40)
- Penetración de agua según IRAM 1554 < 50 mm
- Agregados apropiados y con granulometría adecuada (en los casos de ataque por ácido sulfúrico puede ser conveniente utilizar agregados calizos)
- Contenidos apropiados de cemento (en general > 350 kg./m3)
- Es recomendable la utilización de aditivos fluidificantes o superfluidificantes
- Es recomendable la utilización de aditivos incorporadores de aire
- Utilizar el mínimo asentamiento compatible con una buena colocación del hormigón(< 15 cm)

c) Emplear cementos idóneos (de modo de lograr pastas hidratadas de bajo contenido de CH)

- Cementos con adiciones minerales activas (AMA) de buena actividad puzolánica, que consuman el CH producido durante la hidratación de los silicatos
- En los casos de ataque por ácido sulfúrico puede ser conveniente emplear adiciones minerales de naturaleza carbónica (cementos con filler calcáreo)
- Cementos de baja relación SC3/SC2

d) Someter al hormigón a un curado adecuado (reducción de la porosidad y permeabilidad) antes de que entre en contacto con las aguas puras

e) Fundamentalmente en el caso de que el ataque sea fuerte, se debe proteger a la estructura con una membrana, película o material impermeable, evitando el contacto del hormigón con la solución agresiva

f) En determinadas circunstancias, es posible recurrir al tratamiento de la solución agresiva para disminuir su poder disolvente o su acidez.

ATAQUE DE SULFATOS AL HORMIGÓN

Probablemente, el ataque de los sulfatos constituya una de las formas más difundidas en el mundo de agresión química al hormigón.

Ambitos propicios donde encontrar sulfatos:

- Se encuentran presentes en el suelo, particularmente los arcillosos
- Disuelto en el agua de las napas freáticas
- En al agua de mar
- Otra fuente de aporte la constituyen los ambientes de descomposición orgánica, en procesos anaerobios donde se forma SH2, compuesto que puede transformarse posteriormente en ácido sulfúrico (SO4 H2) por acción bacteriológica.
- Ambientes urbanos o industrializados, con altos grados de polución ambiental (lluvia ácida).
- Puede formarse a partir de ciertos procesos biológicos que degradan lentamente al hormigón, incluso en aquellas estructuras que no se hallan en contacto directo con el suelo.

Regiones en Argentina con porcentajes diversos de sulfatos en suelos:

- En el Centro y Sur de Bs. As. y Alto valle de Río Negro la concentración de SO4(2-) llega a superar el 0.2% en peso del suelo.
- En zonas costeras urbanizadas de la provincia de Bs. As. las napas freáticas contienen aproximadamente 2700 ppm de SO4(2-) en solución.
- Los suelos de las Salinas Grandes y la región de la laguna de Mar Chiquita son suelos con concentraciones de sulfatos altamente agresivas.
- Mendoza, San Juan, Santiago del Estero, Entre Ríos, y vastas zonas de la Patagonia.
- Zonas contaminadas por industrias.