



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO,
LOCALIZADAS FRENTE A LA COSTA**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:
ING. JESÚS MANUEL BERNAL CAMACHO

DIRECTOR DE TESIS:
ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.
2009





JURADO ASIGNADO:

Presidente: Ing. López Gutiérrez Héctor Juvencio

Secretario: M.I. García Domínguez Octavio

Vocal: Ing. Cottier Caviedes Juan Luis

1er. Suplente: M.I. Mendoza Escobedo Carlos Javier

2do. Suplente: M.I. Rodríguez Vega Miguel Ángel

Lugar donde se realizó la tesis:
CIUDAD DE MEXICO, D.F.

Director de Tesis:

Ing. Juan Luis Cottier Caviedes



AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se logró en base a esfuerzos personales y al apoyo incondicional de personas e instituciones que no desistieron en ofrecer su ayuda sin esperar algún beneficio a cambio, es por lo anterior que agradezco de forma muy sincera y respetuosa a todos ellos.

En primer plano agradezco a mis padres quienes tuvieron la plena confianza en mi persona para ofrecerme todas las herramientas sin escatimar en esfuerzo y dinero, solamente pensando en mi formación y superación personal, así como también resalto la comprensión de mi esposa durante el desarrollo de mi tesis y todo su apoyo incondicional en cada etapa.

Agradezco infinitamente las atenciones de mi director de tesis el **Ing. Juan Luis Cottier Caviedes**, quien ofreció la mayor de su disponibilidad en conocimientos y tiempo, siempre cuidando el objetivo fijado en un inicio de conseguir un trabajo de calidad, beneficiando así la integración de un campo de conocimiento que antes no había sido explorado en mi desarrollo profesional.

Menciono de forma notable el beneficio económico otorgado a mi persona por parte del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, convirtiéndose en el puntal principal para la estancia en México D.f., gracias a su ayuda económica se propició la adquisición de literatura necesaria en el campo de la Ingeniería Civil.

Y sobre todo agradezco a la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, quien es la forjadora de conocimiento día con día, ofreciendo instalaciones de primer nivel, incrementando así el nivel de conocimiento de todos y cada uno de sus alumnos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES	3
OBJETIVO	5
1.- EL CONCRETO	6
1.1 Estructura del concreto	6
1.2 Microestructura del concreto	8
1.3 Concreto armado	9
1.4 Concreto presforzado.....	9
1.5 Acero de refuerzo.....	10
2.- CAUSAS DE DETERIORO.....	11
2.1 Calidad e idoneidad del concreto.....	13
2.2 Condiciones de exposición	14
2.3 Reconocimiento de los factores que afectan una estructura	15
• Factores intrínsecos	15
• Factores extrínsecos.....	16
2.4 Ataques físicos al concreto.....	17
• Efectos de las heladas	17
• Acciones de abrasión, erosión e impacto	17
2.5 Ataques químicos al concreto	18
• Acción de los sulfatos.....	19
• Acción de las sales de magnesio y amonio	22
• Ataque ácido	22
• Lixiviación por aguas puras	24
• Efectos del agua del mar	25
• Reacción álcali-agregado.....	26
3.- DURABILIDAD DEL CONCRETO EN LA COSTA	27
3.1 Tipología estructural localizada en el ambiente marino	28
1) Zona de inmersión:.....	28
2) Zona de marea:	29



3) Zona de salpicaduras:.....	30
4) Zona del ambiente marino:.....	30
3.2 Composición química del agua del mar	31
3.3 Cargas ambientales	33
3.4 La humedad y los procesos de deterioro en principio	34
3.5 Ambiente químicamente agresivo	35
3.6 Degradación del concreto	37
• Concreto simple	37
• Acero de refuerzo.....	38
• Formas de corrosión del acero.....	42
Corrosión general:.....	42
Corrosión Galvánica:	43
Corrosión por hendiduras:	43
Corrosión por Picaduras:.....	43
3.7 Influencia del método de dosificación en la durabilidad	45
4.-PRINCIPALES AGENTES AGRESIVOS EN LA COSTA.....	47
4.1 Efectos en el concreto armado	48
4.2.- Sulfatos en su afectación hacia el concreto.....	50
• Origen de los sulfatos.....	50
- Formación de sulfatos en la naturaleza	51
- Formación de sulfatos debido a la acción biológica.....	53
- Formación de sulfatos como resultado de la contaminación industrial.....	54
• Procesos de ataque por sulfatos	57
• Parámetros que condicionan al concreto en un medio sulfático	60
• Acción de las adiciones minerales en el concreto.....	62
- Las cenizas volantes silico-aluminosa	63
- Los humos de sílice.....	64
- Los cementos con adición de fillers calcáreos	64
• Cementos resistentes a los sulfatos (RS).....	64
4.3.- Cloruros en su afectación hacia el concreto	66
• Riesgo de corrosión por cloruros	67



- El proceso y sus agentes..... 71
- Efectos en el concreto 72
- Iniciación del cloruro 75
- Efectos en el acero de refuerzo..... 76
- El umbral de la corrosión 78
- Incidencia del agrietamiento..... 78
- La durabilidad del concreto y el medio ambiente..... 80
- Potencial de cloruros en el aire..... 83
- Aire marítimo 83
- Zonas industriales..... 84
- 5.-PREVENCIÓN Y CONTROL EN EL CONCRETO 86**
- 5.1 Indagaciones preliminares 86
 - Condiciones climáticas de sitio 86
 - Características de la estructura..... 87
 - Condiciones de exposición 87
 - Condiciones de servicio..... 88
- 5.2 Caracterización del concreto..... 88
 - Requisitos de desempeño 88
- 5.3 Diseño de la mezcla de concreto..... 89
 - Objetivos del diseño..... 89
- 5.4 Previsiones y recomendación en tiempo caluroso 90
 - Condiciones de tiempo caluroso 90
 - Factores perjudiciales propiciados por el clima caluroso 90
- 5.5 Previsiones y recomendación en tiempo frío..... 90
 - Factores perjudiciales propiciados por el clima frío 91
- 5.6 Protección contra el ataque de los sulfatos 91
- 5.7 Prevención de la corrosión del acero de refuerzo 94
 - Planteamientos 94
 - Medios para prevenir la corrosión..... 96
 - Alcalinidad y carbonatación del concreto 97



- Permeabilidad del concreto	97
- Nivel crítico de cloruros.....	99
- Espesor del recubrimiento de concreto	102
- Medios complementarios de prevención y protección	104
5.8 Prevención de la lixiviación del concreto	104
5.9 Protección contra el ataque de sustancias químicas	105
CONCLUSIONES	107
BIBLIOGRAFIA.....	109
REFERENCIAS ELECTRONICAS	110

INTRODUCCIÓN

El ataque y desintegración del concreto bajo la influencia de sustancias agresivas que se pueden encontrar en forma de líquidos, vapores o materia sólida, es aún en nuestros días un fenómeno no del todo bien entendido. El estudio del deterioro de las estructuras de concreto ha tomado un interés particular a partir de los años cincuenta, situación que puede tener diferentes motivos, de entre los cuales se pueden citar la creciente construcción de estructuras de concreto, la necesidad de reparar lo antes construido, la falla de estructuras en forma prematura, etc.

Los daños a los que está expuesta cualquier estructura se pueden clasificar en forma muy general en dos grupos: Daños de carácter mecánico y Daños de carácter químico. Esta clasificación se realiza tomando como referencia la principal influencia de las degradaciones en una estructura, sin embargo es pertinente tener siempre presente que la relación entre los dos es muy íntima. De los mecanismos de degradación sin lugar a dudas los mas complicados por entender son los de carácter químico, debido a que no sólo es necesario entender el comportamiento del concreto como material único, sino también, la relación de éste con el acero que lo refuerza y con los diferentes ambientes a que está sujeto.

Importante es señalar que las continuas fallas estructurales encontradas en edificaciones, son provocadas por los altos niveles de salinidad y humedad con los que cuenta el ambiente. Debido a que el concreto tiene poros intercomunicados y es penetrado por elementos corrosivos como el agua, oxígeno, iones de cloro, dióxido de carbono y otros gases, se produce un contacto con el acero y comienza la corrosión.

Al corroerse el acero se hace más voluminoso debido a los productos de la corrosión, lo que genera tensiones sobre el concreto circundante y provocan su

agrietamiento y fragmentación. Cuando esto sucede, la capacidad estructural del elemento se ve amenazada y es necesario hacer reparaciones costosas para recuperarlo.

Hoy en día las construcciones que se encuentran en desarrollo son sometidas a controles de calidad rigurosos con el fin de obtener obras de calidad, capaces de soportar las embestidas de los agentes climáticos imperantes en el puerto, sin olvidar también que el aspecto del mantenimiento de las estructuras se ha venido reforzando con el objetivo de que las estructuras tengan mayor durabilidad y se mantengan en buen estado.

Por todo lo anterior es necesario un estudio que considere el clima imperante en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa, el cual propicia factores negativos a las estructuras de concreto armado. La salinidad y humedad encontrada en el medio ambiente afecta las construcciones, traduciéndose lo anterior, en elementos estructurales de baja resistencia en su concreto, corrosión en el acero de refuerzo y por lo tanto, disminución de la vida útil de las edificaciones.

El análisis y diseño estructural de los especialistas se ve perjudicado en su afán por alcanzar el objetivo de seguridad estructural, ya que no se obtienen los valores finales, inicialmente planteados. Además, es importante señalar que los inmuebles localizados en la costa, afectados por las condiciones anteriormente señaladas, sufren deterioros y por ende pérdida de valor que afecta la economía de los propietarios.

ANTECEDENTES

Existen innumerables estructuras de concreto alrededor del mundo que, a pesar de haber sido construidas hace un siglo, permanecen en uso y siguen cumpliendo satisfactoriamente las funciones para las que fueron proyectadas. Los cimientos de concreto del puente colgante sobre el Danubio, en Budapest, construido por el Ing. William T. Clark, hace más de 120 años, permanecen hoy en día en estado excelente en la llamada arcilla Kiscell, uno de los estratos más importantes del subsuelo agresivo de Budapest. Igualmente sucede con los pilares de los puentes Margareten y ferroviario del Sur, construidos en Budapest sobre subsuelos agresivos hace más de 70 años empleando cementos de Beocin y Labatlan.

Hoy en día el gran desarrollo de la construcción en los últimos 50 años se ha basado principalmente en la utilización del concreto armado y pretensado, el cual debido a sus propiedades de durabilidad y rentabilidad se ha convertido en el principal protagonista del sector, siendo utilizado tanto para edificaciones como para obra pública. La combinación del concreto y acero ofrecen magníficas prestaciones en cuanto a resistencias mecánicas.

La ciudad de Mazatlán, Sinaloa, en los últimos años ha sido objeto de interés para una gran cantidad de inversionistas (cadenas de hoteles nacionales y extranjeros e inversión privada), quienes ven en el puerto un punto estratégico de desarrollo a futuro, convirtiéndose así en el lugar de preferencia para la visita de turismo tanto nacional como internacional. La construcción de grandes edificaciones en el puerto es consecuencia de este boom inmobiliario. También ha sido notoria la remodelación de antiguas edificaciones que se encontraban en el abandono absoluto, y a través de una previa revisión apegada a las especificaciones principalmente estructurales, fueron reforzadas y rehabilitadas (Hotel Pato Blanco

ahora Proyecto Tiare Sands) al servicio del turismo. Las construcciones en deterioro avanzado, han sido analizadas y evaluadas desde el punto de vista económico y estructural, para determinar su factibilidad y ser demolidas (Hotel Coral Reef ahora Proyecto Legacy) para su nueva construcción.

Hasta hace algunos años se consideraba que un concreto armado bien ejecutado tenía una duración prácticamente ilimitada. Ahora bien, tanto la experiencia como las investigaciones llevadas a cabo indican que diferentes agresiones de tipo físico, químico o mecánico causan el deterioro del mismo y dan lugar a que aparezca todo tipo de patologías asociadas. Por lo que las estructuras se ven rápidamente afectadas por las inclemencias de la naturaleza que predominaban frente a la costa y su vida útil es considerablemente afectada. Es por eso que hoy en día los estudios acerca de la patología del concreto son cada vez mas avanzados, siempre encaminados a proponer técnicas en la elaboración de elementos estructurales capaces de soportar el ataque de la salinidad y la humedad, garantizando así una vida útil con mayores expectativas de las edificaciones.

El avance continuo en la tecnología del concreto con referencia a su patología, es un voto de confianza para quienes deciden realizar sus construcciones basadas en concreto armado, ya que su inversión estará blindada con mayor fuerza ante las adversidades que generan la salinidad y la humedad de la costa.

OBJETIVO

La elaboración del presente tema de investigación será de importancia para el campo de la construcción en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa. Ya que se mostrarán los factores que deberán de tener un mayor control en los elementos de concreto armado durante la construcción de obra civil, así como también, se mencionarán las medidas necesarias a tomar antes de la construcción para evitar circunstancias que perjudiquen la obtención de concretos armados saludables y se darán recomendaciones para el correcto mantenimiento de las edificaciones.

La elaboración de concretos que sean capaces de propiciar una mejor protección al acero de refuerzo embebido en su interior, creará construcciones con mayores expectativas de durabilidad, y por lo tanto incrementará sus años de vida útil, entendiéndose por esto, que las obras sujetas a un ordenado cuidado de los factores que se mencionarán en el presente trabajo serán rentables para sus dueños, ya que se conservarán sanas por más tiempo y por lo tanto, adquirirán un valor mayor y podrán ser mayormente explotadas.

Otro aspecto importante de señalar será la seguridad estructural con la cual contarán las construcciones, ya que la afectación a las mismas será menor siguiendo las recomendaciones sugeridas en esta investigación.

CAPITULO.-1

EL CONCRETO

Se define como una mezcla de cemento, agregados inertes y agua, la cual se endurece después de cierto tiempo mezclado. Los elementos que componen el concreto se dividen en 2 grupos: activos e inertes. Son activos, el agua y el cemento a cuya cuenta corre la reacción química por medio de la cual esa mezcla, llamada lechada, se endurece – fragua – hasta alcanzar un estado, en general de gran solidez, mientras que los agregados inertes son en general grava y arena.



Fig. 1.1 Elementos que componen el concreto

1.1 Estructura del concreto

Está constituido por tres componentes: el agregado, la pasta de cemento hidratada y la zona de transición entre la pasta y el agregado. Para una mejor comprensión de estos tres componentes del concreto, hagamos un análisis de su estructura.

El concreto tiene una estructura altamente heterogénea y compleja por lo que resulta difícil predecir con exactitud y seguridad su comportamiento futuro, conociendo que esta estructura no se mantiene estable, debido a que la pasta de cemento y la zona de transición evolucionan con el tiempo, la humedad y la temperatura que lo rodean.

La estructura del concreto está constituida por los elementos gruesos, que pueden ser percibidos por el ojo humano (el límite de detección del ojo humano es de 0.2 mm), y se le denomina Macroestructura a la estructura total, y Micro estructura a la que esta constituida por los elementos que requieren de la aplicación microscópica para ser observada.

Si partimos del principio que las propiedades del concreto pueden modificarse haciendo los cambios adecuados a su estructura interna en función de las cualidades exigidas para hacerlo resistente a la agresión de los agentes externos, se hace necesario conocer primero su micro estructura y después otros factores que influyen en sus propiedades finales, para poder ejercer esas acciones de cambios deseados.

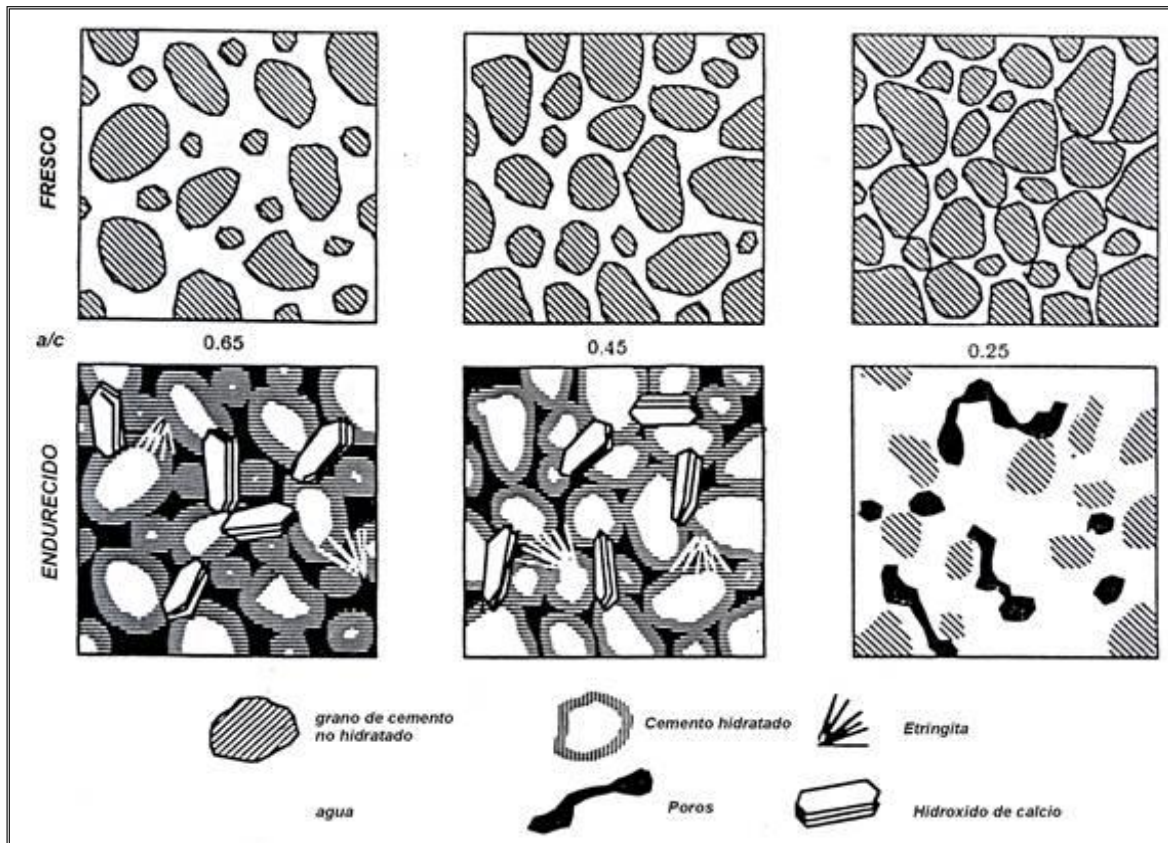


Fig. 1.2 Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c

1.2 Microestructura del concreto

Es la estructura material en estado sólido generada por el fraguado del cemento y cuyos tamaños son inferiores a 0.20 mm. Por lo que la microestructura es la fase sólida, en la que el concreto ha logrado un desarrollo mecánico debido al estado avanzado de las reacciones químicas del cemento con el agua, produciéndose en cierta rigidez conferida por los nuevos productos que se genera.

Las características de la microestructura del concreto están relacionadas con la porosidad de la pasta de cemento endurecido, la conexión entre los poros, la distribución de sus tamaños, capacidad para el transporte de fluidos, relaciones y equilibrios entre los diferentes productos de la hidratación, la naturaleza de la interfaz entre la pasta hidratada y el agregado, así como otros factores.

Los estudios de la microestructura del concreto pueden llegar a ser complejos, dependiendo de lo que se busca. En función de los objetivos que se requieren obtener podrán usarse distintas técnicas y sistemas, tales como: microscopia óptica, microscopia electrónica (de barrido convencional, de barrido ambiental, etc.) hasta procedimientos para reproducir en computadoras los procesos de hidratación del cemento, por el uso de modelos matemáticos basados en la teoría de fractales.

El estudio de la microestructura del concreto tiene gran importancia para el conocimiento de su durabilidad, en tanto que:

- 1) Define el comportamiento mecánico de concreto (resistencia, tenacidad, etc.)
- 2) Dimensiona los procesos de transporte de fluidos en el concreto, lo que repercute en:

2.1 Funcionalidad: Impermeabilidad, estanquidad del concreto.

2.2 Durabilidad: Acceso de sustancias agresivas a los componentes del concreto

3) Define la reología del concreto: contracción, fluencia, etc.¹

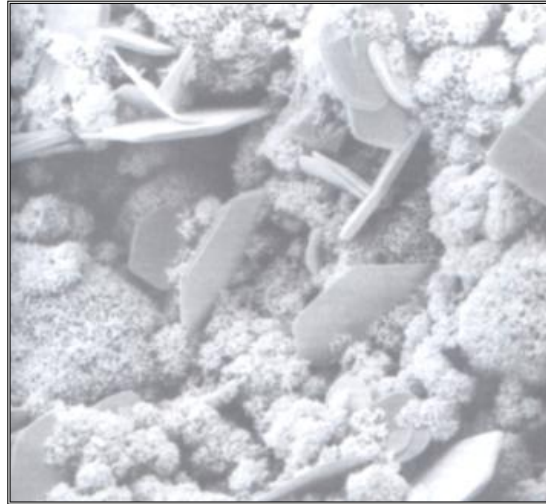


Fig. 1.3 Pasta de cemento hidratada: Ca (OH)2 y C-S-H.

1.3 Concreto armado

Consiste en la utilización de concreto reforzado con barras o mallas de acero, llamadas acero de refuerzo. También es posible armarlo con fibras, tales como fibras plásticas, fibra de vidrio, fibras de acero o combinaciones de barras de acero con fibras dependiendo de los requerimientos a los que estará sometido. El concreto armado es de amplio uso en la construcción siendo utilizado en edificios de todo tipo, caminos, puentes, presas, túneles y obras industriales.²

1.4 Concreto presforzado

El presfuerzo significa la creación intencional de esfuerzos de compresión permanentes en una estructura o conjunto de piezas, con el propósito de mejorar su comportamiento y resistencia bajo condiciones de servicio y de resistencia. Los principios y técnicas del presforzado se han aplicado a estructuras de muchos

¹Revista “Construcción y Tecnología”, Vitervo O’reilly Art. Acción Acerca de la durabilidad del concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Marzo 2008, Pág. 50-53.

² <http://www.mitecnologico.com/Main/MamposteriaYConcretoArmado>

tipos y materiales, la aplicación más común ha tenido lugar en el diseño del concreto estructural.

El American Concrete Institute (ACI) propone la siguiente definición:

Concreto presforzado: Concreto en el cual han sido introducidos esfuerzos internos de tal magnitud y distribución que los esfuerzos resultantes debido a cargas externas son contrarrestados a un grado deseado

1.5 Acero de refuerzo

El uso del acero de refuerzo ordinario es común en elementos de concreto presforzado. Este acero es muy útil para:

- Aumentar ductilidad
- Aumentar resistencia
- Resistir esfuerzos de tensión y compresión
- Resistir cortante
- Resistir torsión
- Restringir agrietamiento
- Reducir deformaciones a largo plazo
- Confinar el concreto

El acero de refuerzo suplementario convencional (varillas de acero) se usa comúnmente en la región de altos esfuerzos locales de compresión en los anclajes de vigas postensadas. Tanto para miembros postensados como pretensados es usual proveerlos de varillas de acero longitudinal para controlar las grietas de contracción y temperatura. Finalmente, a menudo es conveniente incrementar la resistencia a la flexión de vigas presforzadas empleando varillas de refuerzo longitudinales suplementarias.³

³ <http://www.construaprende.com/tesis01/122-acero/1221-acero-de-refuerzo.html>

CAPITULO.-2

CAUSAS DE DETERIORO

El principal problema del concreto armado es la corrosión del acero de refuerzo embebido en él. El desencadenamiento de la corrosión puede ser originado por la carbonatación del concreto o bien por la penetración de cloruros procedentes de las sales de deshielo o del rocío marino que tienden a destruir la capa pasivante.

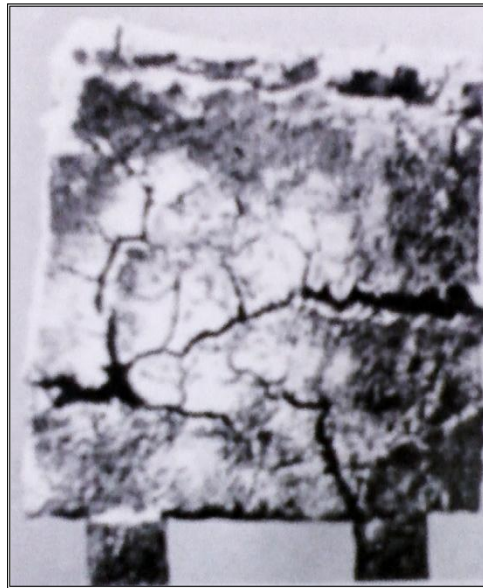


Fig. 2.1 Porción de concreto reforzado afectada por el ion cloruro

Síntomas frecuentes. Una de las patologías más severas es la corrosión en el acero de refuerzo. Este mal afecta sobre todo a estructuras que están expuestas a la humedad continuamente o al escurrimiento de agua, más aún si están inmersas en un medio salino.

El deterioro o el mal funcionamiento de las estructuras, puede darse por causas congénitas o adquiridas, pero también a razón de cambios en su funcionamiento. Tradicionalmente, el estudio de las patologías siempre se enfocaba desde un

punto de vista estructural y de diseño; pero ahora el análisis contempla otros elementos como suelos, calidad de los materiales, factores ambientales y pruebas de laboratorio.

Se propone una clasificación de las causas de daño en el concreto, según los siguientes tipos:

- 1. Mecánicas:** Sismos, sobre cargas, cargas impuestas, movimientos en los terrenos, abrasión, vibraciones, etc. Los daños por estas causas se pueden predecir por la presencia de fisuras o grietas en estructuras.
- 2. Físicas:** Son acciones como cambios en la temperatura o incendios que suelen producir deformaciones, expansiones, erosión o pérdida de masa en el concreto.
- 3. Químicas:** Se refiere a reacciones o ataques con ácidos o sulfatos que suceden, por ejemplo, en construcciones que constantemente están en contacto con el agua de mar.
- 4. Biológicas:** El concreto también puede verse afectado por el embate de hongos, bacterias, algas, líquenes, musgos o corrosión de metales. Los síntomas más comunes por estas afecciones son manchas en las superficies, cambios de color (fluorescencias) y retención de humedad.

Cada una de estas causas merece especial atención, independientemente que se trate de una estructura vieja o de reciente construcción. Hay que tener especial cuidado con la salinidad, la lluvia ácida o, en su defecto, la deposición de partículas secas que puedan adherirse a la superficie y dañarla.

El concreto expuesto y sin revestimiento es uno de los más susceptibles a esta patología, de ahí la necesidad de asegurarse que el diseño de la mezcla considere las condiciones del ambiente que podrían afectarlo.⁴

2.1 Calidad e idoneidad del concreto

Sin considerar los factores relacionados con el diseño estructural, la durabilidad intrínseca del concreto depende en gran medida de su calidad final y su idoneidad, es decir, su congruencia con lo que requiere la estructura. La mayoría de las deficiencias de calidad y/o idoneidad que ocasionan el deterioro prematuro del concreto se deben al incumplimiento de algunos de los siguientes requerimientos descritos en términos generales.

- Empleo de agregados apropiados a las características y condiciones operativas de la estructura, y cuya calidad satisfaga las especificaciones de la obra.
- Selección y uso del cemento adecuado a la composición petrográfica de los agregados, la geometría y dimensiones de la estructura y sus condiciones de exposición y servicio
- Prevención de una eventual reacción deletérea de los agregados con los álcalis del cemento, en condiciones propicias para que se produzca.
- Utilización de aditivos de calidad certificada, cuando se requiere y lo autoricen las especificaciones de la obra.
- Uso de agua de calidad conforme a las especificaciones, para el mezclado y el curado del concreto
- Diseño y aplicación de la mezcla de concreto idónea, tomando en cuenta los requisitos estructurales y las características y condiciones operativas de la estructura.

⁴ <http://www.nacion.com/br/2005/noviembre/19/nota6.html>

- Fabricación, transporte, colocación, compactación y acabado del concreto, con el empleo de equipos, procedimientos y personal adecuados y competentes.
- Ejecución de un eficaz procedimiento de protección y curado del concreto ya colocado en la estructura.
- Desarrollo de un programa de inspección, supervisión y pruebas de laboratorio y campo para el control y aceptación del concreto, mediante equipos, instalaciones, procedimientos y personal calificado y certificado.
- Operación de un sistema de verificación y seguimiento en todas las etapas del proceso de producción y utilización del concreto.

2.2 Condiciones de exposición

Las causas externas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio. Las condiciones de exposición se refieren básicamente a las del medio ambiente y el medio de contacto con el concreto en el sitio, mientras que las de servicio son inherentes a las funciones operativas de cada estructura en particular.

- Medio ambiente

La temperatura y la humedad son características ambientales cuyas magnitudes y variaciones pueden afectar la obtención de propiedades y el desempeño del concreto en sus diferentes modalidades y etapas, desde recién mezclado hasta completamente endurecido.

- Medio de contacto

El concreto en la estructura puede tener contacto permanente, cíclico o eventual con diversos medios, dependiendo de aspectos tales como la localización, tipo y funciones de la estructura y de su posición dentro de ésta. No necesariamente todos los medios de contacto ejercen acciones que afectan la durabilidad del

concreto, ni tampoco un mismo medio debe juzgarse siempre igual. Más bien lo que procede es identificar los agentes que pueden dañar al concreto, evaluar el grado de concentración en que son dañinos y cuantificar su existencia en el medio de contacto. A continuación se muestran diferentes medios de contacto a los cuales puede estar sujeta una estructura:

- Suelo y agua freática
- Aguas superficiales
- Agua de mar
- Aguas residuales
- Salmueras
- Aire atmosférico
- Sustancia químicas

2.3 Reconocimiento de los factores que afectan una estructura

Antes de definir las medidas necesarias para prevenir el deterioro prematuro de una estructura de concreto en vías de ser construida, se requiere identificar y cuantificar los posibles factores de daño a fin de evaluar el riesgo que representa.

- **Factores intrínsecos**

- Aspectos propios de la estructura
 - Cambios volumétricos térmicos
 - Cambios volumétricos por secado
- Aspectos inherentes a los agregados
 - Características físicas
 - Estabilidad química
- Aspectos relativos al cemento
 - Clases de cementos locales
 - Cementos resistentes a los sulfatos
 - Cementos de baja reactividad álcali-agregado (BRA)
 - Cementos de bajo calor de hidratación (BCH)

- Deficiencias constructivas
 - Concreto inapropiado
 - Compactación defectuosa
 - Curado deficiente
 - Recubrimiento de concreto escaso
 - Juntas defectuosas

- **Factores extrínsecos**
 - Condiciones climáticas locales
 - Acciones de los medios de contacto
 - Identificación de agentes dañinos
 - Riesgos de ataque por sulfatos
 - Riesgo de corrosión por cloruros
 - Riesgo de corrosión por carbonatación
 - Riesgo de deterioro por lixiviación
 - Riesgo de daños por agentes químicos
 - Efectos de las condiciones de servicio
 - Propiedades críticas del concreto
 - Resistencia mecánica
 - Deformabilidad
 - Impermeabilidad
 - Resistencia superficial
 - Acciones mecánicas
 - Acciones hidráulicas⁵

⁵ M. Mena Ferrer, (2005). **Durabilidad de Estructuras de Concreto en México**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 3-28

2.4 Ataques físicos al concreto

- Efectos de las heladas

En climas muy fríos, el concreto puede presentar desconchamientos superficiales o agrietamientos debidos a las tensiones internas que se producen al congelarse la fase acuosa presente en los poros, con el consiguiente aumento de volumen. Las situaciones más comunes que producen este tipo de daños son la exposición a ciclos de hielo-deshielo y la exposición a temperaturas bajo cero en presencia de sales de deshielo. El fenómeno del helamiento viene dado como consecuencia del aumento de volumen, en torno al 9%, del agua líquida al transformarse en hielo. Por otro lado, las tensiones producidas pueden ser o no resistidas por el concreto. En este segundo caso se producirán daños en el material. Por un lado una elevada compacidad del material daría una elevada resistencia del concreto lo que sería positivo, sin embargo, ese menor contenido de poros implicaría que se alcanzara el grado crítico de humedad en los poros del concreto de una forma muy rápida. Esto justifica el empleo de agente aireantes en el concreto.

- Acciones de abrasión, erosión e impacto

La acción de la abrasión se da cuando se producen roces continuos sobre la superficie del concreto, como por ejemplo el movimiento de ruedas, la fricción con máquinas, etc. Este desgaste se incrementa debido a la presencia de partículas finas sobre el concreto que actúan como agente abrasivo. La resistencia a la abrasión viene dada por la resistencia del agregado más grueso, por lo que el mortero resiste menos que el concreto. El impacto consiste en el golpeteo continuo o no, al que se ve sometido el concreto en situaciones tales como el flujo de agua en tuberías de concreto (acción de la cavitación) o por caída libre de un objeto pesado sobre un pavimento de concreto. En estos casos es la fracción de agregados la que más influye en la resistencia.⁶

⁶ M. A. Sanjuán Barbudo y P. Castro Borges (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 25-27

2.5 Ataques químicos al concreto

La mejor forma de garantizar una buena durabilidad, consiste en una correcta elaboración del concreto, con unas materias primas adecuadas al uso, una correcta dosificación que asegure una elevada compacidad (baja relación a/c y elevado contenido de cemento) y una esmerada ejecución (adecuada colocación en obra y curado). Además, conociendo el entorno agresivo se pueden mejorar estas etapas. En el entorno se pueden encontrar los agentes agresivos tanto en disolución, como en los suelos o en el aire.

Las principales disoluciones, en cuanto a su agresividad para el concreto, son: agua (puras, carbonatadas, marinas, residuales, industriales, etc...), disoluciones acidas, básica o salinas, alcoholes y azúcares.

Los suelos son perjudiciales sólo si contienen compuestos que pueden formar disoluciones agresivas. En general, con relación al concreto se pueden diferenciar 3 grupos importantes: suelos con sulfatos solubles, suelos pantanosos (pueden tener CO_2 , K_2SO_4 y escombreras o basureros (con elevado contenido de ácidos y sulfuros).

El aire contenido entre un 0.03% y un 0.04% de CO_2 , pudiendo ser aún mayor en ambientes urbanos e industriales. Los gases procedentes de combustiones y procesos industriales pueden contener vapores ácidos (H_2SO_4 , HCl , HNO_3 , SO_2 , CO_2 , SH_2 ,....) que con la humedad de la atmosfera o del concreto forman, cuando se alcanza el punto de rocío, disoluciones más o menos que neutralizan la alcalinidad del concreto.

La siguiente figura presenta un esquema general de la acción de varios agentes agresivos en disoluciones acuosas sobre los componentes hidratados del cemento portland (tobermorita, portlandita y aluminatos de calcio hidratados).

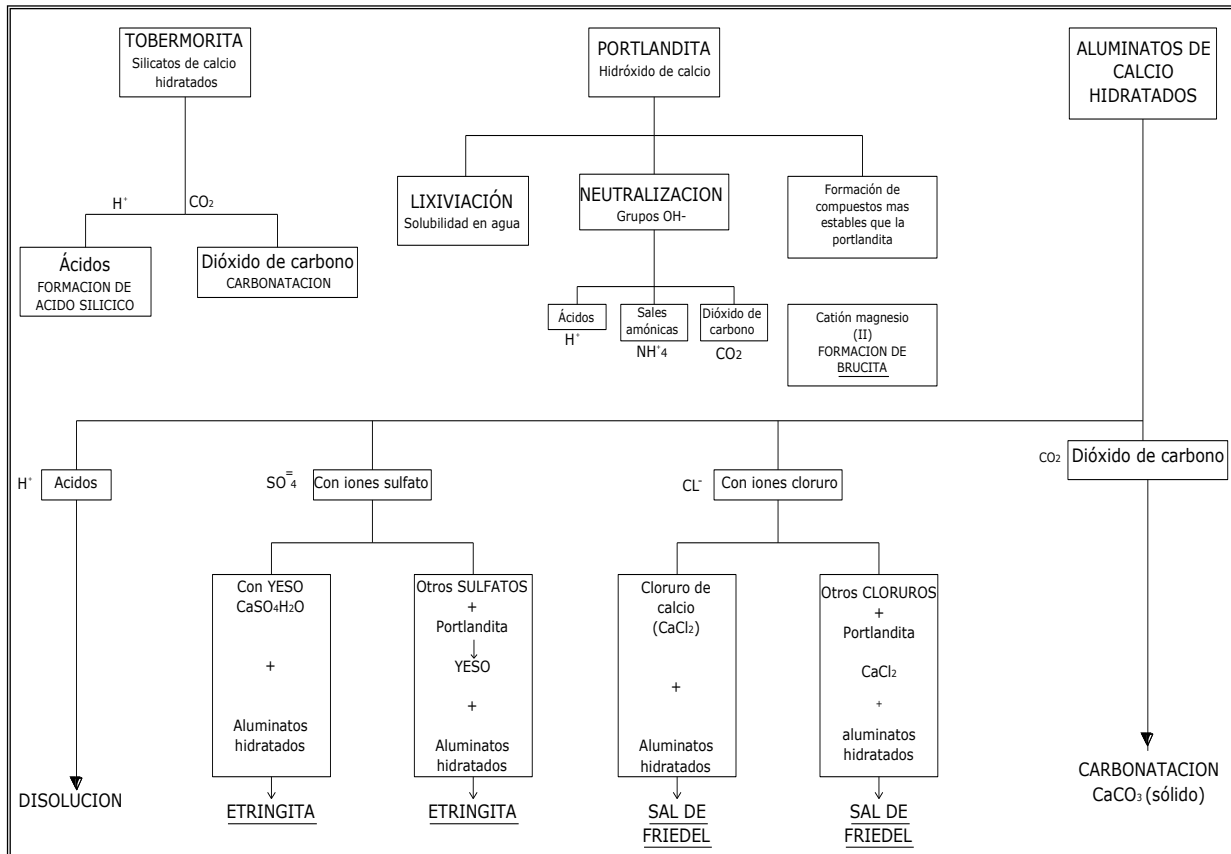


Fig. 2.2 Esquema de la acción de varios agentes agresivos en disolución acuosa sobre los componentes hidratados del cemento portland

- Acción de los sulfatos

Los iones sulfatos reaccionan con los aluminatos cálcico hidratados del clinker de cemento portland formando la sal de Candlot o Etringita, que es muy poco soluble en agua y provoca un gran aumento de volumen del orden del 250% en relación a los reactivos iniciales. Esta expansión produce grandes tensiones internas que, por lo general, no pueden ser absorbidas por el material y desencadena una serie de fisuras y desprendimientos superficiales de material.

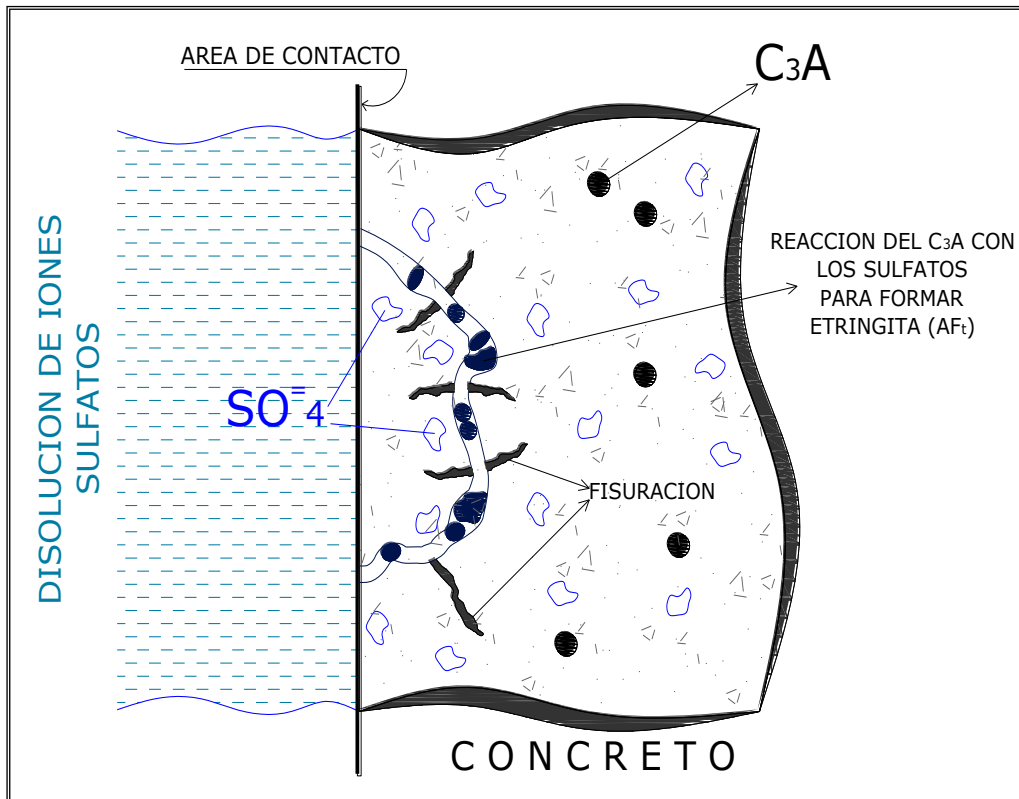


Fig. 2.3 Acción de los Sulfatos

Se pueden distinguir 3 tipos de etringita:

- **Primaria**, que no produce daños
- **Secundaria**, que se produce por una recristalización de etringita primaria
- **Diferida (DEF)**, que produce daños por expansión conocidos como degradación por formación de etringita.

Este último tipo de etringita suele estar asociada al curado a altas temperaturas ya que por encima de 65°C se produce una disolución de la etringita que provocaría expansiones en su recristalización

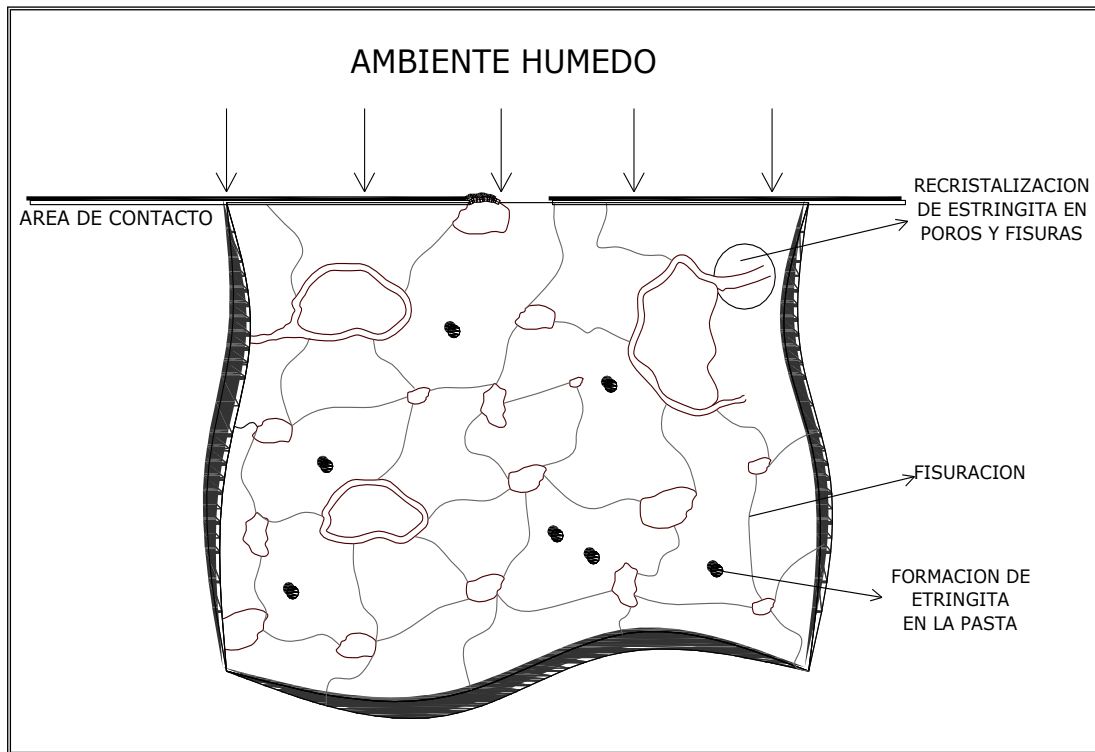


Fig. 2.4 Expansión de la etringita diferida (def) en el mortero

La etringita primaria se produce en la hidratación de cemento portland, dependiendo su formación de la temperatura, alcalinidad del concreto y de las concentraciones de sulfatos y aluminatos. Con temperaturas superiores a 65°C se descompone y se forma monoaluminato tetracálcico liberándose iones sulfatos que se absorben en el gel C-S-H; estos iones van a ser los que mas adelante vuelvan a formar etringita (diferida) produciendo tensiones internas en la pasta de cemento. Por otro lado, se ha encontrado que la etringita (secundaria) se puede formar en fisuras y poros sin que necesariamente cree tensiones.

La formación de etringita cuando el concreto se encuentra en estado plástico no produce expansiones negativas para el concreto. Esta a su vez puede transformarse en monosulfato de calcio hidratado.

Cuando el contenido de iones sulfato supere los 600 mg/l en disolución o 3000 mg/kg en suelos, se recomienda el empleo de cementos con la característica de resistencia a sulfatos. El sulfato proviene del yeso, anhídrido, etc., que se emplea como regulador de fraguado del cemento y de las materias primas. Además, los iones sulfatos pueden provenir de distintas sales: sulfatos de calcio (yeso), sulfatos alcalinos, sulfatos magnesio, etc. Por ejemplo, el sulfato sódico puede reaccionar con los iones de calcio de la fase acuosa produciendo yeso secundario que produce un aumento de volumen del 17.7 %. Este a su vez reaccionara con el aluminato tricalcico para forma etringita expansiva. Por otro lado, el sulfato magnésico podría formar yeso secundario y brucita

- Acción de las sales de magnesio y amonio

Las sales magnésicas actúan sobre el concreto produciendo un intercambio iónico del ion Mg^{2+} por el ion Ca^{2+} presente en la fase Líquida del concreto. Esto provoca una redisolución de la portlandita y de los hidratos cálcicos para mantener el equilibrio de calcio en disolución y, por tanto, se produce una descalcificación de la fase solida de la pasta de cemento.

Los iones de amonio actúan de forma similar al magnesio con el agravante de ser más perjudicial, ya que forman compuestos más solubles que las sales magnésicas.

- Ataque ácido

Las disoluciones acidas reaccionan con los componentes básicos del concreto formando sales y agua (ver fig.2.5). Es decir, este proceso consiste en la reacción de los constituyentes ácidos del medio con la fase liquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del concreto, y con los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase liquida.

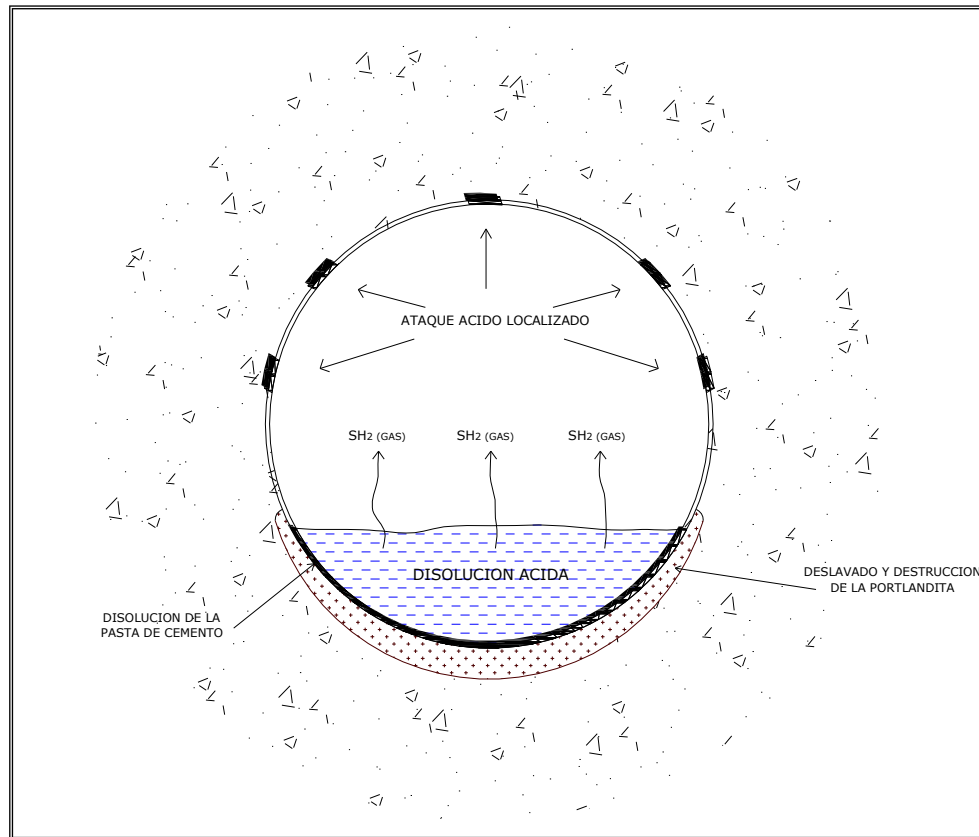


Fig. 2.5 Ejemplo de ataque ácido en una tubería de concreto por una disolución ácida conteniendo sulfuros

Los principales responsables de este fenómeno, que se encuentran en la atmósfera, son los óxidos de azufre (6-10 mg SO₃/L en lluvia) y el dióxido de carbono (600-1000mg CO₂ /m³ en aire), desempeñando este último el papel más importante en ambientes urbanos, por lo que al proceso de neutralización del concreto habitualmente se le conoce como carbonatación. La carbonatación es una reacción exotérmica que produce 19.2 kcal y que afecta a las propiedades físico-químicas de la pasta conglomerante, provocando una modificación lenta de su estructura, variando así la resistencia mecánica y química, originando retracciones y reduciendo la porosidad en concreto de cemento portland. También la neutralización puede deberse a las aguas ácidas conteniendo H₂CO₃ provenientes de fermentaciones anaeróbicas en aguas estancadas, o provenir de oxidaciones.

El descenso del pH del concreto es una de las causas principales de la despasivación de la armadura embebida en el, iniciándose una corrosión generalizada, cuyos óxidos expansivos crean tensiones internas y fisuran al concreto, lo que facilita la nueva entrada de agua y de oxígeno. La cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible para atenuar la reacción de neutralización decrece con el uso de adicciones. Por este motivo, los cementos de adición podrían proteger menos al acero de la corrosión. Sin embargo, los productos de hidratación de este tipo de cementos rellenan los poros, obteniéndose un concreto menos permeable. Además, con la reacción puzolánica se incrementa la resistividad eléctrica y se disminuye la movilidad de los iones agresivos reduciendo de esta forma el riesgo de corrosión. En conclusión, la poca capacidad de reacción de los cementos de adición se ve contrarrestada por su baja permeabilidad, si es bien curado, ya que hay que tener en cuenta que debido a su menor velocidad de hidratación son más sensibles frente a un mal curado. Por tanto, en el caso de cementos de adición si se quiere un concreto menos carbonatable hay que asegurar períodos de curado más prolongados y mayor cantidad de clinker.

- Lixiviación por aguas puras

La lixiviación es un fenómeno de arrastre o lavado de la fase acuosa del concreto que induce una progresiva disolución de la portlandita. Está producida fundamentalmente por las aguas puras de montaña que tienen una fuerza iónica muy reducida, es decir, con una concentración muy baja de iones, aunque también puede deberse a la acción de aguas carbónicas o disoluciones ácidas. La gran avidéz de las aguas puras por llegar al equilibrio de disolución de los diferentes compuestos sólidos de la pasta de cemento hace que se produzca una rápida disolución de la portlandita y de otros hidratos de la pasta de cemento. El efecto producido es la aparición de eflorescencia y la disgregación del concreto, esto es, la disolución de la pasta cementante dejando libres a los agregados.

- Efectos del agua del mar

En el agua de mar se conjugan las acciones químicas de varios iones tales como los sulfatos, cloruros, magnesio, álcalis, etc; físicas como la acción de mareas, ciclos de humectación-secado, erosión y abrasión, etc.; y biológicas de una gran variedad de algas y organismos marinos. Aun así, el efecto combinado de todas las acciones aparentemente agresivas no resulta ser tan perjudicial como se pudiera pensar en un principio.

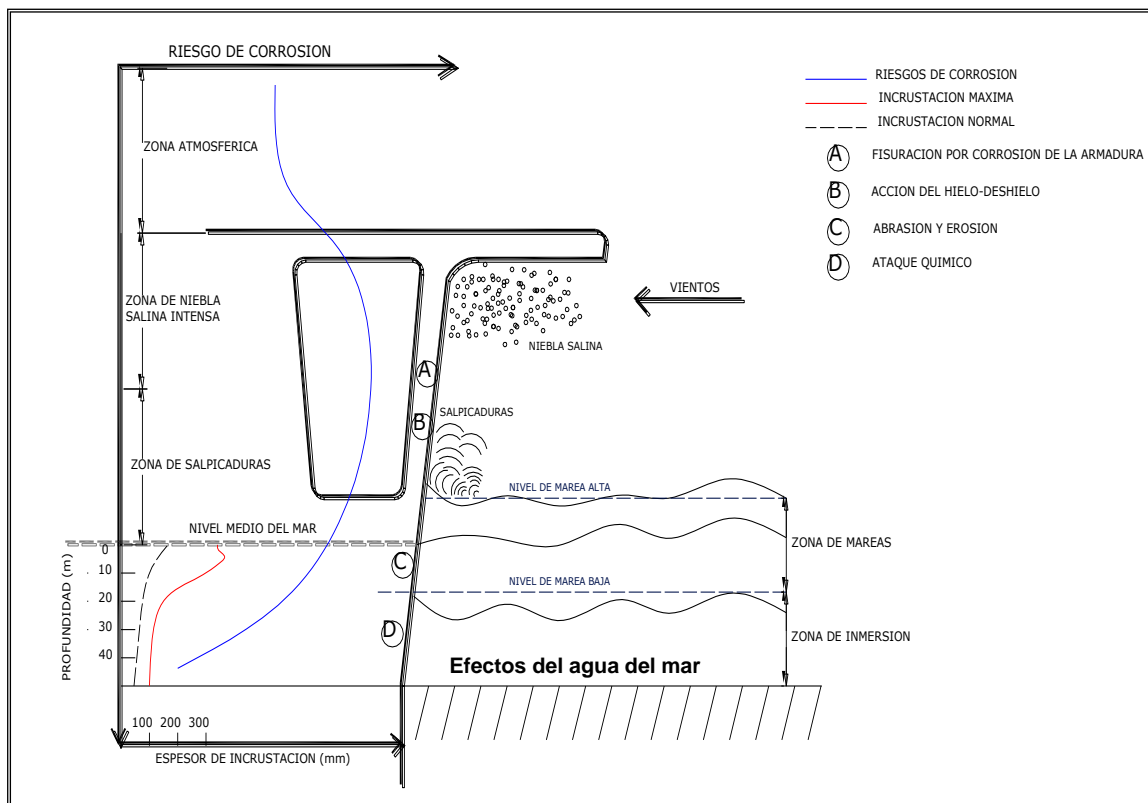


Fig. 2.6 Zonas de influencia en construcciones que presentan contacto directo con la costa

En general se recomienda que el cemento empleado en concretos expuestos al agua de mar contengan una reducida concentración de C_3A para reducir el ataque por sulfatos, por lo que el empleo de cementos con resistencias al agua de mar es recomendado.

- Reacción álcali-agregado

La reacción álcali-agregado es una causa del deterioro de estructuras de concreto que se produce cuando se ponen en contacto agregados que tienen compuestos reactivos con componentes alcalinos y se dan unas condiciones de elevada humedad. Para evitar estas reacciones se recomienda no emplear agregados potencialmente reactivos y el empleo de cementos con un bajo contenido de óxidos alcalinos, el cual conviene que sea inferior al 0.60% de Na_2O . En caso de no poder disponer de agregados adecuados se recomienda tomar medidas adicionales, como por ejemplo emplear cementos mezclados (cementos conteniendo cantidades de escoria superiores al 65 % o cementos puzolanicos con más del 30% de cenizas volantes o puzolanas) o añadir directamente adiciones al concreto, excepto las que contenga caliza; empleo de impermeabilizaciones con las pinturas hidrófobas, etc.⁷

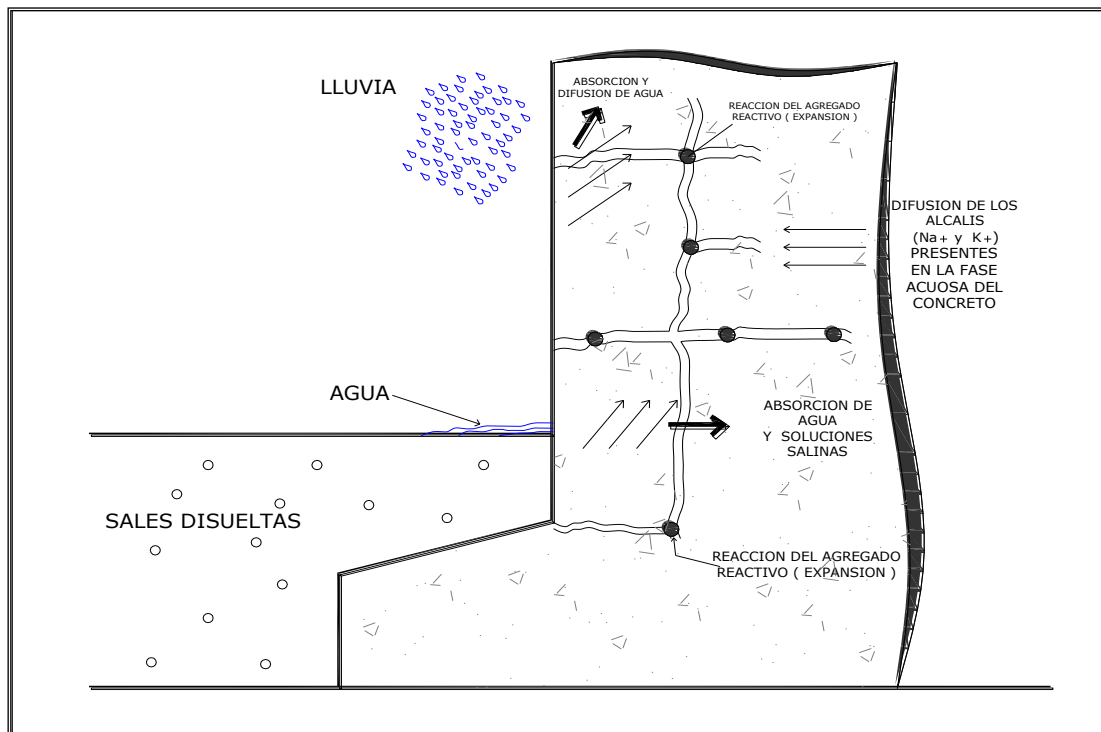


Fig. 2.7 Mecanismo de la reacción álcali-agregado

⁷ M. A. Sanjuán Barbudo y P. Castro Borges (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 25-27

CAPITULO.-3

DURABILIDAD DEL CONCRETO EN LA COSTA

El problema más importante que se observa en las construcciones de concreto es actualmente el deterioro por acciones ambientales. En las zonas costeras los principales agentes agresores son cloruros, sulfatos y la humedad, los cuales penetran a través de la red de poros del concreto. Algunos de estos agentes provocan daños directamente al concreto pero principalmente producen la corrosión del acero de refuerzo; esto provoca disminución de la resistencia de los elementos por pérdida de área de acero y posteriormente, el agrietamiento y desprendimiento del concreto.



Fig. 3.1 Exposición de acero de refuerzo debido a corrosión.

El agua de mar debe ser considerada como un medio de contacto de alto riesgo para la durabilidad del concreto reforzado; en primer término por su elevado contenido de cloruros que le confiere un carácter muy corrosivo para el acero de refuerzo y en segundo lugar por su moderada proporción de sulfatos y su consecuente acción química sobre el concreto de cemento portland. Estas condiciones tienden a ser más severas en el agua de las albuferas y pantanos costeros, a causa de la evaporación solar que incrementa la concentración de dichas sales.

- Definición

El American Concrete Institute 201 (ACI 2002) define la durabilidad del concreto como su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir, que el concreto durable debe retener su forma original, su calidad y sus condiciones de servicio, cuando se exponga a su medio ambiente. Como resultado de las interacciones ambientales, la microestructura y consecuentemente las propiedades de los materiales, cambian con el tiempo. El material alcanza el final de su vida de servicio cuando sus propiedades se han deteriorado a tal punto que continuar utilizándolo se considera inseguro o antieconómico.⁸

3.1 Tipología estructural localizada en el ambiente marino

Las estructuras en ambiente marino pueden clasificarse según su ubicación y las condiciones agresivas del medio, en las siguientes zonas, cuyas fronteras en la realidad no esten definidas:

- 1) Zona de inmersión:

El concreto que se encuentra permanentemente sumergido por debajo de las zonas de mareas, es capaz de proteger las barras de acero de refuerzo pues debido a la débil concentración de oxígeno en el agua que impide la actividad corrosiva del ion cloruro, en el caso de haberse introducido hasta las barras.

En algunos elementos sumergidos, que sobresalen por encima de las zonas de mareas altas – como ocurre en los pilotes - se produce la corrosión en las zonas emergentes por efecto del fenómeno denominado de “macro celdas”. Esto se debe al estado de humedad permanente del concreto que facilita la corrosión electrolítica. El mecanismo se inicia en las zonas de mareas, en una sección de

⁸ ACI Manual of Concrete Practice, (2002) American Concrete Institute. **Guía para obtener un concreto durable (ACI 201.2R)**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1

concreto pobre en cemento (generalmente por segregación), que bajo la acción del ion cloruro actúa como ánodo y en la zona sumergida, se constituye el cátodo, con eventual despasivación del acero, sin corroerse por la falta de oxígeno.

En las zonas sumergidas, la penetración del agua tiene lugar inicialmente por succión capilar y se acelera en razón de la presión hidráulica, el agua ingresa con sustancias disueltas como el cloro y los sulfatos.

En estos casos el comportamiento del concreto a la corrosión se diferencia según la profundidad en que se encuentra. En las zonas más profundas, la permeabilidad del concreto disminuye, pues se cierran los poros superficiales.

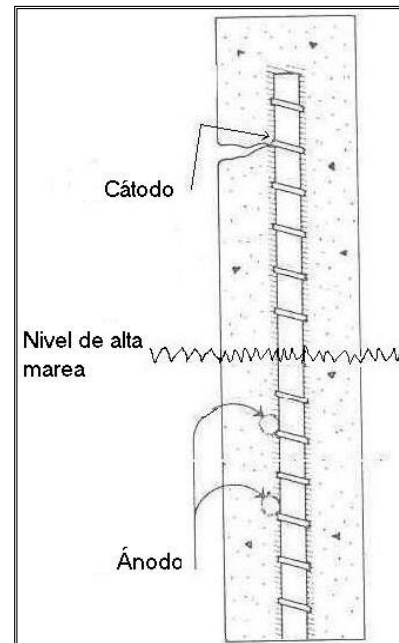


Fig. 3.2 Fenómeno de la Macro celda

2) Zona de marea:

Comprende los elementos entre los niveles de marea alta y baja, donde el concreto está permanentemente húmedo, debido a que la inmersión es cíclica en el lapso de un día.

Los poros se encuentran saturados, pues, el tiempo de baja marea es reducido y no se produce la desecación, lo que disminuye el peligro de corrosión, pues el concreto absorbe agua más rápidamente que la pierde. En esta zona el agua ingresa por succión capilar, transportando las sustancias disueltas como el cloro y los sulfatos, sin difusión de gases.

En el concreto comprendido entre mareas, se pueden producir fisuras que adelanten la corrosión, sea por golpes de impacto o por la acción de las olas.

3) Zona de salpicaduras:

Se ubica por encima del nivel de la marea alta, propensa a la salpicadura de las olas y el baño de la espuma, presenta el riesgo de ciclos alternados de humidificación y secado, de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad del medio, que pueden afectar severamente el concreto.

En el período húmedo se produce el ingreso del ion cloruro por difusión, en el secado se elimina el agua en exceso, pero el concreto retiene el cloro, al repetirse el ciclo sucesivamente el porcentaje ion cloruro resulta muy elevado.

En esta zona de abundante oxígeno, la corrosión por cloro puede darse conjuntamente con la corrosión por carbonatación.

4) Zona del ambiente marino:

El concreto no está en contacto con el agua de mar, pero recibe las sales procedentes de la brisa marina y la niebla salina. Puede comprender muchos kilómetros al interior de la costa dependiendo de las características de los vientos dominantes.

Las construcciones de concreto ubicadas en el litoral o alrededores, son propensas a la corrosión por cloro en suspensión en la atmósfera, en forma de microscópicas gotas de agua de mar. En la niebla o aerosol la concentración salina de cloruros y sulfatos eventualmente puede ser mayor que en el agua de mar, debido a la gran dispersión de las gotas y la evaporación parcial de agua, en especial cuando la temperatura es alta y la humedad relativa es baja.

En esta zona la corrosión produce fallas características en el concreto, como fisuras, grietas y desprendimientos del revestimiento, pero además, causa un peligroso daño invisible, que afecta las estructuras en casos de sismos. En efecto, los cloruros de la brisa marina atacan la estructura reduciendo la sección del acero

de refuerzo, de manera que cuando recibe solicitaciones por efecto del sismo, únicamente puede soportar una pequeña parte de la carga de diseño.

En las estructuras aéreas los poros mayores del concreto generalmente se llenan de aire pero cuando la humedad del ambiente es mayor, la superficie de los poros se cubre con una capa de agua adsorbida. Los cloruros disueltos se difunden a través de esta capa de agua que recubre las paredes de los poros o a través de los poros llenos de agua; si la cantidad de agua es menor, entonces la cantidad de difusión se reduce. El transporte de las sustancias disueltas en el agua es un proceso de difusión por la humedad del aire, inducido por la gradiente de tensiones.



Fig. 3.3 Exposición de acero de refuerzo, al perder el recubrimiento colocado debido al incremento del volumen del refuerzo y el posterior desprendimiento del concreto.

3.2 Composición química del agua del mar

El agua de mar contiene sales disueltas, agresivas para el concreto. Están presentes las siguientes: cloruro sódico (NaCl), cloruro magnésico (MgCl_2), sulfato

magnésico ($MgSO_4$), sulfato cálcico ($CaSO_4$), cloruro potásico (KCl) y sulfato potásico (K_2SO_4).

Concentración (g por 100 cm ³)					
Ion	Mar del Norte	Océano Atlántico	Litoral Mexicano	Mar Báltico	Golfo Pérsico
Sodio	1,220	1,110	1,090	0,219	1,310
Potasio	0,055	0,040	0,039	0,007	0,067
Calcio	0,043	0,048	0,041	0,005	0,050
Magnesia	0,111	0,121	0,130	0,026	0,148
Cloro	1,655	2,000	1,933	0,396	2,300
Sulfato	0,222	0,218	0,268	0,058	0,400
Total	3,306	3,537	3,500	0,711	4,275

Tabla No. 1 Composición química de diferentes zonas del mar en el mundo

La corrosión en el concreto, se vincula con la temperatura y humedad. Como se sabe, el incremento de temperatura potencia todas las reacciones químicas. Se estima que un aumento de la temperatura en 10°C duplica la velocidad de la reacción. La corrosión por carbonatación se activa en el rango de 60 a 90 % de humedad relativa. En el caso de la corrosión por cloruros el efecto de la humedad es importante en especial en los niveles de 70 a 90 % de humedad relativa. Experiencias en regiones cálidas muestran que la elevada humedad relativa favorece el fenómeno de la corrosión

La experiencia internacional sobre desarreglos por corrosión en estructuras de concreto armado y pretensado, demuestra que la corrosión se incrementa en las zonas marítimas de climas semitropicales y subtropicales, con temperaturas elevadas y apreciable humedad relativa, en comparación con los resultados que se obtienen en climas fríos o templados. De esta manera, en las regiones tropicales se hace más difícil la prevención, sea por el conveniente diseño estructural o la adopción de apropiados sistemas de construcción. Por añadidura, los reglamentos de construcción de los países en desarrollo, como es el caso de

México, generalmente se basan en códigos de construcción del hemisferio Norte, que recogen experiencias de climas mas benignos.

3.3 Cargas ambientales

Los principales efectos que influyen adversamente en la durabilidad del concreto pueden clasificarse como agentes físicos o químicos. Entre los primeros, los más importantes son: el desgaste de la superficie ocasionada por abrasión o erosión (asociada al exceso de tránsito o a cualquier otro tipo de fricción); el agrietamiento debido a la presión de la cristalización de sales contenidas en los poros del material (asociadas con el contacto con soluciones salinas, en cimientos o muros, por ejemplo); y la exposición a temperaturas extremas, como son las heladas o el fuego.

El segundo tipo de factores ocasionan reacciones químicas entre los agentes agresivos presentes en el ambiente externo y los constituyentes de la pasta de cemento, o incluso entre los mismos constituyentes del concreto.

Entre los daños químicos más importantes están los provocados por: hidrólisis o disolución del hidróxido de calcio de la pasta de cemento (ocasionado por el contacto de aguas puras o suaves con contenido escaso o nulo del ión de calcio); diversas reacciones que producen la formación de productos expansivos como son: la reacción entre los álcalis contenidos en la pasta de cemento y ciertos materiales reactivos presentes en los agregados (en el caso en que éstos no cumplen con su condición de inertes); el ataque al concreto por sulfatos contenidos en el agua o el suelo, o por ácidos que son generados por diferentes actividades humanas (industriales, agrícolas, etc.); la presencia de cantidades importantes de MgO y CaO en el cemento que provocan un efecto expansivo al

hidratarse; y la corrosión de metales embebidos en el concreto tales como ductos, tubos y, principalmente, acero de refuerzo.⁹

3.4 La humedad y los procesos de deterioro en principio

La naturaleza básica del deterioro en su proceso electroquímico, el cual concierne a la corrosión del refuerzo. Un ataque químico involucra la disolución de sustancias o reacciones químicas entre sustancias y componentes del concreto. Los productos de la reacción, caracterizados por la disolución o expansión, pueden causar muchos problemas. Los ejemplos incluyen:

- Ataque ácido que disuelve el aglomerante de la superficie del concreto.
- Ataque de sulfato desde la superficie, por el agua del subsuelo o agua de mar, o ataque del sulfato interno (formación retardada de etringita), creando un producto de reacción que absorbe una cantidad significativa de agua, causando expansión interna y agrietamiento.
- Reacciones Alkali-agregado que proviene del cemento, o del exterior, reaccionando con los componentes de ciertos agregados reactivos.
- Carbonatación proveniente del dióxido de carbono, que reacciona con los componentes en el líquido de los poros.
- Ataque de agua suave causando lixiviación de los álcalis y óxido de calcio, que a su vez causa disolución del hidróxido de calcio depositado y los componentes del aglomerante.

El ataque electroquímico típico es la corrosión del refuerzo, en donde las reacciones químicas en el ánodo y en el cátodo se combinan con una corriente eléctrica a través del acero y del concreto. La humedad juega un papel significativo en la mayoría de las reacciones químicas en el concreto y en partes

⁹ Exposición “**La Corrosión del Concreto en el Ambiente Marino**”, Ing. M. Gonzales de la Cotera, I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, Diciembre 1998, Pag. 15-17

de los procesos físicos y químicos en varios fenómenos de deterioro. La humedad puede involucrar:

- Un material con propiedades diferentes
- Un soluto, para reactivos y iones
- Un medio de transporte
- Un medio de expansión
- Un líquido con presión de agua en los poros (negativo)

El efecto de la humedad usualmente puede ser definido como un tipo de límite crítico de humedad, por debajo del cual no ocurren cambios significativos.¹⁰

3.5 Ambiente químicamente agresivo

El concreto es un material que en general tiene un comportamiento satisfactorio ante diversos ambientes químicamente agresivos. El concepto básico reside en que el concreto es químicamente inalterable al ataque de agentes químicos que se hallan en estado sólido.

Para que exista alguna posibilidad de agresión, el agente químico debe estar en solución en una cierta concentración y además tener la opción de ingresar en la estructura de la pasta durante un cierto tiempo, es decir debe haber un cierto flujo de la solución concentrada hacia el interior del concreto y este flujo debe mantenerse un tiempo suficiente para que se produzca la reacción.

Este marco de referencia reduce pues las posibilidades de ataque químico externo al concreto, sin embargo existen agentes que incrementan la posibilidad de deterioro como son: las temperaturas elevadas, velocidades de flujo altas, mucha

¹⁰ Revista “Construcción y Tecnología”, Kyösti Tuutti y Lars-Olaf Nilsson **Art. Durabilidad del Concreto**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Diciembre 2007, Pág. 24-27.

absorción y permeabilidad, el curado deficiente y los ciclos de humedecimiento y secado.

Los ambientes agresivos usuales están constituidos por el aire, agua y suelos contaminados que entran en contacto con las estructuras de concreto.

Se puede decir pues que el concreto es uno de los materiales que demuestran mayor durabilidad frente a ambientes químicamente agresivos, ya que si se compara estadísticamente los casos de deterioro con aquellos en que mantiene sus condiciones iniciales pese a la agresividad, se concluye que estos casos son excepcionales.¹¹

VELOCIDAD DE ATAQUE A TEMPERATURA AMBIENTE	ACIDOS INORGANICOS	ACIDOS ORGANICOS	SOLUCIONES ALKALINAS	SOLUCIONES SALINAS
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	–	Cloruro de aluminio
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de Sodio >20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio
Lenta	Carbónico	–	Hidróxido de Sodio 10% a 20% Hipoclorito de sodio	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cloruro de sodio
Insignificante	–	Oxálico Tártarico	Hidróxido de Sodio <10% Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de Sodio

Tabla No. 2 Efecto de sustancias químicas en el concreto

¹¹ http://fic.uni.edu.pe/construccion/concreto/tec_conc02.html

3.6 Degradación del concreto

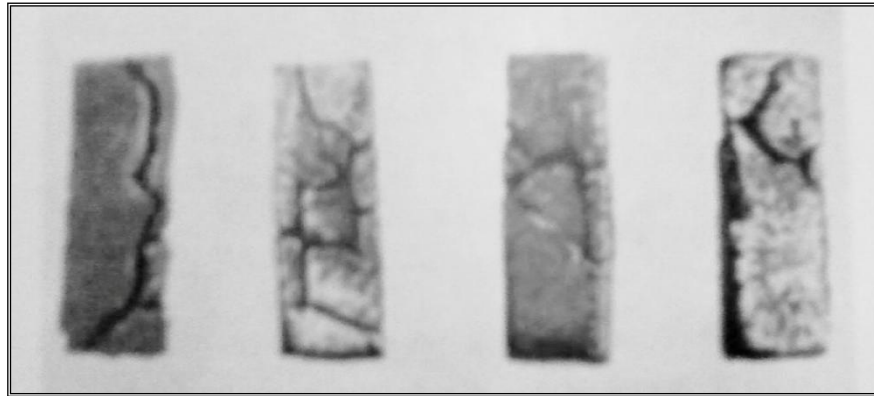


Fig. 3.4 Muestras de laboratorio sometidas a sustancias agresivas encontradas en el ambiente marino

- **Concreto simple**

La degradación del concreto constituye un caso excepcional. Su aparición es lógica en las obras marinas, en obras de la industria química o en cimentaciones bañadas por aguas agresivas. La velocidad real de la corrosión en estructuras de concreto, aún no se ha podido establecer, ya que la intensidad de los procesos de corrosión en la naturaleza depende de muchos factores, aun no bien conocidos y por lo tanto, no bien apreciados.

El concreto, en un medio húmedo o saturado de líquido agresivo, sufre daños de corrosión, su superficie se hace porosa y la masa se afloja. Si esta acción agresiva es intensa y duradera puede generar la destrucción del concreto.

La corrosión del concreto es un proceso complejo que depende, tanto de las propiedades del medio agresivo, de la concentración de sus ácidos, bases o sales, así como de las distintas propiedades que posea dicho concreto. La magnitud de la corrosión del concreto depende esencialmente del medio exterior, es decir, de las sustancias agresivas, por ejemplo, la composición química de la capa freática, de las propiedades de las rocas en contacto con dicha capa (terrenos), de la

profundidad a la que se encuentre el nivel freático, condiciones climatológicas, condiciones microbiológicas, etc.¹²

- **Acero de refuerzo**



Fig. 3.5 Pérdida del recubrimiento del acero de refuerzo por la corrosión del mismo.

Este último factor es el que con mayor frecuencia provoca daños en las edificaciones de concreto. En este caso la durabilidad del concreto reforzado depende de las características del concreto y del acero, pero principalmente de la interrelación entre ellos. En condiciones normales, el concreto que envuelve al acero de refuerzo, conocido como recubrimiento, le confiere una buena protección, tanto física como química, a dicho refuerzo. El recubrimiento proporciona un ambiente alcalino que rodea al acero propiciando la formación de una capa de óxido, llamada película pasivante, que lo protege contra la corrosión.

Sin embargo, el recubrimiento no constituye una barrera perfecta y permanente contra los agentes agresivos del ambiente iniciadores de la corrosión (iones agresivos, humedad, dióxido de carbono y oxígeno, principalmente); lo anterior se debe a que la pasta de cemento es un material poroso que está constituido por dos fases: una sólida de minerales hidratados y una líquida contenida en el interior de los poros que se denomina la solución de poro. En promedio, la porosidad total

¹² Exposición “**La Corrosión del Concreto en el Ambiente Marino**”, Ing. M. Gonzales de la Cotera, I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, Diciembre 1998, Pag. 15-17

del concreto es de alrededor de 20% del volumen del material y depende, principalmente, de la relación agua/cemento, de la compactación y del curado (factores típicos que influyen en las principales propiedades físicas del material). El tamaño y la interconexión de los poros y de las grietas (que es otra respuesta natural del material) determinan la tasa de ingreso de los mencionados agentes.

La corrosión del acero de refuerzo ocurre, principalmente, por la destrucción de la película pasivante formada de manera natural en el acero. Esto ocurre por dos causas principales: que haya una cantidad suficiente de cloruros u otros iones despasivantes, o que disminuya la alcalinidad del concreto al reaccionar con sustancias del medio ambiente. La corrosión del acero en el concreto es un proceso electroquímico (reacción química con transferencia de electrones y iones) en el que se forman celdas de corrosión en la superficie del acero, debido a las diferencias en las concentraciones de iones disueltos. La transformación del hierro metálico corroído es acompañada de un incremento en el volumen que, dependiendo de su estado de oxidación, puede ser tan grande como 600% del metal original. Este incremento de volumen es la causa principal de la expansión y del agrietamiento del concreto que suelen observarse en las construcciones de la costa; más que cualquier otra que pudiera relacionarse con la resistencia del material ante la acción de las demás cargas (no ambientales).

Para que se produzca la corrosión del acero de refuerzo es absolutamente necesaria la presencia tanto de aire como de agua en la superficie del área catódica (región donde se produce la reducción y la corriente iónica entra al metal); además, es necesario que la película superficial de óxido de hierro que cubre el acero, sea removida del área anódica (región donde se produce la oxidación y la corriente iónica fluye hacia el electrolito).

Se ha encontrado que la capa pasivante del acero es estable cuando el pH de la solución de poro del cemento hidratado permanece por encima de 11.5. Puesto

que el cemento hidratado contiene álcalis e hidróxido de calcio sólido, normalmente hay suficiente reserva alcalina para mantener el pH por encima de ese valor. Dependiendo del tamaño y la continuidad de los poros en la estructura de la pasta de cemento, el material tendrá una cierta permeabilidad y el CO₂ del medio ambiente podrá carbonatar la mayor parte del hidróxido de calcio de la pasta, dando como resultado que el pH en las cercanías del acero pueda ser reducido por debajo de 11.5, destruyendo así la pasividad del metal, y procurando las condiciones para el proceso de corrosión

En presencia de los iones de cloro, la película protectora puede ser destruida aún a valores considerablemente arriba de 11.5 de pH (dependiendo de la relación molar Cl⁻/OH⁻). Además, cuando grandes cantidades de cloro están presentes, el concreto tiende a retener más humedad, lo que también incrementa el riesgo de corrosión. Puesto que el agua, el oxígeno y los iones de cloro juegan papeles importantes en la corrosión del acero embebido, es obvio que la permeabilidad del concreto es la clave para controlar los procesos involucrados en el fenómeno. Los parámetros de la mezcla de concreto para asegurar una baja permeabilidad son principalmente: la relación agua/cemento, un contenido adecuado de cemento y el uso de aditivos minerales.

El ACI 318 (ACI 2002) especifica una relación agua/cemento máxima de 0,4 para concreto reforzado expuesto al ambiente marino; siendo igualmente esenciales para garantizar la baja permeabilidad de la mezcla, una compactación y un curado adecuados. En la costa, la situación que más frecuentemente desencadena la corrosión es la presencia de cloruros.

Éstos pueden ingresar al concreto por adición durante su fabricación por medio del uso de aditivos (como es el caso del acelerante de fraguado a base de CaCl₂, muy utilizado en México) o de agua y agregados previamente contaminados; o también pueden ingresar por medio de la acción del aerosol marino; en donde la

velocidad y dirección del viento predominante juega un papel importante. Los cloruros del exterior suelen penetrar por fuerzas de succión capilar o por difusión; por lo general ocurre por la combinación de ambos mecanismos, e incluso, de otros.

Se ha estudiado el nivel necesario de los cloruros en el concreto para que se rompa la capa pasivante, y se ha encontrado que ese valor depende de muy variados factores (como el tipo de cemento, las condiciones de curado, la relación agua/cemento, etc., que son los mismos factores que definen la mayoría de las propiedades mecánicas y la calidad del material). El intervalo del nivel de cloruros iniciadores de la corrosión se puede considerar entre 0,2 y 2,0 kg/m³ de concreto, de acuerdo a investigaciones realizadas en diversos lugares del mundo en los últimos 30 años.¹³

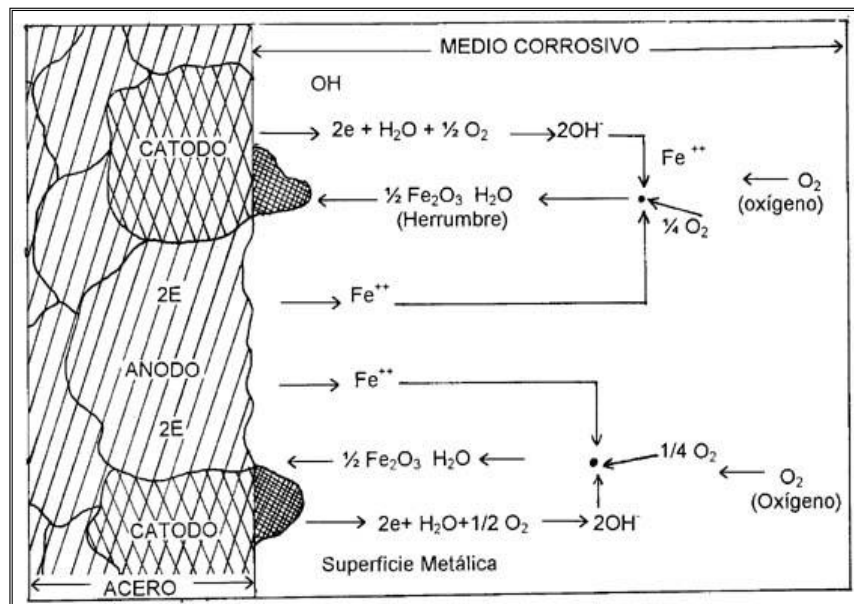


Fig. 3.6 Proceso de corrosión en el acero

13 Revista "Construcción y Tecnología", Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno, Pedro Castro Borges. **Art. Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Enero 2008, Pág. 46-49.

- **Formas de corrosión del acero**

Para evaluar los daños producidos por la corrosión es muy conveniente clasificarlos según la forma como se producen:

Cuando la superficie del metal se corroe en una forma casi uniforme se dice que la corrosión es de tipo "superficial". Es la forma más benigna o menos peligrosa pues el material se va gastando gradualmente extendiéndose en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y su penetración media es igual en todos los puntos. Un ataque de este tipo permite evaluar fácilmente y con bastante exactitud la vida de servicio de los materiales expuestos a él.

A veces el ataque se profundiza más en algunas partes pero sin dejar de presentar el carácter de ataque general constituyendo un caso intermedio entre corrosión uniforme y corrosión localizada, en este caso se dice que se trata de una corrosión "en placas".

Existe otra forma de corrosión, conocida como corrosión "por picadura" que se presenta cuando una superficie metálica que ha sido pasivada se expone a un medio agresivo. Durante el picado, el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas y se propaga hacia el interior del metal formando en ocasiones túneles microscópicos.

La corrosión se puede presentar de varias formas que difieren en apariencia.

Corrosión general:

La corrosión general es la forma más común que se puede encontrar y la más importante en términos de pérdidas económicas. Se caracteriza por un ataque más o menos uniforme en toda la superficie expuesta con solamente variaciones mínimas en la profundidad del daño. En las estructuras se pueden usar recubrimientos especiales para minimizar el ataque de la corrosión.

Corrosión Galvánica:

Se puede producir un daño severo por corrosión cuando dos o más metales distintos se acoplan eléctricamente. Esto se conoce como corrosión galvánica y resulta por la existencia de una diferencia de potencial entre los metales acoplados que causa un flujo de corriente entre ellos. El metal más activo padece una corrosión más acelerada, mientras que la corrosión en los miembros menos activos se retarda o se elimina.

Corrosión por hendiduras:

La corrosión por hendiduras es un tipo que se presenta en espacios confinados o hendiduras que se forman cuando los componentes están en contacto estrecho. Para que se presente la corrosión por hendidura, la hendidura debe ser muy cerrada, con dimensiones menores a un milímetro. Aunque no se han definido los límites de la brecha, es conocido que este tipo de corrosión no se presenta en espacios más grandes.

Para que se presente la corrosión por hendiduras no es necesario que las dos superficies de aproximación sean metálicas. También se ha reportado corrosión por hendiduras formadas por varios materiales no metálicos (polímeros, asfaltos, vidrio, neopreno) en contacto con superficies metálicas. El hecho de que esto pueda ocurrir es de una importancia especial en la aplicación y selección de materiales de juntas de dilatación, apoyos, etc.

Corrosión por Picaduras:

Las picaduras son una parte localizada de corrosión en la que el ataque está confinado a muchas cavidades pequeñas en la superficie del metal. Las cavidades que se forman pueden variar en cantidad, tamaño y forma. Las picaduras pueden contribuir de manera importante a una falla general, en componentes sujetos a esfuerzos muy altos, dando como consecuencia la falla por corrosión bajo tensión.

El picado se puede presentar en varios metales y aleaciones, pero los aceros inoxidables y las aleaciones de aluminio son susceptibles en especial a este tipo de degradación.

Agrietamiento por corrosión y esfuerzos: El agrietamiento por corrosión y esfuerzos es una falla corrosiva en la que se forman las grietas de un componente bajo la acción combinada de esfuerzos mecánicos y un medio ambiente agresivo. Los esfuerzos y el medio ambiente agresivo se unen para ocasionar una falla súbita.

Por lo general los requisitos para que se presente la corrosión son dos:

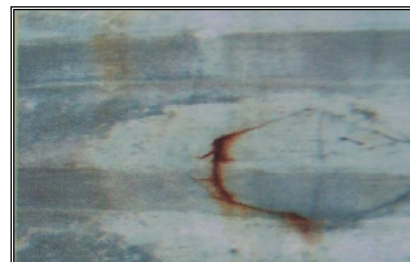
1.- Un metal o aleación susceptibles. Aceros de alta resistencia, latones y aceros inoxidables, y aleaciones comunes de aluminio, acero, fierro, etc.

2.- Un medio ambiente específico. Por lo general un ambiente húmedo o salado, por lo general un ambiente lleno de iones específicos (iones de cloruro, iones de amonio, etc.)

ESCURRIMIENTO



DESCONCHADO



FALLA



EXPOSICION



Fig. 3.7 Diferentes representaciones de corrosión en el concreto

3.7 Influencia del método de dosificación en la durabilidad

Debido a la estrecha dependencia de la intensidad de penetración de los agentes corrosivos con su porosidad y la relación de ésta, con la compacidad de la masa, ésta debe lograrse con la mayor impermeabilidad posible. Mediante investigaciones científicas y sus comprobaciones en la producción de construcciones, ha quedado demostrado la gran influencia que tiene el método de dosificar el concreto en la calidad de la masa de este que envuelve las barras de acero y su resistencia al paso de los agentes agresivos externos, razón por la que se creó un nuevo método, que tiene en cuenta estas exigencias.

Partiendo de la necesidad de mejorar la durabilidad de las construcciones hechas con concreto, ha creado un nuevo método de dosificación, después de largos estudios e investigaciones científicas, que obligaron a probar más de 20,000 especímenes. Este método, entre otras cosas:

- A) Determina e incluye la influencia de las características formales de los agregados gruesos.
- B) Establece una nueva forma de determinar las proporciones de los agregados finos y gruesos.
- C) Incluye en su ecuación, de forma directa, la influencia de la consistencia del concreto en su resistencia. Lo cual se logra por primera vez en una ecuación.
- D) Hace la determinación de la cantidad de agua, para una consistencia requerida, de forma más exacta y racional.

Este método, aquí apenas esbozado, garantiza los parámetros que se exigen para lograr la durabilidad del concreto. Este método de dosificar concreto, que partió de lograr la máxima compacidad de su masa, demostró y comprobó por estudio y comparaciones con otros métodos, que los tradicionales que determinan la relación óptima entre los agregados (arena y grava) no son válidos para obtener la

máxima compacidad, como punto de partida fundamental para el logro de dichos objetivos.

El método -como ya se ha dicho en este texto- también incorpora nuevos conceptos y factores no tomados en cuenta por los investigadores, tales como: determinación de la característica de los agregados gruesos, la influencia de la consistencia de la masa del concreto en estado fresco de una forma directa y la determinación de una forma mas exacta de la cantidad de agua de la mezcla para obtener una consistencia necesaria.

La aplicación del método aporta ahorros de cemento en la producción de concreto y logra que éste sea más compacto y menos poros, garantizando una mejor protección a las barras de acero que circundan, lo cual lo hacen un método ideal para dosificar concreto de elevado desempeño.¹⁴

¹⁴ Revista “Construcción y Tecnología”, Vitervo O’reilly **Art. Acción Acerca de la durabilidad del concreto.** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Marzo 2008, Pág. 50-53.

CAPITULO.-4

PRINCIPALES AGENTES AGRESIVOS EN LA COSTA

La planeación y el diseño de estructuras de concreto armado en la costa, deberán entonces no solamente estar basados en el uso de la estructura, sino también en las condiciones ambientales y en la vida útil esperada de la misma. Estas definiciones básicas deberán estar reflejadas en los materiales y especificaciones de construcción, y tanto en el concepto como en los detalles estructurales.



Fig. 4.1 Colocación de acero de refuerzo en obra marítima

En el contexto de la práctica común, se diseña y detalla no sólo para las cargas que actuarán en la vida útil de una estructura, sino también para los efectos de agrietamiento y temperatura; sin embargo, sólo se consideran condiciones especiales de exposición para grupos muy particulares de estructuras.

Es muy común que los reglamentos y normas actuales sólo prescriban las variaciones adecuadas de la relación agua/cemento y del recubrimiento de concreto sobre el acero de refuerzo de acuerdo con una clasificación muy simple de las condiciones de exposición. Sin embargo, en la práctica se encuentran muchas y más diversificadas condiciones de exposición, y no sólo en relación con el medio ambiente, sino también según el uso pretendido de la estructura.

En condiciones de ambientes eminentemente agresivos, las precauciones y los cuidados en la construcción deben realmente extremarse. No obstante, existen condiciones no tan claramente agresivas, por lo que, con el fin de obtener estructuras durables se considera que éstas son afectadas por el viento y la humedad marítima que contienen grandes cantidades de sal, así como por los ciclos de humedecimiento y secado. Se vuelve entonces muy importante la detección y el estudio de las características climáticas más relevantes de la región en la que se ubicará la estructura, es decir, los cambios estacionales de la dirección de los vientos, la temperatura, la humedad relativa y la precipitación pluvial; inclusive, podría en muchos casos resultar deseable y útil contar con el análisis de la composición química del agua de mar.

4.1 Efectos en el concreto armado

La agresión de las sales marinas sobre el concreto no es significativa, generalmente no llegan a causar desarreglos que inhabiliten la estructura, como sí ocurre con la corrosión de las barras de refuerzo en el concreto armado. En este caso, el concreto se dilata y se fractura, la sección del acero se reduce, pierde resistencia a la tracción y a la fatiga, generalizándose progresivamente el proceso corrosivo.

En el concreto armado en contacto -permanente o intermitente- con agua de mar, los sulfatos y cloruros de calcio, magnesio y alcalinos, que se encuentran de forma inseparable, pueden penetrar por porosidad, capilaridad, ósmosis y difusión. Los sulfatos atacan al concreto formando compuestos expansivos causantes de fisuración. Los cloruros, si llegan hasta la armadura, causan la despasivación de ésta y provocan su corrosión.

La fisuración ocasionada por los sulfatos facilita la penetración de los cloruros y la corrosión del acero de refuerzo. Los productos expansivos de la corrosión dan lugar a pérdida de adherencia y la fisuración interna que se suma a la externa

producida por los sulfatos, incrementando y acelerando ambas acciones. Estos fenómenos, en principio pueden presentarse sucesivamente, iniciándose con la difusión del ion cloruro cuyo radio iónico es menor que el del sulfato, por lo que se difunde más rápidamente, terminando por ocurrir de forma simultánea, con superposición de causa y efecto.

El ion sulfato, penetra más lentamente que el cloruro en el concreto, entra en contacto con el aluminato tricálcico anhidro si lo hay y con aluminatos de calcio hidratados. Con los aluminatos anhidro e hidratado libres de sulfato se puede formar etringita expansiva. También con el cloroaluminato de calcio hidratado por razones de solubilidad. Esta transformación, libera aluminato tricálcico, que pueden formar con el sulfato que lo ha liberado y con el que sigue penetrando, etringita secundaria y diferida, expansiva y más dañina aún que la primera, para un concreto consolidado. Además, se liberan aniones cloruro, los cuales quedan aptos para seguir penetrando, a las armaduras y provocan corrosión.¹⁵



Fig. 4.2 Acero de refuerzo afectado por cloruros en el ambiente marino

¹⁵ Exposición “**La Corrosión del Concreto en el Ambiente Marino**”, Ing. M. Gonzales de la Cotera, I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, Diciembre 1998, Pag. 15-17

4.2.- Sulfatos en su afectación hacia el concreto

De los mecanismos de degradación sin lugar a dudas los mas complicados por entender son los de carácter químico, debido a que no sólo es necesario entender el comportamiento del concreto como material único, sino también, la relación de este con el acero que lo refuerza y con los diferentes ambientes a que está sujeto. Enumerar cada una de las sustancias o medios que no son compatibles con el concreto es una labor muy amplia, y contempla un sin número de variables.

- **Origen de los sulfatos**

Un gran número de procesos destructivos debidos a la formación de sales se puede relacionar con la agresividad de los sulfatos. El ion sulfato causante de la degradación del concreto puede estar presente en el suelo o en el agua subterránea o freáticas, en soluciones acuosas de ácido sulfúrico o en formas de sales, sulfatos que son identificados como anión SO_4 .

Las sales de sulfatos dañinas al concreto están presentes principalmente en suelos selenitosos con yeso y en aguas freáticas de estos mismos suelos, cabe hacer mención que el agua de mar aparte de contener sales de sulfatos está compuesta de otras sales cuyo trabajo químico en conjunto, así como la exposición la hacen ser de mediana a severamente dañina.

Las aguas principalmente dañinas son aquellas que contienen concentraciones de: Sulfato de calcio (yeso), sulfato de sodio, sulfato de magnesio y aguas de desechos industriales.

Los sulfatos en forma de sales altamente agresivos son: De amonio, calcio, magnesio y de sodio.

Los sulfatos que se consideran menos agresivos son: De cobre, de aluminio de bario, por ser insolubles al agua.

La existencia de los sulfatos puede ser de origen natural, biológico o industrial.

- Formación de sulfatos en la naturaleza

En forma general todos los suelos contienen sulfatos los cuales constituyen un material alimenticio para las plantas. Su concentración por lo regular es baja oscila entre 0.01 y 0.05% del suelo seco, sin embargo no es raro encontrar suelos con una cantidad mayor (superior a 5%) en algunas regiones donde el suelo puede contener yeso.

Los suelos arcillosos o de aluvión son susceptibles de contener pirita que se oxida al contacto con el aire y la humedad formando ácido sulfúrico, si este es combinado con el carbonato de calcio finamente distribuido en el suelo formará yeso al mismo tiempo que se desprenderá ácido carbónico.

Una parte de ese yeso formado podrá ser disuelto por el agua freática donde permanecerá una parte cristalizada en forma de yeso. Consecuentemente se formarán tres componentes dañinos llamados componentes finales de la descomposición de la pirita: ácido sulfúrico, sales de sulfato y ácido carbónico.

La oxidación de la pirita se forma diferente cuando se encuentran vestigios de carbón el cual tendrá un efecto reductor en la oxidación. Sin embargo si existe aire en suficiente cantidad la oxidación se llevara a cabo independientemente de la presencia de carbón y la formación de sulfatos continuará.

Bajo la acción del ácido sulfúrico el potasio y el sodio contenido en los feldspatos es transformado en sulfato de sodio y sulfato de potasio los cuales son altamente solubles al agua y dañinos al concreto.

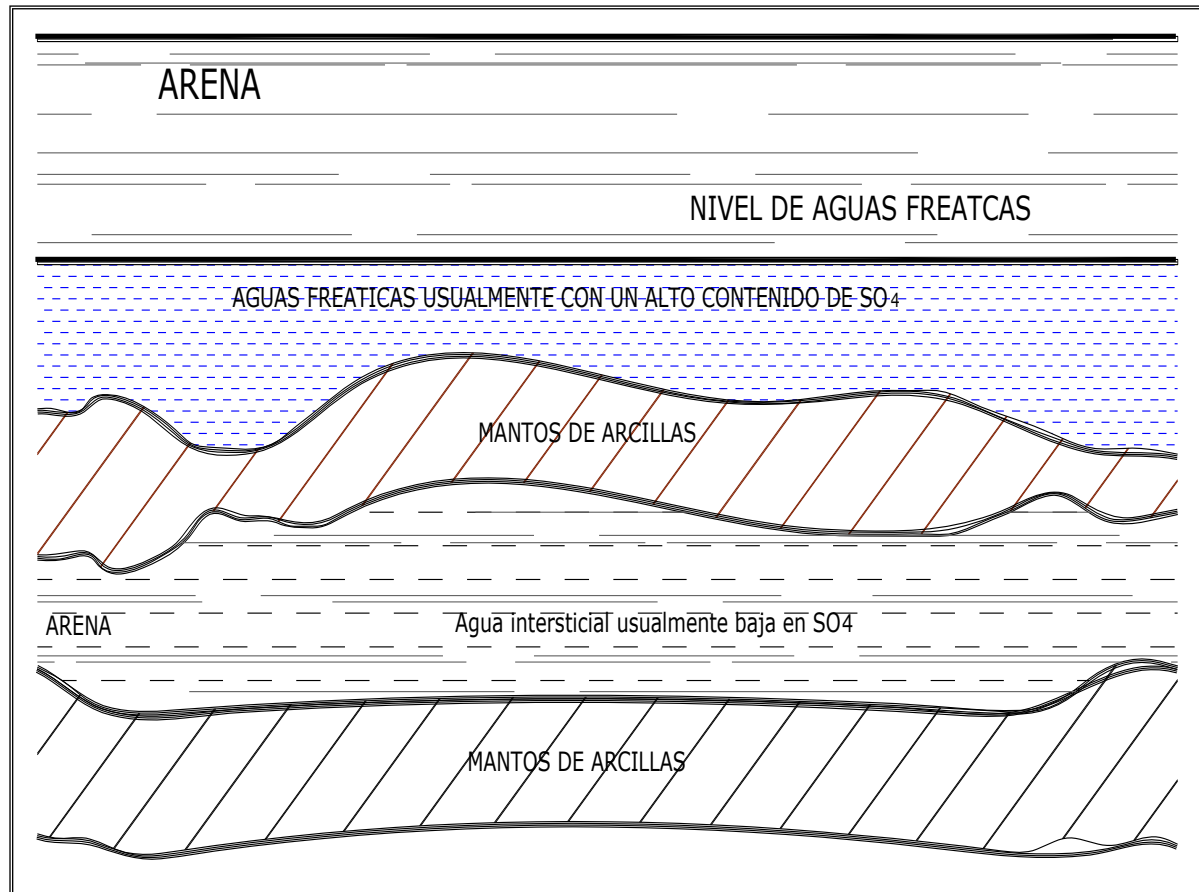


Fig. 4.3 Formación e introducción de sulfatos al agua freática.

Como se ha comentado una cantidad importante de los sulfatos son debidos a la oxidación, fenómeno que no se podría desarrollar sin la presencia del aire. Por lo que es fácilmente entendible que la formación de los sulfatos en las aguas de mantos artesianos profundos.

Los sulfatos de las aguas freáticas no dependen exclusivamente de la pirita, yeso y sustancias orgánicas contenidas en los suelos, sino también a los tres factores siguientes:

- 1.- Ventilación del suelo
- 2.- Velocidad del flujo de las aguas freáticas
- 3.- Velocidad de evaporación

- Formación de sulfatos debido a la acción biológica

Los sulfatos presentes en el suelo pueden provenir también de la descomposición biológica de tipo aerobia de sustancias orgánicas que contienen proteínas y/o azufre, lógicamente en este caso solo se toma en cuenta la albumina sulfúrica.

En ambientes húmedos el azufre normalmente está presente en forma de compuestos orgánicos. Sulfatos que pueden ser fácilmente disueltos en el suelo, mientras que el azufre combinado en forma de compuestos inorgánicos ofrece una mayor resistencia a ser disuelto y es transformado gradualmente en sulfatos. Esta transformación de azufre orgánico en sulfato requiere de la descomposición del nitrógeno contenido en las albúminas, en los nitratos, incrementando así la acidez del suelo.

De acuerdo a las investigaciones realizadas en diferentes países el uso de abonos artificiales y el estiércol aumentan en forma importante el contenido de sulfatos en el suelo, aunado a esto, el cultivo del suelo promueve la ventilación del suelo con lo que a ciertas profundidades se incrementan la oxidación del azufre en grandes extensiones, motivo por el cual en suelos cultivados las concentraciones de sulfatos pueden aumentar hasta en un 100%, respecto a suelos no cultivados.

La contaminación con sulfatos de origen fecal puede ocurrir por todas partes, con lo que la agresividad del suelo y las aguas freáticas se puede deber a la contaminación de diferentes sustancias. Cuando se lleva a cabo la construcción de una nueva obra en un terreno cultivado es necesario realizar un estudio profundo sobre el contenido de sulfatos en el suelo, así como el agua subterránea que pudiera llegar a tener contacto con el concreto.

- Formación de sulfatos como resultado de la contaminación industrial

Existe una gran cantidad de plantas industriales y fábricas, las cuales desalojan en sus entornos una gran cantidad de desechos, que al descomponerse en el medio ambiente producen sulfatos que penetran al suelo y a las aguas subterráneas, como un ejemplo de estas sustancias son el carbón o la escoria, por lo que es raro que se lleguen a encontrar concentraciones de sulfatos de 1000 a 2000 mg de SO_4 por litro. Los rellenos con carbón y escoria incrementarán los sulfatos en el agua subterránea y el suelo contaminado una extensión amplia.

Por otro lado en las zonas industriales así como en las zonas urbanas la combustión de carbón o gasolinas con una cierta cantidad de azufre liberará dióxido de azufre que en presencia de oxígeno y humedad forman el ácido sulfúrico. Un defecto indirecto del humo cargado de dióxido de azufre se hace presente en las ciudades donde las eflorescencias (salitre), y la degradación de ciertas fachadas son debidas frecuentemente a la formación de yeso y a la adherencia de polvos como cenizas, particulares de carbón, etc.

Las aguas de lluvia, en particular las lluvias ácidas pueden contener sulfatos en forma de ácido sulfúrico, el cual ataca la superficie del concreto endurecido así como el concreto plástico¹⁶

- **Riesgo de ataque por sulfatos**

Las sales inorgánicas genéricamente identificadas como sulfatos (de calcio, potasio, sodio, magnesio) son potencialmente dañinas para el concreto de cemento portland porque pueden atacarlo químicamente hasta producirle un deterioro considerable. Normalmente se reconoce que el daño es consecuencia de 2 reacciones químicas: en una los sulfatos externos que penetran en el concreto

¹⁶ Juan Luis Cottier Caviedes, Art. El Concreto Bajo la Influencia de los Sulfatos, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

reaccionan con los iones de calcio de este para formar sulfato de calcio (yeso), y en la otra los iones de sulfatos se combinan con los hidratos cálcicos y aluminosos para generar sulfoaluminato de calcio (etringita) dentro del concreto. La formación de los productos de reacción se acompaña de reblandecimiento del concreto y de aumentos de volumen que generan presiones internas hasta fracturarlo y desintegrarlo.

Tabla No. 3 Efectos probables en el concreto reforzado de los agentes dañinos que suele hallarse en los medios de contacto ordinarios		
MEDIO DE CONTACTO	AGENTE PERJUDICIAL	EFFECTO PROBABLE(+)
Suelo y agua freática	Sulfatos (SO_4^{2-}) Cloruros (Cl^-)	Ataque químico al concreto Corrosión del acero de refuerzo
Aguas Superficiales:		
Corrientes fluviales Deshielos Embalses y lagos Pantanos y ciénagas Agua de mar y de albuferas	Arrastre de sólidos Elevada solubilidad Fluctuación de nivel Sulfatos y cloruros Cloruros, sulfatos y otras sales. Oleajes y mareas	Desgaste superficial del concreto Lixiviación del concreto y Corrosión del refuerzo Lixiviación leve Ataque químico al concreto y corrosión del refuerzo Corrosión del refuerzo Ataque químico, desgaste y descostramiento del concreto
Aguas Residuales:		
Domesticas Industriales Salmueras	Gas sulfhídrico y ácido sulfúrico Diversos Cloruros, sulfatos y otras sales	Ataque químico al concreto Según composición Corrosión del refuerzo Ataque químico y descostramiento del concreto
Aire atmosférico:		
Rural	Normalmente ninguno	Normalmente ninguno
Urbano	Bióxido de carbono	Carbonatación leve
Industrial	Bióxido de carbono y otros gases, lluvia ácida	Carbonatación y ataque químico al concreto, corrosión del acero de refuerzo
Marítimo	Ion cloruro	Corrosión del refuerzo
(+) En concreto de cemento portland con acero de refuerzo		

La presencia de sulfatos es bastante común en las aguas y suelos en contacto con las estructuras de concreto; sin embargo, para que ocasionen un daño significativo se requieren de 2 condiciones básicas:

- 1) Que los sulfatos se hallen en solución acuosa para facilitar su ingreso en el concreto.
- 2) Que la concentración de los sulfatos en el medio de contacto sea suficientemente alta.

La primera condición se da obviamente cuando los sulfatos se encuentran en aguas freáticas, pantanos, ciénagas, agua de mar y de albuferas, aguas residuales y salmueras; pero también puede darse en el caso de los suelos por efecto de la lluvia y/o la migración capilar de agua procedente del manto freático, cuando este es poco profundo. En cuanto a la segunda condición existen niveles establecidos de concentración de sulfatos que permiten evaluar su grado de agresividad al concreto, tales como las indicadas en la siguiente tabla.

Tabla No. 4 Evaluación de la agresividad del medio de contacto con el concreto, en función de su contenido de sulfatos (Datos de ACI 201.2 R)		
Sulfatos en el medio de contacto (SO_4^-)		Grado de agresividad del concreto de cemento portland
En suelo (sulfatos solubles) %	En aguas Mg/l (ppm)	
0.0 - 0-10	0 – 150	Insignificante
0.11 - 0.20	151- 1 500	Moderado
0.21 - 2.00	1 501 – 10 000	Severo
Mayor de 2.00	Mayor de 10 000	Muy Severo

En la República Mexicana es relativamente frecuente la existencia de sulfatos en demasía en numerosos sitios y regiones. Sin carácter limitativo puede mencionarse los siguientes: las zonas desérticas y semidesérticas del norte,

centro-norte, las franjas costeras de ambos litorales, particularmente la del Golfo de México, las albuferas y zonas pantanosas que existen a lo largo de estos litorales, los lechos secos de antiguos depósitos lacustres, como el ex-Lago de Texcoco, etc.

Por lo que se refiere al efecto del agua de mar debido a los sulfatos, es pertinente señalar que su contenido total de sales disueltas es del orden de 30 a 35 mil mg/l, de las cuales cerca de 90% son cloruros y 10% son sulfatos, con un porcentaje mínimo de otras sales. Es decir, su contenido de sulfatos suele ser alrededor de 3000 mg/l, según el cual (de acuerdo con la tabla anterior), le correspondería un grado de agresividad incipientemente severo; sin embargo, se acepta que por la elevada presencia de cloruros, el efecto de los sulfatos en el agua de mar se atenúa y resulta más bien moderado.

Tal carácter del agua de mar le es aplicable en su condición normal, pero en el caso del agua salda de las albuferas y zonas pantanosas costeras, la evaporación tiene a incrementar la concentración de sales disueltas, con lo que esta agua se convierte en un medio de contacto más agresivo para el concreto, debe verificarse el grado de concentración para evaluar su agresividad y en función de esta aplicar las medidas preventivas que correspondan.¹⁷

- **Procesos de ataque por sulfatos**

Los efectos que causan los sulfatos en la masa del concreto se clasifican en tres grupos:

- a) Simultáneamente con la lixiviación o lavado de una parte de los componentes del concreto ya endurecido, principalmente del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el valor del pH es reducido. Consecuentemente la hidrólisis continua y se tiene como resultado final la formación de geles no expansivos de sílice,

¹⁷ M. Mena Ferrer, (2005). **Durabilidad de Estructuras de Concreto en México**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 29-31

óxido de aluminio, y de óxido de hierro, que al ser solubles al agua se pierden, aumentado con esto la porosidad en el concreto permitiendo la penetración en formas más rápida de los agentes degradantes dando con ello una degradación mayor al concreto.

- b) Transformación de componentes del concreto endurecido en geles no expansivos e insolubles al agua los cuales permanecerán dentro de la masa del concreto, sin embargo por su consistencia provocarán una disminución en la resistencia del concreto.
- c) Los poros y vacíos del concreto son llenados con formación de cristales los cuales al endurecer expanden y destruyen al concreto.

La degradación del concreto por los sulfatos es debido principalmente al fenómeno de expansión en relación con la cristalización de la etringita, siendo ésta, etringita secundaria.

La formación de la etringita expansiva destructiva se distingue de la expansión no destructiva o primaria, obtenida en las primeras etapas de la hidratación del cemento Portland por reacción del yeso puesto que la etringita primaria es expansiva pero se presenta en la etapa plástica del concreto motivo por el cual no causa daños a la masa al experimentar el aumento de volumen.

Esquemáticamente, la formación de la etringita se presenta a continuación:

- La formación de yeso secundaria por oposición al primario utilizado como retardante en el cemento. La formación del yeso secundario es resultado de una reacción de sustitución entre la portlandita y los sulfatos. Si la cantidad de sulfatos es elevada y la concentración local de iones Ca^{+} y SO_4^{2-} en la fase líquida intersticial del concreto excede la producción de solubilidad del yeso, este último se precipita. El volumen del sólido precipitado representa

un poco más del doble del volumen de los productos iniciales y por lo tanto se presenta una expansión. Sin embargo en la mayoría de los casos esta reacción se mantiene limitada en la medida de que el yeso se forme bajo un proceso de disolución y de cristalización dentro de los espacios libres de la matriz del concreto.

- Reacción entre el yeso secundario y los aluminatos del calcio del cemento que forman etringita.

Sea a partir del aluminato tetracalcico hidratado C_4A_{H13} de monosulfoaluminato de calcio $C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$

Según la composición de la fase líquida, en particular de la cantidad de cal, la cristalización de la etringita puede ser expansivo o no.

Dentro de los productos ricos en cal, donde su solubilidad es reducida según lo indica la siguiente tabla, la etringita se forma en el sitio al contacto del aluminato de calcio en presencia de una cantidad limitada de una solución fuertemente saturada. La velocidad de germinación, muy superior a la velocidad de crecimiento de cristales, conduce a la formación en masa de pequeños cristales de naturaleza más o menos coloidal. El sólido neoforme, donde el volumen molecular es de tres a ocho veces mayor que el del sólido inicial, sabiendo que se trata del C_3A o de C_4AH_{13} , desarrollando esfuerzos muy elevados los cuales son debidos a la presión acompaña a su formación.

Tabla No. 5						
CaO (g/l)	0.065	0.112	0.168	0.224	0.670	1.080
C3a. 3CaSO4. H30-32(g/l)	0.225	0.165	0.115	0.080	0.030	0.002

Por lo contrario dentro de los cementos que liberan menos portlandita, la etringita precipita a partir de la solución dentro de los vacíos intersticiales del concreto y la cristalización en agujas bien formadas no es expansiva.

Los sulfatos más agresivos para el concreto son los sulfatos de magnesio, los de amonio, los de calcio y el de sodio.

- Sulfato de Calcio

Presente dentro de los suelos sobre la forma de yeso y anhídrita y dentro de las aguas subterráneas selenitosas, es agresiva para el concreto sin importar su relativa poca solubilidad.

- Sulfato de Sodio

Muy soluble, sufre una degradación por formación de yeso y de etringita expansiva aún cuando las proporciones son función a la vez de la concentración de SO_4 y de la cantidad de aluminato tricálcico C_3A del cemento.

- Sulfato de Potasio

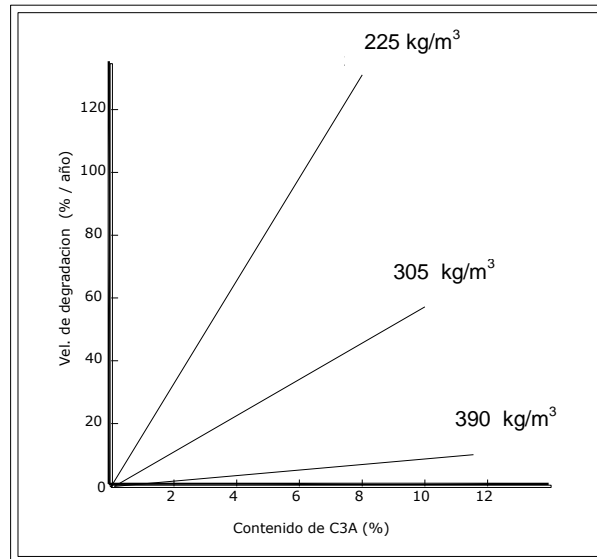
Tiene una acción similar a la del sulfato de sodio pero la velocidad de ataque es un poco más lenta. La mayor parte de los sulfatos metálicos soluble, son agresivos al concreto con excepción del sulfato de plomo y de bario muy poco soluble.

• **Parámetros que condicionan al concreto en un medio sulfático**

En la gráfica siguiente se observa que la resistencia química del concreto crece con la dosificación del cemento. Esto es con la compacidad del concreto. Desde este punto de vista es importante señalar que con el aumento en la dosificación del cemento, está generalmente acompañada una reducción en la relación A/C . Por otra parte, la velocidad de degradación es prácticamente proporcional al porcentaje en C_3A del cemento portland, hasta una cantidad cercana al 10% aproximadamente.

Existen demostraciones las cuales indican que no sólo se debe tener la cantidad de C₃A del cemento sino también y sobre todo la relación C₃A/SO₃, donde se puede considerar que para valores inferiores de 3 se lograra un buen concreto.

Grafica No. 1 Influencia de la cantidad de C₃A y cantidad de cemento sobre la velocidad de degradación del concreto



Relación A/C máxima recomendable

En grado benigno	Sin límite por este aspecto
En grado moderado	0.50
En grado severo	0.45
En grado muy severo	0.45

Las adiciones minerales como cenizas volantes sílico-aluminosas, puzolanas naturales y el humo de sílice mejoran notablemente el comportamiento del concreto ante los sulfatos.

En un primer análisis se puede estimar que el mejoramiento es debido a la dilución de los aluminatos y a la modificación de la textura de los hidratos que los vuelve más compactos independientemente de la edad del concreto.

Tabla No. 6 Requisitos para concreto expuesto a soluciones con sulfato

TIPOS DE EXPOSICIÓN A LOS SULFATOS	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (SO) PRESENTES EN SUELOS (% en peso)	SULFATOS (SO ₄) EN AGUA	TIPO DE CEMENTO RECOMENDADO	RELACION AGUA/CEMENTO RECOMENDADA concreto normal	f'c minimo (kg/cm ²)
Despreciable	0 a 0.10	0 a 150	–	–	–
Moderada	0.10 a 0.20	150 a 1,500	II, IP(MS) IS(MS) IPM(MS) I(SM)(MS)	0.50	280
Severa	0.20 a 2.00	1,500 a 10,000	V	0.45	315
Muy severa	>2.00	>10,000	V + Puzolana	0.45	315

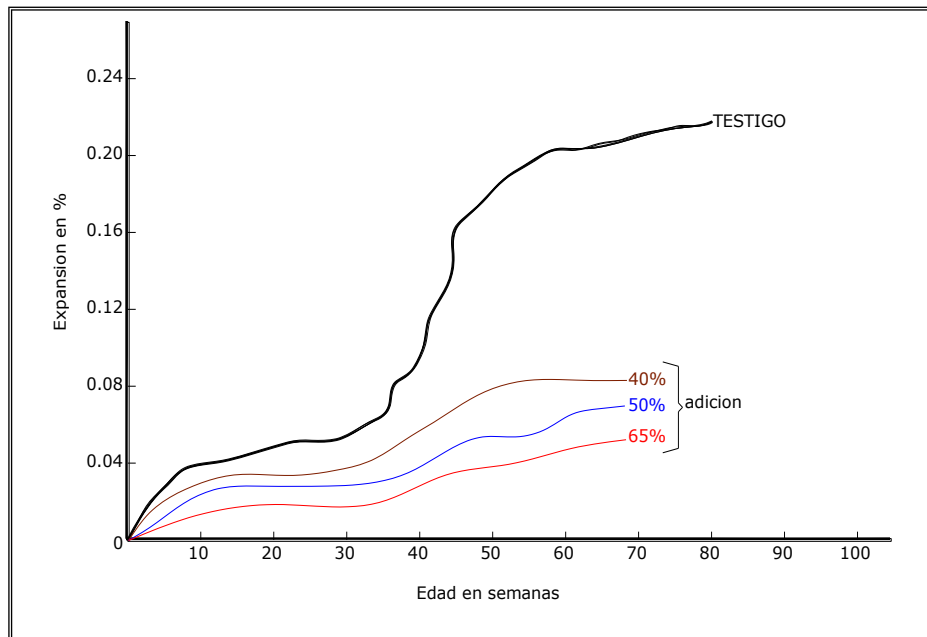
Fuente: Report ACI Comité 201 2R- "Guide to Durable Concrete"- 198

- **Acción de las adiciones minerales en el concreto.**

Los cementos con adiciones tienen en general un buen comportamiento ante la agresión de los sulfatos debido a:

- A la reducción de la cantidad de Cal y de C₃A en la mezcla.
- Al aumento de la compacidad de los hidratos, en relación con una disminución del volumen de poros pudiendo ser hasta un 25 %, en el caso de las adiciones principales. La cantidad de poros capilares mayores de 30 mm y la relación media de poros de la pasta de cemento endurecido disminuyendo igualmente. Esta modificación de la estructura porosa implica una reducción de la permeabilidad y de los coeficientes de difusión.
- Al modo de cristalización de la etringita, formada por precipitación a partir de la fase líquida la cual no es expansiva.

Grafica No. 2 Eficiencia en la reducción de la expansión debida a los sulfatos



Los cementos para los cuales la cantidad de adición es superior o igual al 60%, son considerados como resistentes a los sulfatos, independientemente del clinker de base con el cual se fabriquen. Sin embargo se ha definido últimamente que las adiciones con una cantidad superior al 11% de Al_2O_3 tienen un comportamiento inferior al óptimo.

Cuando la cantidad de adición es menor del 60%, y en caso de cementos con cenizas volantes silico-aluminosas o puzolanas es el clinker portland base quien determina la dosificación de cemento. Este clinker deberá satisfacer todas las especificaciones para cemento portland, en lo que respecta a la cantidad de C_3A y SO_3 .

- Las cenizas volantes silico-aluminosa

Tienen un valor de sustitución de 20 a 30% tienen generalmente un efecto benéfico sobre el comportamiento del concreto ante los sulfatos. Este efecto es

debido al consumo parcial de las cenizas de la portlandita liberada por la hidratación de los silicatos del cemento portland. Esto es debido igualmente a las modificaciones de la microestructura y en particular a la distribución dimensional de los poros que se desplazan hacia las zonas. La eficiencia de las cenizas depende de su capacidad puzolánica esto es de su capacidad a reaccionar con la cal y a producir los hidratos cementantes.

Las cenizas ricas en cal (cantidad superior a 20%), proveniente de carbón subbituminosos y de lignitos, son menos resistentes a los sulfatos. Como con las cenizas volantes silico-aluminosas, la sustitución de 20% a 30% de cemento por puzolana natural puede tener un efecto muy positivo sobre la resistencia del concreto a los sulfatos. Siempre la eficiencia de las puzolanas depende de su naturaleza mineralógica que es muy variable, así como su reactividad

- Los humos de sílice

Ofrecen igualmente una buena protección contra la agresividad de los sulfatos debido al fuerte consumo de portlandita y de la estructura compacta de C-S-H.

- Los cementos con adición de fillers calcáreos

Son susceptibles a ser empleados en los medios sulfatados moderadamente agresivos (agua de mar, por ejemplo) su contenido dentro del cemento debería ser limitado.

- **Cementos resistentes a los sulfatos (RS)**

En presencia de proporciones riesgosas de sulfatos en el medio de contacto con el concreto las principales medidas de defensas consiste en elaborar el concreto con

una reducida relación agua/cemento para hacerlo menos permeables a los fluidos y emplear un cemento que sea capaz de resistir al ataque químico de estas sales.

Para certificar que un cemento es resistente a los sulfatos (RS) en la norma mexicana se prescribe una prueba de larga duración, por inmersión de especímenes en una solución sulfatada, cuyos resultados se obtienen y evalúan a un año de edad (NMX-C-418). De ordinario, este tipo de pruebas se destina preferentemente a los cementos mezclados, cuya resistencia a los sulfatos no solo depende la composición química del clinker portland sino también de los efectos de los otros componentes, cuya aportación en este aspecto requiere normalmente varios meses para hacerse patente. Cuando se trata de un cemento portland simple como el CPO, su resistencia a los sulfatos puede estimarse rápidamente por la determinación de su contenido de aluminato tricalcico, o bien se puede verificar mediante una prueba con adición de sulfato de calcio (yeso) cuyos resultados se obtienen a 14 días (ASTM C 452 / NMX-C-185)

De acuerdo con lo anterior, cuando se requiere conocer si un determinado cemento es efectivamente resistente a los sulfatos, puede acudir a los siguientes medios:

- 1) Si el cemento es portland simple (clase CPO) puede ser suficiente verificar que su contenido de C_3A sea menor de 8% para una exposición moderada y menor de 5 % para una exposición severa y/o que su expansión a 14 días en la prueba con yeso sea menor de 0.040 %
- 2) Si se trata de un cemento mezclado (clases CPP, CPEG, CPC, CPS o CEG) lo procedente es requerir del fabricante una constancia certificada de que en la prueba de exposición a los sulfatos por el método NMX-C-418 / ASTM C1012 se obtuvo una expansión menor de 0.10 % a un año. Sin

embargo, para condiciones muy severas de exposición a los sulfatos se recomienda que esta expansión máxima se verifique a los 18 meses.¹⁸

Tabla No. 7 CEMENTOS PREFERENTES	
En grado benigno	Sin límites por este concepto
En grado moderado	Portland II
En grado severo	Portland V o portland-puz con clinker V
En grado muy severo	Portland V o portland-puz con clinker V, más protección externa.

Tabla No. 8 CEMENTOS ALTERNATIVOS	
En grado benigno	Sin límite por este aspecto
En grado moderado	Portland-puz con clinker II
En grado severo	Portland II con baja expansión por sulfatos
En grado muy severo	Portland II con baja expansión por sulfatos mas protección externa
Expansión < 0.040 a 14 días (ASTM C 452)	

4.3.- Cloruros en su afectación hacia el concreto

Existe una conciencia general en la práctica constructiva común respecto de las precauciones que deben seguirse en la fabricación de elementos y estructuras de concreto claramente expuestos a ambientes de carácter agresivo, por el deterioro que ocasiona el contacto directo con sustancias naturales en el suelo o en el agua. Dada su elevada concentración de cloruros (más de 20,000 ppm), destaca como medio ofensivo el agua de mar en su estado normal porque favorece la corrosión del acero de refuerzo.

No obstante, se presentan en la actualidad serios y veloces deterioros estructurales por el ataque al concreto de cloruros disueltos en el aire, presentes en ambientes marinos con alta humedad relativa y acción constante del viento,

¹⁸ Juan Luis Cottier Caviedes, Art. El Concreto Bajo la Influencia de los Sulfatos, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

tales como en las fajas costeras. En algunas circunstancias, el problema se agrava por la presencia de intensa y variada actividad industrial en la zona.

- **Riesgo de corrosión por cloruros**

Actualmente, la corrosión del acero de refuerzo es una de las causas más frecuentes de deterioro prematuro de las estructuras de concreto. Entre las razones para que así sea, cabe señalar las siguientes:

- 1) La importancia del fenómeno de corrosión se subestimó durante mucho tiempo, por lo que no se tomaron medidas preventivas en la construcción de numerosas estructuras que ahora muestran signos de deterioro por esta causa.
- 2) El proceso de corrosión del acero de refuerzo suele ser lento y antes de manifestarse puede pasar largo tiempo inadvertido, de modo que no se da mantenimiento oportuno a muchas estructuras en la etapa de corrosión incipiente.
- 3) El reconocimiento de los cloruros como agentes promotores e impulsores de la corrosión (y la consecuente adopción de medidas de defensa) data de pocas décadas.
- 4) Aún a sabiendas de la influencia dañina de los cloruros, es inevitable tener que construir estructuras en contacto con medio que lo contienen en abundancia, como es el caso del agua de mar, los y aguas salobres y las salmueras de variado origen.

Aunque la corrosión puede darse por ataque químico directo, la mayoría de las veces es consecuencia de un proceso electroquímico. En el caso del acero de refuerzo, el proceso se da cuando existen puntos con diferente potencial a lo largo

de una misma varilla o entre varillas contiguas, los cuales funcionan como electrodos inmersos en la solución alcalina de poro del concreto que actúa como electrolito.

En estas condiciones, la varilla se oxida en el punto de mayor potencial (ánodo) generando hidróxidos ferrosos y férricos (herrumbre) cuyo volumen es mayor que el de sus componentes originales, con lo cual se producen presiones internas que desprenden al concreto de recubrimiento y ponen al descubierto la varilla en curso de corrosión, frecuentemente avanzada.

Si bien hay varias teorías propuestas para explicar la influencia de los cloruros en el desarrollo de este proceso, lo cierto es que la presencia de cloruros en la solución de poro del concreto estimula notablemente su avance y, como es natural, dicho estímulo depende del contenido de cloruros en la solución. Así, con bajos contenidos de cloruros el proceso corrosivo puede permanecer en estado latente, al ser inhibido por la defensa que brinda la elevada alcalinidad del concreto, estado que se identifica como pasivación del acero de refuerzo.

Sin embargo, a medida que el contenido de cloruros aumenta y/o la alcalinidad del concreto disminuye, se llega a una situación en que el estado de equilibrio se pierde y la corrosión se activa. Al contenido crítico de cloruros que propicia esta situación se identifica como umbral de riesgo para efectos de corrosión.

La presencia de cloruros en la solución de poro del concreto puede tener origen interno y/o externo. Los cloruros de origen interno provienen de los componentes (agua, agregado, cementantes, aditivos) y por ello se hallan presentes en el concreto desde su elaboración, en tanto que los de origen externo proceden del medio de contacto con la estructura y su acceso al acero de refuerzo se produce paulatinamente por penetración a través del recubrimiento de concreto. De cualquier modo, para evitar que el contenido total de cloruros en el concreto

alcance un nivel riesgoso, se hace necesaria la adopción de medidas contra la aportación de cloruros de ambas procedencia.

Los niveles permisibles de cloruros de origen interno normalmente se definen en función de las características del acero de refuerzo y de las condiciones de exposición de la estructura. Por una parte, el criterio es más estricto para el acero de prefuerzo por ser más vulnerable a la corrosión. En cuanto a las condiciones de exposición hay que tomar en cuenta la presencia de agua y oxígeno, cuya ocurrencia es indispensable para el proceso de corrosión, así como también la existencia de cloruros en el medio de contacto.

A modo de ejemplo en la siguiente tabla se indican los contenidos máximos permisibles de cloruros solubles en agua de origen interno, recomendados por el Comité ACI 318 para el concreto endurecido antes de ponerlo en servicio bajo diferentes condiciones de exposición, y expresados como por ciento del cemento en masa. En la propia tabla se presentan a título informativo, dichos contenidos de cloruros expresados en $\text{kg (Cl}^-)/\text{m}^3$ de concreto, y en por ciento del concreto en masa, para el caso de un concreto con 300 kg de cemento por cada m^3 y una masa unitaria de $2.3 \text{ ton}/\text{m}^3$. Se trata desde luego de los cloruros que puedan ser aportados por los componentes del concreto y su evaluación previa debe hacerse mediante la determinación individual de los cloruros en cada uno de los componentes. En caso necesario, su confirmación debe hacerse en el concreto ya endurecido, a una edad comprendida entre 28 y 42 días.

Tabla No. 9 Contenidos máximos permisibles de cloruros de origen interno, en el concreto antes de entrar en servicio bajo diferentes condiciones de exposición			
Tipos de concreto y condiciones de exposición	Contenido máximo de cloruros solubles en agua (CL ⁻) en el concreto antes de entrar en servicio		
	% en masa del consumo de cemento	kg (CL ⁻) / m ³ de Concreto endurecido	% Masa del concreto endurecido (+)
Concreto presforzado en Todas condiciones	0.06	0.18	0.008
Concreto reforzado común expuesto a los cloruros durante el servicio	0.15	0.45	0.02
Concreto reforzado común en condición seca, o protegido de la humedad durante el servicio	1.00	3.00	0.13
Concreto reforzado común En condiciones de humedad, sin cloruros.	0.30	0.90	0.04
(+) Para un concreto con 300 kg de cemento por metro cubico y una masa unitaria de 2.3 ton/m ³			

Como se observa en la tabla, no se contemplan diferentes niveles de corrosividad del medio de exposición por concepto de la concentración de cloruros (como en el caso de los sulfatos) sino que solo se considera si hay o no cloruros en dicho medio, lo cual constituye una aparente indeterminación. Sin embargo, la corrosividad del medio de contacto se toma en cuenta al establecer las medidas de defensa contra la penetración de cloruros externos; es decir, la medidas de prevención se vuelven mas rigurosas conforme el medio es más corrosivo, de modo que la suma de los cloruros de origen interno mas los que pueden penetrar desde el exterior, se mantenga por debajo de un nivel que no sea riesgoso para efecto de corrosión del acero de refuerzo.

Así cuando se trata de estructuras por construir, ese objetivo puede lograrse limitando los cloruros de origen interno como ya se vio, y adoptando las medidas de prevención necesarias. En el caso de estructuras de servicio cuya contaminación con cloruros se requiere evaluar, es necesario muestrear el

concreto endurecido para determinar su contenido de cloruros soluble en el agua. En tal caso, debido al probable desconocimiento del consumo de cemento utilizado, esta determinación suele expresarse en función de la masa del concreto y, con fines de orientación únicamente, puede considerarse riesgoso un contenido de cloruros superior a 0.02 por ciento del concreto en masa, que un concreto de peso normal equivale aproximadamente a $0.45 \text{ kg}(\text{Cl}^-)/\text{m}^3$ de concreto.

- **El proceso y sus agentes**

La corrosión del acero de refuerzo existente dentro del concreto se origina por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad en las proximidades de las barras, pero la existencia de cloruros libres en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso.

En el agua de mar, en su estado normal, se puede encontrar un amplio rango de concentraciones de sales disueltas, aunque siempre con una proporción constante de un constituyente a otro; las concentraciones son más bajas en las zonas frías o templadas que en las cálidas y resultan especialmente altas en zonas de aguas bajas con tasas excesivas de evaporación diurna.

Debido a su alto contenido de cloruros, el agua de mar representa un elemento ofensivo para el concreto y el acero de refuerzo pues propicia y acelera –una vez que se ha iniciado– el fenómeno de la corrosión. En las franjas costeras, la brisa marina acarrea importantes contenidos de humedad que, naturalmente, lleva en sí cloruros; de esta manera, estructuras que no están en contacto directo con el agua de mar, sufren igualmente sus embates.

Los cloruros se vuelven así un elemento activo en el proceso de daño y degradación de las estructuras de concreto en franjas marítimas. De acuerdo con la concentración con que se presenten en el agua de mar, quedará definido su

grado de agresividad, por lo que habrá que esperar que algunas zonas tengan un mayor potencial dañino que otras.

El fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo es causa frecuente de que las estructuras de concreto se deterioren prematuramente, aún cuando el concreto, por su alta alcalinidad con un pH promedio de 12.5 y baja conductividad, suele ser un medio que proporciona buena protección al acero contra la corrosión. Sin embargo, dentro de un esquema de ambiente agresivo, esta protección no es suficientemente eficaz y el fenómeno se produce.

Pero existen también condiciones que de origen la favorecen y son las siguientes:

- Excesiva porosidad del concreto.
- Reducido espesor del recubrimiento de concreto sobre el refuerzo.
- Existencia de grietas en la estructura.
- Alta concentración de agentes corrosivos en los componentes del concreto.

- **Efectos en el concreto**

La resistencia a compresión ha sido utilizada por lo regular como un indicador de la durabilidad del concreto; sin embargo, cada día se hace más evidente que por sí misma no determina la durabilidad del concreto. La impermeabilidad y la resistencia química rigen también la vida útil de una estructura, aunque estos factores están a su vez influidos por la composición del cemento y la calidad de la mezcla.

Los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla de concreto fresco (disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua). Se refieren como cloruros totales calculados y se expresan como el porcentaje de ion cloruro respecto al peso de cemento, el que debe limitarse, de acuerdo con la más reciente información, a:

Tipo de exposición límite de cloruros por peso de cemento (%)

Ambiente agresivo y expuesto a cloruro	0.06
Ambiente agresivo y no expuesto a cloruro	0.15
Construcción sobre al suelo y seca permanentemente	1.50

Esto es lo que generalmente especifican diversas normas y reglamentos de construcción en el mundo, aunque suele también limitarse en función de la cantidad de ion cloruro en peso por cada metro cúbico de concreto, y tiene que ver de manera directa con el umbral de riesgo, de acuerdo con la siguiente tabla:

Condiciones de exposición límite de cloruros por volumen de concreto (kg/m³)

Consumo de 300 kg/m³

Ambiente agresivo y expuesto a cloruro	0.18
Ambiente agresivo y no expuesto a cloruro	0.45
Construcción sobre el suelo y seca permanentemente	sin limitación

El ion cloruro puede también penetrar posteriormente en el interior del concreto por difusión desde el exterior, en cuyo caso el riesgo de corrosión se incrementa grandemente.

Los cloruros totales en el concreto se pueden subdividir químicamente en ligados y libres. Esta distinción resulta importante ya que son los cloruros libres los responsables de la corrosión del acero de refuerzo.

Los cloruros ligados son los que están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión; por lo tanto, los límites en las especificaciones deben aplicarse al contenido de cloruros libres en lugar de al contenido total o soluble en ácido. No obstante, con los datos de las

actuales investigaciones no es posible calcular con precisión su proporción en relación con el contenido total de cloruros, ya que varía con los cambios en el contenido de cloruros totales, aunque, considerando que el cloruro libre es soluble en agua, se lo puede extraer y así determinar su proporción.

En términos de la química del concreto, se asume que el cloruro total es igual a la porción soluble en ácido de los constituyentes del concreto; así su extracción, previa a la determinación del contenido, implica digerir una muestra de concreto endurecido en ácido nítrico.

El procedimiento de extracción para la determinación del contenido de cloruros libres requiere hervir una muestra de concreto endurecido durante cinco minutos y saturar por 24 horas.

Amplias investigaciones indican claramente que el contenido de cloruro soluble en agua proporciona un indicador del riesgo inmediato de corrosión. Comparativamente con los métodos de extracción de agua, los métodos de digestión en ácido extraen una mayor proporción de los cloruros totales presentes en el concreto, por lo que una interpretación apoyada en estos resultados resultará siempre en una sobreestimación del riesgo inmediato de corrosión.

Por otra parte, los niveles de cloruros solubles en ácido pueden resultar más adecuados para evaluar el riesgo extremo de corrosión a largo plazo si el concreto ha sufrido procesos adicionales de carbonatación o sulfatación. La carbonatación libera cloruro ligado, mientras que la presencia de sulfatos la impide hasta cierto punto; la reacción entre el cloruro y el aluminato tricálcico incrementa así los cloruros libres.

El efecto directo más nocivo por acción de cloruros en la mezcla de concreto endurecido está constituido por la cristalización de las sales dentro de sus poros, la cual puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de sal. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el concreto que no está permanentemente en contacto directo con el agua. No obstante, debido a que la sal en solución penetra y asciende por capilaridad, el ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en el concreto, de tal suerte que la permeabilidad de este material es un factor de gran importancia, y el clima tropical propio de nuestras franjas costeras actúa como catalizador del proceso.

En el caso del concreto reforzado, la absorción de las sales establece áreas anódicas y catódicas; la acción electrolítica resultante conduce a una acumulación de producción de la corrosión sobre el acero, con la consecuente ruptura del concreto que lo rodea, de tal manera que los efectos se agravan.

- **Iniciación del cloruro**

El ingreso del cloruro en el concreto requiere de un sistema de poros que esté, al menos parcialmente, lleno de agua, de modo que los iones pueden moverse en senderos de agua continuos. Consecuentemente, el ingreso, la acumulación y la redistribución del cloruro están fuertemente relacionados a las condiciones de humedad. Debido a esta situación, el contenido de cloruros en la superficie del acero depende de la humedad. Un concreto permeable con zonas profundas de evaporación incrementaría la concentración de iones de varias sustancias en la ubicación del refuerzo, lo que tendría un impacto significativo en el inicio de la corrosión.

- **Efectos en el acero de refuerzo**



Fig. 4.4 Concreto armado afectado por la carbonatación

La pasta de cemento no carbonatada tiene un pH mínimo de 12.5 y el acero de refuerzo no se corroe en esa circunstancia, fundamentalmente por la presencia de una película pasivante microscópica de óxido que evita su disolución anódica. No obstante, si el pH disminuye a menos de 10 por la acción de efectos tales como la carbonatación, la corrosión puede iniciarse. El efecto de la carbonatación puede disminuir el pH a niveles de 8 ó 9, resultando en corrosión del acero cuando están presentes la humedad y los iones cloruro disueltos en agua en niveles por encima de 0.2 por ciento relativos a la masa de cemento, lo cual acelera la corrosión.

Cabe destacar que, en opinión de diversos autores, la corrosión puede iniciarse por la acción de iones de cloruro sobre el acero de refuerzo, aún en ambientes con un pH superior a 10 u 11, aunque estos casos se relacionan con cloruros presentes de origen en la mezcla por efectos de los agregados, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el concreto.

La corrosión electroquímica de los elementos consiste básicamente en la conexión eléctrica o electrolítica entre un cátodo y un ánodo. En relación con el acero embebido en el concreto, las barras de refuerzo actuarán como un conductor eléctrico y el agua en los poros de la pasta actuará como electrolito. Durante el proceso de corrosión, el oxígeno es consumido y genera los productos de corrosión; el agua se necesita para permitir que el proceso de corrosión se mantenga y continúe, su presencia se relaciona con la generación de óxido férrico. Así, el resultado principal y más grave de la acción de los cloruros sobre el acero de refuerzo lo constituye la corrosión acelerada que éste sufre a consecuencia de su acción como catalizador en ese proceso electrolítico.

En muchas estructuras de concreto localizadas en ambientes marinos cercanos a las costas, en las que el daño se ha iniciado a través de una incipiente penetración de cloruros hacia el acero –como consecuencia de una permeabilidad natural excesiva del concreto, su carbonatación o el agrietamiento de las secciones–, la acción de la corrosión y del incremento de diámetro de las varillas causan por sí mismas agrietamiento en el recubrimiento del concreto, lo que facilita en gran medida el acceso de humedad, aire y cloruros contenidos en el agua, y acelera así el proceso de ataque, llevando las estructuras a daños irreversibles en periodos notablemente cortos. Así, ante la sospecha de ataque, se deberán incorporar de inmediato programas de reparación y mantenimiento de los elementos afectados.

Tabla No. 10 CONTENIDO MÁXIMO DE ION CLORURO PARA PREVENIR CORROSIÓN

TIPO DE ELEMENTO	CONTENIDO MÁXIMO DE ION CLORURO EN CONCRETO (% en peso de cemento)
Concreto pretensado	0.06
Concreto armado expuesto a cloruros	0.15
Concreto armado protegido de la humedad	1.00
Otro tipo de concreto	0.30

- **El umbral de la corrosión**

Los procesos de difusión, el modelado matemático y la relevancia de diferentes parámetros de materiales son bien conocidos. Sin embargo, un parámetro importante, el valor umbral de la corrosión, debe ser estudiado más antes de que podamos esperar un progreso general importante en esta materia. Los cálculos teóricos y el modelado del tiempo de iniciación de un ambiente rico en cloruros demuestran la falta de conocimiento del parámetro importante, el valor umbral de la concentración de iones de cloruro, que cambia la etapa pasiva a una etapa de corrosión activa.

La humedad es decisiva para la ocurrencia y la extensión de la corrosión del refuerzo. La corrosión afectará el tiempo para iniciar la corrosión, por carbonatación y por el ingreso de cloruros, y la humedad afectara la tasa de corrosión, una vez que se ha iniciado.

Debido a la injerencia de numerosos factores, no resulta factible establecer un valor general para este umbral de riesgo; no obstante, un dato que se maneja con frecuencia es 0.3 por ciento del cemento en masa, expresado como cloruros solubles en agua. De tal modo, si se considera un consumo medio de 300 kg de cemento por cada m³ de concreto, resulta un contenido crítico de cloruros de 0.9 kg/m³ de concreto. Es decir, un concreto con un contenido de cloruros solubles en agua igual o mayor a 0.9 kg/m³ representa ya un cierto riesgo para la corrosión del refuerzo, de manera que para fines de prevención es necesario considerar un valor más bajo para el límite que no debe excederse, el cual puede ser 0.6 kg/m³

- **Incidencia del agrietamiento**

La existencia del grietas en el concreto no es condición indispensable para que se produzca corrosión en el acero de refuerzo, pero su presencia favorece la ocurrencia de este fenómeno, pues la película pasivante en la superficie del acero se rompe en un área estrictamente confinada, lo cual resulta equivalente a un

severo ataque por carbonatación en el concreto y genera zonas de máxima vulnerabilidad en la tasa de corrosión. Debido a ello es necesario, para prolongar la vida útil de las estructuras de concreto reforzado, prevenir la formación de grietas o suministrar un tratamiento adecuado de obturación a las que ya se hayan presentado.



Fig. 4.5 Afectación de concreto armado por falta de mantenimiento

Las grietas en el concreto pueden dividirse en dos grandes grupos: las que se producen por esfuerzos debidos al funcionamiento estructural y las que se deben a esfuerzos que se originan en el seno mismo del concreto. Así, la formación de grietas depende de factores tales como el diseño estructural, las características de los materiales, la composición del concreto, las prácticas constructivas, las condiciones ambientales y la manifestación de situaciones anómalas y de eventos extraordinarios.

En el caso de las grietas comunes, asociadas con el propio funcionamiento y naturaleza del concreto, con anchos que fluctúan de 0.15 a 0.35 mm, tienen un comportamiento autosellante en ambientes no agresivos, por efecto de calcificación, polvo y depósitos de óxido. No obstante, en ambientes agresivos colaboran también a la acumulación de sales que pueden agravar esa magnitud de agrietamiento a consecuencia de su cristalización. Así mismo, las grietas que

se desarrollan perpendiculares al refuerzo resultan menos peligrosas que las de dirección paralela a éste, por la menor exposición que propician.

Los factores que principalmente pueden vincularse con determinados sitios o regiones geográficas son las características de los agregados y las condiciones ambientales, que influyen sobre los agrietamientos atribuibles a las contracciones –plástica y por secado– y a las reacciones deletéreas que eventualmente se producen entre los álcalis del cemento y algunos agregados.

En la República Mexicana, las características de los agregados y las condiciones ambientales son muy variables; existen casos en los que tales características y condiciones se muestran favorables a motivar este tipo de agrietamiento en el concreto. Habría que considerar como riesgo potencial todos aquellos sitios del país donde los agregados contuvieran rocas y minerales reactivos con los álcalis.

- **La durabilidad del concreto y el medio ambiente**

Las estructuras de concreto están expuestas durante su vida útil al ataque químico y físico de diferentes agentes. La durabilidad del concreto variará entonces conforme tales factores sean más o menos agresivos, y también de acuerdo con las propiedades de sus componentes, el proporcionamiento de la mezcla y las condiciones de colado y curado que se hayan aplicado en su construcción.

La planeación y el diseño deberán entonces no solamente estar basados en el uso de la estructura, sino también en las condiciones ambientales y en la vida útil esperada de la misma. Estas definiciones básicas deberán estar reflejadas en los materiales y especificaciones de construcción, y tanto en el concepto como en los detalles estructurales.

En el contexto de la práctica común, se diseña y detalla no sólo para las cargas que actuarán en la vida útil de una estructura, sino también para los efectos de

agrietamiento y temperatura; sin embargo, sólo se consideran condiciones especiales de exposición para grupos muy particulares de estructuras.

Es muy común que los códigos y normas actuales sólo prescriban las variaciones adecuadas de la relación A/C y del recubrimiento de concreto sobre el acero de refuerzo de acuerdo con una clasificación muy simple de las condiciones de exposición. Sin embargo, en la práctica se encuentran muchas y más diversificadas condiciones de exposición, y no sólo en relación con el medio ambiente, sino también según el uso pretendido de la estructura.

En condiciones de ambientes eminentemente agresivos, las precauciones y los cuidados en la construcción deben realmente extremarse. No obstante, existen condiciones no tan claramente agresivas, por lo que, con el fin de obtener estructuras durables se ha de considerar que éstas son afectadas por el viento y la humedad marítima que contienen grandes cantidades de sal, así como por los ciclos de humedecimiento y secado. Se vuelve entonces muy importante la detección y el estudio de las características climáticas más relevantes de la región en la que se ubicará la estructura, es decir, los cambios estacionales de la dirección de los vientos, la temperatura, la humedad relativa y la precipitación pluvial; inclusive, podría en muchos casos resultar deseable y útil contar con el análisis de la composición química del agua de mar.

Como se mencionó anteriormente, existen dos factores preponderantes en la determinación de la tasa de corrosión: la resistividad eléctrica del concreto y la disponibilidad de oxígeno en el cátodo, los cuales se relacionan con los siguientes factores:

- Contenido de humedad en el concreto. Mientras que un incremento de la humedad en el concreto reduce su resistividad, reduce también la penetración y difusión de oxígeno, que se vuelve mínima para el concreto

saturado; de esa forma, el concreto permanentemente sumergido en agua de mar sufre corrosión lenta, mientras que los concretos expuestos a humedecimiento y secado intermitentes son más susceptibles de corroerse.

- Temperatura. Estudios de campo y de laboratorio han mostrado que la corrosión en el acero de refuerzo se acelera con el incremento de la temperatura, en virtud de que ésta afecta directamente la solubilidad del oxígeno y también la movilidad de sustancias tales como los cloruros que participan preponderantemente en el proceso de corrosión. También, los cambios bruscos de temperatura en el aire ambiental pueden resultar en condensación de agua sobre la superficie de concreto y cambiar así su contenido de humedad.
- Presencia de sales. La presencia de sales provoca generalmente dos efectos que resultan opuestos uno al otro: reducen la resistividad del electrolito, incrementando así la velocidad de corrosión, y en concentraciones altas disminuye la solubilidad del oxígeno y puede por lo tanto disminuir la velocidad de corrosión.

El contenido de C_3A en el cemento forma un complejo insoluble, hidrato de cloroaluminato de calcio, el cual inhibe cierta proporción de los cloruros totales y disminuye así el riesgo de corrosión. Sin embargo, en un ambiente con presencia de sulfatos y cloruros, los iones sulfato alteran ese complejo debido a la formación preferencial de hidrosulfoaluminato de calcio, lo que resulta en la liberación de algunos cloruros ligados que quedan así disponibles para la corrosión del acero. Un proceso similar de liberación de cloruros se genera bajo la acción del dióxido de carbono presente en la atmósfera, ya que también puede descomponer los hidratos de cloroaluminato.

El dióxido de carbono puede así mismo penetrar en el concreto, aunque su tasa de penetración se puede controlar eficazmente mediante la impermeabilidad de un concreto de buena calidad. El CO₂, el dióxido de sulfuro y el óxido nítrico, considerados importantes contaminantes del aire, reaccionan también con los hidróxidos en el concreto y los convierten en carbonatos. Así, todos ellos, en condiciones naturales de exposición, dan lugar a procesos de carbonatación del concreto, por lo que la carbonatación es hoy su mecanismo dominante de neutralización.

- **Potencial de cloruros en el aire**

- Aire marítimo

Estudios realizados en otros países indican una gran diversidad de componentes químicos en el agua de mar, con una amplia gama de concentraciones. Resulta entonces improductivo generalizar una presencia promedio de elementos nocivos para el buen comportamiento de las estructuras de concreto. Podemos citar como ejemplo una reciente investigación en Japón, que detectó una variación en cloruros del agua de mar que osciló entre 0.01 y 0.20 mg de cloruro de sodio por cm² de superficie expuesta. Otro estudio encontró concentraciones particularmente elevadas del ion cloruro, las cuales variaban alrededor de 21,700 ppm. Así mismo, se detectaron contenidos de sulfatos sobre 3800 ppm, y los más altos valores de sulfitos registrados en el mundo.

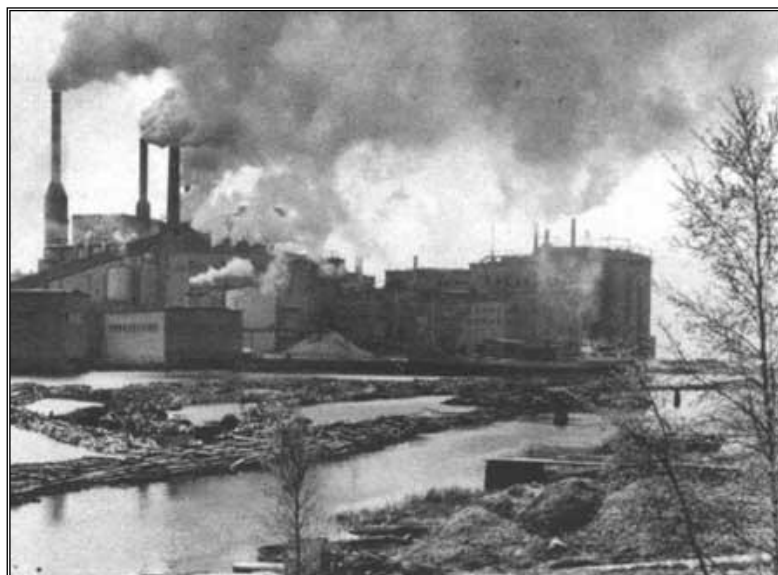
Aún cuando en nuestro país no se conocen datos concretos, resulta evidente la presencia de sulfitos, carbonatos y cloruros en el agua de mar, los cuales necesariamente resultan dañinos para las estructuras de concreto. Así, con el agravante de la acción de la temperatura, casi constante en todo el año, asociada al clima tropical de nuestros litorales y a la acción de los vientos también propios de estas zonas, se conjuntan todos los factores que generan ambientes altamente propicios para que se produzca la corrosión en el acero de refuerzo de las

estructuras de concreto, tal y como se refirió al describir la incidencia de cada uno de esos aspectos en el proceso general.



- Zonas industriales.

La presencia de contaminantes en el medio ambiente, generados por la emisión de las industrias, provoca una diversidad de componentes químicos (con diferentes grados de concentración cada uno) mayor de la que se podría observar en un ambiente marítimo natural, aunque es altamente probable la preponderancia del óxido de carbono, algunos sulfatos y nitratos que, como se refiere, inciden en la disminución del pH natural del concreto y en procesos de carbonatación que favorecen la entrada de humedad y agentes corrosivos hacia el acero de refuerzo.



Como se señaló en el inciso anterior, las zonas costeras cuentan con condiciones que propician la corrosión del acero de refuerzo por los componentes químicos que flotan en el aire. Por lo tanto, la emisión de contaminantes de zonas industriales en esas áreas viene a agudizar la problemática, pues la gran aleatoriedad en la presencia de cada componente impide el establecimiento de normas o recomendaciones en cuanto a cuidados específicos y hace necesario el estudio de cada caso en particular, con el apoyo del conocimiento que pueda proporcionar el estado del arte actual en cuanto a tecnología del concreto.¹⁹

¹⁹ Juan Luis Cottier Caviedes, **Art. La corrosión del concreto en masa y armado,** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

CAPITULO.- 5

PREVENCIÓN Y CONTROL EN EL CONCRETO

Previamente a la construcción de una estructura de concreto, es necesario llevar a cabo una serie de reconocimientos y evaluaciones cuya amplitud y cuya trascendencia deben estar de acuerdo con el tamaño, requisitos e importancia de la obra. Los resultados que se obtengan y los requerimientos que de ellos deriven, deben servir de base para establecer las medidas de prevención específicamente aplicables en procuración de la calidad y durabilidad de la estructura.



Fig. 5.1 Construcciones representativas de la utilización de concreto armado

5.1 Indagaciones preliminares

- **Condiciones climáticas de sitio**

Es conveniente adquirir conocimiento anticipado de las características climatológicas del sitio donde se construirá la estructura. Este reconocimiento de las condiciones ambientales (temperaturas, humedad, precipitación pluvial, radiación solar, vientos dominantes) debe abarcar todas las estaciones del año, a fin de tomar en cuenta no solamente las que puede esperarse durante la etapa de construcción, sino también las que debe soportar la estructura ya construida en el curso de su vida de servicio.

- **Características de la estructura**

Los aspectos característicos de la estructura que deben reconocerse y evaluarse corresponden a su forma y dimensiones, a fin de establecer de acuerdo con su relación volumen / superficie expuesta (V/S) si se trata de estructuras ordinarias o semivoluminosas, o bien si por su gran superficie expuesta y reducido espesor deben ser identificadas como losas, placas o elementos similares.

Cuando la estructura se identifica como semivoluminoso, se procede a aplicar las medidas que se recomiendan por especificaciones en el cálculo estructural, con objeto de prevenir los agrietamientos de origen térmico en el concreto. Si se trata de elementos similares a losas, lo procedente es aplicar las medidas antes mencionadas, con el propósito de evitar los agrietamientos del concreto debidos a la contracción plástica y/o por secado.

- **Condiciones de exposición**

La exposición del concreto a un medio de contacto que de modo directo o indirecto puede dañarlo, es tal vez una de las causas más frecuentes de su deterioro prematuro. Por ello es de vital importancia para la durabilidad de las estructuras investigar anticipadamente las condiciones de exposición en que deberán operar y, en caso necesario, verificar el carácter y grado de agresividad de los medios de contacto en que permanecerá expuesto el concreto en servicio.

Si como consecuencia de esta indagación se determina que existe riesgo potencial de deterioro para la estructura por este concepto, será necesario prevenir la aplicación de las medidas de defensa que correspondan, entre las que cabe señalar las que se recomiendan contra el ataque de los sulfatos, la corrosión del acero de refuerzo, la lixiviación y el ataque de sustancias químicas.

- **Condiciones de servicio**

Al tratar sobre los riesgos que entrañan las condiciones de servicio de las estructuras de concreto para efectos de su durabilidad, se juzgó apropiado agrupar las condiciones más comunes en función de las propiedades del concreto que en cada caso resultan más influyentes en la durabilidad potencial de la estructura.

Sobre esta base, conviene definir la propiedad del concreto que se considere crítica para el buen desempeño de la estructura en las condiciones de servicio previstas, a fin de ejercer las medidas adecuadas para consolidar su obtención. Tales medidas, que más adelante se incluyen, están dirigidas a la procuración de las siguientes propiedades del concreto: resistencia mecánica, deformabilidad bajo carga, impermeabilidad y resistencia superficial al ambiente agresivo.

5.2 Caracterización del concreto

- **Requisitos de desempeño**

Con base en la información obtenida mediante las indagaciones preliminares, y de acuerdo con las estipulaciones de proyecto de la estructura, es posible precisar los requisitos de desempeño que el concreto debe cumplir. La mayoría de las veces, estos requisitos se refieren a una o varias de las siguientes propiedades y características del concreto endurecido:

- Resistencia mecánica, o compresión y/o tensión
- Deformabilidad bajo carga
- Resistencia a la penetración de fluidos (impermeabilidad)
- Resistencia al ataque de los sulfatos

- Resistencia a la congelación y el deshielo
- Prevención de agrietamientos térmicos
- Prevención de agrietamientos por secado
- Prevención de las reacciones álcali-agregado
- Resistencia superficial al ambiente agresivo

5.3 Diseño de la mezcla de concreto

- **Objetivos del diseño**

El diseño de la mezcla de concreto debe efectuarse con la finalidad específica de proporcionar un concreto capaz de satisfacer determinados requisitos de desempeño previamente establecidos. Tales como los siguientes:

Requisitos de desempeño

- Resistencia mecánica (estructural)
 - A compresión
 - A tensión (indirecta, por flexión)
- Resistencia al deterioro físico y/o químico
 - Penetración de fluidos (corrosión, lixiviación)
 - Ataque de sulfatos
 - Congelación y deshielo
 - Reacción álcali-agregado (sílice, carbonato)
 - Resistencia superficial (mecánicas, hidráulicas)
- Otras propiedades
 - Deformabilidad bajo carga
 - Estabilidad volumétrica (temperatura, humedad)

5.4 Previsiones y recomendación en tiempo caluroso

- **Condiciones de tiempo caluroso**

En relación con el uso del concreto, el tiempo caluroso se define cualitativamente como una combinación de condiciones perjudiciales que incluyen elevadas temperaturas del ambiente y del concreto, baja humedad relativa ambiental, presencia de viento y fuerte radiación solar.

- **Factores perjudiciales propiciados por el clima caluroso**

Las condiciones ambientales que caracterizan el tiempo caluroso, producen en el concreto fresco y en proceso de endurecimiento factores negativos, los cuales son de suma importancia y es necesario emplear buen cuidado en ellos. A continuación se enlistan los de mayor importancia:

- Temperatura de la mezcla de concreto
- Demanda de agua de mezclado
- Sobrecalentamiento y pérdida de revenimiento
- Aceleración del fraguado
- Secado superficial rápido
- Deseccación interna temprana

5.5 Previsiones y recomendación en tiempo frío

En relación con el uso del concreto, las condiciones térmicas ambientales que definen el tiempo frío suelen ser más explícitas que las de tiempo caluroso. Así se consideran que existen condiciones de tiempo frío cuando durante tres días consecutivos la temperatura media diaria del aire es menor de 4.5 °C, y ésta no excede de 10°C durante más de 50% del tiempo en un lapso de 24 horas. Así mismo señala que estas condiciones empiezan a manifestarse desde el otoño y se

prolonga hasta la primavera, lo cual evidentemente corresponde al clima que prevalece en esta época del año en buena parte del territorio de Estados Unidos de América (EUA).

- **Factores perjudiciales propiciados por el clima frío**

A continuación se presentan condiciones que se generan al momento de tener condiciones climáticas anteriormente mencionadas, en las cuales se debe de tener mayor cuidado:

- Temperatura de la mezcla de concreto
- Demanda de agua mezclada
- Transporte de la mezcla de concreto
- Colocación y compactación en la estructura
- Fraguado y endurecimiento del concreto

5.6 Protección contra el ataque de los sulfatos

El riesgo que representa para la durabilidad del concreto la existencia de altas concentraciones de sulfatos en el medio de contacto con la estructura, se evalúa en función de los grados de agresividad. Asimismo, al hacer referencia a la resistencia a los sulfatos como requisitos de desempeño del concreto, se mencionó que los medios para procurar dicha resistencia son principalmente dos:

- 1) El empleo de una baja relación agua/cemento en beneficio de la impermeabilidad del concreto.
- 2) La utilización de un cementante químicamente resistente a la acción de los sulfatos.

Para complementar esos señalamientos, en la siguiente tabla se reproducen las medidas preventivas específicas que recomienda el Comité ACI 201 para los diferentes grados de agresividad por sulfatos previamente mencionados.

Tabla No. 11 Valores recomendadas por el ACI para proteger el concreto contra el ataque de sulfatos en el medio de contacto				
Grado de agresividad del medio de contacto	Contenido de sulfatos, $SO_4^{=}$		Agua/cementante Máxima en masa	Requisitos del cementante
	Suelo (sulfatos solubles) %	Agua, mg/l (ppm)		
Leve	0.00 – 0.10	0 – 150	Sin requisitos especiales por resistencias a sulfatos	
Moderado	0.10 – 0.20	150 – 1500	0.50	Cemento tipo II ASTM C 150, o Equivalente
Severo	0.20 – 2.00	1500 – 10 000	0.45	Cemento tipo V ASTM C 150, o Equivalente
Muy severo	> 2.00	> 10 000	0.40	Cemento tipo V ASTM 150 mas Puzolana o escoria

En la tabla anterior se observa que los cementantes recomendados están básicamente de acuerdo a la especificación ASTM C 150 pero admite el uso de cementantes en cuanto a su resistencia a los sulfatos. Para adaptar estos requisitos a los cementos locales que se fabrica conforme a la norma mexicana NMX-C-414, en la siguiente tabla se proponen diversas opciones para satisfacer esas equivalencias mediante el uso de cementos nacionales.

Tabla No. 12 Cementos nacionales propuestos por su probable equivalencia en la resistencia a los sulfatos.	
Grado de agresividad por sulfatos del medio de contacto (+)	Opciones propuestas de cementos nacionales según NMX-C-414, por su probable equivalencia en la resistencia a los sulfatos del concreto.
Moderado	Cemento CPO con 8 % máximo de C3A Cementos CPP, CPEG, CPC, CPS y CEG, cuyo clinker no exceda 8% de C3A, o bien cuya expansión (NMX-C-418) no excede 0.10 % a 6 meses
Severo	Cemento CPO con 5 % máximo de C3A Cemento CPP, CPEG, CPC, CPS, cuyo clinker no excede 5% de C3A, o bien

	cuya expansión (NMX-C-418) no excede 0.05% a 6 meses ni 0.10 % a un año. Cementos CEG (RS) con expansión máxima de 0.05% a 6 mese y 0.10% a un año.
Muy Severo	Cementos CPP, CPEG Y CPS; cuyo clinker no exceda 5 % de C ₃ A y cuya expansión (NMX-C-418) no excede 0.07 % a un año ni 0.10% a 18 meses Cemento CEG (RS) cuya expansión (NMX-C-418) no exceda 0.07 % a una año, ni 0.10 % a 18 meses
(+)Grados de agresividad conforme a la tabla anterior a esta. (++) En este grado se incluye el agua de mar en condiciones normales (no estancada)	

Es pertinente destacar la importancia que tiene para la resistencia a los sulfatos de la estructura el hecho de que manifiesta una baja permeabilidad a los fluidos, para lo cual no basta con utilizar una reducida relación agua/cemento en la elaboración del concreto, sino también es imprescindible tomar las precauciones necesarias para evitar las deficiencias constructivas y los agrietamientos de toda procedencia, incluyendo los no estructurales.

En el caso de estructuras ya construidas que deban prestar servicio en contacto con sulfatos, y por alguna razón no se tomaron oportunamente medidas preventivas en la elaboración del concreto, existe la posibilidad de protegerlas siempre y cuando se pueda tener acceso a las superficies en riesgo de exposición a los sulfatos, a fin de recubrirlas con un material adecuado antes de entrar en contacto con el medio agresivo. Dado que la función básica de este recubrimiento es evitar el contacto y la infiltración del medio acuoso en el concreto, debe seleccionarse un material que forme en dichas superficies una película bien adherida, durable, impermeable con cierta elasticidad.

5.7 Prevención de la corrosión del acero de refuerzo

Por su elevada frecuencia, la corrosión del acero de refuerzo ocupa un lugar destacado entre las causas de deterioro anticipado de las estructuras de concreto reforzado.



Fig. 5.2 Acero de refuerzo colocado en obra marítima

- **Planteamientos**

El asunto de la corrosión del refuerzo del concreto se puede plantear y resumir en los siguientes conceptos.

- La corrosión del acero de refuerzo es un proceso electroquímico cuyo desarrollo requiere la existencia de agua y oxígeno; es decir, para que se produzca la corrosión debe haber en el concreto un cierto grado de humedad y suficiente oxígeno del aire en la vecindad de las barras de refuerzo. Esto significa que la corrosión no evoluciona si el concreto se halla en condiciones seca y continuamente inmerso en agua. En los demás casos, el riesgo de corrosión depende del grado de exposición al agua y al aire y de la corrosividad del medio de contacto.

- Aún en presencia de agua y oxígeno, el concreto que envuelve las barras de refuerzo puede protegerlas contra la corrosión si cumple las siguientes condiciones:

- 1) Debe poseer y conservar una elevada alcalinidad (aproximadamente, $\text{pH} > 11$).
- 2) Debe ser sano, compacto y resistente a la penetración de fluidos.
- 3) La costra de concreto que recubre las barras debe tener un adecuado grosor en función de las características del medio de contacto externo.
 - La presencia de cloruros en la solución de poro del concreto en contacto con las barras de refuerzo, propicie la corrosión cuando alcanza un cierto grado de concentración. El origen de estos cloruros puede ser endógeno (provenientes de los componentes del concreto) y/o exógenos (procedentes del medio de contacto externo e infiltrados a través del concreto). La suma de cloruros de ambos orígenes debe mantenerse por debajo de una concentración crítica para prevenir la corrosión. Dicha concentración crítica de cloruros depende de condiciones de exposición de la estructura y de las características del acero de refuerzo, pues el acero de preesfuerzo es más vulnerable a la corrosión.
 - La continua exposición de las estructuras al aire atmosférico propicia el fenómeno de carbonatación superficial del concreto, a medida que el bióxido de carbono del aire reacciona con los compuestos alcalinos derivados del cemento para formar carbonatos; como consecuencia, la alcalinidad original del concreto de recubrimiento tiende a disminuir y con ello se reduce la protección que brinda a las barras de refuerzo contra la corrosión. Este proceso, que en condiciones ordinarias es muy lento, puede intensificarse si el concreto es poroso, y/o el contenido de CO_2 atmosférico es alto, y/o la humedad ambiental esta en un cierto nivel crítico (60-80 % HR, aproximadamente)

- **Medios para prevenir la corrosión**

Previamente a la definición de las medidas aplicables la corrosión del acero de refuerzo, es necesario identificar de riesgo que por este concepto corresponda a la estructura por construir en función de sus características y las condiciones de exposición en que deba prestar servicio.

Tabla No.13 Escala propuesta de riesgos de corrosión del acero de refuerzo, en función de las condiciones de exposición del concreto en servicio		
Riesgo de corrosión	Condiciones de exposición del concreto en servicio	Casos de muestra
(1) Nulo a leve	Continuamente seco al ambiente, en condiciones atmosféricas de hábitat sin agentes corrosivos	Elementos estructurales en espacios cerrados o semiabiertos, y no expuestos a la lluvia, en ambiente atmosférico no industrial ni marino.
(2) Leve a moderado	Continua o esporádicamente húmedo, en contacto con un medio no corrosivo	Elementos estructurales a la intemperie, en ambiente atmosférico no industrial ni marino. Estructuras hidráulicas en contacto con aguas no corrosivas. Elementos estructurales enterrados o semienterrados, en contacto con aguas freáticas y/o suelos no corrosivos.
(3) Moderado a alto	Continua o esporádicamente húmedo, en contacto con un medio moderadamente Corrosivo.	Estructuras costeras no industriales, expuestas al aire marítimo. Estructuras industriales no costeras, expuestas a emanaciones de gases corrosivos. Elementos estructurales enterrados o semienterrados, en contacto con aguas freáticas y/o suelos moderadamente corrosivos.
(4) Muy alto	Continuamente o esporádicamente húmedo, o cíclicamente húmedo y seco, en contacto con un medio corrosivo.	Estructuras industriales costeras, expuestas a emanaciones de gases corrosivos y aire marítimo. Elementos estructurales expuestos al contacto con agua de mar en forma permanente, periódica o cíclica. Cimentaciones de estructuras cerca de la costa, en pantanos o albuferas Elementos estructurales enterrados o semienterrados en contacto con aguas freáticas y/o suelos muy corrosivos Elementos estructurales en contacto con salmueras

- Alcalinidad y carbonatación del concreto

El concreto ya endurecido suele exhibir un pH entre 12 y 13 aproximadamente. En estas condiciones de elevada alcalinidad se forma una película en las barras de acero de refuerzo que las protege de la corrosión, en cuyo caso se dice que hay un estado de “pasivación” en que la corrosión no prospera.

En el curso de la vida de servicio de las estructuras expuestas al ambiente atmosférico, la alcalinidad del concreto superficial tiende a declinar progresivamente por la carbonatación que produce la penetración del bióxido de carbono (CO_2) del aire. Cuando la carbonatación alcanza la profundidad del refuerzo y el pH desciende a menos de 11, comienza a perderse el estado de pasivación y el acero se vuelve vulnerable a la corrosión. Si en la vecindad de las barras hay agua y oxígeno la corrosión se inicia, pero si además hay suficientes cloruros el proceso corrosivo se activa por un efecto de sinergismo.

Para prevenir la corrosión por carbonatación el recurso básico consiste en proveer un concreto que se oponga a la penetración del CO_2 por lo menos lo difiera en concordancia con la vida de proyecto de la estructura. Los medios para lograrlo, se refieren al uso de un concreto resistente a la penetración de los fluidos y de un generoso espesor de recubrimiento sobre las barras de refuerzo. La aplicación conjunta de estas medidas suele ser eficaz para evitar la carbonatación prematura del concreto, que es uno de los diversos factores que contribuyen a la corrosión temprana del acero de refuerzo.

- Permeabilidad del concreto

Una adecuada resistencia del concreto a la penetración de fluidos es un requisito de desempeño necesario para prevenir la corrosión del acero de refuerzo; esto es, el concreto debe exhibir una baja permeabilidad al agua y al aire con sus correspondientes contenidos de agentes de corrosión.

Con agregados de buena calidad, la permeabilidad potencial del concreto se regula mediante la composición de la pasta de cemento. A su vez, la permeabilidad de la pasta de cemento hidratada depende principalmente de su porosidad cuyo grado puede regularse mediante la relación agua/cemento. Sin embargo, en el caso de la penetración de agentes corrosivos como el CO₂ y el ion cloruro (Cl⁻) no solo importa el grado de porosidad de la pasta sino también la dimensión y distribución de los poros, cuya adecuación es posible mediante la incorporación de materiales con propiedades puzolánicas muy finamente divididos.

De acuerdo con ello, para obtener un concreto que sea potencialmente resistente a la penetración de fluidos corrosivos, no solamente es necesario emplear una relación agua/cemento suficientemente baja, sino además utilizar un cementante con propiedades puzolánicas. No obstante, debido a que la actividad puzolánica tiende a reducir la alcalinidad del concreto, conviene evitar el empleo de cementantes con elevadas proporciones de componentes puzolánicos.

En la siguiente tabla se proponen las relaciones agua/cemento máximas permisibles y los cementantes locales apropiados para los niveles de riesgos de corrosión.

Tabla No.14 Relaciones agua/cemento y cementos locales recomendables para concreto expuestos a diversos riesgos de corrosión del acero de refuerzo.		
Nivel de riesgos de corrosión ⁽⁺⁾	Agua/cemento en masa, máxima permisible ⁽⁺⁺⁾	Cementos nacionales recomendable según Especificación NMX-C-414
(1) Nulo a leve	Sin requisitos por corrosión	Sin requisitos o limitación por concepto de corrosión
(2) Leve a moderado	0.50	

(3) Moderado a alto	0.44	Cemento CPP con 25 % máximo de puzolana Cemento CPEG con 30 % máximo de escoria
(4) Alto a muy alto	0.38	Cemento CPS con 5 a 15 % de humo de sílice
(+) Conforme a la escala propuesta anteriormente (++) A menos que se requiere una relación A/C mas baja por concepto de resistencia mecánica o por otros riesgos de deterioro		

- Nivel crítico de cloruros

Este concepto se refiere a la concentración de cloruros en la solución de poro del concreto a partir de la cual inhibe el riesgo de corrosión del acero de refuerzo. También se le conoce como umbral de riesgo de corrosión por el contenido de cloruros en el concreto.

Los cloruros en la solución de poro del concreto pueden ser de origen endógeno y exógeno. Los primeros son los que aportan los ingredientes del concreto (cemento, agua, agregados, aditivos) y los segundos son los que proceden del medio de contacto externo y penetran en el concreto por difusión del ion cloruro (Cl⁻). Para la determinación del contenido de cloruros en el concreto endurecido existen básicamente dos procedimientos por disolución con ácido nítrico o con agua. Los cloruros soluble en ácido (ASTM C 1152) corresponden a los cloruros totales, que no necesariamente todos contribuyen a la corrosión, pero como su determinación es mas rápida y sencilla, se le utiliza con frecuencia para pruebas discriminantes preliminares. Los cloruros solubles en agua determinados por el método ASTM C 1218, normalmente representan alrededor del 70 a 75 % de los solubles en ácido y supuestamente son los que contribuyen a la corrosión; sin embargo, sus resultados pueden ser engañosos cuando los agregados contienen cloruros solubles en agua que no son corrosivos. Para evitar este evento inconveniente se ha propuesto un método denominado Soxhlet cuya ejecución

tiene por ahora carácter provisional el cual permite extraer del concreto solamente los cloruros solubles en agua que pueden contribuir a la corrosión.

Para prevenir la corrosión por cloruros es preciso mantener su contenido en el concreto por debajo del umbral de riesgo. Debido a la injerencia de numerosos factores no es factible establecer un valor de carácter general para este umbral de riesgo, no obstante, suele manejarse un dato de 0.4 % del cemento en masa, para cloruros solubles en ácido, lo que equivale aproximadamente a 0.3 % de cloruros solubles en agua.

Para mantener los cloruros totales en el concreto por debajo de este contenido máximo recomendable, es necesario limitar la inclusión de cloruros endógenos en el concreto nuevo y restringir la aportación adicional de cloruros externos por penetración a través del concreto en servicio. De tal modo, a medida que hay más posibilidades de penetración de cloruros procedentes del exterior, las limitaciones de los cloruros endógenos en el concreto nuevo deben ser más estrictas.

Así se pone de manifiesto en los límites máximos permisibles de cloruros endógenos para el concreto nuevo citado en la siguiente tabla, que corresponden al criterio del comité ACI 222 cuyas recomendaciones en este aspecto son más rigurosas que las del comité ACI 31.

Tabla No. 15 Límites máximos permisibles de cloruros endógenos en el concreto de construcciones nuevas (Datos de ACI 222R)	
Clase de concreto y condiciones de exposición de la estructura en servicio	Contenido máximo permisibles de cloruros endógenos, solubles en agua, en el concreto de construcciones nuevas ⁽⁺⁾ (ASTM 1218 / ACI 222.1)
Concreto presforzado en cualquier condición	0.06
Concreto reforzado en condiciones húmedas	0.08

Concreto reforzado en condiciones secas	1.00
(+) Expresados como porcentaje en masa del consumo de cemento.	

En condiciones de servicio que representan riesgo de corrosión será necesario verificar antes de la construcción de la estructura que no se excedan los cloruros endógenos en el concreto de uso previsto. Para ello debe determinarse individualmente los cloruros solubles en agua de sus componentes (cemento, agua, agregados, aditivos) con objeto de calcular las aportaciones de cloruros que puedan hacer al concreto en función de las cantidades en que intervengan

La defensa contra la penetración de cloruros exógenos se funda básicamente en utilizar un concreto con reducida permeabilidad a los fluidos y asegurar un adecuado espesor en el concreto que recubre las barras de refuerzo. En los casos de alto riesgo de corrosión por la elevada concentración de cloruros en el medio de contacto y/o por la vulnerabilidad de la estructura, procede poner especial atención en la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro, cuya verificación es aplicable el método de prueba ASTM C 1202. En la siguiente tabla se relacionan los resultados de esta prueba (carga eléctrica que pasa y permeabilidad al ion cloruro) con los concreto que son típicamente representativos y los niveles de riesgo en que se justifican.

Tabla No. 16 Escala para evaluar la resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro, en función de su conductancia eléctrica.

Permeabilidad del concreto al ion cloruro (Cl ⁻) (ASTM C 1202)		Concretos típicamente representativos del grado de permeabilidad	Condiciones de riesgos de corrosión en que son aplicables estos concretos
Carga eléctrica que pasa, en coulombs	Grado de permeabilidad a los cloruros		
> 4000	Alto	Concreto convencional con alta relación (A/C) (mayor de 0.6)	(1) Nulo a leve
2000 – 4000	Moderado	Concreto convencional con media relación A/C (de 0.6 a 0.4)	(2) Leve a moderado
1000 – 2000	Bajo	Concreto convencional con baja relación A/C (menor de 0.4)	(3) Moderado a alto
100 – 1000	Muy bajo	Concreto con 5 a 15 % de humo de sílice y baja relación A/C Concreto modificado con latex	(4) Alto a muy alto
< 100	Insignificante	Concreto con 15 a 20 % de humo de sílice y muy baja relación A/C Concreto impregnado con polímero y polimérico	

- Espesor del recubrimiento de concreto

La velocidad con que los agentes externos de corrosión pueden penetrar el concreto maduro y sano depende principalmente de su permeabilidad a los fluidos, que a su vez puede regularse mediante la relación agua/cemento y las características del cemento.

De acuerdo con lo anterior, para que la corrosión del refuerzo no se convierta en una causa de deterioro precoz de las estructuras, no basta con utilizar en el concreto una baja relación agua/cemento y un cementante adecuado, sino que además debe proveerse un espesor de recubrimiento apropiado a las condiciones de corrosividad del medio de contacto externo. Para definir el orden de magnitud de los espesores necesarios, procede tomar en cuenta que en condiciones de moderado riesgo de corrosión el recubrimiento mínimo usual es 40 mm y de preferencia 50 mm en tanto que para alto riesgo de corrosión por exposición al agua de mar dicho recubrimiento mínimo suele incrementarse a 75 mm aunque puede llegar a 100 mm para elementos de concreto colocados in situ. Con base en estos valores se ha formado la siguiente tabla en que se representan recubrimientos mínimos nominales que se estiman recomendables para los niveles de riesgos de corrosión definidos previamente.

Tabla No. 16 Espesores mínimos recomendables del concreto según el riesgo de corrosión del acero de refuerzo		
Nivel de riesgos de corrosión	Espesor nominal recomendable del recubrimiento de concreto, mínimo requerido en mm	
	Precolados ⁽⁺⁾	Colados in situ
(1) Nulo a leve	Sin requisitos por este concepto	
(2) Leve a moderado	40	50
(3) Moderado a alto	50	70
(4) Alto a muy alto	60	90
(+) En elementos precolados puede reducirse 10 % este espesor si se le reviste y protege contra la penetración de agentes corrosivos		

- Medios complementarios de prevención y protección, ante la corrosión

Cuando las condiciones de exposición se manifiestan muy corrosivos y/o la estructura es sumamente vulnerable, los medios anteriores pueden no ser suficientes y se hace necesario complementarlos con otros que coadyuven a la defensa del acero de refuerzo contra la corrosión. Estos, medios complementarios se pueden dividir en 2 grupos: 1) los que se ejercen internamente en la estructura, ante y durante la construcción, y 2) los que se ponen en practica en el exterior de la estructura ya construida.

Entre los medios de acción interna destacan la inclusión en el concreto de un aditivo inhibidor de la corrosión y la aplicación de un revestimiento anticorrosivo a las barras de acero de refuerzo. En el grupo de medios externos puede mencionarse la aplicación de recubrimientos a base de cemento portland con diferentes adiciones (látex, humo de sílice, etc.), recubrimientos con resina epoxy, poliuretano, metacrilato, etc., membranas impermeabilizantes de diversas naturaleza, impregnación con productos selladores de superficie y el sistema de protección catódica.

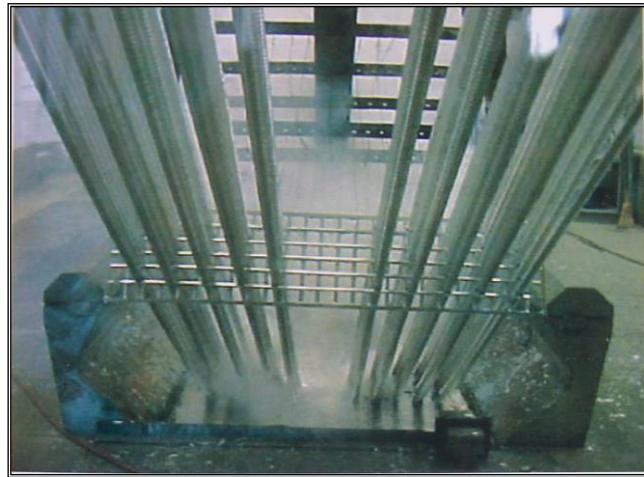


Fig. 5.3 Proceso de Galvanizado

5.8 Prevención de la lixiviación del concreto

Por nosotros es conocido el proceso de lixiviación del hidróxido de calcio del concreto por la acción disolvente del agua que alcanza a infiltrarse en su interior. Así como también las consecuencias de este proceso, las cuales aumentan la porosidad y disminuye la alcalinidad del concreto superficial lixiviado, con lo cual se afecta la protección que brinda al acero de refuerzo contra la corrosión. A fin de prevenir este riesgo, es necesario tomar medidas contra la lixiviación en las

estructuras por construir donde puede producirse, cuyas medidas consisten principalmente en utilizar un concreto de baja permeabilidad potencial para inhibir la penetración del agua y emplear un cementante con actividad puzolánica adecuada para fijar el hidróxido del calcio y convertirlo a compuestos insolubles.

5.9 Protección contra el ataque de sustancias químicas

El concreto de cemento portland es incapaz de soportar sin daño el contacto con muchas sustancias químicas, especialmente cuando son de naturaleza ácida. Algunas veces, como en el caso de los sulfatos y los cloruros es posible adoptar medidas de carácter preventivo durante la construcción de las estructuras, a fin de acondicionar el concreto para resistir sus acciones perjudiciales. Sin embargo, para la mayoría de las sustancias potencialmente dañinas no existen medidas preventivas de acondicionamiento que habiliten este concreto para resistir sus efectos. Por tal motivo cuando en las condiciones de exposición y servicio se contempla el contacto con una sustancia química agresiva, las medidas de defensa del concreto se ejercen en la estructura ya construida.

Normalmente, la protección del concreto ya terminado requiere la interposición de una barrera que impida el contacto directo con la sustancia agresora prevista. La selección de esta barrera (material, espesor, forma de aplicación, etc.) debe hacerse en función de la naturaleza y grado de agresividad de la sustancia, de manera que exista constancia de su efectividad y durabilidad en condiciones de contacto con dicha sustancia específicamente. De acuerdo con el Informe ACI 515.1R existen diversos materiales y productos de probada eficacia para esta finalidad. Con base en esta información, en la siguiente tabla se indican los materiales que suele emplearse en la formación de barreras para proteger al concreto de cemento portland contra la acción deteriorante de sustancias químicas con diversos grados de agresividad.²⁰

²⁰ M. Mena Ferrer, (2005). **Durabilidad de Estructuras de Concreto en México**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 41-59,85-97

Tabla No. 17 Materiales típicos para barreras de protección del concreto contra sustancias químicas con diverso grado de agresividad. (formada con datos del Informe ACI 515.1R)

Sustancias agresoras	Agresividad y efectos en el concreto	Barreras de protección (materiales típicos)
Ácidos fuertes en cualquier concentración (clorhídrico, sulfhídrico, sulfúrico, sulfuroso, nítrico). Cloruro de aluminio, bisulfito de calcio y otras sales presentes en salmueras industriales.	Muy severa. Desintegración Rápida	<ul style="list-style-type: none"> - Membrana de furano reforzado con fibra de vidrio, cubierta con ladrillo antiácido juntado con mortero químicamente resistente. - Membrana asfáltica reforzada con fibra de vidrio, cubierta con ladrillo de carbón, juntado con mortero de éster vinílico - Capa de recubrimiento con mortero epoxico (resina epoxy con carga inerte no silicea) sellada con resina epoxy sin carga.
Sales de amonio (nitrato, sulfito, fosfato) Aceites vegetales puros (cacao, algodón, coco); jugos y Fermentos de frutas; ácidos intermedios (acético, fórmico, Húmico, láctico). Soluciones alcalinas y salinas de alta concentración.	Severa. Desintegración a corto plazo	<ul style="list-style-type: none"> - Resinas epoxy o poliéster reforzadas con fibra de vidrio. Laminas de neopreno precurado o PVC plastificado, fijadas con adhesivos afines - Membrana asfáltica reforzada con fibra de vidrio, cubierta con mortero de ester vinilico con carga de carbón mineral.
Aguas acidas (pH < 6.5) Ácidos intermedios con baja concentración. Soluciones alcalinas y salinas con mediana contracción. Grasas y desechos de origen animal	Significativa. Deterioro Superficial A mediano plazo	<ul style="list-style-type: none"> - Morteros con arena silicea u otra carga inerte, usando como aglutinantes resinas epoxy, poliéster o poliuretano - Productos bituminosos reforzados con fibra de vidrio.
Sales descongelantes (cloruros de sodio o de calcio). Aguas residuales industriales. Aguas muy puras (lixiviantes) Soluciones alcalinas y salinas con baja concentración. Ácidos débiles.	Moderada Deterioro superficial a largo plazo	<ul style="list-style-type: none"> - Recubrimientos de polivinilo, butilo, poliuretano, metilmetacrilato, epoxy, acrílico, hule, clorado, etc. - Recubrimientos asfálticos, de alquitran de hulla, vinilo, neopreno y alquitran de hulla con epoxy o uretano.

CONCLUSIONES

Durante el diseño del proyecto se deberá estudiar la exposición al entorno de la estructura de concreto, poniendo especial atención en las condiciones microclimáticas. Habrá que considerar todos los aspectos de durabilidad que vayan a tener efecto durante la construcción y la vida en servicio de la estructura.

Estos estudios de diseño se deben traducir en requerimientos de especificaciones de proyecto que sean razonables y no excesivas. La mezcla de concreto deberá estar proporcionada con base en los materiales seleccionados por el proyectista para asegurar que se satisfagan los requerimientos de durabilidad. Para asegurar la durabilidad proyectada, se tendrán que mantener los métodos de construcción apropiados, particularmente aquellos que afectan las propiedades del concreto fresco conforme es entregado. La consolidación, el acabado y también el curado se deberán ejecutar de tal manera que las propiedades del concreto endurecido tengan la durabilidad proyectada. Por lo anteriormente mencionado, es de vital importancia la supervisión y control de obra que se lleva a cabo en el medio ambiente marino, no menospreciando los factores a los que se someten otras estructuras en el interior de la República.

Los vicios que se vienen arrastrando de muchos años en el rubro de la construcción, se resumen en estructuras de baja eficiencia y corta vida útil, por lo cual es importante apegarse y respetar las especificaciones de proyectos, así como también es necesario el llevar un historial de todos los eventos importantes que se suscitan en obra.

Es importante señalar que la obtención de edificación elaboradas de concreto simple o de concreto armado con alta calidad es posible siempre y cuando se respeten los parámetros por todos nosotros conocidos; en algunas regiones de nuestra República Mexicana se tiene la idea de no ser necesario el seguimiento y

la aplicación de los reglamentos, a diferencia del centro del país en donde el reglamento se sigue al pie de la letra y es el principal instrumento para garantizar buenos resultados.

En relación a la Ciudad de Mazatlán, situada en el estado de Sinaloa, su clima imperante es sumamente perjudicial para los elementos de concreto armado, por lo cual existe la necesidad de tener un control muy representativo a la hora de construir utilizando este material, menciono de manera propositiva la creación de un manual de construcción que se especifique exclusivamente a la condiciones de la costa en este caso al puerto anteriormente mencionado, la intención de este manual consistiría en cuidar y a la vez evaluar al concreto armado desde el momento en que se concibe la idea de emplearlo en la construcción, pasando por el método constructivo utilizado al momento de su colocación, señalando los cuidados esenciales después de su colocación y concluyendo con las recomendaciones necesarias para su correcto mantenimiento.

Por último, es importante señalar que la tecnología aplicada también ha tenido lugar en el esfuerzo por encontrar soluciones de raíz a los problemas de durabilidad y vida útil de las estructuras de concreto, saliendo al mercado aditivos que se nombran inhibidores de corrosión los cuales modifican la microestructura del concreto para proteger el acero embebido de los sulfatos y cloruros. Así como también existen investigaciones muy a fondo con respecto al uso de acero galvanizado en las construcciones, tratando de inhibir con este material principalmente los efectos de la carbonatación del concreto que afectan la corrosión del acero de refuerzo, los resultados son evidentemente benéficos a favor de la durabilidad del concreto pero se contraponen al factor del costo del proyecto. De la misma manera existen estudios muy satisfactorios a favor de las propiedades mecánicas del concreto, esto se obtiene utilizando fibras de acero al interior de la mezcla pero solamente esto puede ser empleado en circunstancias que no exijan mayor capacidad de resistencia a los elementos donde se aplicará.

BIBLIOGRAFÍA

M. Mena Ferrer, (2005). **Durabilidad de Estructuras de Concreto en México**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 3-28

ACI Manual of Concrete Practice, (2002) American Concrete Institute. **Guía para obtener un concreto durable (ACI 201.2R)**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1

M. A. Sanjuán Barbudo y P. Castro Borges (2001). **Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Edición 1, Pág. 25-27

Exposición **“La Corrosión del Concreto en el Ambiente Marino”**, Ing. M. Gonzales de la Coteria, I Congreso Nacional de Ingeniería Estructural y Construcción, Diciembre 1998, Pag. 15-17

Revista “Construcción y Tecnología”, Kyösti Tuutti y Lars-Olaf Nilsson **Art. Durabilidad del Concreto**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Diciembre 2007, Pág. 24-27.

Revista “Construcción y Tecnología”, Rómel G. Solís Carcaño, Éric Iván Moreno, Pedro Castro Borges. **Art. Durabilidad en la estructura de concreto de vivienda en zona costera**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Enero 2008, Pág. 46-49.

Revista “Construcción y Tecnología”, Vitervo O’reilly **Art. Acción Acerca de la durabilidad del concreto**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), Marzo 2008, Pág. 50-53.

Juan Luis Cottier Caviedes, **Art. El Concreto Bajo la Influencia de los Sulfatos**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).

Juan Luis Cottier Caviedes, **Art. La corrosión del concreto en masa y armado**, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC).



REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

<http://www.mitecnologico.com/Main/MamposteriaYConcretoArmado>

<http://www.construaprende.com/tesis01/122-acero/1221-acero-de-refuerzo.html>

<http://www.nacion.com/br/2005/noviembre/19/nota6.html>

http://fic.uni.edu.pe/construccion/concreto/tec_conc02.html

<http://www.imcyc.com/revista/1998/nov/durabilidad.htm>