

UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO DE MANABI”



**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERIA CIVIL**

TEMA:

ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN POR DURABILIDAD

ELABORADO POR:

María Esperanza Macías Almeida

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Darío Páez Cornejo, Msc.

Manta, 2016

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Certifico, que el presente trabajo de investigación, fue realizado en su totalidad por la Egresada de la Carrera de Ingeniería Civil, el Sra. MARÍA ESPERANZA MACÍAS ALMEIDA como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Manta, enero de 2016

Ing. Dario Páez Cornejo, Msc.
DIRECTOR DE TESIS

RESPONSABILIDAD DEL AUTOR

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, corresponden exclusivamente al autor, y el patrimonio intelectual de la tesis de grado corresponde a la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí”

Egda. María Esperanza Macías Almeida

AGRADECIMIENTO

Mi gratitud a Jehová Dios, porque sin él, no hubiera podido tener sabiduría, fuerzas e intrepidez para continuar y culminar esta etapa de formación en mi vida.

Quiero dejar constancia de mi eterno agradecimiento:

A la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí de la ciudad Manta, quien me proporcionó los conocimientos necesarios y la orientación a través de su folio de docentes para formarme como profesional, quienes sacrificaron parte de su vida, para guiarme, asesorarme, darme consejos, requerimientos y también palabras de aliento siendo muy necesarias en este proceso de aprendizaje.

Al Ing. Darío Páez, Tutor de este trabajo de titulación, quien con su experiencia, y paciencia pudo departir críticas constructivas y sugerencias para que este estudio investigativo cumpliera su propósito, gracias a sus enseñanzas, permitieron que mis conocimientos se fortalecieran.

A mi esposo Milton Saltos, por todo su apoyo. A mis hijos por su tiempo A mis padres. A mi amiga Gabriela Almeida familiares y amigos, que estuvieron allí papa brindarme su ayuda incondicional, Muchas gracias.

Con afecto,

Macías Almeida María Esperanza

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado A Jehová Dios, que me dio la vida, salud, sabiduría, el valor necesario para no desistir, gracias a su voluntad, logre culminar parte de mis estudios seculares.

A mis hijos: Suanny Alejandra, David y Valentina Maralet Saltos, quienes están conmigo en toda situación, siendo ellos, mi fuente de felicidad, dándome ánimo, me ayudaron a no desistir en nada, a luchar con coraje y siempre anteponiendo la humildad; es por eso que hoy dedico este esfuerzo a ustedes que son la base fundamental para que pueda subir un escalón más en esta carrera que aún no termina.

A mis padres, Barón Macías y Auristela Almeida, que son el pilar de mí existir, gracias amados padres.

A mi esposo, Milton Saltos, que me brindó su apoyo, Dios te bendiga amor y multiplique tus esfuerzos

A mi amiga Gabriela, por estar allí siempre, por sus consejos y ánimos que sirvieron para que no me rindiera.

A mis hijos de corazón, Ivin y Valentino

A mis amigos, hermanos y más familiares, que estuvieron allí.

Muchas gracias

De todo corazón

Macías Almeida María Esperanza

RESUMEN

Los daños por durabilidad en la infraestructura han afectado las estructuras de concreto en su desempeño estructural y, en ocasiones, también tienen repercusiones económicas que son puntos clave para determinar la rentabilidad de un proyecto. En este proyecto se analiza en la ciudad de Manta varias estructuras de hormigón armado asociadas a los daños y causas posibles de las mismas.

Se presenta la filosofía del diseño por durabilidad, una herramienta y concepto tecnológico que bien aplicado, puede conducir a la industria de la construcción a tener un mejor desempeño y optimización de materiales durante el siglo XXI, logrando con esto construir estructuras con una mayor vida útil y menores costos de mantenimiento, con la finalidad de que la construcción participe en mayor medida en el desarrollo sustentable de la ciudad.

Este proyecto de investigación analiza de manera directa los principales factores que determinan la durabilidad de las estructuras de hormigón armado y su influencia en la vida útil, adicional se presenta una evaluación general de los niveles de daño que tienen las edificaciones de dos sectores de la ciudad de Manta como son: la ciudadela Universitaria y la calle 13, lugares considerados por la antigüedad de las construcciones y los factores ambientales a los cuales se encuentran expuestos.

ABSTRACT

The damage to infrastructure durability have affected concrete structures in structural performance and sometimes have economic repercussions that are key points to determine the profitability of a project. This project is analyzed in the city of Manta several concrete structures associated with damage and possible causes of the same.

design philosophy for durability, tool and technological concept well applied is presented, it can lead to the construction industry to have better performance and optimization of materials for the XXI century, achieving this build structures with a longer life and lower maintenance costs, in order that the construction involved more in the sustainable development of the city.

This research project directly analyzes the main factors that determine the durability of concrete structures and their influence on the life, additional general assessment of damage levels buildings with two sectors of the city presents Manta such as: University Citadel and 13th Street, places considered by the age of the buildings and environmental factors to which they are exposed.

INDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	ii
RESPONSABILIDAD DEL AUTOR	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
INDICE DE TABLAS	4
INTRODUCCIÓN	5
CAPITULO I	8
1. Estructuras de hormigón	8
1.1 Estructura del concreto	8
1.2 Microestructura del concreto	9
1.3 Concreto armado	11
1.4 Concreto presforzado	11
1.5 Acero de refuerzo	11
1.6 Causas de deterioro	12
1.7. Calidad e idoneidad del concreto	14
1.8. Condiciones de exposición	15
1.9. Reconocimiento de los factores que afectan una estructura	16
1.10. Ataques físicos al concreto	17
1.10.1. Efectos de las heladas	17
1.10.2. Acciones de abrasión, erosión e impacto	18
1.11. Ataques químicos al concreto	18
1.11.1 Acción de los sulfatos	20
1.11.2. Acción de las sales de magnesio y amonio	22
1.11.3. Ataque ácido	22
1.11.4. Lixiviación por aguas puras	24
1.11.5. Efectos del agua del mar	25
1.11.6. Reacción álcali-agregado	25
CAPITULO II	27
DIAGNÓSTICO	27

2. El concreto	27
2.1. Durabilidad del concreto en la costa	27
2.1.1. Tipología estructural localizada en el ambiente marino	28
2.2. Estructura y microestructura del concreto.....	28
2.2.1. Compacidad del concreto.	30
2.3. Porosidad.....	31
2.3.1. Poros de aire o macroporos.....	31
2.3.2. Poros capilares.	32
2.3.3. Poros de gel o microporos.	32
2.4. Absorción.	33
2.4.1. Porosidad fundamental o abierta.	33
2.4.2. Permeabilidad del concreto.	34
2.4.3. Hermeticidad.....	36
2.5. Interacción entre los poros y el medio ambiente.....	36
2.5.1. Interacción entre los poros y el agua.	37
2.5.2. Condensación capilar.	38
2.5.3. Difusión.....	39
2.6. Mecanismos de transporte.....	39
2.6.1. Transporte en el aire húmedo.....	39
2.6.2. Transporte por agua lluvia o salpicaduras de agua.	41
2.6.3. Transporte por inmersión.....	43
2.7. Mecanismos de daño	44
2.7.1. Acciones físicas.	44
2.7.2. Acciones mecánica.....	45
2.7.3. Acciones químicas.....	45
2.7.4. Acciones biológicas.	46
2.8. Generalidades de la patología del concreto.....	46
2.8.1. Definición y alcance de la patología del concreto.....	47
2.8.2. Fenómenos de envejecimiento y deterioro.	50
2.8.3. Factores que afectan la apariencia.....	50
2.8.4. Polución del medio ambiente.....	51
2.9. Superficie vertical de concreto	52
2.9.1. Cultivos biológicos	53

2.9.2. Eflorescencias.....	54
2.10. Mecanismos de deterioro.....	55
2.10.1. Meteorización.....	55
2.10.2. Decoloración y manchado	56
2.10.3. Expansión	56
2.10.4. Despasivación del acero de refuerzo.....	58
2.11. Fallas de las estructuras de concreto.....	59
2.11.1 Fallas durante la concepción y diseño del proyecto.....	59
2.11.2. Fallas por materiales.....	60
2.11.3. Fallas por construcción	62
2.11.4. Fallas por operación de las estructuras	63
2.11.5. Fallas por mantenimiento.....	64
CAPITULO III	66
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	66
3.1 Metodología de análisis	66
3.1.1. Muestra para el estudio	66
3.2. Factores de análisis	67
3.2.1. Carbonatación y metodología de medición	67
3.2.2. Determinación de la resistencia a la compresión.	69
3.2.3. Determinación del estado de corrosión de las armaduras.....	71
3.3. Reparación de daños	71
3.4. Equipos	71
CAPITULO VI.....	73
ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
4. Clasificación de Resultados	73
4.1 Resultados de las observaciones.....	73
4.1.1. Análisis del Sector A.....	74
4.1.2. Análisis de la Sector B.....	78
4.2. Resultados de los factores medidos	81
CONCLUSIONES.....	84
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFIA	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Efecto de la edad de una pasta de cemento sobre el coeficiente de permeabilidad para una rotación agua/material cementante de 0.51	35
Tabla 2.2 Tiempo de curado requerido para producir un sistema discontinuo de poros capilares en el concreto, asumiendo un curado húmedo continuo.	35
Tabla 3.3 Descripciones de sectores	66
Tabla 4.4 Total de viviendas observadas	73
Tabla 4.5 Resultados de la carbonatación	81
Tabla 4.6 Resultados de la corrosión	82

INTRODUCCIÓN

El concreto elaborado con cemento Pórtland es un material con una historia relativamente reciente. Debido a su consistencia rígida, anteriormente se creía que tenía una larga vida útil; sin embargo, la experiencia ha demostrado que no siempre es así. Los ejemplos en la construcción de estructuras de concreto con problemas, ante sus condiciones de servicio son abundantes y de diferente naturaleza, éstos se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras como investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad y conocer los factores que en ella intervienen. El estado de arte actual del tema es bastante amplio; no obstante, el espíritu científico continúa alimentándose de preguntas y nuevos retos.

A nivel mundial, el concreto es el material más utilizado en la construcción, y a menos que haya una revolución en los materiales de construcción, seguirá siéndolo; gran parte de la infraestructura de los países está elaborada con él, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo. Es un tema con implicaciones socioeconómicas.

Los problemas de durabilidad han afectado diversos tipos de estructuras, las cuales una vez que se presentan ya no son funcionales ni eficientes y están destinadas a no cumplir con su vida de servicio estimada. Los problemas de durabilidad no se limitan a su diseño inicial y construcción, tienen una fuerte intervención en la operación, ocasionan costos y pérdidas económicas para el propietario o inversionista, ya sea por reparación de las zonas afectadas, por la sustitución de elementos que se han deteriorado o por costos operativos imputables a remodelaciones o mantenimientos periódicos.

Por tal motivo, al hablar de durabilidad, se debe tener un enfoque holístico que integre los aspectos más relevantes para la construcción de estructuras de concreto con alta durabilidad.

La durabilidad de las estructuras se encuentran influenciadas por diferentes aspectos, teniendo entre uno de los más importante la influencia de factores

externos como es el ataque de cloruros, que de acuerdo a la ubicación de la ciudad de Manta frente al Océano Pacífico genera un ambiente de altos índices de salinidad afectando al hormigón armado de las edificaciones.

Este proyecto toma su importancia y se justifica a que en la ciudad de Manta no se han realizado estudios donde se pueda determinar los índices de identificación de degradación de estructuras por durabilidad los mismo que permiten establecer la vida útil de las estructuras, así como la determinación de las medidas preventivas que se deben adoptar.

Problema de Investigación

El ambiente salino y las malas prácticas constructivas generan en las edificaciones de hormigón armado disminución en su vida útil

Objeto

Estructuras de hormigón armado

Campo

Durabilidad de estructuras

Objetivo General

Analizar los principales factores que intervienen en la disminución de la vida útil de las estructuras de hormigón armado en la ciudad de Manta a través de ensayos de laboratorio.

Objetivos Específicos

Identificar en la literatura científica los diferentes aspectos que influyen en la durabilidad de estructuras asociándolas al entorno de la ciudad de Manta.

Establecer los principales errores en el proceso constructivo de edificaciones de hormigón que influyen su vida útil.

Verificar a través de ensayos de laboratorio la degradación del hormigón armado en edificaciones de la ciudad de Manta.

Hipótesis

Las edificaciones construidas con hormigón armado en la ciudad de Manta tienen afectaciones considerables que han disminuido su vida útil.

En el capítulo uno se evidencia el marco teórico referencial donde se identifican a través de un estudio de la literatura científica el análisis del concreto con un material compuesto y los principales factores que afectan su estructura.

En el capítulo dos señala de estudia la afectación que pueden sufrir las estructuras en relación a la ubicación en zonas de influencia de ambiente costero-marino y los principales mecanismos de daño.

En el capítulo tres se describe las acciones para establecer el diagnóstico de las edificaciones de la ciudad de Manta teniendo en cuenta los principales errores en el proceso constructivo y el análisis de la degradación de la vida útil del hormigón a través de ensayos

CAPITULO I

1. Estructuras de hormigón

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.

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 está 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.

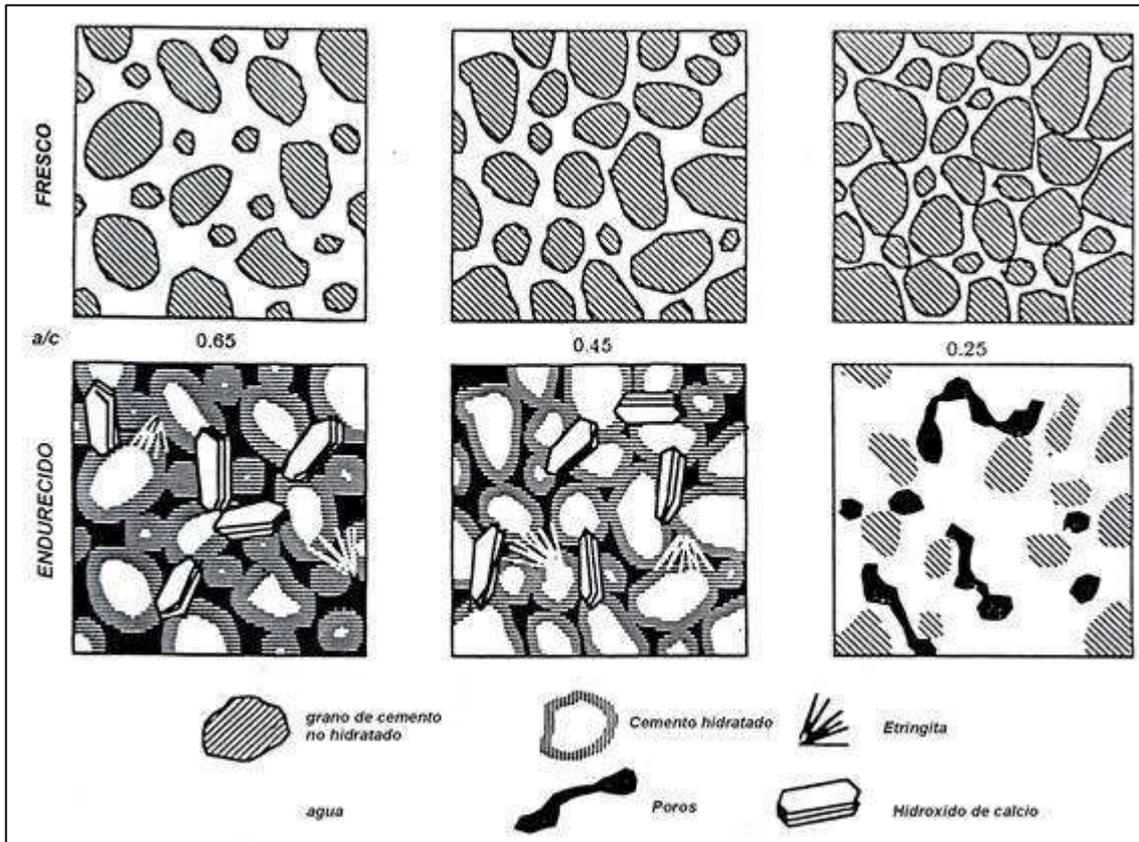


Figura 1.1. Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en máxima hidratación para varias relaciones a/c
FUENTE: Otero, 2012

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: microscopía óptica, microscopía 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
- 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.

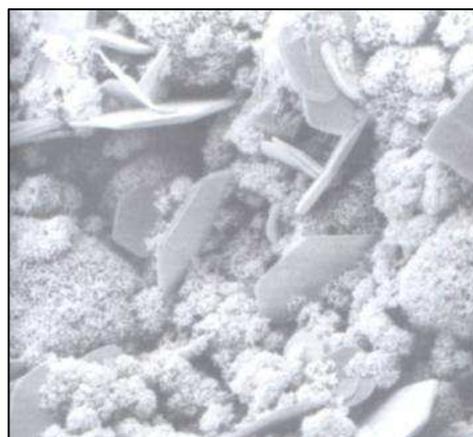


Figura 1.2. Pasta de cemento hidratada: Ca (OH)₂ y C-S-H.
FUENTE: Otero, 2012

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.

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 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.

1.6 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.

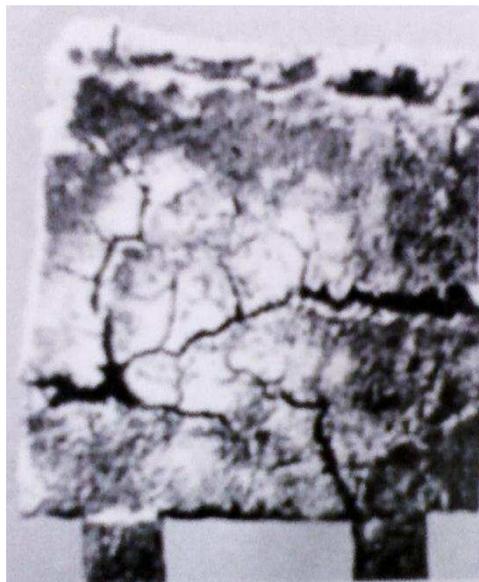


Figura 1.3. Porción de concreto reforzado afectada por el ion cloruro.
FUENTE: Otero, 2012

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.

1.7. 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.
- 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.

1.8. 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

1.9. 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 hidráulicas

1.10. Ataques físicos al concreto

1.10.1. 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.

1.10.2. 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 golpeo 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.

1.11. 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_2 , 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).

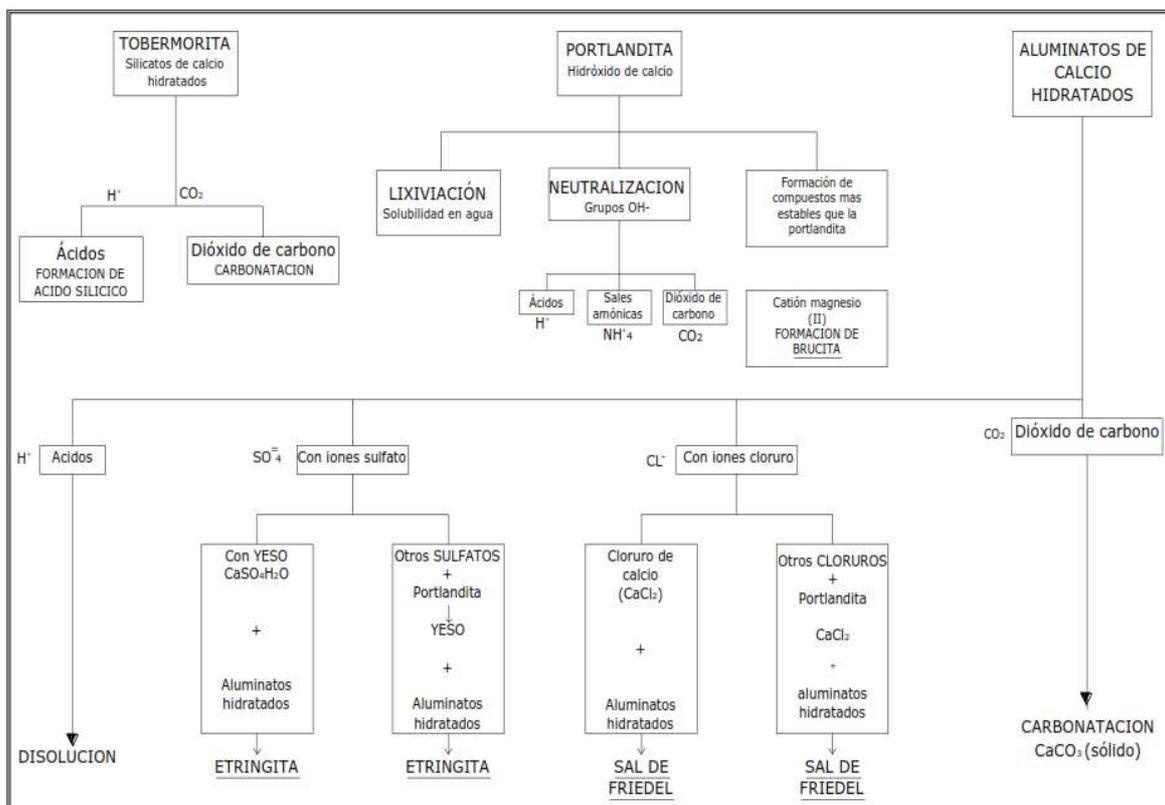


Figura 1.4 Esquema de la acción de varios agentes agresivos en disolución acuosa sobre los componentes hidratados del cemento portland.

FUENTE: El autor

1.11.1 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.

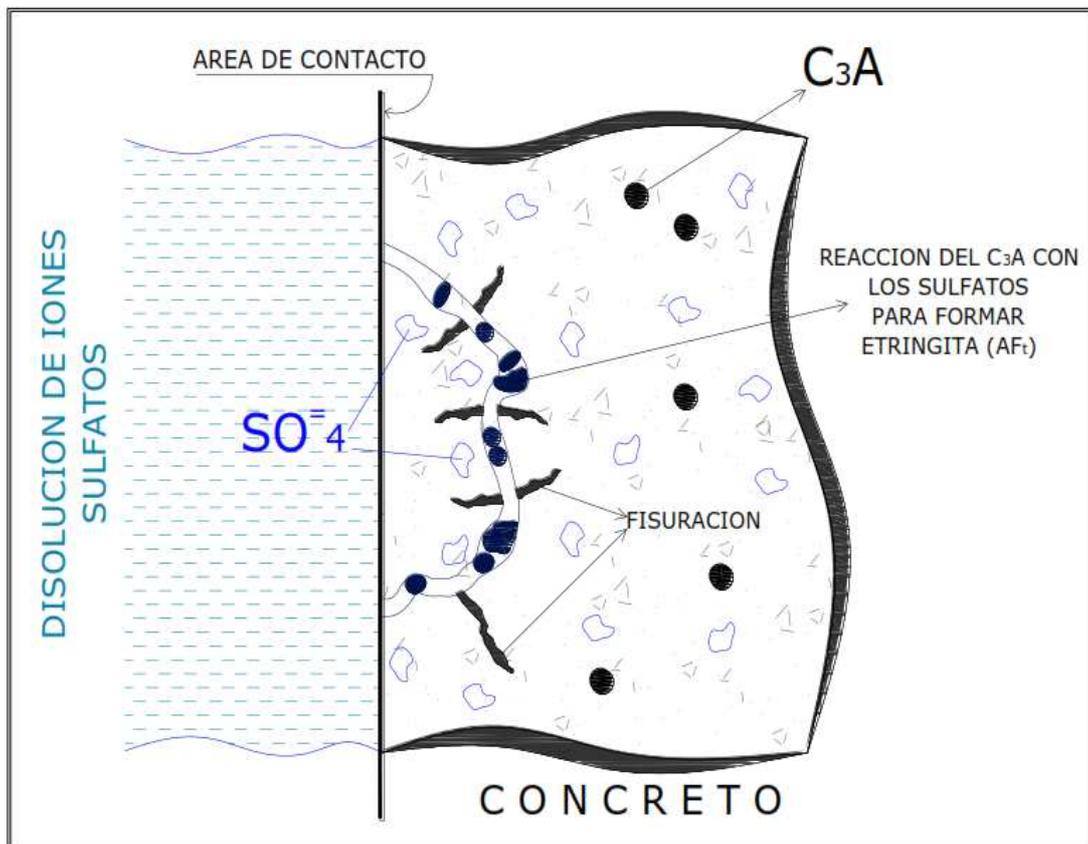


Figura 1.5. Acción de Sulfatos.
FUENTE: El autor

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

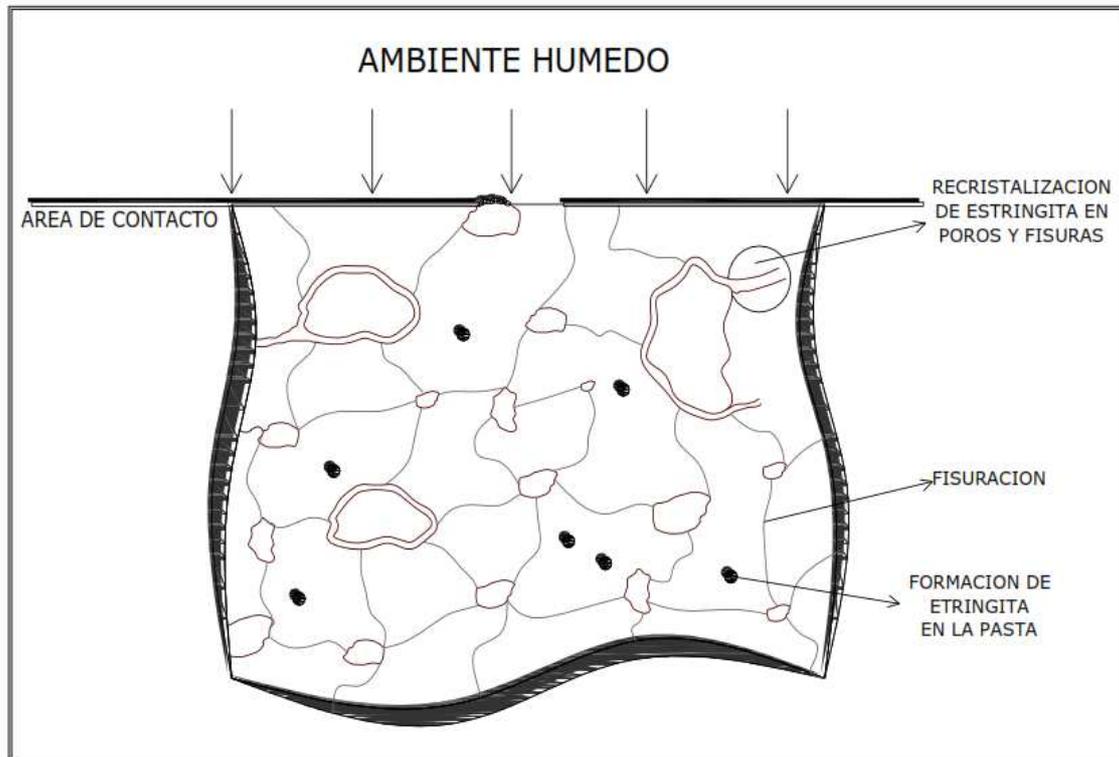


Figura 1.6. Expansión de la etringita diferida (def) en el mortero
FUENTE: El autor

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

1.11.2. 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.

1.11.3. 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 líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del concreto, y con los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida.

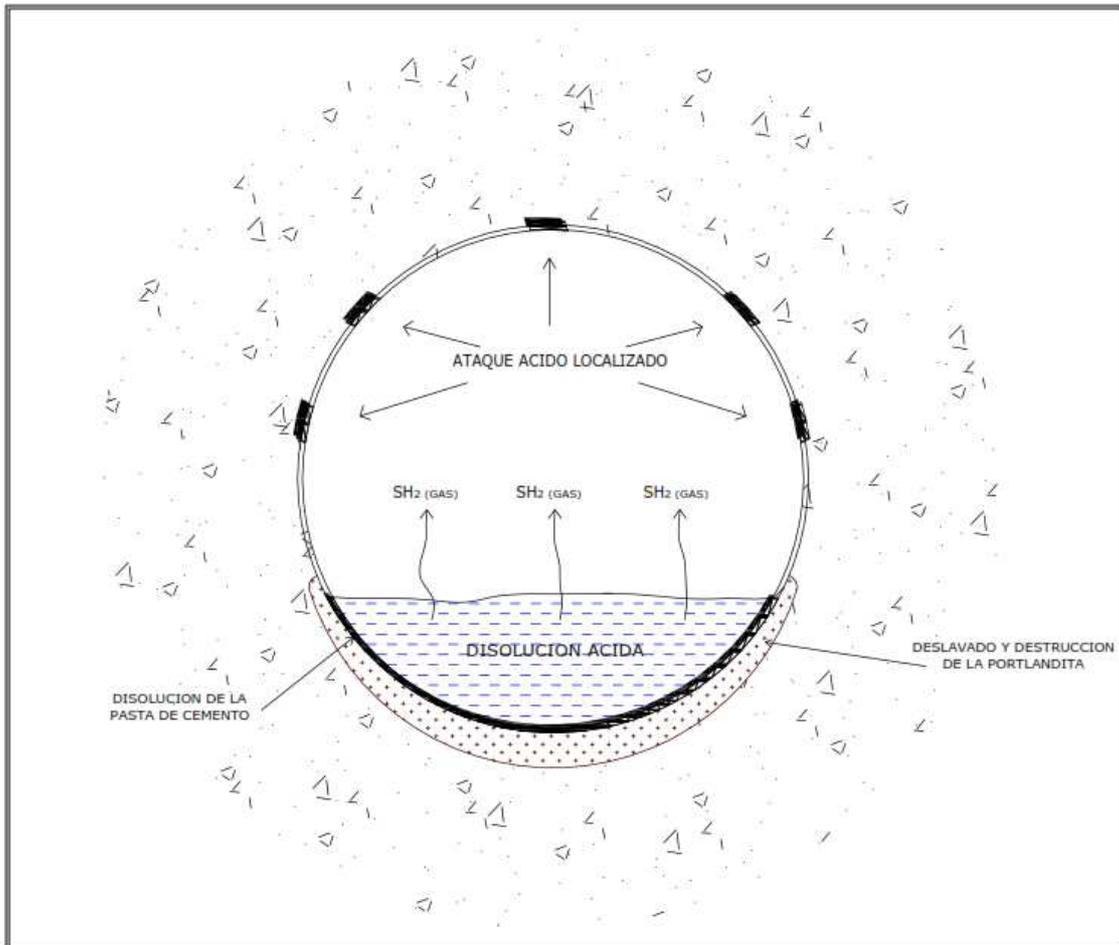


Figura 1.7. Ejemplo de ataque ácido en una tubería de concreto por una disolución ácida conteniendo sulfuros
FUENTE: El autor

Los principales responsables de este fenómeno, que se encuentran en la atmósfera, son los óxidos de azufre (6-10 mg SO_3/L en lluvia) y el dióxido de carbono (600-1000mg CO_2/m^3 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 H_2CO_3 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 él, 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 Ca(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.

1.11.4. 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 avidez 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.

1.11.5. 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.

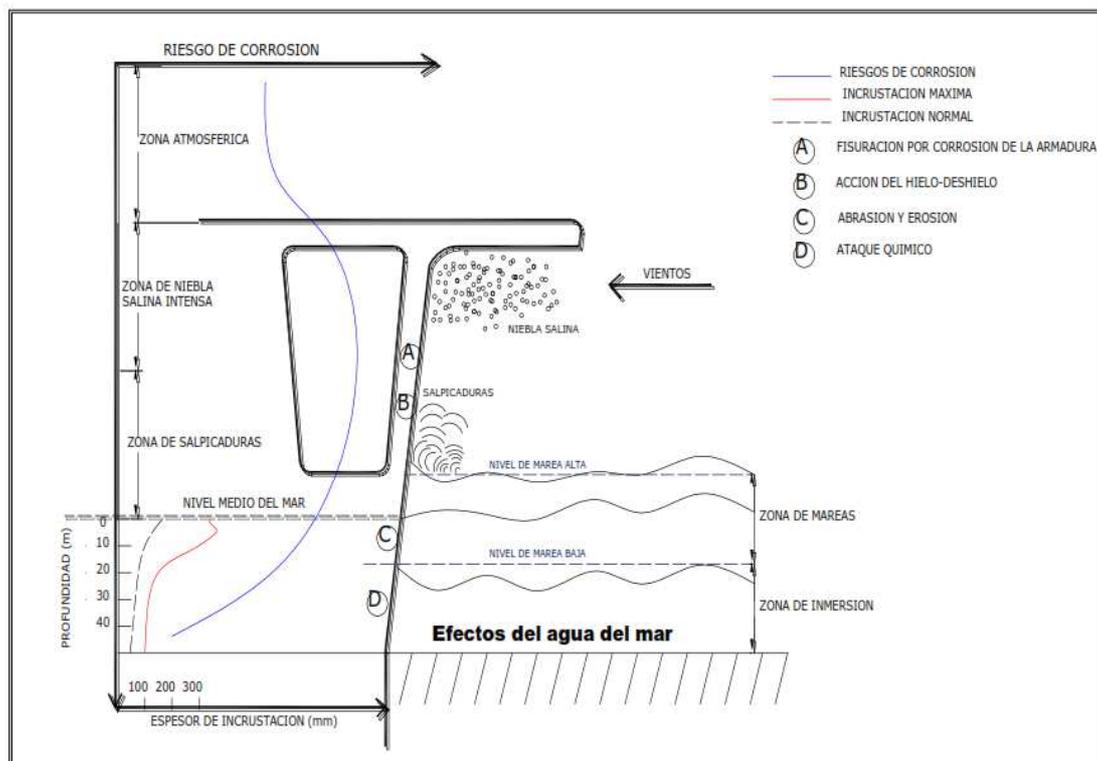


Figura 1.7. Zonas de influencia en construcciones que presentan contacto directo con la costa

FUENTE: El autor

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.

1.11.6. 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.

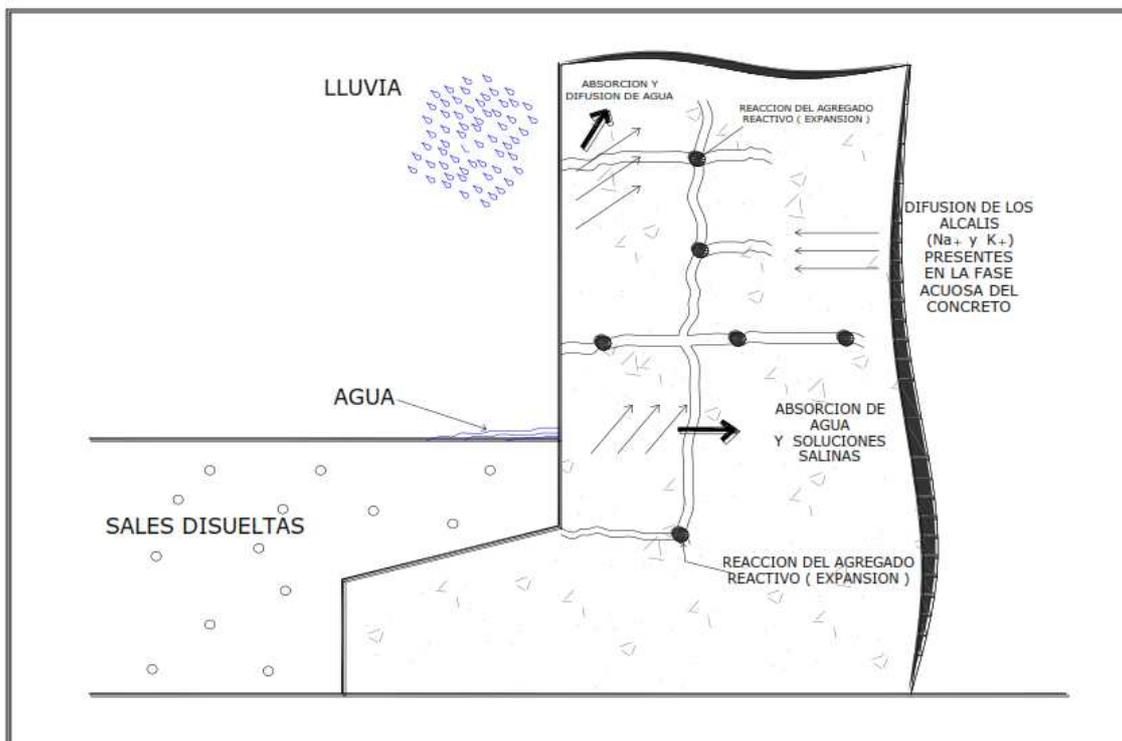


Figura 1.8. Mecanismo de la reacción álcali-agregado

FUENTE: El autor

CAPITULO II

DIAGNÓSTICO

2. El concreto

2.1. 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.



Figura 2.9. Exposición de acero de refuerzo debido a corrosión.

FUENTE: El autor

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.

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.

2.1.1. 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 estén 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

2.2. Estructura y microestructura del concreto

El concreto está compuesto de cemento, agua, agregados, aire, aditivos y eventualmente adiciones. El principal componente del concreto, es el cemento

Portland, el cual ocupa entre el 7% y el 12% del volumen de la mezcla y tiene propiedades de adherencia y de cohesión que proveen buena resistencia a la compresión. El cemento Portland es producido por el hombre y proviene de la calcinación de rocas calizas y arcillas.

El segundo componente, el agua, ocupa entre el 14 y el 20% del volumen de la mezcla e hidrata al cemento Portland, por medio de complejas reacciones químicas. La mezcla de cemento Portland y agua es llamada la pasta de cemento y sirve como lubricante de la mezcla fresca. Adicionalmente, la pasta endurecida provee resistencia mecánica y durabilidad al concreto.

El tercer componente, los agregados, ocupan entre el 59% y el 68% del volumen de la mezcla. Por lo anterior, las características y propiedades de los agregados ejercen una notable influencia en las propiedades del concreto. Son esencialmente materiales, naturales o artificiales, de forma granular, que por conveniencia práctica ha sido separados en fracciones finas (arenas) y fracciones gruesas (gravas). En general, provienen de las rocas, pero también existen agregados artificiales. Los agregados, son considerados un llenante de la mezcla, que controlan los cambios volumétricos de la pasta de cemento y que también proveen resistencia mecánica. El agregado debe estar constituido por partículas limpias, duras, resistentes y durables, que desarrollen buena adherencia con la pasta de cemento, libres de recubrimientos de arcilla y de impurezas que interfieran el desarrollo de la resistencia de cemento.

Adicionalmente, el concreto también contiene alguna cantidad de aire atrapado (usualmente entre 1% y 3% del volumen de la mezcla), lo cual se logra con el uso de aditivos o con cementos que tengan agentes inclusores de aire.

Por último con alguna frecuencia se añaden aditivos y/o adiciones a la mezcla con el objeto de modificar una o más propiedades del concreto tales como mejorar la manejabilidad en estado fresco, reducir los requerimientos de agua de mezclado, acelerar o retardar los tiempos de fraguado, incrementar resistencia, aumentar la durabilidad, o alterar otras propiedades.

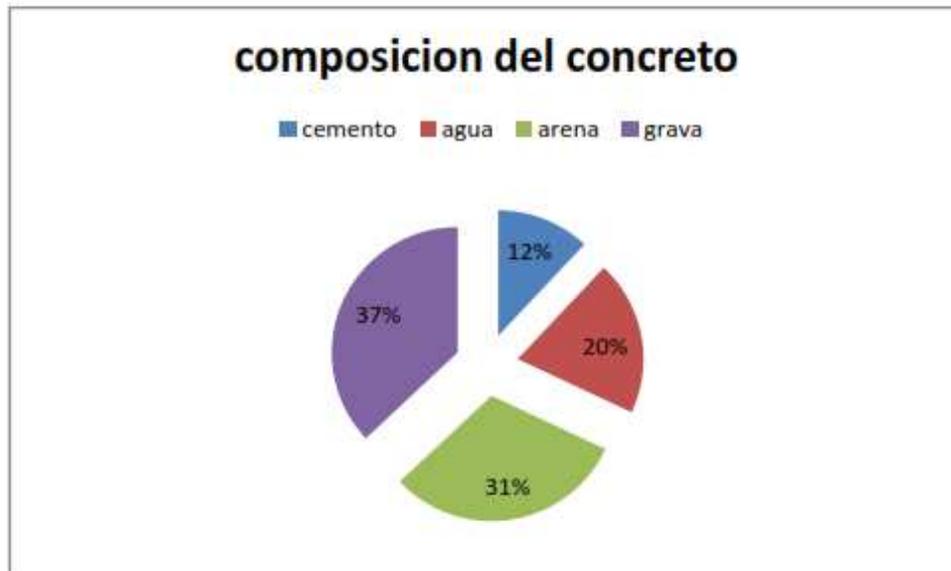


Ilustración 2.10 COMPOSICION APROXIMADA DEL CONCRETO
Fuente: El Autor

La proporción relativa de los distintos ingredientes, debe estar suficientemente compensada, de tal manera que, el concreto sea compacto (denso y sólido), homogéneo, poco poroso y resistente.

2.2.1. Compacidad del concreto.

La compacidad del concreto, hace referencia a la capacidad de acomodamiento que tienen las partículas de los ingredientes sólidos que lo componen, y está definida como la cantidad de materiales sólidos (en volumen absoluto), por unidad de volumen de concreto.

Una alta compacidad, conduce por lo tanto a un alto peso unitario del concreto, dentro de ciertos límites. La compacidad, depende en una buena medida de la calidad y cantidad de los ingredientes del concreto, lo cual afecta a su vez la solidez del material (un cemento de baja calidad y /o una cuantía baja del mismo, no garantizan una buena solidez).

Por otra parte, dada la naturaleza heterogénea del concreto (por la diversidad de sus componentes), la compacidad se puede ver afectada por el fenómeno de segregación, cuando la mezcla se encuentra en estado plástico. Por ello, la correcta distribución de todos y cada uno de los componentes, a través de su masa, es importante para mantenerlo tan homogéneo como sea posible.

Para que un concreto sea compacto, denso, sólido, homogéneo y por lo tanto resistente y durable, se requiere lo siguiente:

El uso de un cementante (cemento Portland más eventuales adiciones), de buena calidad y la aplicación de bajas relaciones agua/material cementante.

- El uso de agregados densos, poco porosos y bien gradados (compensados en su relación arena/agregado total).
- El más bajo contenido posible de agua de mezclado, lo cual se logra con el uso de aditivos reductores de agua.
- Un adecuado manejo y una correcta colocación de compactación (sin segregación) del concreto dentro de la formaleta.
- Un cuidadoso procedimiento de retiro de las formaletas.
- Una protección y un curado apropiados, después del fraguado final de la mezcla, acompañado de unas buenas prácticas de protección y puesta en servicio.

Sin embargo, aún con una alta compacidad y una buena homogeneidad, el concreto presenta en su interior una estructura relativamente porosa; y, eventualmente microfisuras o fisuras. La estructura, forma y tamaño de los poros, lo mismo que la configuración de las fisuras, dependen de muchos factores. Para entender entonces la estructura porosa del concreto, se definirán los siguientes términos.

2.3. Porosidad.

La porosidad del concreto, está definida como la cantidad de espacios vacíos que quedan inmersos dentro de la masa del material, como consecuencia de la evaporación del agua libre de la mezcla y de la presencia de aire naturalmente atrapado. Los poros del concreto, dependiendo de su tamaño, se subdividen en:

2.3.1. Poros de aire o macroporos.

Estos, corresponden a las burbujas de aire que quedan naturalmente atrapadas y/o intencionalmente incluidas (mediante un aditivo incluso de aire) en la masa de concreto. Es decir, que constituyen los llamados poros de compactación y

poros de aire ocluido (aire incluido). En general, su diámetro es mayor de 0.2 mm (200 micras) y no suelen estar interconectados.

2.3.2. Poros capilares.

Son los poros que se encuentran por fuera del gel de cemento. Su forma es variable y su tamaño oscila entre 0.00002 mm (0.02 micras) y 0.2 mm (200 micras) de diámetro. Cuando están interconectados y abiertos al exterior, son susceptibles de ser saturados y por ellos ocurre la permeabilidad del concreto a los fluidos. En general, cuando aumenta la cantidad de poros capilares, se reduce significativamente la resistencia del concreto a los ataques físicos, químicos y/o biológicos.

2.3.3. Poros de gel o microporos.

Son los poros que presenta la pasta de cemento hidratada y endurecida (poros intersticiales del gel de cemento) y su diámetro es menor de 0.00002 mm (0.02 micras). Usualmente estos poros no intercambian agua con el medio ambiente, a menos que la humedad que presenten se encuentre por debajo del 20%.

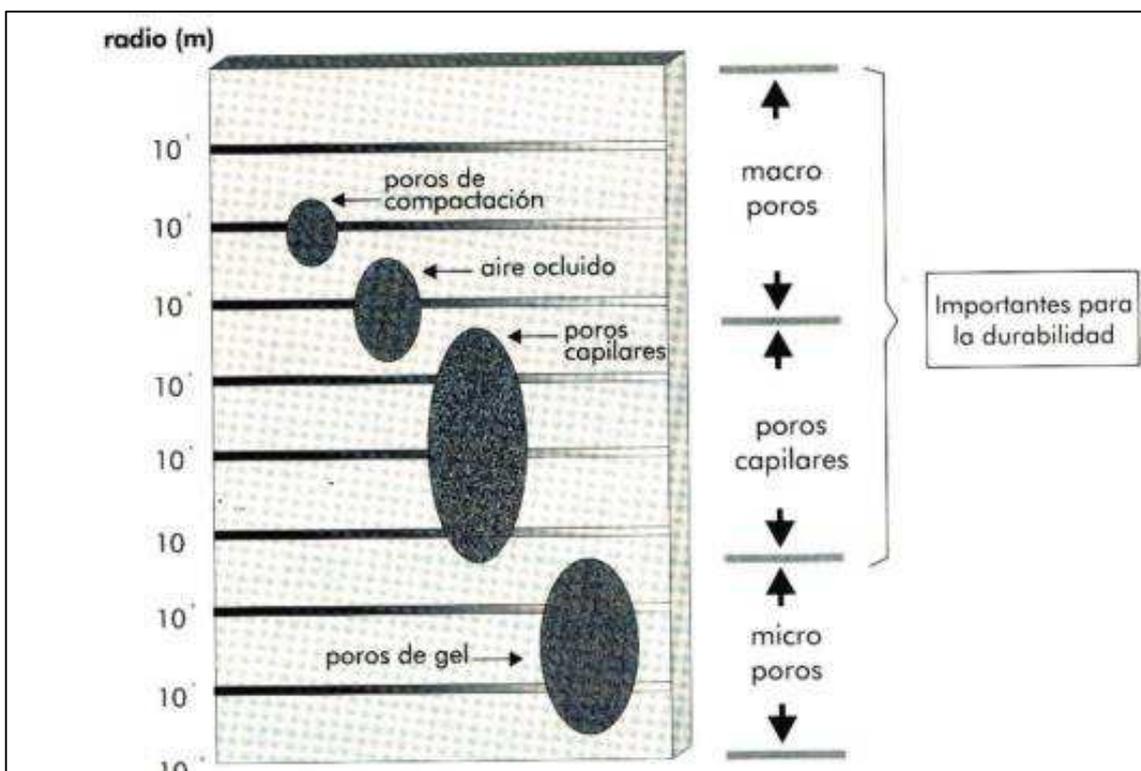


Figura 2.11 Tamaños de los poros
Fuente: Becker, 2002

De todos los poros descritos, los más importantes para la durabilidad del concreto, son los poros capilares y los macroporos.

Considerando la estructura porosa que se ha descrito, puede definirse entonces dos términos de vital importancia para la durabilidad del concreto, como son: la absorción y la porosidad fundamental o abierta.

2.4. Absorción.

La absorción del concreto, está definida como la relación que existe entre la masa de agua que penetra los poros saturables y el peso seco de la muestra penetrada por el agua.

$$A = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_s} * 100$$

Donde:

A = Absorción, en porcentaje.

P_{SSS} = Peso de la muestra saturada y superficialmente seca.

P_s = Peso seco de la muestra.

2.4.1. Porosidad fundamental o abierta.

La porosidad fundamental o porosidad abierta, está definida como la relación que hay entre el volumen de poros accesible al agua y el volumen aparente de la probeta.

$$PA = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_{SSS} - P_m} * 100$$

Donde:

PA = Porosidad abierta en porcentaje.

P_{SSS} = Peso de la muestra saturada y superficialmente seca.

P_s = Peso seco de la muestra.

P_m = Peso sumergido de la muestra.

Es decir, que la porosidad fundamental o abierta, está estrechamente relacionada con los poros y oquedades interconectadas a través de los cuales

es posible que ocurra el transporte de fluidos y/o el intercambio de sustancias disueltas.

Lo anterior, permite a su vez, estudiar dos términos que se relacionan directamente con los cambios por humedad en el concreto. Estos son, la permeabilidad y la hermeticidad.

2.4.2. Permeabilidad del concreto.

La permeabilidad del concreto, como la de cualquier material, consiste en que éste pueda ser atravesado por un fluido (líquidos, gases, iones) a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material.

Usualmente, la permeabilidad se determina por el caudal filtrado de agua, de acuerdo con la ley de Darcy (a través de un medio poroso), en la cual el flujo es laminar y permanente.

$$v = \frac{Kp * h}{x}$$

Donde:

v = Rata del flujo de agua.

h = Cabeza de la gua (presión hidráulica).

x = Espesor del espécimen.

Kp = Coeficiente de permeabilidad.

La permeabilidad del concreto al agua, depende de: la permeabilidad de la pasta de cemento (poros capilares); de la permeabilidad y granulometría de los agregados; de la proporción de pasta en relación a los agregados; y de los vacíos causados por una compactación deficiente o por los capilares del agua de exudación (macroporos). La velocidad, profundidad de penetración y efectos del fluido y/o los agentes agresivos disueltos, desde luego están regidos por la forma y estructura de los poros y por el microclima que rodea la superficie del concreto.

En general, la permeabilidad de la pasta depende de la relación agua/material cementante, del grado de hidratación del cemento y de la edad, como se puede apreciar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Efecto de la edad de una pasta de cemento sobre el coeficiente de permeabilidad para una rotación agua/material cementante de 0.51

EDAD (días)	Kp/m/s	OBSERVACIONES
Pasta fresca	10^{-5}	Independiente de a/c
1	10^{-8}	Poros capilares interconectados
3	10^{-9}	
7	10^{-11}	
14	10^{-12}	
28	10^{-13}	
100	10^{-16}	Poros capilares discontinuos

FUENTE: MINDES, SIDNEY; YOUNG FRANCIS J. CONCRETE.

Según Mindess y Young. Un concreto de baja permeabilidad no sólo requiere de una baja relación agua/material cementante, sino también de un adecuado periodo de hidratación del cemento, la red de poros se va cerrando como consecuencia del bloque de los mismos por la formación de C-S-H. Es decir, que con el curado húmedo continuo se va disminuyendo el valor de Kp hasta llegar a una completa discontinuidad de los poros capilares, pero en función de la relación agua/material cementante. Ver tabla 2.2

Tabla 2.2 Tiempo de curado requerido para producir un sistema discontinuo de poros capilares en el concreto, asumiendo un curado húmedo continuo.

RELACION Agua/material cementante	TIEMPO DE CURADO (días)
0,40	3
0,45	7
0,50	28
0,60	180
0,70	365
> 0,70	No es posible

FUENTE: MINDES, SIDNEY; YOUNG FRANCIS J. CONCRETE.

En esta tabla además se observa que en concretos cuya relación agua/material cementante sea mayor de 0.70 la completa discontinuidad de los poros capilares nunca puede ser alcanzada, aun con un curado húmedo continuo; y por lo tanto, el coeficiente de permeabilidad K_p de un concreto maduro de buena calidad es de aproximadamente 1×10^{-13} m/s. En casos extremos cuando la porosidad capilar ha sido eliminada, el valor de K_p puede llegar hasta valores de 1×10^{-22} m/s.

2.4.3. Hermeticidad.

La hermeticidad, se refiere a la capacidad del concreto de refrenar el agua sin escapes visibles.

Al igual que con la permeabilidad, las bajas relaciones agua/material cementante, reducen la segregación y la exudación, contribuyendo a la hermeticidad del concreto. La inclusión de aire, también ayuda a la hermeticidad. Para ser hermético, desde luego el concreto también debe tener una alta compacidad y estar libre de fisuras y vacíos.

2.5. Interacción entre los poros y el medio ambiente.

Para que se desarrollen procesos de deterioro de carácter físico, químico o biológico, tanto en el concreto como en las armaduras de acero, debe darse una interacción entre los materiales de la estructura y el medio ambiente circundante. En ello, intervienen: la **permeabilidad** del concreto a los fluidos (gases o líquidos), a través de los macroporos, los poros capilares y las fisuras; y el **microclima** (condiciones de humedad, de temperatura, de presión y la presencia de agentes agresivos), que rodea a la superficie del concreto.

El alcance de la penetración, la velocidad y el efecto del transporte de agentes agresivos dentro del concreto, depende principalmente de: la estructura de los poros y fisuras dentro del concreto; de la presencia de humedad; y, de los mecanismos de transporte. Del mismo modo, la velocidad y magnitud de las reacciones que se puedan presentar entre los agentes agresivos y el concreto, depende a su vez de: el tipo y la concentración de las sustancias agresivas; la composición química del cemento y las propiedades químicas y mineralógicas de los agregados; de la temperatura y presión; de la humedad relativa efectiva;

y, de la naturaleza y distribución de los poros y fisuras. (Ver figura 2.12).

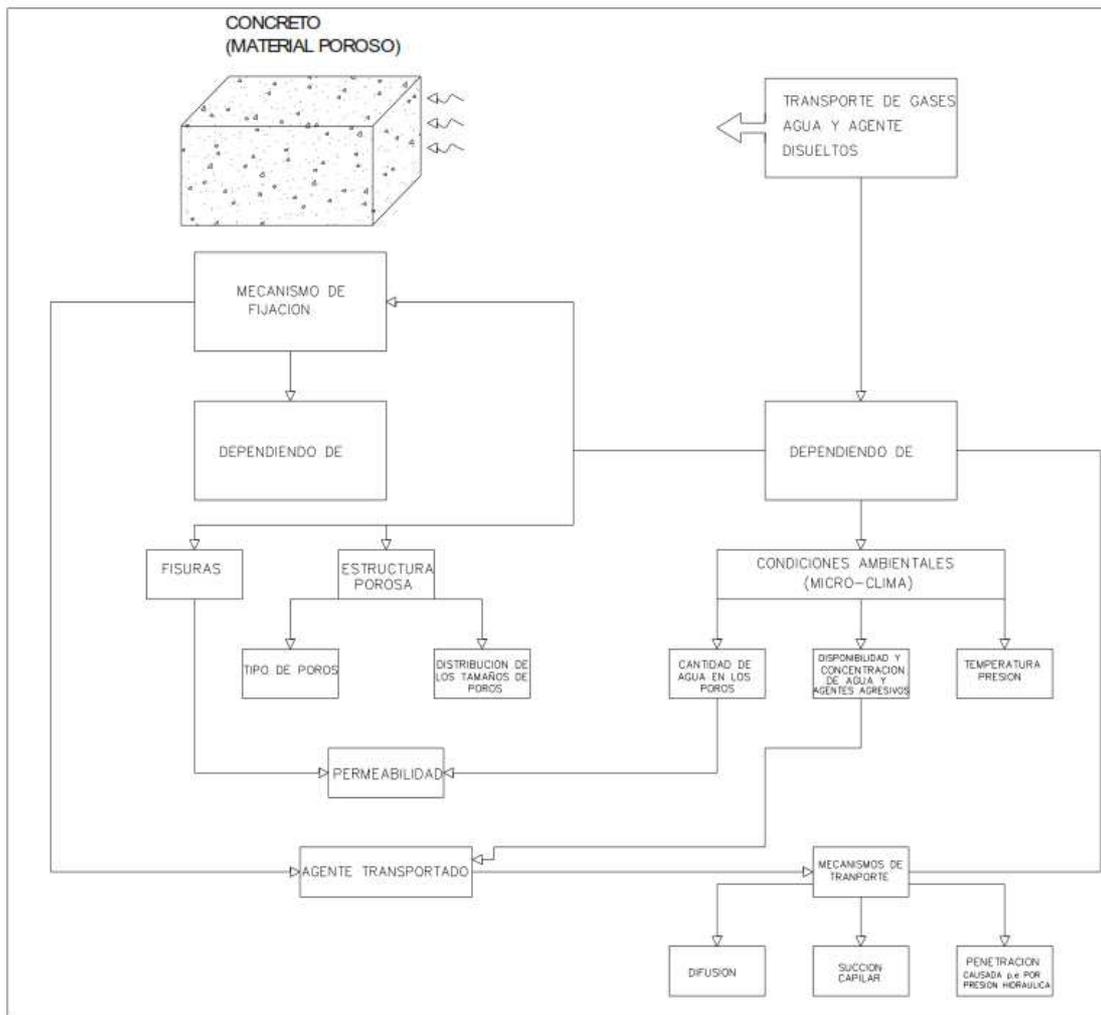


Figura 2.12 Proceso de transporte en el concreto
FUENTE: Comisión IV, grupo español de hormigón, durabilidad de estructuras de hormigón.

2.5.1. Interacción entre los poros y el agua.

Para estudiar los mecanismos de transporte a través del concreto y comprender la interacción entre los poros del concreto y el agua, es necesario definir tres términos de vital importancia. Ellos son: la adsorción; la condensación capilar; y, la difusión.

Adsorción.

La superficie libre de cualquier sólido, generalmente tiene un exceso de energía debido a la falta de enlaces con las moléculas cercanas. En los poros de la pasta de cemento, esta energía superficial tiende a compensarse adsorbiendo moléculas de vapor de agua sobre dichas superficies y el espesor de la capa de

agua que se forma depende del grado de humedad en el interior de los poros (ver figura 2.13). El término adsorción se refiere a la adherencia de moléculas a una superficie; y no es lo mismo que absorción, que se refiere a la incorporación de moléculas en el interior de otra sustancia o masa (como por ejemplo, cuando una esponja absorbe agua).

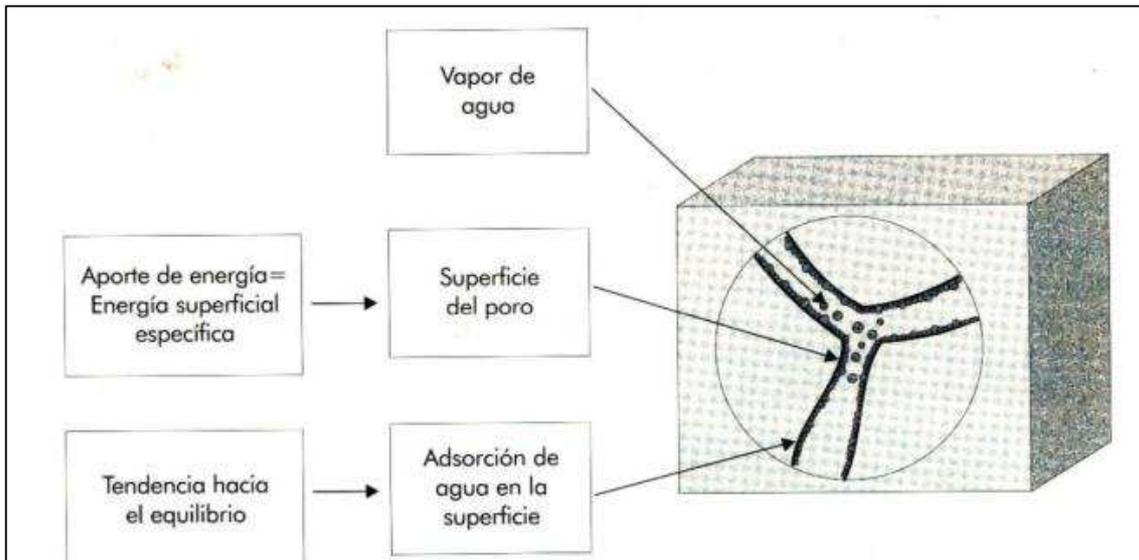


Figura 2.13 Esquema del fenómeno de fijación del agua por adsorción en los poros del concreto
FUENTE: Comisión IV, grupo español de hormigón, durabilidad de estructuras de hormigón.

2.5.2. Condensación capilar.

Como la relación que existe entre el área superficial y el volumen de los poros se incrementa en la medida en que los poros son más pequeños, el agua adsorbida también se incrementará en relación con la cantidad de poros, hasta un cierto y determinado diámetro de los poros para el cual estos se encontrarán totalmente llenos de agua. Este proceso es lo que se le denomina *condensación capilar*. (Ver figura 2.14).



Figura 2.14 Esquema del fenómeno de fijación del agua por condensación capilar en los poros del concreto
FUENTE: Comisión IV, grupo español de hormigón, durabilidad de estructuras de hormigón

2.5.3. Difusión.

La difusión está definida como la dispersión de una sustancia dentro de un espacio o dentro de una segunda sustancia; por ejemplo, cuando las moléculas de un perfume se difunden dentro de una habitación; o cuando un líquido se dispersa dentro de otro.

Si la humedad relativa efectiva de un concreto es baja y hay presencia de gases, estos se difunden fácil y rápidamente por los poros del concreto. Pero, en la medida en que se da el proceso de condensación capilar, que produce el llenado de agua de los poros, se reduce el espacio disponible para la difusión de gases; y como consecuencia de ellos, la permeabilidad del concreto a los gases (p.e difusión de CO₂, O₂, etc.) se disminuye considerablemente.

2.6. Mecanismos de transporte.

Para que operen los mecanismos de transporte entre el concreto y el microclima que rodea su superficie, se pueden presentar tres situaciones: transporte en aire húmedo (por difusión); transporte por agua lluvia o salpicaduras de agua (por succión capilar); transporte por inmersión (por presión hidrostática).

2.6.1. Transporte en el aire húmedo.

Los procesos de transporte de gases, agua o sustancias disueltas en el agua, son procesos de difusión que se dan en función de la humedad relativa del aire.

Estos procesos de difusión, son inducidos por una tendencia al equilibrio cuando hay un gradiente de concentraciones.

Por ejemplo, la difusión del oxígeno avanza a través del concreto a medida que este es consumido durante la corrosión del acero de refuerzo, lo cual causa una diferencia de concentraciones de O₂ dentro de los poros del concreto. Del mismo modo, el dióxido de carbono se difunde en el concreto, en la medida en que se da una reacción química entre el CO₂ y la cal libre que hay en las paredes de los poros, reduciendo a su vez la concentración de CO₂.

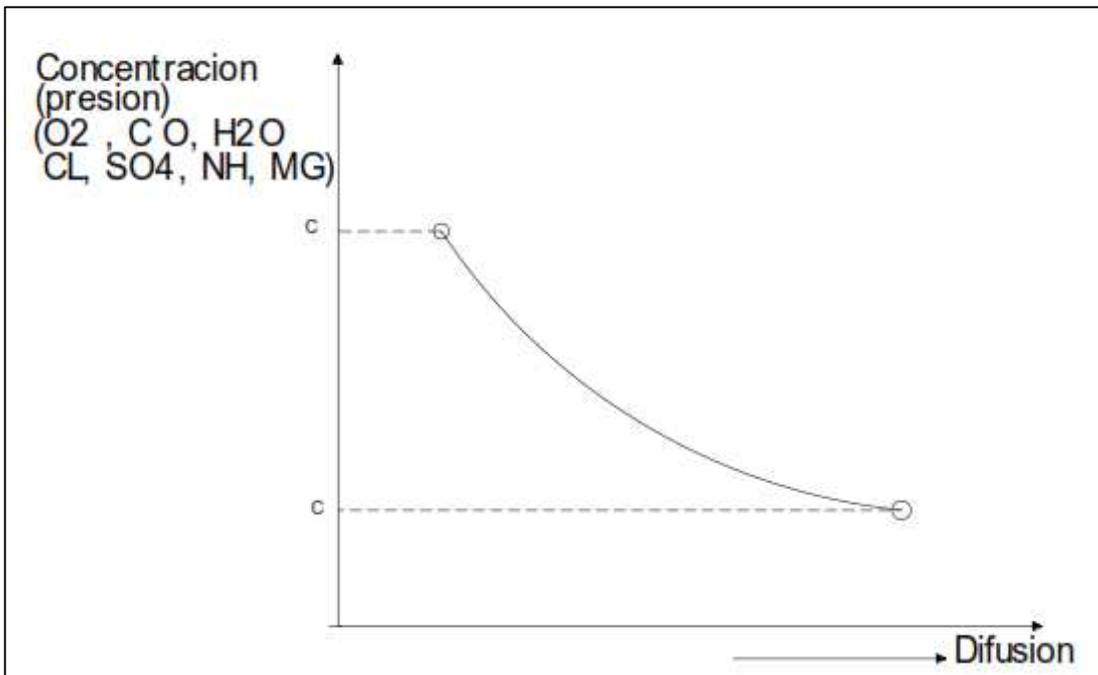


Figura 2.15. Relación entre la concentración a presión de las Moléculas de un gas y su difusión
FUENTE: Comisión IV, grupo español de hormigón, durabilidad de estructuras de hormigón.

La difusión del agua o el vapor de agua, ocurren cuando se producen cambios en la humedad del ambiente o cuando el concreto se seca, es decir cuando hay un diferencial de concentración.

Para el caso de las eventuales sustancias disueltas en el agua (carbonatos, cloruros, sulfatos, amonio, magnesio, etc.), su difusión se realiza a través de la capa de agua que recubre las paredes de los poros (agua de adsorción), o a través de los poros llenos de agua por condensación capilar. Desde luego, en la medida en que es menor el espesor de la capa de agua de adsorción a la cantidad de agua que llena los poros, la velocidad de difusión de las sustancias disueltas es menor.

Lo anterior significa, que la fuente de poder para que se dé este mecanismo de transporte (difusión) a través del concreto, es la diferencia de concentraciones que puedan tener el agua, o el gas presente en los poros del concreto.

2.6.2. Transporte por agua lluvia o salpicaduras de agua.

Cuando la superficie del concreto se moja como consecuencia de la lluvia o de la salpicadura de agua, la saturación del material ocurre muy rápidamente porque el agua se absorbe por succión y por difusión capilar (ver figura 2.7), y posteriormente se adsorbe por adherencia de moléculas de vapor sobre la superficie de los poros. En este caso, las sustancias disueltas en el agua son transportadas por la misma agua y la difusión de gases queda prácticamente bloqueada por la condición de saturación de los poros del concreto.

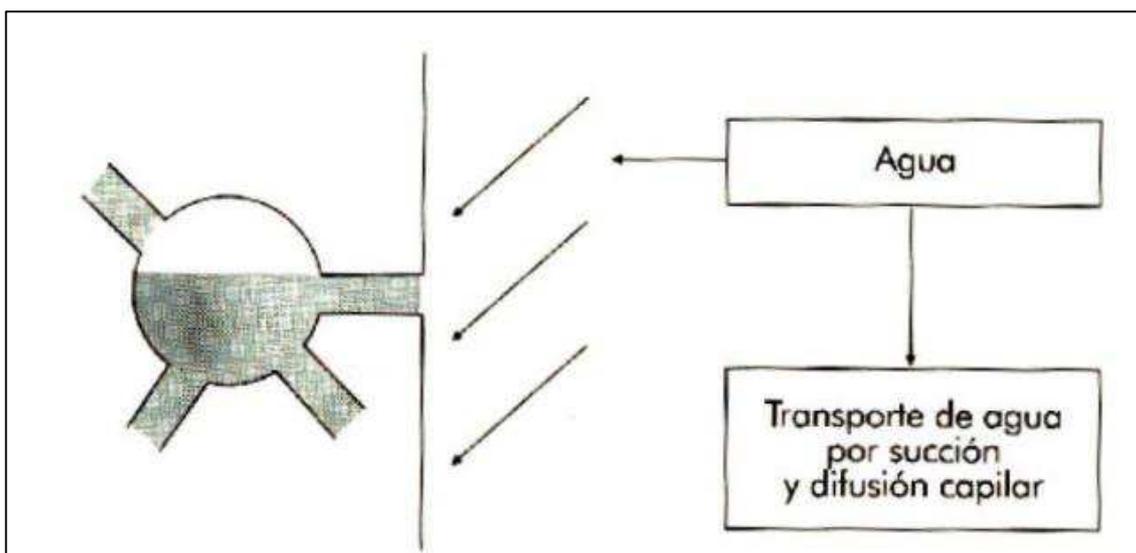


Figura 2.16. Esquema del fenómeno de absorción de agua lluvia en los poros superficiales del concreto.
FUENTE: Comisión IV, grupo español de hormigón, durabilidad de estructuras de hormigón.

El efecto de la succión capilar depende de la energía superficial de los poros del concreto y por ello, la tendencia a **adsorber** agua por parte de estas superficies crea una succión capilar, siempre que haya agua disponible. En poros verticales, la altura de la columna de agua dentro del poro, es regulada por un equilibrio entre las fuerzas de adsorción de la superficie de los poros y el peso de dicha columna de agua (ver figura 2.16). Para el caso de succión capilar en dirección horizontal, la profundidad de penetración depende del exceso de agua en la superficie del concreto y del a duración de esa situación, es decir si hay inmersión o no y cuánto dura.

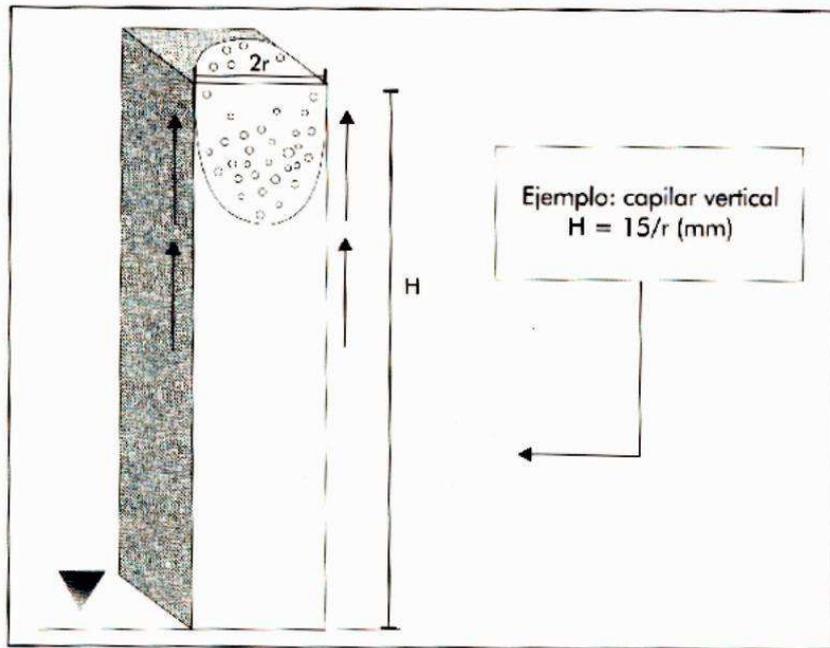


Figura 2.17. Esquema del fenómeno de absorción de succión capilar en los en los poros del concreto causada por energía superficial.
FUENTE: Columnio, 2012

Por lo anteriormente expuesto, el concreto *absorbe* agua del medio ambiente, a través de succión capilar, a una velocidad considerablemente mayor de lo que se pierde por evaporación; y en consecuencia, la humedad relativa efectiva (al interior del concreto) tiende a ser superior a la humedad relativa del ambiente que lo rodea (microclima), lo cual se puede apreciar en la figura 2.18

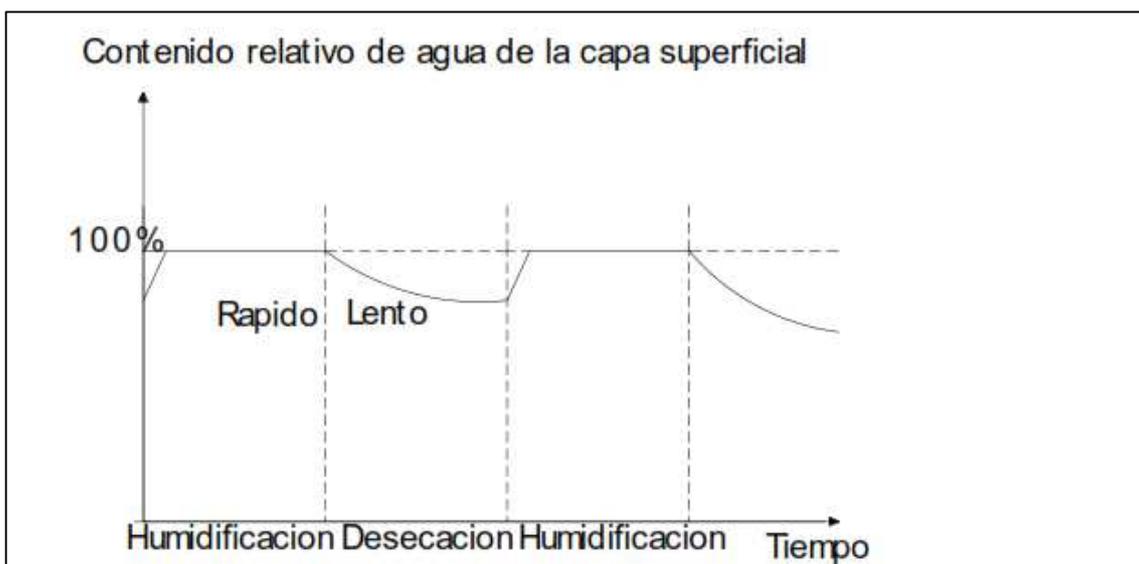


Figura 2.18. Esquema de los ciclos de humedecimiento y secado del concreto en función del tiempo.
FUENTE: Columnio, 2012

2.6.3. Transporte por inmersión.

Para estructuras sumergidas permanentemente en agua, la penetración de agua se da por succión capilar, la cual muy probablemente es acentuada por penetración inducida como consecuencia del aumento de la presión hidráulica.

Un transporte continuo de agua a través del concreto, ocurre solamente cuando el agua se puede evaporar de las superficies del concreto que están expuestas al aire. La intensidad de este transporte depende de la relación que se establezca entre la tasa de evaporación, la tasa de succión capilar, y la presencia y continuidad de la presión hidráulica.

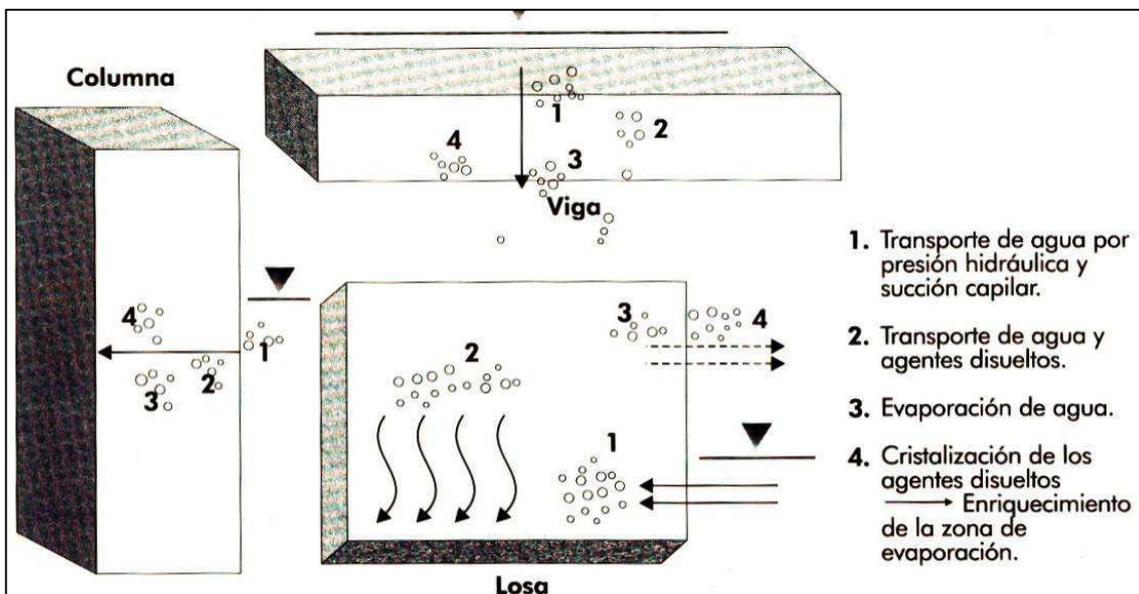


Figura 2.19. Ilustración de los mecanismos de transporte del agua en el concreto sumergido..
FUENTE: Columnio, 2012

Para estos casos, las eventuales sustancias disueltas y transportadas en el agua, tienden a depositarse en considerables concentraciones en aquellas zonas del concreto donde se produce la evaporación. Por ello, a veces aparecen eflorescencias y manchas en la superficie del concreto.



Figura 2.20. Detalle de eflorescencias en zonas de humedecimiento y secado continuo del concreto
FUENTE: El autor

De otra parte, los agentes agresores pueden cristalizarse y re-cristalizarse causando esfuerzos de tracción (por expansión dentro de los poros cercanos a la superficie del concreto), lo cual a su vez, puede fracturarlo, si el concreto es pobre o está carbonatado. Además, la cristalización de estos agentes usualmente genera depósitos de sales que pueden intensificar el ataque químico al concreto por su alta concentración.

2.7. Mecanismos de daño

Tomando un modelo del equilibrio como el de la figura 2.11, se observa un conjunto de acciones en relación con una capacidad de servicio que afectan la durabilidad del concreto y pueden aclarar muchos conceptos sobre los mecanismos de falla de una estructura de concreto.

2.7.1. Acciones físicas.

Las acciones físicas se refieren esencialmente a los cambios volumétricos que experimenta el concreto, como consecuencia de cambios de humedad (agua líquida, vapor de agua, escarcha), y/o de temperatura (frio, calor, fuego). Pero también, las acciones físicas hacen referencia las variaciones en su masa (cambios de peso unitario, porosidad, y permeabilidad).

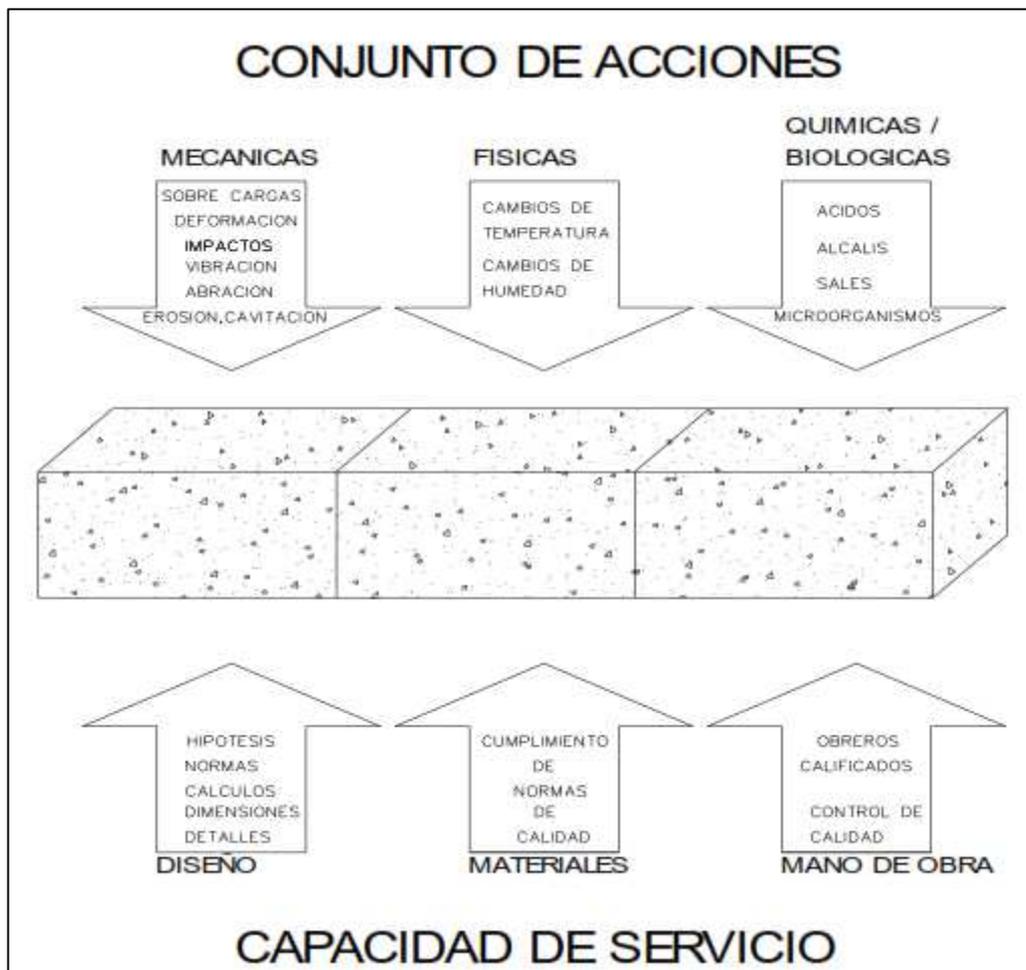


Figura 2.21. Modelo de equilibrio de durabilidad del concreto
FUENTE: El autor

2.7.2. Acciones mecánica.

Dentro de los factores de deterioro imputables a las acciones mecánicas están la deformación lenta (fluencia); las sobrecargas y deformaciones impuestas (fisuras estructurales; deflexiones y movimientos excesivos, imprevistos o fortuitos; y, las fracturas y los aplastamientos); las vibraciones excesivas; y los daños por abrasión (frotamiento, rozamiento), que están relacionados con el uso que se da a la estructura.

2.7.3. Acciones químicas.

Como factores de deterioro que se asignan a las acciones químicas están, al ataque de ácidos, la carbonatación, la formación de sales expansivas (ataque de sulfatos), y la expansión destructiva de las reacciones álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo. Estos mecanismos de daño.

2.7.4. Acciones biológicas.

Como consecuencia de la biorreceptividad que ofrecen las superficies de concreto y de mortero, aparentemente por la disminución del pH sobre sus mismas superficies se dan las condiciones para la colonización, establecimiento y desarrollo de microorganismos de origen animal o de origen vegetal, que también afectan la durabilidad del concreto.

2.8. Generalidades de la patología del concreto.

Desde la invención de los hornos rotatorios y los molinos de cuerpo moledores, al comienzo del siglo XX, que permitieron producir cemento portland en cantidades industriales y hubo un desmesurado desarrollo de las estructuras de concreto reforzado, siempre se consideró que el concreto hidráulico era un material prácticamente imperecedero por su solidez, su dureza, su alta resistencia mecánica (específicamente), e incombustibilidad.

Con el transcurso de los años, hubo importantes desarrollos tecnológicos en la química de los cementos; la calidad y el comportamiento de los agregados naturales y artificiales; las características del agua de mezclado y de curado; el uso de aditivos y adiciones; las técnicas de producción, manejo y colocación del concreto; las prácticas de protección y curado; y, el desarrollo de muchas clases especiales de concretos, que desde luego han contribuido a ratificar esa condición de material duradero.

Sin embargo, el concreto en su misma condición de piedra artificial, al igual que las rocas naturales, también puede sufrir modificaciones en su solidez estructura, si existen agente (internos o externos) que con el paso del tiempo lo puedan deteriorar como nos lo ha demostrado la corta experiencia de estos últimos 100 años de vida que tiene la *Tecnología Moderna del Concreto*.

Por ello, hacia la década de los años 60, en todo el mundo se empezó a poner especial cuidado a la conservación y reparación de toda suerte de estructuras de concreto reforzado, dando origen al entendimiento de los mecanismos de

daño y al estudio formal de la **patología del concreto** pero sobre todo a la prevención de fallas

2.8.1. Definición y alcance de la patología del concreto.

La patología del concreto, puede definirse entonces como el estudio sistemático de los procesos y características de las *enfermedades* o los *defectos* y daños que puede sufrir el concreto, sus causas, sus consecuencias y sus remedios. El alcance de la patología del concreto, se puede visualizar en el esquema de la figura 2.12.

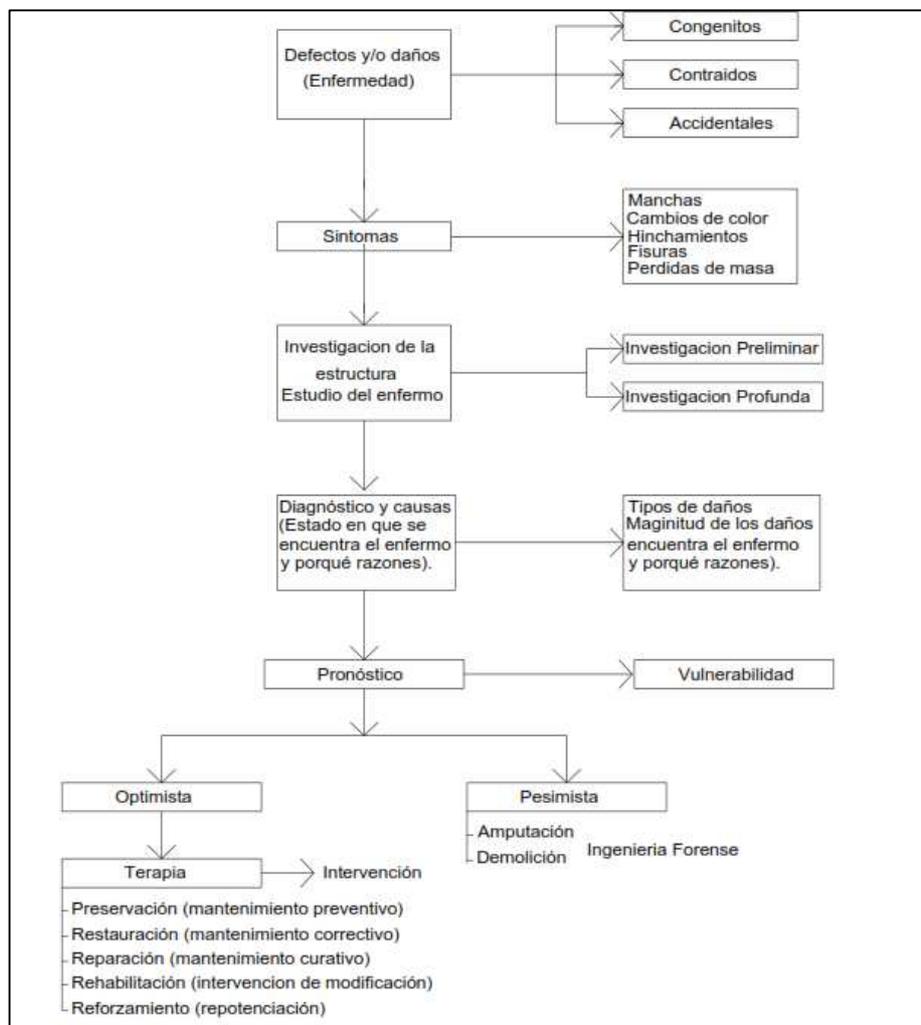


Figura 2.22. Modelo de equilibrio de durabilidad del concreto
FUENTE: El autor

Al igual que los seres vivos, el concreto puede sufrir enfermedades y lesiones (defectos o daños), que alteran su estructura interna y su comportamiento. Algunas de ellas pueden ser congénitas, es decir, que estuvieron presentes

desde su concepción y/o construcción; otras pueden haberse contraído durante alguna etapa de su vida útil; y otras pueden ser consecuencia de accidentes.

Según el modelo presentado, las enfermedades se manifiestan mediante unos síntomas que están representados por fenómenos que exhibe el concreto, tales como: manchas, cambios de color, hinchamientos, fisuras, pérdidas de masa, u otros



Figura 2.23. Síntomas superficiales de daños en estructura de concreto
FUENTE: El autor

Por ello, se adelanta una investigación de la estructura (estudio del enfermo), que incluye una investigación preliminar y una investigación profunda (que serán tratadas con suficiente detalla en capítulo siguiente); las cuales comprenden un conocimiento previo, antecedentes o historial (sobre aspectos como las cargas de diseño, el microclima que rodea la estructura, el diseño, la vida útil, el proceso constructivo, las condiciones actuales, y el uso, cronología de daños entre otras); una inspección visual (condiciones de la estructura); una *auscultación* de los elementos afectados (mediante mediciones de campo y pruebas no destructivas); una exploración (remociones y sondeos); una evaluación o análisis estructural (chequeo de la capacidad estructural y determinación de la resistencia residual de la estructura mediante métodos empíricos, métodos analíticos o pruebas de carga); y, una extracción, ensayo y análisis de muestras (ensayos de evaluación física, mecánica, química, biológica y/o microscópica,

que permiten establecer mecanismos de daño). Es decir que hay una **patología clínica** que se encarga del estudio de la enfermedad y una **patología experimental** que se encarga de realizar pruebas en el laboratorio y/o en el campo.

Según el mismo modelo, posteriormente, se correlacionan los antecedentes; las inspecciones, mediciones, auscultamientos y exploraciones, realizados a los elementos afectados de la estructura; y, los resultados de los ensayos físicos, mecánicos, químicos, biológicos y petrográficos(no disponible hasta este momento en El Salvador) obtenidos de las muestras extraídas, para establecer y diagnosticar apropiadamente, el tipo, la magnitud y la cantidad, de los diferentes daños en los elementos y estructuras evaluadas, con sus más probables causas de ocurrencia.

Con base en el diagnóstico (estado en que se encuentra el enfermo), se evalúa la condición de servicio y se genera un pronóstico sobre el comportamiento futuro de los elementos afectados y de la estructura en general. Según Fernández Cánovas, este pronóstico puede ser optimista o pesimista. En el pronóstico optimista, se puede aplicar una terapia apropiada (intervención) para lograr alguna de las siguientes acciones y condiciones, recomendadas por el comité ACI 364. 1R:

a) Preservación: proceso de mantener una estructura en su condición presente y contrarrestar posteriores deterioros.

b) Restauración: Proceso de restablecer los materiales, la forma o la apariencia que tenía una estructura en una época determinada.

c) Reparación: proceso de reemplazar o corregir materiales, componentes o elementos de una estructura, los cuales se encuentran deteriorados, dañados o defectuosos.

d) Rehabilitación: proceso de reparar o modificar una estructura hasta llevarla a una condición deseada (intervención de modificación).

e) Reforzamiento: Proceso mediante el cual se incrementa la capacidad de una estructura o de una parte de ella, para resistir cargas.

En el pronóstico pesimista, es posible que la estructura tenga que sufrir amputaciones o la propia demolición. En estos casos, se está dando origen a la *ingeniería Forense*; es decir, aquella rama de la ingeniería que se encarga del estudio de los restos de los elementos o la estructura afectada (p.e. estudios de estructuras deterioradas colapsadas por sobrecargas, sismos, fuego, explosiones, u otras).

2.8.2. Fenómenos de envejecimiento y deterioro.

Del mismo modo que los seres vivos, puede decirse que las estructuras de concreto experimentan unas fases en el tiempo que son asimilables a: la concepción (planeación y diseño); el nacimiento, la infancia, la adolescencia, la juventud (construcción); la madurez (operación o uso); la senectud (deterioro por senilidad o vejez); la agonía (degradación o fatiga del material); y finalmente, la muerte (colapso de la estructura). En todas estas etapas, aun después del colapso, el concreto experimenta fenómenos de envejecimiento y de deterioro.

2.8.3. Factores que afectan la apariencia.

Como se vio en el anterior, el microclima que rodea la superficie del concreto tiene un alto impacto en su durabilidad y comportamiento; y entre los factores que influyen en la apariencia y el aspecto estético están los que se indican en la figura 2.14. La polución, está en el medio ambiente; los cultivos biológicos se sitúan sobre la superficie y las eflorescencias proceden del interior de la masa de concreto.

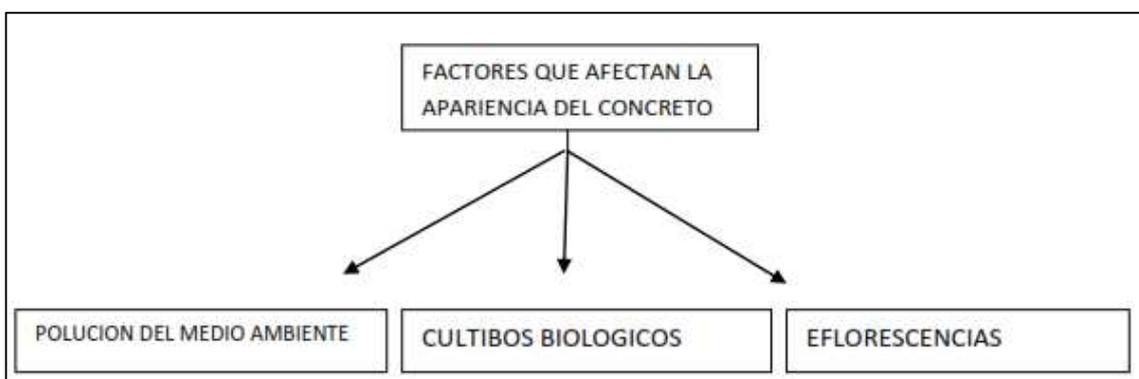


Figura 2.24. Factores que afectan la apariencia original del contrato
FUENTE: El autor

2.8.4. Polución del medio ambiente

Esta contaminación intensa y dañina del aire, compuesta por residuos de procesos industriales o biológicos, en forma de partículas, es transportada y depositada por el viento sobre las superficies de concreto de las estructuras y puede subdividirse en:

- Polvo fino (partículas desde 0.01 hasta 1 micra), que está en suspensión en el aire, y se adhiere fácilmente a las superficies microrugosas y rugosas, y tienen una gran capacidad de cubrir debido a la elevación relación superficie/volumen de sus partículas.
- Polvo grueso (partículas desde 1 micra hasta 1 mm), que es principalmente de origen mineral y tienen una baja capacidad para cubrir superficies. Este polvo usualmente se adhiere a las superficies que permanecen húmedas durante largos periodos de tiempo.

Dependiendo de la velocidad del viento (que aumenta con la altura) y del flujo (laminar o turbulento), la acumulación de polvo sobre las superficies de una estructura varía. Por ejemplo, en una fachada alta, la velocidad del viento puede ser tan grande que no hay lugar a que se formen depósitos de polvo, e inclusive haya más bien remoción del polvo existente sobre la superficie; en las fachadas intermedias, donde hay turbulencia, la formación de depósitos se acelera; y en las partes bajas, donde hay mayor concentración de polvo, se intensifica la magnitud de los depósitos. (Ver figura 2.15).

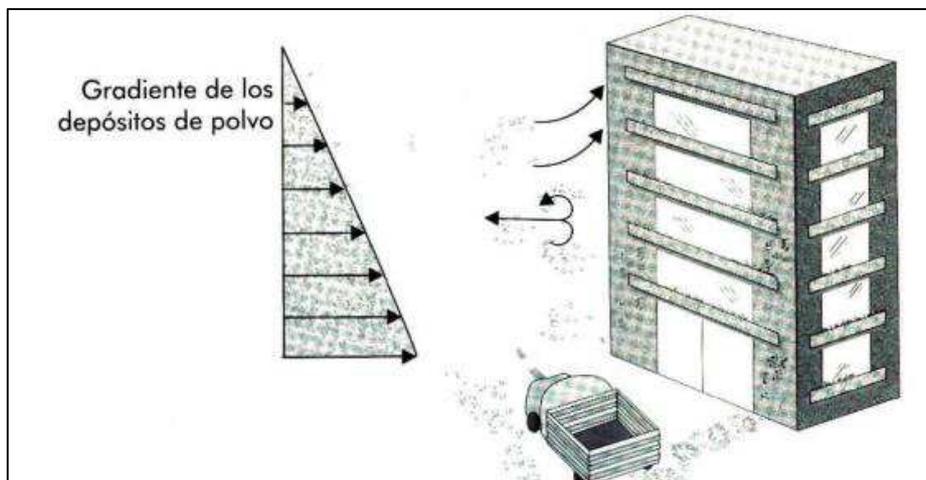


Figura 2.25. Formación de depósitos sobre una fachada de concreto
FUENTE: Calavera, 1996

De otra parte, debido a la dirección del viento, cuando llueve se producen ráfagas que inclinan la caída del agua sobre las superficies y generan lavado y limpieza diferencial de las capas de polvo que puedan existir. El escurrimiento del agua, barre la capa de polvo y en algunos casos la redeposita en lugares donde la textura del concreto y la geometría del mismo facilitan la formación de depósitos de polvo.

Adicionalmente, si el concreto tienen una alta porosidad y por lo tanto una baja hermeticidad, este puede ser penetrado por el agua según el modelo presentado en la figura 2.16 para superficies verticales.

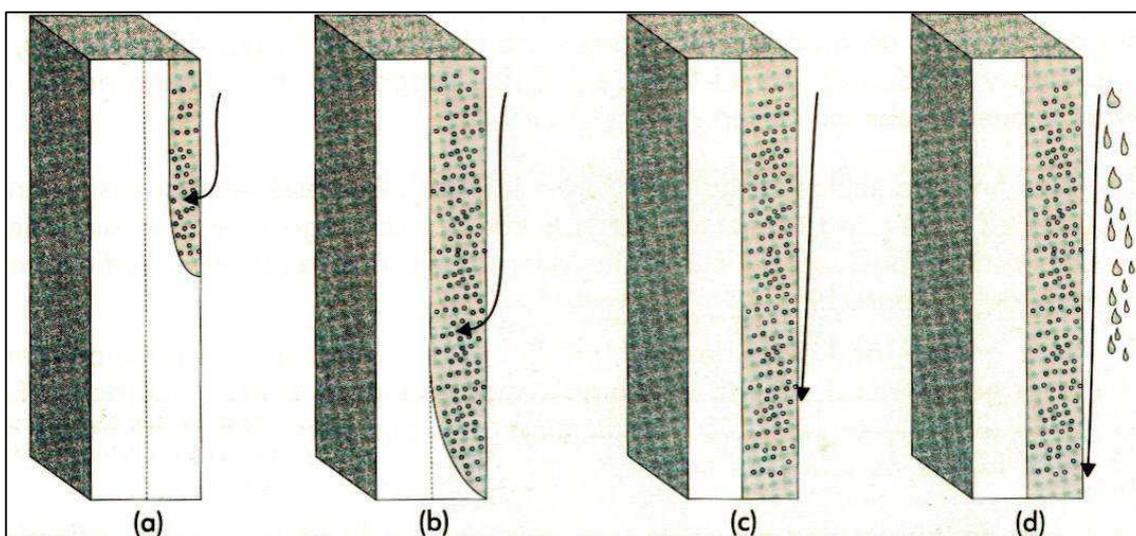


Figura 2.26. Modelo de recubrimiento y absorción de agua sobre una superficie vertical de concreto
FUENTE: Calabera, 1996

2.9. Superficie vertical de concreto

En este modelo, en la figura (a) se inicia la absorción del agua en los poros superficiales del concreto; en (b), se inicia el escurrimiento de agua sobre la porción de la superficie ya saturada; en (c), ya se ha saturado totalmente la capa superficial y se inicia el lavado de la superficie; y en (d), el exceso de agua escurre libremente.



Figura 2.27. Fachada afectada en su apariencia por escurrimiento diferencial del agua lluvia sobre su superficie.

FUENTE: El autor

2.9.1. Cultivos biológicos

Como consecuencia de la biorreceptividad que ofrecen las superficies de concreto (sobre todo si estas tienen textura rugosa), a la proliferación de microorganismos, se afecta el aspecto del concreto, no sólo por las manchas y cambios de color; sino también, porque su principal efecto desfavorable es que mantienen húmeda la superficie del concreto, lo cual promueve los mecanismos de deterioro y los mecanismos de daño.



Figura 2.28. Fachada afectada en su apariencia por presencia de cultivos biológicos de origen vegetal.

FUENTE: El autor

2.9.2. Eflorescencias

El término eflorescencia se emplea para describir depósitos que se forman algunas veces sobre la superficie de los concretos, los morteros u otros materiales de construcción. Usualmente, los depósitos eflorescentes están compuestos de sales de calcio (principalmente de carbonatos y sulfatos) o de metales alcalinos (sodio y potasio), o de una combinación de ambos. Los depósitos eflorescentes pueden ser clasificados de acuerdo con la solubilidad de las sustancias químicas en el agua.

El carbonato de calcio, que se produce como consecuencia del fenómeno de carbonatación, tiene una solubilidad en el agua extremadamente baja; y por ello, cuando se deposita es probable que tienda a permanecer. Por lo anterior, la eflorescencia debida al carbonato de calcio insoluble está considerada como el decolorante más serio del concreto.

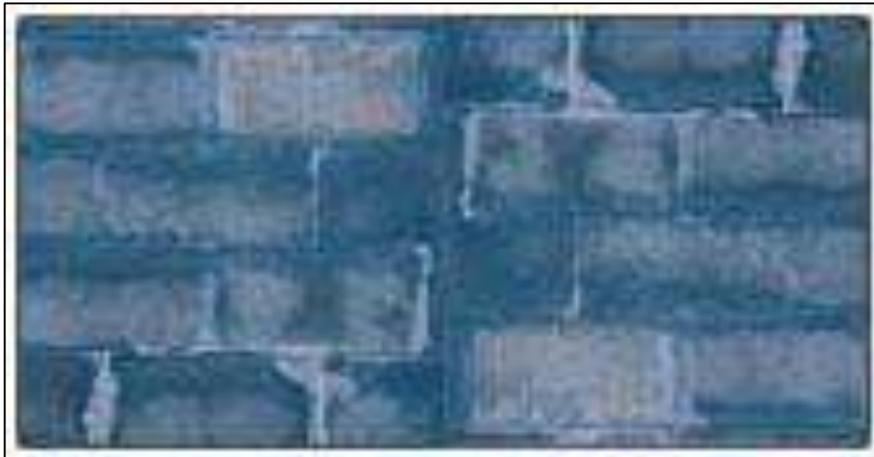


Figura 2.29. Eflorescencia
FUENTE: El autor

El sulfato de calcio, es ligeramente soluble en agua, pero, puesto que reacciona especialmente para formar compuestos insolubles que normalmente permanecen en el concreto, rara vez es un componente principal de los depósitos eflorescentes.

Las sales metálicas alcalinas son mucho más solubles que las sales de calcio y constituyen un problema menor, ya que o no permanecen durante mucho tiempo o pueden removerse con relativa facilidad.

El riesgo de eflorescencia se reduce por medio del curado en aire húmedo y se incrementa por el curado en aire seco. Varias investigaciones coinciden en que un curado de uno o dos días de 80 a 95% de humedad relativa y 20°C de temperatura, son suficientes para dar buena protección contra la formación de florescencias. Si se usa menos del 65% de humedad relativa, el tiempo de curado necesario deberá hacerse durante varias semanas.

2.10. Mecanismos de deterioro

Entre los mecanismos de deterioro que sufre el concreto, los cuales lo degradan o destruyen, por acción independiente o combinada de los mecanismos de daño por acciones físicas, mecánicas, químicas o biológicas, se encuentran las siguientes.

2.10.1. Meteorización

Alteración física, mecanizada o química sufrida por el concreto bajo la acción de la intemperie (sol, viento, lluvia, u otros). Este fenómeno, desde luego está muy influenciado por los cambios en la temperatura, la humedad y la presión (viento del medio ambiente; pero también, especialmente por la polución del mismo medio ambiente que es un factor de continuo crecimiento en los centros urbanos.



Figura 2.30. Concreto meteorizado en su capa superficial
FUENTE: El autor

2.10.2. Decoloración y manchado

Acción y efecto de quitar o amortiguar el color de una superficie de concreto, como consecuencia de la meteorización, la presencia de eflorescencias, los ciclos de asoleamiento, los ciclos de humedecimiento y secado, la acumulación de polvo, el lavado por la lluvia y/o el escurrimiento de agua.



Figura 2.31. Concreto manchado en la superficie
FUENTE: El autor

2.10.3. Expansión

La expansión de la masa de concreto se puede presentar como consecuencia de reacciones que forman nuevos productos que aumentan de volumen, como son: el ataque de sulfatos a la pasta de cemento hidratada y endurecida; o, las reacciones álcali-agregado que se dan entre los compuestos alcalinos del concreto y ciertos agregados reactivos. Estos dos fenómenos, son estudiados más adelante.

Los síntomas básicos de la expansión por ataque de sulfatos, son microfisuras y fisuras aleatorias en la masa de concreto afectada, descascaramiento, ablandamiento de la masa, pérdida de resistencia y de rigidez. En este caso, también se observa una reducción del pH del estrato acuoso de los poros superficiales, con riesgo de Despasivación de la capa de recubrimiento del acero de refuerzo.



Figura 2.32. Aspecto de un concreto deteriorado por e expansión debido a ataques de sulfatos.

FUENTE: El autor

Los síntomas básicos de la expansión por la reacción álcali-agregado, son una expansión generalizada de la masa de concreto con fracturas superficiales, profundas y aleatorias para estructuras masivas; y fracturas ordenadas para elementos delgados.

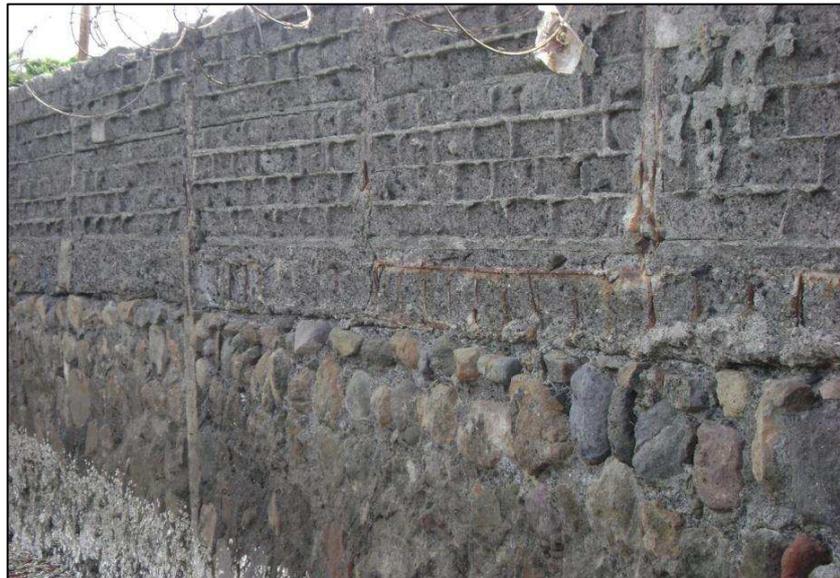


Figura 2.33. Aspecto de un concreto deteriorado por expansión.

FUENTE: El autor

2.10.4. Despasivación del acero de refuerzo

El recubrimiento de concreto que se hace sobre el acero de refuerzo de una estructura de concreto es conocido como la capa protectora o pasivadora que protege al acero de la acción agresiva de ciertas sustancias o elementos que pueden ocasionar deterioro o corrosión del acero de refuerzo. Cuando esta capa pasivadora que debe ser densa, compacta y de espesor suficiente, pierde su capacidad de protección, se dice que se ha despasivado.



Figura 2.34. Corrosión del acero de refuerzo por despasivación del Recubrimiento.
FUENTE: El autor

La despasivación del recubrimiento del concreto se puede dar por el fenómeno de carbonatación, de la capa de recubrimiento, que permite el acceso de agua, oxígeno u otras sustancias que pueden reaccionar con el acero de refuerzo.

La despasivación del recubrimiento del concreto también se pueden dar por la penetración de iones cloruro a través de procesos de difusión, impregnación o absorción capilar de agua con cloruros, que al acceder al acero de refuerzo fomentan el fenómeno de corrosión del mismo.

2.11. Fallas de las estructuras de concreto

Muchos son los investigadores que en los últimos años se han ocupado del tema de la patología del concreto y aunque la normativa al respecto es pobre; las fallas que ocurren en estructuras de concreto se pueden clasificar dentro de las siguientes categorías:

2.11.1 Fallas durante la concepción y diseño del proyecto

Como se ha visto en los apartados anteriores, la planeación y el diseño de una estructura no sólo debe basarse en su función, sino también en las condiciones ambientales y en la vida estimada de servicio. Para ello, es indispensable que los profesionales que intervienen en la fase de diseño del proyecto, sean consecuentes no solo en aplicar métodos de cálculo altamente desarrollados; sino también, en considerar los aspectos tecnológicos que aporta la Ingeniería de Materiales.

Debido al desmesurado avance que han tenido los métodos de cálculo de estructuras, que consideran diversas hipótesis de carga, normas, cálculos, dimensiones y detalles, y tienden a optimizar los recursos disponibles en un proyecto de construcción, hoy en día hay una mayor inclinación hacia construir estructuras más estables y algunas veces con factores de seguridad más bajos (que no ponen en riesgo la capacidad estructural, pero si pueden afectar la durabilidad).

Pero fallas por concepción y diseño de una estructura pueden darse por muchas razones, entre ellas:

- Por ausencia de cálculos o por no valorar todas las cargas y condiciones de servicio.
- Por falta de un diseño arquitectónico apropiado. El diseño estructural debe incluir los conceptos arquitectónicos y viceversa.
- Por falta de drenajes apropiados (eliminar el agua es eliminar el problema). El desagüe sobre el concreto hay que evitarlo; lo mismo que la presencia de agua estancada. del mismo modo, deben reducirse las salpicaduras y los ciclos de humedecimiento y secado.

- Por no proyectar juntas de contracción, de dilatación o de construcción.

Hay que entender que el diseño y construcción de estructuras de concreto implica la presencia de fisuras y grietas, que deben ser controladas mediante la disposición del llamado *acero de retracción y temperatura* y/o de juntas.

- Por no calcular de manera apropiada todos los esfuerzos y/o confiarse en los programas de computador.

- Por no dimensionar apropiadamente los elementos estructurales y/o no disponer apropiadamente del refuerzo.

- Por imprecisiones en los métodos de cálculo o en las normas.

- Por no especificar la resistencia y características apropiadas de los materiales que se emplean (concretos y aceros).

- Por tolerar deformaciones excesivas en el cálculo.

- Por falta de detalles constructivos en los planos.

2.11.2. Fallas por materiales

Los materiales también han experimentado cambios significativos y su selección debe estar basada en una calidad, una capacidad, unas experiencias y una formulación. Por ejemplo, hoy existe una gran variedad de cementos cuyas propiedades y características permiten diferentes usos y aplicaciones (por ello, es importante elegir el cemento apropiado por razones de durabilidad); el agua no sólo debe cumplir con los requisitos de calidad; sino que debe ser mesuradamente dosificada; los agregados deben tener granulometría continua y baja relación de vacíos, de lo contrario las mezclas tendrán alta tendencia a la desegregación; el uso de aditivos debe ser racional y adecuado a las necesidades (sin excesos y sin exigir condiciones de riesgo para la estabilidad y durabilidad del concreto); las adiciones, deben usarse cuando hay lugar a ello y con conocimiento de causa.

Es indispensable romper con la costumbre de utilizar *recetas únicas* dosificadas por volumen en relación al diseño de mezclas. La dosificación de los ingredientes debe hacerse por peso, con corrección de la humedad en los agregados, y con

ajuste al agua de mezclado por absorción o aporte del agua libre de los mismos agregados. Como fallas más usuales por materiales, se pueden distinguir las siguientes:

- Por selección inapropiada y/o falta de control de calidad de los ingredientes de la mezcla.
- Por no diseñar y/o dosificar inadecuadamente la mezcla.
- Por no respetar las tolerancias permisibles en el asentamiento de la mezcla.
- Por utilizar agregados de tamaño equivocado.
- Por utilizar exceso de aire incluido.
- Por adicionar agua a pie de obra, sin control.
- Por no disponer de un factor de seguridad apropiado en el diseño de la mezcla.
- Por no usar la curva de relación agua/material cementante de los materiales disponibles.
- Por utilizar poco cemento (mezclas pobres y porosas), o por emplear exceso de cemento (mezclas ricas con alta concentración y fisuración).
- Por usar mezclas pastosas (con exceso de mortero) o piedrudas (con excesos de agregado grueso). Este tipo de mezclas tienen alta tendencia a la segregación y a la exudación.
- Por retardos excesivos en el fraguado. El retraso en el fraguado de un concreto, puede traer como consecuencia la formación de fisuras por asentamiento y/o concentración plástica; pero además, puede afectar a la adherencia mecánica entre el acero de refuerzo y el mismo concreto.
- Por la presencia del fenómeno de falso fraguado, que tiende a inducir un incremento en el agua de mezclado con la consecuente alteración de la relación agua/material cementante.
- Por fraguados acelerados que generan estructuras de pega pobres y por lo tanto bajas resistencias mecánicas.

- Por bajas resistencias en el concreto, lo cual conduce a fatigas prematuras o detrimento de la durabilidad.
- Por no hacer control de calidad al concreto, con lo cual se desconoce su capacidad y su comportamiento.
- Por acero de refuerzo de calidad inapropiado o por insuficiencia en los anclajes y/o longitudes de desarrollo (ACI 318-05) Sobre este aspecto, por ejemplo, debe recordarse que el ASTM A616-76 estipula la corrugación del acero.

2.11.3. Fallas por construcción

Una estructura fácil de construir, es una estructura que tienen mayores probabilidades de estar bien construida, y por lo tanto de ser más duradera.

Además, hay que tener presente que cualquier estructura se comportará entre las sollicitaciones que se le hagan, según como haya quedado construida; y por ello, los procesos constructivos deben reflejar lo más fielmente posible (dentro de las tolerancias permisibles, los planos y las especificaciones dadas en las fases de planeación y diseño del proyecto.

Hoy en día existen muchos sistemas de construcción de estructuras de concreto reforzado, que en muchos casos demandan una metodología y unos cuidados específicos. Es decir, que debe haber una experiencia previa, unos cuidados y unas calificaciones de la mano de obra, un control de calidad y unas precauciones que permiten obtener la calidad especificada. Sin embargo, las fallas más comunes por los aspectos constructivos se dan por las siguientes causas.

- Por no calcular y diseñar la formaleta.
- Por defectos o deformación de la formaleta.
- Por no respetar las tolerancias dimensionales permisibles en los elementos. Por ejemplo, cambiar las dimensiones de los elementos, lo cual altera su geometría, su inercia y de paso su comportamiento, porque se alteran su centro geométrico y su centro de masa.

- Por no inspeccionar la formaleta antes del vaciado, para verificar su integridad y estabilidad.
- Por no colocar apropiadamente ni asegurar el acero de refuerzo, permitiendo el desplazamiento durante el vaciado.
- Por no respetar la separación de barras y el recubrimiento de norma, mediante el uso de separadores adecuados.
- Por no inspeccionar el acero de refuerzo antes del vaciado, para verificar el cumplimiento de los planos y especificaciones.
- Por utilizar malos procedimientos de izaje y montaje de elementos prefabricados, con lo cual se inducen deformaciones no previstas, impactos, u otras condiciones que alteran sus propiedades.
- Por inadecuada interpretación de los planos.
- Por malas prácticas de manejo, colocación y compactación del concreto.
- Por labores de descimbrado prematuro o inapropiado.
- Por indisposición de juntas apropiadas de contracción, dilatación y/o construcción.
- Por no adelantar procedimientos adecuados de protección y curado del concreto.
- Por precargar la estructura antes de que el concreto tenga suficiente capacidad resistente.
- Por picar o abrir huecos en la estructura para soportar o conectar instalaciones anexas a la estructura.

2.11.4. Fallas por operación de las estructuras

El comportamiento real de una estructura y su seguridad bajo las cargas y condiciones previstas de servicio se fundamente en un buen diseño, el uso de los materiales indicados, y la calidad de la construcción.

De acuerdo con el concepto de *vida útil de servicio* presentando anteriormente, existe un periodo de tiempo para el cual la estructura se considera vigente hasta que se cumpla un cierto y determinado nivel aceptable de deterioro, bajo las condiciones de uso.

Sin embargo, en la práctica la vida útil de servicio, puede acabar antes del tiempo previsto por *abuso* de la estructura (incremento de las cargas permitidas, o acción de fenómenos accidentales como impactos, explosiones, inundaciones, fuego u otras); o por *cambio de uso* (cambio de las cargas de servicio y/o cambio de las condiciones de exposición).

Sin embargo hay que reconocer que las condiciones de servicio y el envejecimiento y deterioro de los materiales como el concreto, en la realidad, son impredecibles.

2.11.5. Fallas por mantenimiento

Finalmente, hay que reconocer que las condiciones de servicio y el envejecimiento y deterioro de los materiales como el concreto, en la realidad, no son totalmente predecibles; y por lo tanto, para mantener la confianza en la integridad estructural, el comportamiento, la funcionalidad, la estabilidad, la durabilidad y la seguridad, es necesario realizar unas inspecciones rutinarias que derivarán en la necesidad de un mantenimiento, reparación, rehabilitación o refuerzo de la estructura.

En la práctica, después de la puesta en servicio de una estructura, debería iniciarse el mantenimiento de la misma con una inspección preliminar y con base en ello y en las condiciones de operación del proyecto elaborar un *Manual de Mantenimiento*. Este mantenimiento, al igual que el que se practica en los vehículos puede ser preventivo, correctivo o curativo, según el grado de deterioro o de defectos que exhiba la estructura.

El **mantenimiento preventivo** contempla los trabajos de reparación necesarios para impedir posibles deterioros o el desarrollo de efectos ya apreciados. La limpieza de los sistemas de drenaje, es tal vez el ejemplo más simple de mantenimiento preventivo.

El **mantenimiento correctivo**, hace referencia a la restitución de las condiciones originales del diseño, de manera tal que se restablezcan los materiales, la forma o la apariencia de la estructura. La restauración de estructuras, es un buen ejemplo de mantenimiento correctivo.

El **mantenimiento curativo**. Tiene lugar cuando hay que reemplazar porciones o elementos de una estructura, por deterioro o defecto. La demolición y reparación de miembros estructurales, son técnicas empleadas para practicar el mantenimiento curativo.

CAPITULO III

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

3.1 Metodología de análisis

3.1.1. Muestra para el estudio

Este proyecto plantea la generación de datos relevantes para poder establecer en dos zonas de Manta como se encuentran las edificaciones construidas en hormigón armado.

Para la selección de las zonas a estudiar se plantearon dos variables fundamentales, siendo la ubicación geográfica y antigüedad de construcción, por lo que resultó de acuerdo a esto que las zonas a investigar son las siguientes:

Tabla 3.3 Descripciones de sectores

Sector	Sector	Descripción
A	Ciudadela Universitaria	Es una zona expuesta directamente a las corrientes de aire con alto índice de salinidad y el tiempo de construcción es relativamente reciente
B	Centro de Manta – Calle 13	Es una zona con menor exposición a las corrientes de aire marino, y la antigüedad de las edificaciones es considerable

Fuente: El autor

El análisis de estas edificaciones se plantea que se identificará el tamaño del Universo que sería el total de viviendas en las zonas y de estas se estimará una muestra para hacer los ensayos de laboratorio que se describen en el apartado siguiente.

Adicional a las pruebas de laboratorio la autora plantea generar una estadística de las viviendas que son consideradas para del Universo con la finalidad de establecer a través de la observación principales factores que se aprecian y son posiblemente situaciones de riesgo para la disminución de la vida útil de las estructuras.

3.2. Factores de análisis

Para el análisis de las estructuras de hormigón por durabilidad se plantea la constatación de los tres factores fundamentales que permiten identificar el estado del concreto en las estructuras existentes, siendo estos los siguientes:

- Carbonatación
- Resistencia a la compresión
- Corrosión de las armaduras
- Observación de fisuras y detalles constructivos

3.2.1. Carbonatación y metodología de medición

Dentro del proceso de identificación de factores que influyen en la duración de estructuras, uno de ellos es el estudio del avance de carbonatación y la profundidad que actualmente alcanzan, esto se plantea el estudio en estructuras que tienen una edad considerable y con estructuras relativamente noveles.

Para el análisis de carbonatación que en principio se establecía a través de la extracción de testigos de acuerdo a lo que establece la norma técnica NTE INEN 2336, por motivos de logística y falta del equipo, se adopta la realización empírica de extracción por porción de hormigón.

Sin embargo, como la velocidad de avance del frente de carbonatación depende de muchas variables, es necesario además, determinar con precisión datos tales como el tipo de cemento utilizado, la resistencia a la compresión del hormigón y la edad de la estructura.

3.2.1.2. Determinación de la profundidad de carbonatación.

Para poder identificar la profundidad que ha alcanzado la carbonatación en una columna, viga, plinto, losa u otro elemento estructural de hormigón, se puede establecer dos formas. La primera se realiza a través de un cincel y picar el elemento de hormigón hasta alcanzar una profundidad donde se pueda rociar una solución de fenolftaleína, la misma que si toma un color violeta, significa que el frente de carbonatación no ha avanzado; luego de esto se genera la medición

de la distancia entre la superficie del hormigón y la zona donde se produce el inicio del color rojizo, es decir donde la aplicación de la fenolftaleína toma otro color. Esta medición se hace en forma perpendicular a la superficie, revelando la profundidad de carbonatación del hormigón, y es el método que más se utiliza por lo sencillo y eficaz para la identificación. Este método se lo puede apreciar en la siguiente figura:



Figura 3.35. Medición de avance de carbonatación del hormigón
FUENTE: Howland, 2012

El otro método que proponen las normas, este se genera a través de la extracción de testigos que deben tener de dos pulgadas en delante de diámetro, al mismo que se le realiza el ensayo de hendimiento, que es romper en dos partes diametrales y rociar en las caras internas la aplicación de fenolftaleína, donde resulta más fácil la observación y medición del avance del frente de carbonatación.



Figura 3.36. Método de extracción de testigos de Hormigón
FUENTE: Klaric, 2001

Es importante resaltar que este método es muy invasivo en la estructura por lo que resulta de suma importancia tener en cuenta que la extracción debe ser en el área de influencia menos importante del elemento con la finalidad de no generar ningún problema mecánico que debilite de manera significativa a la estructura.

La solución de fenolftaleína que propone la norma está compuesta por un 1 % de fenolftaleína disuelta en una solución que contiene un 70% de alcohol. De esta manera se tiene una solución que se torna de un color rojizo al estar en contacto con materiales que posean un $\text{pH} > 9,2$ y mantiene el color del material al poseer éste un $\text{pH} < 9,2$.

Al momento que se va a rociar la solución de fenolftaleína es importante que tanto en la probeta extraída como en la zona donde se ha procedido a picar, de acuerdo al método utilizado, la aplicación sea lo más pronto posible, ya que los factores externos generan rápidamente este avance en las superficies expuestas, lo cual puede representar un falso positivo como se denomina en laboratorio de materiales.

También se debe considerar que las mediciones de avance de carbonatación se deben hacer en lugares donde no haya áridos de gran tamaño, es decir, se deben hacer en lugares donde el frente esté, en lo posible, sólo con pasta de cemento. La norma indica además, que la exactitud con que se hace la medición se debe aproximar al milímetro.

3.2.2. Determinación de la resistencia a la compresión.

Para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón en estudio, existen diversos métodos, los cuales se pueden clasificar entre métodos destructivos y métodos no destructivos.

En el desarrollo de este proyecto de investigación debido a que las muestras que se utilizarán son en edificaciones particulares se plantea el uso de menos invasivo, es decir, priorizar los métodos no destructivos.

La metodología para determinar la resistencia a la compresión del hormigón a partir del martillo Schmidt, instrumento que tiene el laboratorio de Materiales y

Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, siendo el procedimiento el siguiente:

- Antes de comenzar la utilización del martillo, éste debe ser calibrado.
- Se determina el lugar donde se va a medir la resistencia y se marcan 16 puntos equidistantes dentro de un cuadrado de alrededor de 20 cm de arista. Se busca que los puntos no estén en lugares donde existan piedras o algún tipo de irregularidades que afecten las mediciones a tomar.
- Luego de obtener los resultados de los rebotes con el martillo, se procede a eliminar los 3 valores más altos y los 3 valores más bajos obtenidos.
- Con los 10 valores restantes de los rebotes, se calcula el promedio.

Una vez obtenido el promedio de la magnitud de los rebotes con el martillo, se procede a determinar la resistencia a la compresión del hormigón a partir de la curva que trae adosada el instrumento, la cual liga una determinada magnitud de rebote a una resistencia a la compresión, dependiendo del ángulo con la horizontal utilizado con el instrumento para obtener las magnitudes de los rebotes. En esta memoria se ocupó la curva de correlación para un ángulo de ejecución de 0° , por tratarse de estructuras verticales (cepas, muros, etc.)



Figura 3.37. Utilización del Esclerómetro
FUENTE: El autor

Como indicación opcional para el lector, se establece que también se pudo generar un ensayo destructivo como es la extracción de testigos cilíndricos para someterlos a la prensa de compresión y evidenciar sus valores, pero como se

indicó en el inciso primero se evitó en lo posible la invasión de la estructura por ser particulares y no contar con el equipo adecuado que garantice la correcta utilización de este método.

3.2.3. Determinación del estado de corrosión de las armaduras

Para la identificación del estado de corrosión de las armaduras tanto longitudinal y transversal, se realiza una perforación pequeña y a través de la observación directa se verifica el estado y espesor del recubrimiento de hormigón.



Figura 3.38. Identificación de corrosión
FUENTE: El autor

En caso de que por medio de la observación no se evidencie la corrosión se plantea la utilización de medidas químicas.

3.3. Reparación de daños

Una vez terminada la experimentación, fueron reparados los orificios y desperfectos que se le ocasionaron a las construcciones como consecuencia de la extracción de testigos. Para esto utilizamos un mortero para Reparaciones Alta Resistencia.

3.4. Equipos

Martillo de Schmidt

El esclerómetro es un instrumento de medición empleado, generalmente, para la determinación de la resistencia a compresión en hormigones ya sea en pilares, muros, pavimentos, etc.

Su funcionamiento consiste en una pesa tensada con un muelle. Dicha pesa tensada es lanzada contra el hormigón y se mide su rebote.

Aunque no es un método excesivamente fiable, su uso está muy extendido. Proporciona valores aproximados y se emplea principalmente como método de comprobación, siendo menos usado que el ensayo de compresión.

En 1950 se diseñó el primer esclerómetro para la medición no destructiva del hormigón. Patentado con el nombre SCHMIDT, su valor de rebote "R" permite medir la dureza de este material. se ha convertido en el procedimiento más utilizado, a nivel mundial, para el control no destructivo en hormigón.



Figura 3.39. Esclerómetro
FUENTE: El autor

Este instrumento utilizado para determinar aproximadamente la resistencia a la compresión del hormigón endurecido. La importancia de éste instrumento es que permite obtener la resistencia del hormigón sin producir daño alguno a la estructura. Mide la dureza del hormigón basándose en un martillo de acero impulsado por un resorte que al dispararse golpea un émbolo de acero en contacto con la superficie de hormigón. Cuando se usa en hormigones antiguos se debe hacer una corrección ya que este instrumento está calibrado para dar la resistencia a los 28 días.

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. Clasificación de Resultados

En la investigación realizada con la finalidad de establecer de cumplir los objetivos plantados, una vez definidos los datos que se analizan, en este aparatado se plantea abordar los siguientes resultados:

- Resultados de las observaciones
- Resultados de los factores medidos

Los primeros resultados, se levantaron a través de una ficha técnica que se encuentra en los anexos, la misma que sirvió para en el proceso de recolección y tabulación de los resultados.

Los segundos resultados, son obtenidos a través de la realización del ensayo de carbonatación, resistencia a la compresión y corrosión de hierros; estos ensayos fueron aplicados de manera aleatoria al cinco por ciento del total de edificaciones observadas.

4.1 Resultados de las observaciones

En el presente estudio se observaron de viviendas y edificaciones que tienen elementos de hormigón armado de acuerdo al siguiente cuadro de muestras:

Tabla 4.4 Total de viviendas observadas

Sector	Sector	Total
A	Ciudadela Universitaria	150
B	Centro de Manta – Calle 13	185

FUENTE: El autor

4.1.1. Análisis del Sector A

Se presentan los resultados de la tabulación de edificaciones del Sector de la ciudadela Universitaria, incluyendo el campus central de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, evidenciando tres variables de tamización, la cuales son: sin daños, daños leves y daños graves.

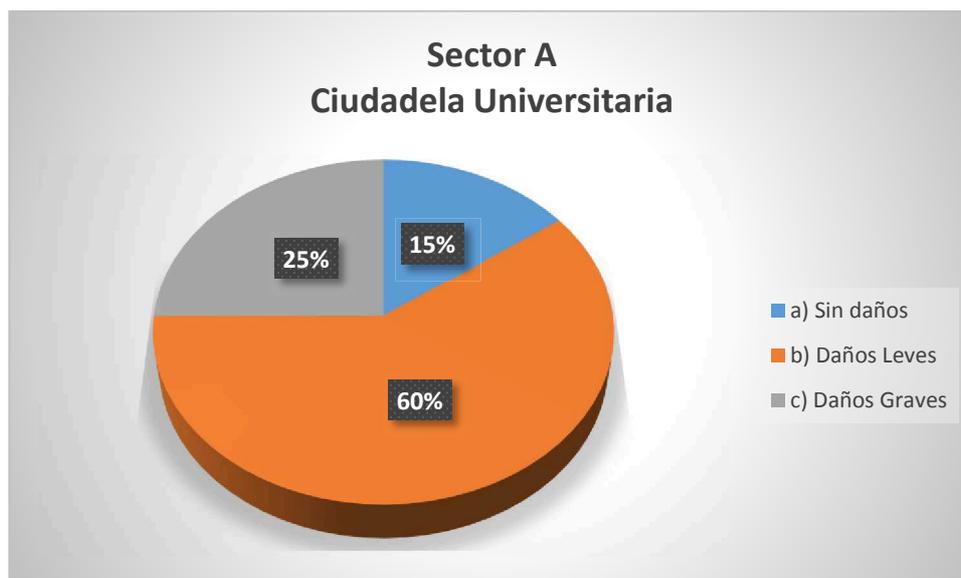


Figura 4.40. Análisis estadístico del sector A
FUENTE: El autor

Como se puede observar en el cuadro estadístico de la figura 3.3. donde la mayoría de las edificaciones de este sector (45%) presentan daños leves, los cuales están asociados en su mayoría a un incorrecto uso de los materiales, demostrando que las fallas regularmente se encuentran en desconchamiento del enlucido, aparición del acero de refuerzo, fisuras a nivel de elementos estructurales y no estructurales.

Resulta importante recalcar que este sector es relativamente nuevo, donde sus estructuras en su mayoría se encuentran en la etapa de vida útil, pero sus condiciones no demuestran esto, más se presenta un envejecimiento prematura y deterioro en las mismas producto de varios factores.

Casos de estudio sector A

En este apartado se presentarán varias de las edificaciones de este sector de manera gráfica denotando su dirección y el daño que presentan.



Figura 4.41. Vivienda Ciudadela universitaria
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Ciudadela Universitaria Calle V10 Av. Univ. 4
DAÑO:	Desconchamiento del hormigón por mala adherencia



Figura 4.42. Vivienda Ciudadela universitaria
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Ciudadela Universitaria Calle V10 Av. Univ. 4
DAÑO:	Falla producida por humedad, la cual se introduce al hormigón y esto causa que llegue hasta el acero estructural

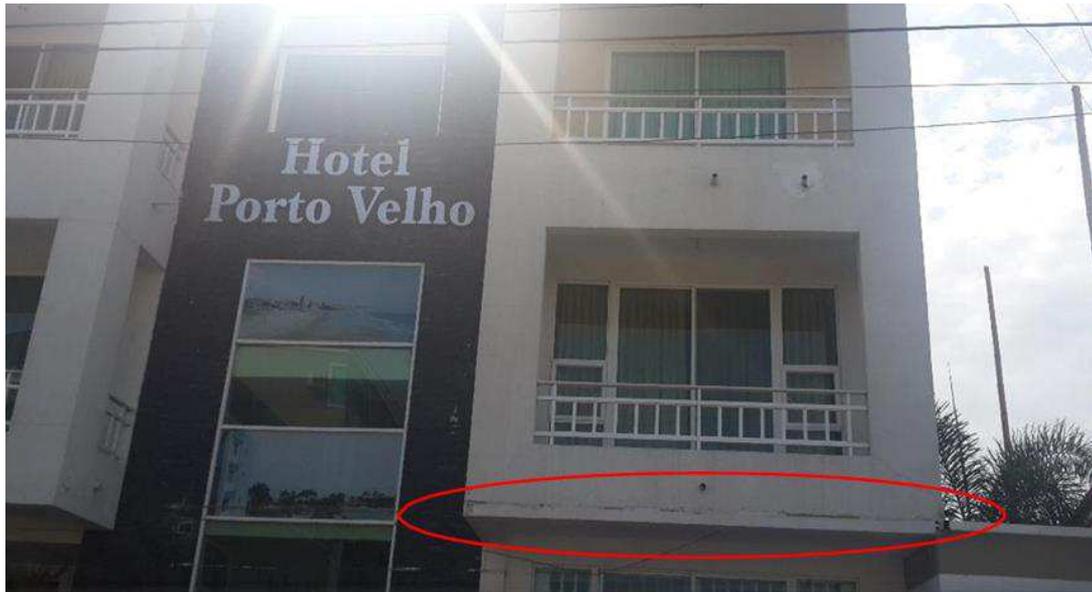


Figura 4.43. Hotel Porto Velho
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Vía Barbasquillo
DAÑO:	Agrietamiento entre losa y antepecho de volado



Figura 4.44. Vivienda Cda. Universitaria – Ataque de sulfatos
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Ciudadela Universitaria Calle V11 Av. Univ. 4
DAÑO:	Esta estructura a más de tener fallas por el ataque de sulfatos



Figura 4.45. Edificio frente a la Ciudadela Universitaria – Acero de refuerzo expuesto
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Edificio frente a la Ciudadela Universitaria
DAÑO:	Acero de refuerzo expuesto todo su contorno



Figura 4.46. Edificio Facultad Ingeniería Industrial
FUENTE: El autor

DIRECCION:	ULEAM- Facultad Ingeniería Industrial
DAÑO:	Debilitamiento de losa para anclaje de columnas metálicas

4.1.2. Análisis de la Sector B

Se presentan los resultados de la tabulación de edificaciones del Sector del centro de la Ciudad de Manta, circundantes a la Calle 13, evidenciando las tres variables de tamización: sin daños, daños leves y daños graves.

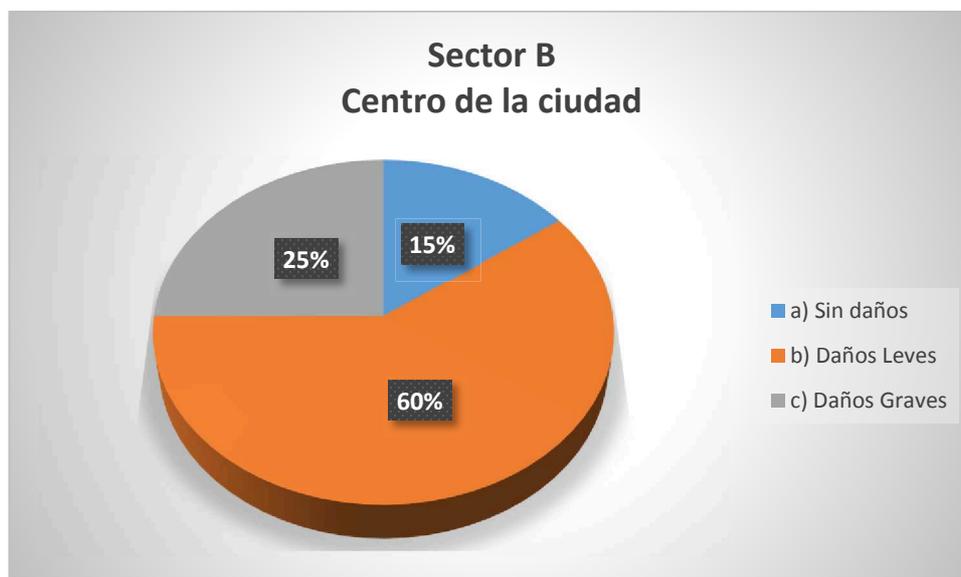


Figura 4.47. Análisis estadístico de Sector B
FUENTE: El autor

Como se puede observar en el cuadro estadístico de la figura 3.9, existe un porcentaje muy elevado (60%) presentan daños leves, los cuales están asociados en su mayoría a un incorrecto uso de los materiales, demostrando que las fallas regularmente se encuentran en desconchamiento del enlucido, aparición del acero de refuerzo, fisuras a nivel de elementos estructurales y no estructurales.

Este sector también demuestra porcentajes altos de daños graves, los cuales se pueden asociar a la antigüedad de varias edificaciones, al uso inadecuado de los materiales y mala práctica en la construcción.

Casos de estudio sector B

A continuación se detallan algunos de los casos que se analizaron en el sector B, tratando de evidenciar a través de la observación factores de riesgo.



Figura 4.48. Vivienda ubicada en la calle 13 avenida 8
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Vivienda ubicada en calle 13 y av. 8
DAÑO:	Presencia de cloruros en el hormigón, desconchamiento del enlucido.



Figura 4.49. Vivienda ubicada en la calle 13 avenida 21
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Vivienda ubicada en calle 13 y av. 21
DAÑO:	Ataque al acero de refuerzo por fisura en la losa



Figura 4.50. Vivienda ubicada en la calle 13 avenida 16
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Vivienda ubicada en calle 13 y av. 16
DAÑO:	La losa de volado presenta daños por ataques de árido-álcali



Figura 4.51. Vivienda ubicada en la calle 13 avenida 20
FUENTE: El autor

DIRECCION:	Vivienda ubicada en calle 13 y av. 20
DAÑO:	Falla en sección de viga por corrosión

4.2. Resultados de los factores medidos

En relación a los resultados de las mediciones efectuados se presentan de acuerdo a los tres factores estudiados, como primer cuadro consolidado de resultados se presenta la tabla siguiente donde se evidencia los datos obtenidos en el análisis del avance del frente de carbonatación y se genera también una columna donde ubica el recubrimiento que se encontró en los diferentes elementos:

Tabla 4.5 Resultados de la carbonatación

Sector	No. Edificación	Profundidad de Carbonatación (cm)		Espesor del recubrimiento (cm)
		Profundidad Promedio	Profundidad máxima	
A	1	6,0	6,6	1,5
	2	3,5	4,5	2,5
	3	5,0	6,0	1,5
	4	2,3	4,8	2,0
	5	5,5	6,8	1,5
	6	4,8	5,1	1,0
	7	5,6	6,9	1,5
	8	6,2	6,5	1,0
	PROMEDIO	4.87	5.9	1.56
B	1	8,2	8,9	1,2
	2	5,5	6,9	1,5
	3	7,2	8,1	1,1
	4	6,9	8,5	1,0
	5	4,2	6,4	1,5
	6	5,5	7,2	1,3
	7	7,4	8,2	1,0
	8	5,8	6,9	1,0
	9	6,3	6,3	1,5
	PROMEDIO	6.33	7.5	1.23

De la tabla anterior se puede generar varios análisis, entre ellos se destaca que todas las estructuras que se evaluaron presentan carbonatación en su hormigón, lo que indica el alto índice de porosidad que los hormigones tienen, siendo esta una de las causas por la que el frente de carbonatación tiene un avance muy rápido.

Es importante resaltar que al comparar los resultados del sector A y el sector B, es evidente que el avance del frente de carbonatación es mayor y más homogéneo en el último, esto se debe a que son estructuras que tienen mayor antigüedad, por lo tanto mayor exposición. A pesar de esto en el primer sector de análisis los valores no son bajos, por lo contrario son altos en función del tiempo en el que fueron construidas las edificaciones.

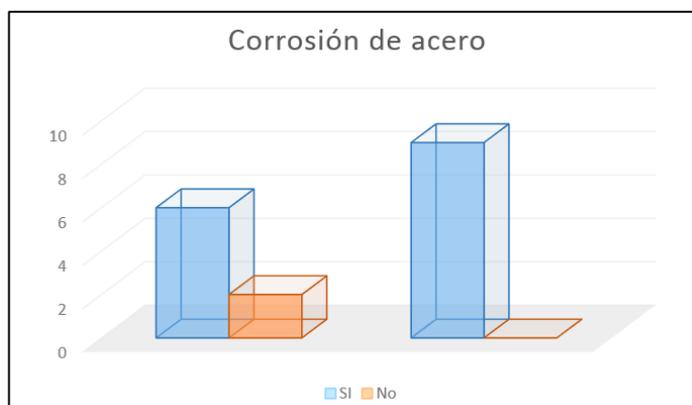
Un aspecto que llama la atención al analizar los resultados es el espesor del recubrimiento del hormigón, dando como resultado mayor las estructuras más noveles, esto puede significar que se está siendo más conservador en los espesores de recubrimiento pero esto no está dando buen resultado debido a la mala calidad del mismo o la excesiva porosidad.

En relación de la resistencia a la compresión generada a través del esclerómetro se pudo evidenciar que las estructuras que presentan valores superiores a los especificados en las normas, esto puede ser debido al endurecimiento del material en relación al tiempo.

Una vez determinada la carbonatación y la resistencia a la compresión, se procedió a verificar a través de observación si existía en las estructuras de análisis la corrosión de las armaduras encontrando los siguientes resultados:

Tabla 4.6 Resultados de la corrosión

Sector	% Corrosión		Total
	SI	No	
A	6	2	8
B	9	0	9



Es evidente de acuerdo a la tabla y el gráfico descrito que la mayoría de las edificaciones presentan corrosión en su armadura de acero, lo que de acuerdo al análisis que se ha generado en este proyecto puede ser por diferentes motivos, entre ellos podemos nombrar al ataque de la salinidad que se penetra en el concreto a través de los poros, siendo estos bastantes considerables ya que se observa en el estudio la presencia de corrosión.

Resulta evidente también que la corrosión de las edificaciones del sector B, por ser más antiguo presenta en su totalidad corrosión; las dos estructuras que no tienen corrosión representan a un 25%, lo que de acuerdo a esto podría decir generalizando que una de cada cuatro edificaciones en el sector A, tienen problemas de corrosión en sus armaduras.

Podemos indicar que de acuerdo a los tipos de resultados analizados en este capítulo, las estructuras en análisis presentan serios problemas de afectación de factores que influyen en la durabilidad de las mismas generando que la vida útil de las disminuya considerablemente.

CONCLUSIONES

- Las edificaciones que son construidas con hormigón armado tienden a disminuir su vida útil debido a que presentan ciertas afectaciones como: carbonatación, lixiviación, corrosión de la armadura, desconchamiento del recubrimiento, fisuras considerables; resulta entonces importante dentro de la ingeniería civil, tener en cuenta las acciones tanto preventivas como correctivas de mantenimiento para poder garantizar la disminución en el proceso degenerativo en el concreto.
- A pesar que la literatura científica a nivel mundial ha estudiado la durabilidad de las estructuras de hormigón, en Ecuador y principalmente en Manta es una rama muy poco estudiada a nivel científico, por lo que se desconoce en su mayoría los principios y las buenas prácticas que se deben tener en relación a los ataques tanto físicos como químicos a los que está expuesto el hormigón, por lo que se concluye que el marco teórico referencial servirá a los lectores como guía de información y preparación en el área.
- 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.

RECOMENDACIONES

- En los procesos formativos universitarios dentro de la rama del diseño estructural es muy importante que adicionalmente de los criterios de diseño por resistencia y desempeño, se forme a los futuros profesionales en el diseño de estructuras de hormigón armado por durabilidad, entendiendo que estos tres parámetros podrán garantizar aún más la vida útil de las estructuras.
- Los profesionales de la construcción: ingenieros como arquitectos, deben garantizar que en los procesos constructivos se respeten las normas técnicas para generar materiales de calidad que contribuyan al correcto desempeño de las edificaciones, entendiendo que la inversión preventiva en la etapa de construcción es mucho menor que la inversión en la reparación o el reforzamiento cuando la estructura está siendo utilizada.
- En los ambientes que tienen presencia de salinidad resulta importante tener precaución con los espesores mínimos de recubrimiento que se deben utilizar, por lo que es importante revisar las normas ecuatorianas de la construcción que identifica varios parámetros para este tipo de ambientes.

BIBLIOGRAFIA

- “Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB”. Grupo Español del Hormigón, Madrid, 1993.
- ACI Committee 201, ACI 201.2R-92 “Guide to Durable Concrete”, ACI Manual of Concrete Practice 2002.
- E. Becker, 2002. “Debilidad Superficial en Losas de Hormigón”, Seminario sobre Cemento Pórtland y Patología del Hormigón y <http://www.lomanegra.com.ar>
- E. Becker, 2002. “Fisuras de Retracción Plástica”, Seminario sobre Cemento Pórtland y Patología del Hormigón y <http://www.lomanegra.com.ar>
- E. Becker, 2003. “El Hormigón como Material de Construcción”, InfoTécnica, Boletín N° 1.
- E. Otero. “Corrosión y degradación de materiales”. Editorial Síntesis,
- F.Leonhardt. “Hormigón pretensado”. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1967.
- H.H. Uhlig “Corrosión y control de la corrosión”. URMO S. A. De Ediciones Bilbao, 1979.
- J. Calavera, 1996. “Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado”, INTEMAC, Madrid, España.
- M. Klaric, 2001. “Fisuración y Ataques Físicos al Hormigón”, AATH - Durabilidad del Hormigón Estructural.
- S.A. : Madrid, 1997.
- T. Liu, 1994. “Abrasión Resistence”, ASTM STP 169 C, American Society for Testing and Materials.
- U.K. Evans. “Corrosiones metálicas”. Ed. Reverté S. A., Barcelona, 1987.

ANEXOS

FICHA TÉCNICA DE OBSERVACIÓN PARA REGISTRO DE FACTORES DE RIESGO PARA DURABILIDAD			
	Esta ficha tiene como objetivo recolectar datos sobre las edificaciones que se encuentran dentro de la muestra de la tesis de grado con el título Análisis de Estructuras por Durabilidad		
1. DATOS INFORMATIVOS:			
1.1. Ubicación:		1.3. Fecha de Inspección	
1.2. Número de pisos		1.4. Referencia	
2. NIVEL DE DAÑOS DE LA VIVIENDA			
2.1. Sin daños			
2.2. Daños leves			
2.3. Daños graves			
3. DAÑOS DE LA VIVIENDA			
CONDICIONES	SI	NO	OBSERVACIONES
3.1. Desconchamiento del recubrimiento			
3.2 Fisuras en elementos estructurales			
3.3 Acero estructural expuesto			
3.4 Lixiviación			
3.5 Ataque de sulfatos			
3.6 Fisuras en elementos no estructurales			
3.7 Ataques de árido-álcali			
3.8 Disminución en secciones			
3.9 Otros:			
OBSERVACIONES GENERALES:			