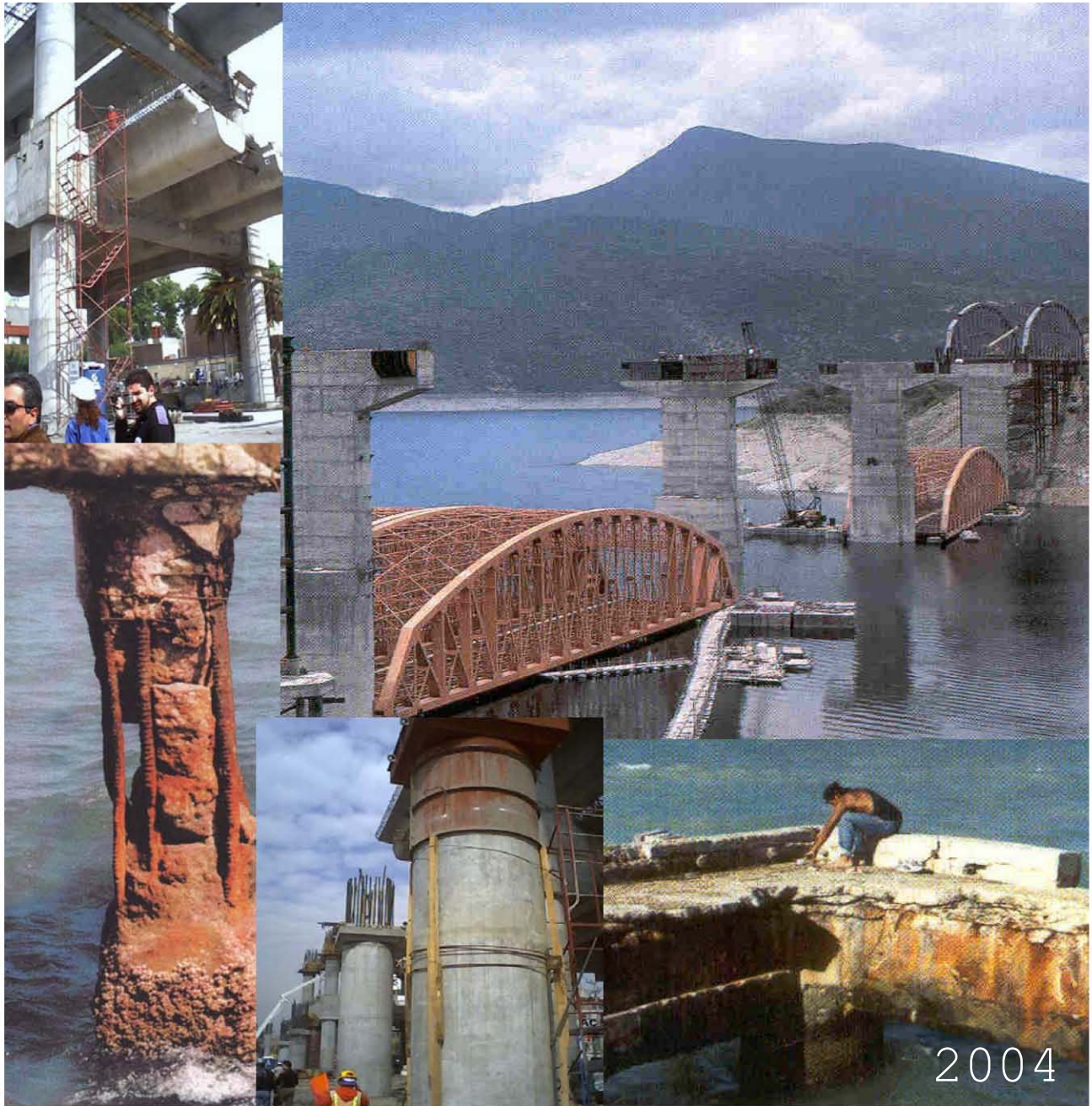


CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN MEDIOS AGRESIVOS

ING. OSCAR HERNÁNDEZ CASTAÑEDA



2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

***A MARISOL
POR INSPIRARME Y
SER UN SUEÑO ALCANZABLE***

AGRADECIMIENTOS

**A DIOS
POR TODO**

A MIS PADRES: FRANCISCA Y ENRIQUE
POR SU GRAN AMOR, APOYO INCONDICIONAL Y SER UN GRAN EJEMPLO A SEGUIR

A MARISOL
POR TU AMOR, COMPRENSIÓN Y POR TODO LO QUE COMPARTIMOS

A MI HERMANA ARACELI
POR TU APOYO Y AYUDA EN TODO MOMENTO

A MI HERMANO ENRIQUE
PORQUE ME HAS HECHO MADURAR

A MI SOBRINO MARCOS ADRIAN
POR ALEGRARME LA VIDA Y DIVERTIRME

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
*POR PERMITIRME SER PARTE DE SU COMUNIDAD, Y ENGRANDECER MIS
CONOCIMIENTOS Y MI ESPÍRITU.*

A LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y A SU DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
*POR PERMITIRME INGRESAR AL PROGRAMA DE EXCELENCIA DE POSGRADO Y
PERMITIRME SER MEJOR*

A MIS PROFESORES DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
*PORQUE TODAS SUS ENSEÑANZAS SON MUY VALIOSAS, Y PORQUE CONTRIBUYEN A
EXPANDIR LA SEMILLA DEL CONOCIMIENTO*

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
*POR SU APOYO MORAL Y ECONÓMICO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO
DE INVESTIGACIÓN Y LA REALIZACIÓN DE MI MAESTRIA, SIN EL CUAL ESTE GRAN
AVANCE PERSONAL NO HUBIERA SIDO POSIBLE*

AL INSTITUTO DE INGENIERÍA
*POR PERMITIRME COLABORAR EN SUS PROYECTOS Y APRENDER
CONTINUAMENTE*

AL M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA
*POR EL TIEMPO DEDICADO Y LA PACIENCIA PARA LA REVISIÓN Y ANÁLISIS DE LA
PRESENTE. POR SU APOYO Y MUCHAS GRACIAS POR SER MI DIRECTOR DE TESIS*

AL ING. ALBERTO L. FUENTES GONZALEZ,
*PORQUE EN 1998 ME PERMITIO INGRESAR A SU EQUIPO Y CONOCER LA
TECNOLOGÍA DEL CONCRETO EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA*

**AL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, SECCIÓN CENTRO Y SUR DE MÉXICO, A.C. Y EN
ESPECIAL A LA LIC. EUGENIA STETA**
POR APOYARME PARA REALIZAR LA ENCUESTA DE DURABILIDAD

**A LA ASOCIACIÓN MEXICANA DE GALVANIZADORES, A.C. (AMEGAC) Y EN PARTICULAR
AL ING. NOE LARA HERNÁNDEZ**
POR SU COLABORACIÓN Y APOYO PARA REALIZAR ESTA INVESTIGACIÓN

A TODOS LOS PARTICIPANTES EN LA ENCUESTA DE DURABILIDAD
POR SU PARTICIPACIÓN Y COMENTARIOS.

ÍNDICE

OBJETIVO, HIPÓTESIS E INTRODUCCIÓN.....	V
CAPITULO I. DURABILIDAD E INFRAESTRUCTURA.....	1
I.1. INTRODUCCIÓN.....	1
I.2. ASPECTOS GENERALES.....	2
I.2.A. AGRESIVIDAD AMBIENTAL.....	3
I.3. IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA DURABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN.....	6
I.3.A. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DE LA CORROSIÓN.....	7
I.3.B. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DE LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE.....	9
I.3.C. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DEL ATAQUE POR SULFATOS.....	9
I.3.D. COSTOS DE MANTENIMIENTO IMPUTABLES A DEFECTOS DE DURABILIDAD.....	10
I.4. DURABILIDAD E INFRAESTRUCTURA.....	10
I.4.A. CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO.....	11
I.4.B. ESTRUCTURAS INDUSTRIALES.....	13
I.4.C. PAVIMENTOS HIDRÁULICOS.....	14
I.4.D. PUENTES.....	15
I.4.E. ESTRUCTURAS MARINAS.....	16
I.4.F. ESTRUCTURAS HIDRÁLICAS.....	16
I.5. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	17
CAPITULO II. CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE QUÍMICO.....	19
II.1. INTRODUCCIÓN.....	19
II.2. ATAQUE DE SULFATOS.....	19
II.2.A. MECANISMO DEL ATAQUE DE SULFATOS.....	20
II.2.B. ESTRATEGIAS PARA EVITAR EL ATAQUE POR SULFATOS.....	24
II.2.C. TIPOS DE ESTRUCTURAS SUJETAS AL ATAQUE DE SULFATOS.....	26
II.2.D. EL ATAQUE DE SULFATOS EN MÉXICO.....	26
II.3. EXPOSICIÓN AL AGUA DE MAR.....	26
II.3.A. MECANISMO DEL DETERIORO POR EXPOSICIÓN AL AGUA DE MAR.....	27
II.4. CARBONATACIÓN.....	27
II.5. ATAQUE DE ÁCIDOS.....	28
II.5.A. MECANISMO DEL ATAQUE POR ÁCIDOS.....	28
II.5.B. FACTORES DEL ATAQUE POR ÁCIDOS.....	29
II.5.C. EL ATAQUE POR ÁCIDOS EN LA INFRAESTRUCTURA.....	30
II.6. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	32
CAPITULO III. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	33
III.1. INTRODUCCIÓN.....	33
III.2. PRINCIPIOS Y MECANISMO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.....	33
III.2.A. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN.....	33
III.2.B. CORROSIÓN: UN PROCESO ELECTROQUÍMICO.....	34
III.2.C. PENETRACIÓN Y DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO EN EL CONCRETO.....	34
III.2.D. FUNCIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS IONES DE CLORURO.....	35
III.2.E. MECANISMO DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.....	36
III.2.F. DESEMPEÑO DEL CONCRETO ANTE LA CORROSIÓN.....	41
III.2.G. VELOCIDAD DE COROSIÓN Y pH.....	42
III.2.H. DIAGRAMAS DE POURBAIX.....	43
III.2.I. CORROSIÓN POR CORRIENTES EXTRAVIADAS.....	43
III.2.J. OTROS IONES DE SALES.....	43

III.3. PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO CONTRA LA CORROSIÓN.....	44
III.4. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA EVITAR CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	46
III.4.A. DISEÑO Y PRÁCTICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA MAXIMIZAR LA PROTECCIÓN AL ACERO DE REFUERZO.....	48
III.4.B. TRATAMIENTOS QUE PENETRAN O SON APLICADOS EN LA SUPERFICIE DEL MIEMBRO DE CONCRETO PARA IMPEDIR EL INGRESO DE LOS IONES DE CLORURO AL CONCRETO.....	57
III.4.C. TÉCNICAS QUE PREVIENEN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DIRECTAMENTE.....	60
III.5. ESTRUCTURAS PROCLIVES A PRESENTAR CORROSIÓN.....	68
III.6. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	70
CAPÍTULO IV. REACCIONES QUÍMICAS EN AGREGADOS.....	71
IV.1. INTRODUCCIÓN.....	71
IV.2. REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE.....	72
IV.2.A. SÍLICE REACTIVA EN LOS AGREGADOS.....	74
IV.2.B. GRADO DE HUMEDAD EN EL CONCRETO.....	74
IV.2.C. OTROS ASPECTOS DE LA REACCIÓN.....	74
IV.2.D. ESTRATEGIAS PARA EVITAR LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE.....	75
IV.2.E. ADITIVOS A BASE DE LITIO.....	78
IV.3. REACCIÓN ÁLCALI - SILICATO.....	79
IV.4. REACCIÓN ÁLCALI- CARBONATO.....	79
IV.5. REACCIONES ÁLCALI – AGREGADO EN MÉXICO.....	80
IV.6. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	81
CAPITULO V. OTROS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.....	83
V.1. INTRODUCCIÓN.....	83
V.1.A. FACTORES ECONÓMICOS PARA LA SELECCIÓN DE LA BARRERA.....	83
V.1.B. INSPECCIÓN DURANTE LA APLICACIÓN.....	84
V.2. SISTEMAS DE BARRERAS PROTECTORAS.....	84
V.2.A. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE BARRERAS.....	84
V.3. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.....	85
V.3.A. CARACTERÍSTICAS.....	85
V.3.B. GUIA PARA SELECCIONAR.....	86
V.3.C. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE LADO POSITIVO.....	86
V.4. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN A LA HUMEDAD.....	87
V.5. SISTEMAS DE BARRERAS DE PROTECCIÓN.....	87
V.5.A. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA DE BARRERA PROTECTORA.....	87
V.5.B. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE BARRERA PROTECTORA.....	87
V.5.C. BARRERAS DE COMPUESTOS ESPECIALES.....	90
V.6. SISTEMAS DE BARRERAS DE PINTURAS DECORATIVAS.....	90
V.7. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	91
CAPÍTULO VI. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO POR DURABILIDAD.....	93
VI.1. INTRODUCCIÓN.....	93
VI.2. PROCESO CONSTRUCTIVO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO.....	94
VI.3. DISEÑO Y DURABILIDAD.....	96
VI.3.A. EL DRENAJE EN LA DURABILIDAD.....	96
VI.4. CALIDAD DE CONCRETOS ESTRUCTURALES POR REQUISITOS DE DURABILIDAD...100	
VI.4.A. RELACIÓN AGUA / CEMENTANTE.....	100

VI.4.B. TIPO DE CEMENTO O CEMENTANTES A USAR.....	100
VI.4.C. ADITIVOS.....	100
VI.4.D. AGREGADOS.....	100
VI.4.E. AGUA DE MEZCLADO.....	101
VI.4.F. CURADO DEL CONCRETO.....	101
VI.4.G. ADITIVOS MINERALES.....	101
VI.4.H. ACERO DE REFUERZO.....	101
VI.5. CONSTRUCCIÓN Y DURABILIDAD.....	101
VI.5.A. EJECUCIÓN Y CURADO.....	101
VI.5.B. LAS ESTRUCTURAS BIEN CONSTRUIDAS SERÁN DURABLES.....	102
VI.5.C. AMBIENTES TÍPICOS.....	102
VI.6.MANTENIMIENTO Y DURABILIDAD.....	106
VI.6.1. ACCESIBILIDAD PARA INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.....	107
VI.7.EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.....	107
VI.8. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	108
CAPÍTULO VII. DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS ESPECIALES.....	109
VII.1. INTRODUCCIÓN.....	109
VII.2. ESTRUCTURAS SANITARIAS.....	109
VII.2.A. REQUISITOS DE DURABILIDAD.....	109
VII.2.B. OTROS MATERIALES EN ESTRUCTURAS SANITARIAS.....	110
VII.2.C. RIESGO DE CORROSIÓN EN DIVERSAS ESTRUCTURAS SANITARIAS.....	111
VII.2.D. METODOLOGÍA PARA REHABILITAR ESTRUCTURAS SANITARIAS.....	112
VII.3. ESTRUCTURAS PRESFORZADAS.....	112
VII.3.A. GENERALIDADES.....	112
VII.3.B. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO Y SU PREVENCIÓN.....	114
VII.3.C. ESTRATEGIAS PARA PREVENIR LA CORROSIÓN DEL REFUERZO EN ESTRUCTURAS PRESFORZADAS.....	118
VII.4. ESTRUCTURAS MARINAS.....	124
VII.4.A. ESTRUCTURAS DE CONCRETO MAR ADENTRO.....	127
VII.5. DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS MARINAS.....	130
VII.6. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	130
CAPÍTULO VIII. EVALUACIÓN Y RETOS DE LA DURABILIDAD.....	133
VIII.1. INTRODUCCIÓN.....	133
VIII.2. DURABILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTOS.....	135
VIII.2.A. PLANTA FUNDIDORA DE ALUMINIO.....	135
VIII.2.B. HOTEL EN ZONA COSTERA.....	136
VIII.3. DURABILIDAD DE NUEVOS MATERIALES.....	138
VIII.4. RETOS DE LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.....	138
VIII.5. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	142
CONCLUSIONES.....	143
BIBLIOGRAFÍA.....	147
APÉNDICE A: RESULTADOS DE LA ENCUESTA DE DURABILIDAD.....	153
APÉNDICE B: MODELO MATEMÁTICO DE LA CORROSIÓN DE REFUERZO.....	165
APÉNDICE C: EFECTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN EL CONCRETO.....	175

OBJETIVO

Generar y proponer recomendaciones de diseño y construcción necesarias para especificaciones de proyecto, y posterior construcción adecuada con concretos expuestos a medios agresivos o condiciones extremas, considerando las características de la República Mexicana.

HIPÓTESIS

A razón de la construcción de estructuras de concreto expuestas a condiciones extremas o medios agresivos es útil y necesario desarrollar metodologías o sistemas de protección que permitan lograr estructuras de concreto con alta durabilidad, y que contemplen las circunstancias de nuestro país.

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 durabilidad, sin embargo, los hechos han 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, los cuales se han tenido que explicar, enfrentar y resolver desde diferentes trincheras: investigaciones serias, teorías, fórmulas, sistemas constructivos, pruebas de laboratorio y campo, todo ello con el objetivo de diagnosticar los problemas de durabilidad y conocer los agentes y/o factores que en ella intervienen. El estado de arte actual del tema es bastante amplio, sin embargo, el espíritu científico continua alimentándose de preguntas y nuevos retos. Hoy, a principios del siglo XXI se tienen varias preguntas por contestar.

En particular ¿Cómo se puede incrementar la vida útil de las estructuras sin un costo excesivo?, ¿Qué materiales pueden coadyuvar a mejorar el desempeño de este material ante medios agresivos?, ¿En qué medida los nuevos productos del mercado permiten este fin?, ¿Los materiales empleados en cierta región son adecuados para lograr estructuras durables en medios agresivos similares?, ¿Es viable aplicar estos nuevos productos o sistemas en México? Y ¿que consecuencia y costo tiene el hacerlo?. El tema rebasa el campo técnico y contempla otros aspectos. Financieramente hablando ¿qué rentabilidad tiene un proyecto durable y con una vida útil considerable? El concreto es a nivel mundial el material más usado 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. El Reino Unido, un país desarrollado, destina 40% de la inversión en construcción a la reparación y al mantenimiento, 4% de su Producto Interno Bruto (PIB)ⁱ. Un país subdesarrollado como el nuestro, ¿cuánto destina? El ahorro que pueda lograr un país en 30 años por investigar y construir ahora estructuras durables puede ser un detonante fundamental en el futuro, dada la escasez de materiales y recursos. Acaso, ¿No destinará mayores recursos un país o una empresa a la investigación, a la capacitación de personal o a construir nueva infraestructura o a otros aspectos igualmente importantes que aquel país o empresa que lo destine al mantenimiento y reparación de su infraestructura o bienes inmobiliarios?

Los problemas de durabilidad han afectado varios tipos de estructuras, las cuales una vez que los presentan ya no son funcionales ni eficientes, y están destinadas a no cumplir con su vida de servicio estimada. Tan sólo en Estados Unidos los problemas de durabilidad que afectaban las estructuras de transporte intermodal tenían un costo de \$20 billones de dólares en 1986ⁱⁱ. Los problemas de durabilidad ocasionan costos y pérdidas económicas para el propietario o inversionista, ya sea por reparación de las zonas afectadas o por la sustitución de elementos que han fallado o que se han deteriorado.

ⁱ NEVILLE, Adam. "Maintenance and Durability of Concrete Structures" Concrete International, November, 1997.

ⁱⁱ Durability of Concrete Structures. Concrete Technology Update, July, 1998. p. 1.

Dado lo anterior la durabilidad del concreto es un tema actual y que con el paso de los años habrá de ocupar mayor importancia en varios ámbitos: profesional, académico, y financiero; ocasionado por el alto impacto socioeconómico que tiene en las obras y en la infraestructura de las naciones.

En México se tienen áreas con medios agresivos al concreto, que debido a la escasez de espacio o situaciones específicas es necesario construir determinadas estructuras de infraestructura considerable en esas áreas. Razón por la que es necesario conocer y dominar el tema. Con el presente escrito se pretende tener un medio de divulgación entre los profesionales de la construcción, que permita identificar los aspectos de durabilidad a cuidar en las etapas de diseño y construcción en las diversas estructuras de infraestructura: puentes, pavimentos, estructuras sanitarias, hidráulicas o marinas, y construcciones de concreto reforzado y presfzado, en general.

La presente tesis tiene un enfoque integral, que describe los aspectos y medidas más relevantes para la construcción de estructuras de concreto con alta durabilidad. El desarrollo de los capítulos incluye el estado de arte actual: su aplicación e importancia, mecanismo de ataque, avances tecnológicos a la fecha, y estrategias prácticas para evitar los diversos ataques; siempre con un enfoque de las particularidades de nuestro país, con casos y fotografías que ilustren la complejidad y trato en estas circunstancias, así como las consideraciones a cuidar en determinadas estructuras y en la evaluación de proyectos.

Para ello se incluyen ocho capítulos, el primero explica y demuestra al lector las repercusiones económicas y sociales que originan los problemas de durabilidad a la humanidad, a través de gobiernos, instituciones o intereses privados. Los capítulos siguientes describen a detalle los aspectos de durabilidad que más afectan en nuestro país: ataque químico, como los causados por sulfatos, ácidos, lluvia ácida, etc. (capítulo II), corrosión del acero de refuerzo (capítulo III), reacciones álcali - agregados (capítulo IV). El capítulo V presenta los sistemas de protección mediante membranas para incrementar la durabilidad del concreto. En el capítulo VI se exponen los requisitos por durabilidad aconsejables para lograr un concreto que se desempeñe adecuadamente ante medios agresivos, dependiendo del grado de agresividad y características estructurales, es decir, que no tenga deterioro a largo plazo. Se presentan recomendaciones de la calidad del concreto y de proyecto. No se incluyen los temas de abrasión ni de congelación – deshielo detalladamente. En el capítulo VII se discute acerca de la importancia y/o efecto de la durabilidad del concreto en estructuras especiales, donde la durabilidad es un factor primordial a considerar, como son estructuras sanitarias, presfzadas y marinas. El panorama de la durabilidad del concreto en la construcción no estaría completo sin la discusión del papel de la evaluación de proyectos y retos de esta rama tecnológica para el futuro (capítulo VIII). Las conclusiones enmarcan las ideas, y recomendaciones que se deben aplicar en la práctica y en el futuro. Se indican las características y consideraciones para diseñar, especificar y construir una estructura de concreto con el criterio de durabilidad.

Con las investigaciones realizadas en el campo de la durabilidad del concreto se ha incrementado nuestro conocimiento del tema, es indudable que aportan nuevos productos y resultan en mejoras importantes para la construcción de estructuras de concreto y a su vez perfeccionan los métodos de reparación inducidos por estos tipos de daños en la estructuras actuales. Es necesario que la información sea difundida entre los actores y protagonistas de la construcción, aquellos individuos responsables del diseño, construcción y mantenimiento de la estructuras. En la medida que se tenga un mayor conocimiento y conciencia del tema por parte de los profesionales de la construcción (Ingenieros civiles y arquitectos) se podrá tener en un futuro estructuras más durables en aquellas áreas agresivas al concreto. Así se pueden optimizar recursos y lograr estructuras con mantenimientos menos frecuentes y costosos a los actuales, eliminando problemas sociales de desalojo de edificios y riesgos que atenten contra vidas humanas.

CAPÍTULO I. DURABILIDAD E INFRAESTRUCTURA

“Para resolver los problemas de durabilidad, necesitamos destinar más recursos hacia la integración de nuestro conocimiento presente hacia una comprensión holística de la durabilidad”
P.K. Metha, Concrete – 50 years of Progress.

I.1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica, por este medio se ha logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio, sin embargo, se han encontrado problemas relacionados con el medio ambiente en el que se encuentra la estructura.

Era inminente la necesidad de investigar las razones del porqué del deterioro del concreto y solucionar problemas prácticos. Se plantearon varias preguntas: ¿Cómo evitar el deterioro del concreto? ¿Cómo eliminar la corrosión? ¿Cómo lograr un concreto durable? ¿Cómo construir un puente o un pavimento que resista satisfactoriamente las condiciones agresivas? ¿Cómo evitar los costos de mantenimiento periódicos en estructuras marinas o ubicadas en ambientes agresivos? ¿Cómo lograr superficies de pisos industriales que resistan las excesivas cargas de trabajo a las que están sometidas? De ahí se derivó el interés de estudiar la relación y los factores que interactúan entre el concreto y su entorno; la rama de la tecnología del concreto que resuelve estos problemas prácticos es la durabilidad del concreto. Es hasta las últimas décadas cuando el criterio de durabilidad se ha incluido en el diseño y normatividad de las estructuras.

Los primeros problemas de durabilidad empezaron a surgir antes de la mitad del siglo XX, por lo que la problemática no es nueva, sin embargo, las obras que se han realizado en las décadas más recientes siguen presentando problemas de durabilidad, dado que no se ha difundido lo suficiente y a que existe un rechazo al tema dado su complejidad y a que significa generalmente un costo inicial mayor. El inversionista y/o el contratista confunden un concreto económico con uno barato. Un concreto barato puede ser resistente ante sus solicitaciones de carga, pero no necesariamente es un concreto durable, que a largo plazo, por el mantenimiento requerido, puede resultar de mayor costo. Por su parte un concreto resistente y durable, puede implicar un costo inicial mayor, pero a futuro representa ahorros considerables.

En las obras de importancia nacional, empresarial o personal, es necesario considerar la durabilidad del material con el que pretendemos construir una estructura. El hecho de hacerlo, es construir responsable y profesionalmente.

Es importante considerar la durabilidad de las obras de concreto porque de ella dependen las condiciones y el grado de deterioro que alcanzará el concreto ante el medio ambiente al que se encuentra expuesto. Dadas las diferencias climáticas de cada región y a las diversas condiciones de servicio y/u operación es necesario investigar el efecto de estas para los materiales empleados y para las condiciones particulares de cada obra.

La durabilidad es una de las propiedades más importantes del concreto, debido a que es indispensable que tenga la calidad y capacidad para resistir las acciones a las cuales estará expuesto en su vida de servicio.

El objetivo de la presente tesis es establecer las bases necesarias para una comprensión adecuada de los diversos aspectos que intervienen en la durabilidad del concreto, en particular en nuestro país, dadas las condiciones climatológicas de éste. Lo anterior es de vital importancia para poder diseñar y construir adecuadamente estructuras de concreto en ambientes agresivos, así como para realizar especificaciones o normas al respecto.

I.2. ASPECTOS GENERALES

La durabilidad del concreto se define como "su habilidad para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable mantendrá su forma, calidad y condiciones de servicio originales, cuando se exponen a su ambiente".¹ Y se evalúa "en función de su capacidad para resistir las acciones deteriorantes derivadas en las condiciones de exposición y servicio a que está sometida"²

La expresión durabilidad del concreto se refiere, en términos generales, a la resistencia del concreto al ataque de agentes físicos o químicos. La naturaleza, intensidad y mecanismo implicado en cada uno de los diferentes ataques pueden variar considerablemente, dependiendo de las condiciones de exposición a las que se encuentra la estructura de concreto.

Estadísticamente resulta difícil determinar las causas de problemas de durabilidad en estructuras de concreto. A principios de la década de los 80's se realizó en España un estudio al respecto, que presenta resultados interesantes e indican la importancia de cada etapa: se atribuye la falla a defectos en la calidad de los materiales en un 16.2 %, los errores en la ejecución o construcción de 38.5 % y el 45.3 % a errores en el diseño y/o cálculo (*vid.* Fig.1.1). Otros estudios similares estiman hasta en un 30% la falla debida a deficiencia en la selección de los materiales.³

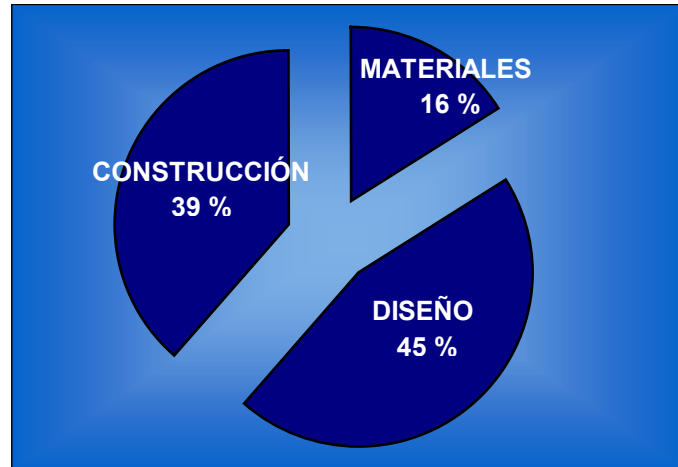


Fig. 1.1. Causas que producen problemas de durabilidad.
FUENTE: Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto.
Sanjuán, M. A y Castro Borges P. IMCYC

Al parecer en México no se tienen estudios similares. Dichos datos indican que lograr un concreto durable se deben considerar todos los aspectos: calidad de los materiales y proveedores, así como un conocimiento de las condiciones de servicio para un correcto diseño y un adecuado proceso constructivo.

Los agentes que afectan la durabilidad del concreto son de diversa índole. Los agentes agresivos pueden ser clasificados en dos categorías: *agentes externos* y *agentes internos*. Los externos son los que se encuentran en el medio ambiente o se deben a condiciones de servicio, entre ellos se encuentran: los iones de cloruro, el dióxido de carbono, sulfatos, bacterias, abrasión y ciclos de congelamiento y deshielo. Los agentes internos se hallan dentro del mismo concreto, como los iones de cloruro incorporados en determinados aditivos, y los álcalis del cemento que reaccionan con agregados potencialmente reactivos.

Los factores también se pueden clasificar por su origen: agentes físicos, químicos, biológicos y mecánicos. Las causas o agentes físicos son los debidos a cambios en el medio ambiente, como el congelamiento y deshielo , así como las cargas y las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento del concreto.

¹ Guide to Durable Concrete. ACI - 201R-92(97).

² Guía para la durabilidad del concreto. Guía del Consumidor de Concreto Profesional. American Concrete Institute. Sección Centro y Sur de México, p.3.

³ Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Sanjuán, M.A y Castro Borges P. IMCYC. p. 1.

Entre los agentes químicos encontramos varios: los ataques de sulfatos, ácidos, agua de mar y cloruros, estos últimos inducen a la corrosión electroquímica del acero de refuerzo. Las biológicas pueden ser microorganismos, algas y moluscos. Las causas mecánicas se deben a las condiciones a que se expone el concreto, estas se refieren a la abrasión y erosión.

En ocasiones estos factores se presentan simultáneamente, por lo que se pueden tener combinaciones interesantes con efectos combinados. Obviamente el efecto del daño se debe a cuestiones intrínsecas y extrínsecas del concreto, como es la calidad del mismo y el grado del agente activo al que se encuentra expuesto.

En la figura 1.2. se muestran los factores que intervienen en la durabilidad del concreto reforzado. La importancia de los agentes agresivos está en función del entorno en que se encuentran y la velocidad de penetración, dependiendo de su medio de transporte y las condiciones en las que se realice. Dichos agentes agresivos pueden ser gases, líquidos o formando parte de los suelos adyacentes al concreto. Dado lo anterior se considera en la literatura del tema los siguientes aspectos para la durabilidad del concreto:

- Exposición al ataque químico
- Corrosión de acero y otros metales embebidos en concreto
- Reacciones químicas de agregados
- Congelamiento y deshielo
- Abrasión

A lo largo de la presente tesis se desarrollarán sólo los tres primeros temas con mayor profundidad, debido a que son los más comunes en la práctica en nuestro país.

Para el diseño de un concreto durable se deben considerar todos los factores que interactúan en el concreto, así como las propiedades que se le conferirán y las condiciones de servicio de la estructura de concreto. Las propiedades de un concreto se muestran en el esquema 1.3.

La durabilidad del concreto recibe atención especial en los Reglamentos Nacionales de Construcción, en países como: Japón, Australia y Europa.⁴ En México, las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (2004) incluyen por primera vez un apartado sobre el tema. La tendencia es que se incluya cada vez más en los Reglamentos de Construcción de los países dada su importancia y los problemas que se han detectado.

1.2.A. AGRESIVIDAD AMBIENTAL

Para que los procesos deletéreos se desarrollen, tanto en el concreto como en el acero de refuerzo, se requiere que exista una interacción entre la estructura y el medio ambiente. Dichas interacciones dependen del tipo, intensidad y regulación de las propiedades del material, especialmente la permeabilidad, la forma estructural seleccionada y la posición del acero de refuerzo, así como el tipo y agresividad del medio ambiente.

Las características de los ambientes que rodean a las estructuras se pueden clasificar dependiendo de sus efectos que tengan en las primeras.

Se han propuesto varias clasificaciones por parte de varios autores, comités y normas, dependiendo de la agresividad hacia las estructuras de concreto. A continuación se presenta la clasificación que realizó el *Comité Euro International du Béton*.

⁴ PIERRE CLAUDE AITCIN, High-Performance Concrete. Cap.17.p.461.

TABLA 1.1. CLASIFICACIÓN DE LA AGRESIVIDAD AMBIENTAL	
LIGERA	a) Interior de construcciones para uso habitacional normal o para oficinas b) Sitios donde un alto nivel de humedad relativa es alcanzado por períodos cortos (por ejemplo, la humedad relativa sólo excede 60% por menos de tres meses al año).
MODERADA	a) Interior de construcciones donde la humedad relativa es alta o donde existe un riesgo de presencia temporal de vapor corrosivo. b) Corrientes de agua c) Inclemencias del clima en condiciones atmosféricas rurales o urbanas sin condensaciones de gases agresivos. d) Suelos ordinarios
SEVERA	a) Líquidos que contienen ligeras cantidades de ácidos, aguas salinas o fuertemente oxigenadas b) Gases corrosivos o suelos corrosivos c) Condiciones atmosféricas corrosivas (industriales o marinas).
Fuente: <i>Durable Concrete Structures, CEB. p.35.</i>	

La clasificación de la agresividad ambiental es una guía para estimar los riesgos de durabilidad asociados con una determinada estructura en un ambiente dado.

Considerar la presencia de la humedad es importante. Todos los procesos de deterioro requieren agua. Por su parte la temperatura es considerada como un factor secundario en términos de agresividad, sin embargo, es muy importante. Un incremento de la temperatura de 10 °C dobla la velocidad de la reacción. Este factor por sí mismo es más importante en climas tropicales que en climas fríos.⁵

Los ejemplos comunes de las sustancias agresivas en la humedad son las siguientes.⁶

- a) Bióxido de carbono, necesario para la carbonatación.
- b) Oxígeno, necesario para corrosión.
- c) Cloruros, promotores de la corrosión.
- d) Ácidos, disuelven la pasta de cemento.
- e) Sulfatos, generan una reacción expansiva con el cemento.
- f) Alcalis, proporcionan una reacción expansiva con los agregados.

La disponibilidad de humedad, la presencia de sustancias agresivas en la humedad y la temperatura son características que identifican un ambiente particular.

1.3. IMPACTO SOCIOECONÓMICO DE LA DURABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN

A lo largo de la historia de la industria de la construcción se han tenido experiencias, que aunque a veces amargas por sus costos sociales o económicos han aportado a la ingeniería civil conocimientos técnicos de gran valor al enfrentarlas. El avance científico y tecnológico que se tiene hoy en día acerca de la durabilidad del concreto es resultado de la experiencia y del ingenio humano para entender los procesos físicos y químicos, así como para evaluar, modificar y evitar en la medida de lo posible tales daños. A continuación se presentan algunos casos de los varios aspectos de durabilidad del concreto en la industria de la construcción.

⁵ *Durable Concrete Structures, CEB, p. 37.*

⁶ *Ibid.*

1.3.A. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DE LA CORROSIÓN:

Desde que se empezó a utilizar el concreto reforzado en la construcción, alrededor de 1867.⁷ los ingenieros y diseñadores del pasado aplicaron principios de sentido común que nacieron fuera de las prácticas legítimas de la ingeniería. El resultado eran estructuras que presentaban una buena resistencia a la corrosión y que se encontraban dentro de los márgenes de seguridad para permitir un funcionamiento normal. En la actualidad la carga de las difíciles restricciones financieras y la tendencia a una mayor competitividad han obligado al uso de técnicas de ingeniería más avanzadas y no experimentadas; con el propósito de ahorrar recursos económicos.

La corrosión es un problema internacional, en 1990 se realizó un estudio del impacto que producen los costos económicos originados por la corrosión, el resultado fue que entre el 2 y el 5% del PNB de cada país se destina a la corrosión. Según Castro y Castillo entre un 15 y 25% se pudo haber evitado si se hubiese aplicado la tecnología existente para contrarrestarla.⁸ A la fecha en México no se tienen datos que permitan determinar la situación actual. En encuestas realizadas se ha detectado que más del 90% de las industrias presentan deterioros por corrosión.⁹ En un trabajo realizado recientemente se detectó que los costos por corrosión rebasan el 8% del PIB estatal (Yucatán).¹⁰

A continuación se indican algunos casos históricos e interesantes de daños causados por la corrosión en la industria de la construcción.

- A) En el Reino Unido el diseño innovador de la suspensión de un puente sobre el *Río Severn* fue anunciado con gran optimismo cuando el puente se abrió en 1966. Los primeros problemas aparecieron en 1978. El techo de acero incluye un innovador diseño en el cual secciones en cajas aerodinámicas cerradas intentan eliminar la atmósfera marina del interior de las cajas. Se encontraron grietas en las cajas del techo de acero y por 1983 la consternación, que cada día era mayor, se vió expresada sobre el futuro de la principal arteria que liga Inglaterra con el sur de Gales. El departamento de transporte insistió que, si existía alguna falla por fatiga de los cables en el sistema de suspensión, esta había sido causada inesperadamente por la carga del tráfico, y agravada por la corrosión, como resultado de una inadecuada protección contra la atmosfera saturada de sales del estuario *Severn*. Las estimaciones del costo de la reparación en 1983 se calculaban cercanas a los 30 millones de libras. Se tomó la decisión de construir un nuevo puente.
- B) En el puente *Penhalm* en Lincoln, (Inglaterra), con 350 m de largo, se presentaron problemas. Una carretera de doble sentido soportada por columnas había sido construida en 1957, en un tiempo donde era imposible prever el gran incremento que tuvo el uso de las sales descongelantes en los caminos para permitir el paso de vehículos en temporadas con nevadas, lo cual sucedió en la década de los 60's. La penetración de las sales en el pavimento había causado una corrosión severa del acero de refuerzo en el concreto de los puentes carreteros. Se reportó que el costo era excesivo, aun si se reparaba austeramente. El reporte concluía que se habían encontrado otros casos similares en la misma Inglaterra.

En Estados Unidos el uso de sales descongelantes aumento de 0.6 millones de toneladas en 1950 a 10.5 millones de toneladas en 1988.

⁷ El invento del concreto reforzado se ha atribuido generalmente al francés J. Monier, quien al parecer lo aplicó en 1867, sin embargo, ingleses, franceses y americanos se han disputado el invento.

⁸ CASTRO B. Pedro y CASTILLO, R. Corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Construcción y Tecnología*, México, Agosto, 1995.

⁹ AVILA J. y GENESCA J. Más allá de la Herrumbre. Referenciado por CASTRO P. *et. al.* en *Corrosión de estructuras de concreto armado*. Cap. I.

¹⁰ OROZCO J. "Cálculo de las pérdidas económicas por corrosión en el estado de Yucatán y su Impacto en el PIB estatal". Referenciado por CASTRO P. *et. al.* en *Corrosión de estructuras de concreto armado*. Cap. I.

Adicionalmente a la corrosión originada por las sales descongelantes en los puentes, se tiene el daño por corrosión provocado en los automotores, en 1974 se reportó que el costo de los daños ascendía a 5 billones. La rehabilitación de estos puentes ha sido una importante práctica de ingeniería.

- C) El Centro *Pompidou* localizado en París, Francia mostró señales de corrosión severa en 1981, a menos de 5 años del término de su construcción (1976). El monitoreo de la corrosión empezó en 1979 cuando los primeros efectos se encontraron en el exterior de la armadura metálica. La protección al fuego se realizó con mantas de fibra mineral cubiertas con hojas de acero inoxidable. Los nodos fueron protegidos con concreto y capas plásticas para prevenir la penetración del agua. Al parecer el agua penetró de un modo u otro, durante el verano de 1978-1979 congelando el agua atrapada, propiciando desconchamientos. Debido al peligro que representaba para el público la caída del aislamiento contrafuego, se removieron las capas, dejando a la estructura de acero protegida solamente con un recubrimiento metálico de zinc de espesor de 7.5 μm .
- D) En diciembre de 1979 el puente *Point Peasant* en Ohio, EU, colapsó matando a 46 personas. La causa del desastre fue la falla de una varilla, por corrosión bajo esfuerzo.

Los puentes no son las únicas estructuras susceptibles a corrosión, pero si proveen un buen ejemplo de los efectos catastróficos de los problemas más triviales de corrosión. En algunas ocasiones los problemas de corrosión pueden ser originados por otras causas inesperadas.

- E) En diciembre de 1979 la Ciudad de Westminster, en Londres, Inglaterra reportó que había problemas con los postes de luz. Era sugerido que los principales responsables de la corrosión que había ocurrido en las bases de los postes eran las mascotas caninas. Las mascotas de la ciudad diariamente depositaban 2,000 litros de orina, la mayoría en la base de los postes de luz, lo que originaba un incremento mayúsculo de la velocidad de corrosión.
- F) Uno de los principales problemas del puente de la vía férrea en el centro de Londres también se atribuía a estas causas. Las visitas repetitivas de las mascotas habían causado una severa grieta por corrosión en una parte de la estructura a la cual era posible darle mantenimiento.¹¹
- G) Los postes de luz elaborados con concreto sufren intensas exposiciones por parte de los caninos. La urea de la orina penetra en el concreto y provoca en el largo plazo la corrosión del acero de refuerzo, como los materiales producto de la corrosión ocupan un mayor volumen se provocan esfuerzos y el recubrimiento sufre agrietamientos que posteriormente provoca desprendimientos de este. La figura 1.4 muestra un caso de este tipo en la Col. Nápoles, Ciudad de México.
- H) La intrusión de los iones de cloruro, que provocan corrosión, en conjunto con la carbonatación no se contempló en Estados Unidos. De acuerdo a un estudio realizado por el TR9 en 1984 la infraestructura tenía serios daños.



Fig. 1.4 Corrosión en un poste de luz. Col. Nápoles, Ciudad de México, 2003

¹¹ Cfr. TRETHERWEY, K.R. and CHAMBERLAIN J. Corrosion for Science and Engineering, Cap. 1p.13-16. edit. Longman.

Solamente en puentes se consideraba que 253,000 tenían las losas de plataforma deterioradas, con todo y que algunos no tenían más de 20 años de edad. Se calculó que anualmente se tendrían 3,500 nuevos puentes deficientes. El país más desarrollado y rico del mundo no tenía presupuesto para hacer las reparaciones necesarias, por lo que se creó un nuevo impuesto adicional. A través del decreto ISTE A se gastaron a lo largo de 6 años-hasta diciembre de 1997, 20, 000 millones de dólares anualmente para hacer frente a las reparaciones, y todavía quedaron puentes pendiente por reparar.¹²

1.3.B. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DE LA REACCIÓN ÁLCALI – SÍLICE

La reacción álcali - sílice requiere la presencia de humedad, por lo que es más susceptible de detectarse en estructuras hidráulicas o marinas. La reacción es estimulada por ciclos de secado y humedad. El fenómeno ha sido conocido desde hace varios años.

El primero en detectarse fue en la planta hidroeléctrica *Buck*, en Virginia, EE.UU. en 1922, diez años posteriores al término de su construcción. En 1935 estudios petrográficos indicaron que las expansiones y las grietas se originaron por las reacciones entre el cemento y la filita usada en el agregado grueso.

Stanton en 1940 publicó una descripción del fenómeno de su experiencia en California y 10 años después de investigación intensa acerca del deterioro causado por la reacción álcali - sílice al concreto se había identificado en 14 estados de EE.UU.¹³ Este fenómeno se ha reportado en varios países: Dinamarca, Gran Bretaña, Alemania, África del Sur, Canadá, Chipre, Nueva Zelanda, Islandia.

Existe el caso de la presa *Val de la Mare* en la *Isla Jersey*, Gran Bretaña, que se construyó entre los años 1957 y 1962, época en que no se tenían antecedentes en Gran Bretaña de daños ocasionados por la reacción álcali - sílice. Probablemente por este motivo no se consideraron medidas preventivas a pesar de que los agregados tenían sílice reactiva (calcedonita) y parte del cemento suministrado tenía alto contenido de álcalis (más del 1% como Na₂O). Nueve años después de construida (1979) se convirtió en la primera estructura que presentaba la reacción álcali - sílice en las Islas Británicas. La presa fue desahuciada. Toda una inversión de gran magnitud y tiempo se interrumpió por el desconocimiento de dicha reacción entre los componentes de la pasta de cemento y de los agregados. Los costos económicos resultaron caros debido a que en 1983 se estudiaba la posibilidad de reponerla, es decir, realizar nuevamente un proyecto hidráulico y exploraciones geológicas de encontrar un sitio adecuado para sustituirla.¹⁴

En México se han tomado algunas medidas preventivas para evitar dicha reacción en estructuras importantes de infraestructura nacional (*vid.* Cap. IV).

1.3.C. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DEL ATAQUE POR SULFATOS

Las estructuras que están más expuestas al ataque de sulfatos, por sus características son las hidráulicas como canales y tuberías, así como los cimientos en torres de transmisión y pavimentos de carreteras.

Un caso interesante que demuestra la importancia de considerar los diversos aspectos de la durabilidad es el de la presa *Alcova*, sobre el río *North Platte*, en *Wyoming*, EE.UU., presa de terraplén que tiene 81 m de altura. La construcción inició en 1935 y concluyó en 1938. Dicha presa cuenta con un vertedor de canal abierto revestido de concreto.

¹² RIVERA VILLARREAL, R. Prefacio del libro "Corrosión en Estructuras de Concreto Armado" CASTRO BORGES, P. Et . al.

¹³ Cfr. CAMPBELL-ALLEN, DENISON AND ROPER HAROLD, *Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair*. Cap.1. Logman Scientific and Technical. Cap.1.p.10.1991.

¹⁴ MENA FERRER, MANUEL, *Reacción álcali sílice en el concreto: causas, efectos y medios de prevención*. Revista IMCYC, agosto 1983, México.

Con el paso de los años el deterioro progresivo del concreto en el piso del vertedor originó erosión y descascamiento severos. En 1967 se decidió reparar el vertedor, por lo que se tomaron corazones para indagar las causas. La resistencia a la compresión fue de 414 kg/cm²; no obstante la resistencia a la tensión era solamente del 2.2 % de la de compresión (9 kg/cm²), el módulo de Young resultó de 177,859 kg/cm², es decir, la mitad de lo esperado.

El estudio petrográfico mostraba que el concreto había sido alterado por ataque de sulfatos. Se encontraron depósitos blancos de sulfoaluminato de calcio (etringita) en cantidades moderadas y espaciadas en todas las superficies de las muestras. También se encontraron algunos depósitos de gel de sílice, generalmente concentrados en unos cuantos guijarros. Por su parte el concreto de las paredes estaba sano y no presentaba daño alguno por esta razón. En esa época existía un manantial que nace en la ladera de la colina situada a la izquierda del vertedor, fluye hacia el extremo inferior de la estructura en una corta distancia, y desaparece bajo el suelo.

El análisis químico del agua de este manantial indicó que tenía un contenido de sulfato soluble igual a 1,370 ppm; otras aguas subterráneas de la misma zona, tenían suficiente cantidad de sulfatos solubles para ejercer un ataque. La conclusión fue que el deterioro se atribuía principalmente al ataque de los sulfatos presentes.¹⁵

1.3.D. COSTOS DE MANTENIMIENTO IMPUTABLES A DEFECTOS DE DURABILIDAD

Debido a que los procesos deletéreos que involucra la durabilidad requieren tiempo para mostrarse macroscópicamente, frecuentemente se detectan dichos procesos de deterioro cuando ya están avanzados y su reparación tiene un mayor costo. Incluso en algunos casos es preferible realizar una demolición total de la estructura que ejecutar un mantenimiento mayor.

Los costos por mantenimiento a estructuras dañadas es elevado, sólo en Estados Unidos se ha evaluado que la mitad de los 575,000 puentes tienen alguna afectación por corrosión y que de ese porcentaje el 40% ya se reporta con deficiencias estructurales. Se calcula que los costos por reparación ascienden a USD \$50 billones. En Brasil, Canadá, Reino Unido, entre otros se han reportado casos parecidos.¹⁶

Debido a que actualmente ya se tiene una infraestructura construida es de vital importancia invertir nuevamente en su mantenimiento, con las repercusiones de que los recursos destinados para este fin podrían destinarse a otros aspectos. En países subdesarrollados estos recursos se pueden aplicar en otras necesidades sociales o en incrementar o mejorar la infraestructura nacional.

1.4. DURABILIDAD E INFRAESTRUCTURA

Es hasta las últimas décadas que los reglamentos, normas y en la práctica constructiva se ha puesto atención a los aspectos de durabilidad del concreto. El uso del concreto reforzado y presforzado hoy es muy amplio. La variedad de situaciones a las que se puede encontrar sujeto el concreto reforzado y presforzado requieren de un amplio conocimiento de las propiedades de los materiales disponibles. La interacción de dichas propiedades en la práctica debe ser entendida por el diseñador competente.

Las diferentes aplicaciones que tiene el concreto también requieren distintas concepciones de durabilidad, de acuerdo con la naturaleza del uso y agresividad del medio ambiente: una cimentación expuesta a sulfatos requiere otros aspectos a cuidar que en un reactor nuclear o que una plataforma marítima.

¹⁵ HARBOE EDWARD M. Resistencia del concreto a los sulfatos: experiencias de campo. REVISTA IMCYC, abril, 1983, México.

¹⁶ CARRION MIRAMONTES, Javier, et. al Estudios de Corrosión en Puentes de Concreto.. IMT, SCT. p. IX.

La durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado y presforzado, requiere de la óptima selección de innovadores materiales, procedimientos de diseño y construcción, así como de programas de mantenimiento para incrementar la vida de servicio de la estructuras, con el objetivo de reducir costos y obtener ahorros a largo plazo. Un mantenimiento planeado es parte esencial de un buen diseño.

Ningún diseñador o propietario espera que los sistemas contra incendios o la instalación eléctrica funcione adecuadamente sin inspección y mantenimiento, sin embargo, es un supuesto no hablado o escrito que las estructuras de concreto servirán indefinidamente sin ninguna atención.

El plan de mantenimiento es más definido por la naturaleza de las construcciones de concreto reforzado, donde la inspección frecuentemente es difícil de llevar a cabo. Las técnicas de inspección deben ser consideradas por el diseñador desde el principio. Algunos problemas pueden detenerse a tiempo si se identifican y tratan adecuadamente, antes de que se extiendan en proporción epidémica. Por ejemplo, la atención temprana de la delaminación de las fachadas de concreto puede detener un problema que podría destruir o dañar la fachada completa de la edificación. Esta atención frecuentemente no proveída, no solamente refleja la escasez de comunicación entre diseñador y propietario, también refleja el escenario actual de la responsabilidad y del aseguramiento de calidad. Existe una atención creciente en la edificación y en la industria de la construcción hacia el aseguramiento y control de calidad.

Frecuentemente se ha expresado que el costo de proveer una vida útil larga a las construcciones resulta prohibitivo y requiere una gran inversión de recursos, que se requieren y se pueden destinar a otros aspectos. Un buen diseño que considera los riesgos del ambiente, no es más caro que el diseño que los ignora.

La construcción realizada por operadores competentes, mano de obra calificada y una buena supervisión no tiene costos inherentes adicionales y tal vez como resultado de un funcionamiento mejor no es más cara que el diseño que no contempla tales condiciones. El costo de los ingredientes de un buen concreto no es diferente al costo de los mismos ingredientes para realizar un concreto pobre. Son los costos de mantenimiento y reparaciones a largo plazo los que pueden incrementar su costo final. Esto sucede cuando la construcción se realiza inicialmente con escaso o ningún control de calidad.

1.4.A. CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO

Las construcciones de concreto reforzado tienen un uso y aplicación muy amplio en nuestro país. En esta sección consideraremos construcciones destinadas a usos comerciales, residenciales, o de infraestructura con bajo y alto riesgo.

La cimentación de cualquier estructura es de importancia vital; son las menos sensibles a la inspección después de que su construcción haya sido concluida o cuando está bajo construcción. Por este motivo el posible ataque por agua freática al concreto o al acero debe ser examinado en la etapa de diseño. Las condiciones deletéreas que deben ser consideradas son el contenido y/o transporte de sulfatos en el agua freática, agua freática ácida y los desperdicios industriales agresivos. Debe considerarse también los cambios en el suelo natural, tales como árboles, cambios en el nivel freático debidos a bombeo o cambios de drenaje o descargas futuras, e incluso el esparcimiento de desperdicios industriales que pueden introducir modificaciones de riesgo a la cimentación de concreto existente.

La imposibilidad de examinar el refuerzo ante posible corrosión significa que se requiere una atención especial durante la construcción para asegurarse que el acero esté apropiadamente colocado y protegido. La posibilidad de una célula gigante de corrosión no debe ser despreciada.

Aunque la situación más usual es que el acero de la superestructura permanezca anódico mientras que el de la cimentación (subestructura) permanezca catódico, lo contrario no es imposible en el acero de la cimentación, la cual no es visible a la inspección y puede convertirse en anódico debido a otro metal en la construcción. Las figuras 1.5 y 1.6 muestran elementos de cimentación del Distribuidor Zaragoza en la Ciudad de México, en su etapa de construcción.

La envoltura externa de la construcción, incluyendo el techo y la fachada están bajo ataque continuo por parte de la atmósfera. El clima provoca debilitamiento químico y físico, cambios de dimensiones grandes, daños por viento y penetración del agua de lluvia, asistida por el viento. En otras partes del mundo las condiciones son más dañinas aún, para lo cual se requiere recurrir a otros materiales de construcción existentes.

Por ejemplo, el clima de las Islas Británicas es excepcionalmente detrimental para las construcciones. En el sureste de Australia los cambios de humedad de 50 % acompañados de saltos de 20 °C pueden ocurrir en pocas horas. En la costa oeste el promedio de humedad puede permanecer por varias horas al 50%, condición favorable para que la carbonatación tenga lugar. Las zonas del noreste están sujetas a condiciones tropicales de alta temperatura y alta humedad por largos períodos. En Estados Unidos suceden periodos prolongados de congelamiento por lo que se presentan frecuentemente ciclos de congelamiento – deshielo. En México esta situación se presenta solamente en ciertas zonas del norte del país y en épocas de invierno exclusivamente. Adicionalmente, en todos los países industrializados la incidencia de contaminación industrial, como la lluvia ácida, está incrementándose peligrosamente.



Fig. 1.5. Refuerzo de cimentación. Distribuidor Vial de Zaragoza. Etapa de Construcción. Ciudad. de México, 2002.



Fig. 1.6. Zapata de cimentación. Distribuidor Vial de Zaragoza. Etapa de Construcción. Ciudad. de México, 2002.

Ninguna construcción puede diseñarse para combatir todas estas formas de ataque, pero su variedad conduce a concluir que no es adecuado proveer la misma envoltura para todas estas situaciones. El clima general y local tiene una influencia profunda en los requerimientos y desempeño del concreto externo. De modo que lo más conveniente al construir una estructura es considerar las condiciones particulares a las que estará sujeta durante su vida de servicio.

El concreto expuesto en el interior de una construcción debe comportarse bien, de modo que no refleje inaceptabilidad y debe estar libre de grietas. La extensión de una grieta, la cual se considera aceptable, depende del uso que se le dará a la construcción, de la distancia a la cual se puede ver y la naturaleza de la superficie del acabado. Los requerimientos de los muros en los cuales se exhibirán pinturas en un museo son ampliamente diferentes de aquellos que son aceptables para un cuarto de máquinas. Finalmente la estructura completa debe ser compatible en términos de movimiento con los acabados y los accesorios. Las construcciones modernas son especialmente susceptibles al cambio dimensional.

En el caso de estructuras de gran altura, el flujo plástico y la contracción por secado de columnas y núcleos resultan en movimientos grandes y diferenciales de importancia.

Las cargas solares que se impactan en las construcciones y los gradientes de humedad y temperatura que son impuestos por el aire acondicionado, tanto frío como caliente pueden inducir movimientos diferenciales entre partes de la estructura y entre la estructura y los acabados. La compatibilidad química es también necesaria. Por ejemplo los tabiques que exudan sulfatos no deben ser colocados contra el concreto o mortero, los cuales son susceptibles al ataque por sulfatos.¹⁷

1.4.A.1. PISOS

La aplicación de recubrimientos es común en las construcciones, por tanto, la presencia de algunas grietas en la superficie superior es frecuentemente aceptable siempre que el recubrimiento no refleje las grietas que estén por debajo. La falla del recubrimiento para permanecer adherido es siempre un defecto serio, para evitar su desprendimiento algunos componentes del curado deben evitarse; en el caso de losas sobre el suelo se debe evitar la penetración de humedad. Las losas pueden presentar deflexiones a largo plazo, que implican agrietamientos de acabados. Estas deflexiones se atribuyen frecuentemente al flujo plástico bajo carga, pero se ha demostrado que son más frecuentes las consecuencias de la contracción diferencial, por lo que esta última condición debe considerarse.

1.4.B. ESTRUCTURAS INDUSTRIALES

Adicionalmente a los requerimientos de las estructuras de concreto reforzado, las que tengan un uso industrial deben cumplir ciertas características adicionales. Dependiendo del tipo o uso industrial serán las características de que debe cumplir. Los pisos industriales comúnmente no llevan una cubierta, excepto un recubrimiento integral. Los pisos industriales están frecuentemente sujetos a cargas vivas vehiculares (montacargas), que frenan y aceleran en distancias cortas, así como a personas y a cargas muertas, como mercancías.

El tráfico pesado es especialmente dañino para juntas o grietas en un piso y el control del agrietamiento originadas por varias causas, incluyendo la carga viva que destaca por su importancia, como es el caso de determinados procesos industriales que involucren procesamiento de alimento, manejo de animales y sus productos derivados.

En el caso de las plantas químicas se requieren cuidados especiales tanto en los pisos como en otros elementos de la estructura con la finalidad de que resistan ácidos y sustancias orgánicas. La industria cervecera y la fotográfica son algunos ejemplos, debido a la cantidad de sustancias químicas dañinas al concreto que se manejan. El concreto convencional no satisface los requerimientos, por lo que es necesario considerar otros sistemas, como la impregnación de polímeros, recubrimientos epóxicos o poliméricos, los cuales están diseñados para cumplir con estas solicitudes.

Algunos procesos industriales sujetan a las estructuras de concreto a altas temperaturas, por ejemplo, hornos metalúrgicos y calentadores. En las chimeneas el concreto trabaja normalmente a temperaturas superiores al ambiente. Las cimentaciones y los soportes asociados con chimeneas probablemente estén sujetos al calor radiante de los gases calientes. La respuesta del concreto a elevadas temperaturas es por tanto de fundamental importancia para un diseño exitoso. También las reacciones químicas posibles entre los materiales de recubrimiento y los gases calientes pueden resultar factores de diseño decisivo. Cuando un recubrimiento se suministra para proteger una chimenea de concreto, existe la posibilidad de goteo de gases corrosivos, como consecuencia de su condensación.

¹⁷ CAMPBELL-ALLEN, DENISON AND ROPER HAROLD, *Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair*. Cap.1. Logman Scientific and Technical, 1991.

La naturaleza masiva de la mayoría de los concretos para instalaciones industriales significa que la capacidad del concreto para generar calor en el proceso de hidratación del cemento deber ser considerado.

Los silos de concreto son frecuentemente usados para almacenar sólidos, gases y líquidos. La carga de los sólidos contenidos en el compartimiento tales como trigo y carbón, depende de las fuerzas friccionantes entre el muro de concreto y el material granular, por tanto un conocimiento de las condiciones de superficie es esencial.

Las necesidades especiales para silos que contienen líquidos y gases son libres de goteo y resistentes al ataque químico. Los silos criogénicos usados para el almacenamiento de gases licuados requieren que el diseñador esté familiarizado con el comportamiento del concreto a muy bajas temperaturas (aproximadamente al cero absoluto) y con la respuesta del concreto a ciclos de baja temperatura¹⁸

1.4.C. PAVIMENTOS HIDRÁULICOS

Los pavimentos, ya sea para autopistas, aeropistas u otras estructuras de tráfico deben ser capaces de soportar las cargas del tráfico con una calidad de rodaje aceptable y sin un deterioro insatisfactorio durante su vida útil. Una primera función del concreto es por tanto distribuir las cargas de las llantas de los vehículos o aeronaves, para que no induzcan condiciones en la sub-base que ésta no pueda sostener. Los pavimentos deben diseñarse y construirse para minimizar las condiciones de relajamiento de los esfuerzos; se identifica al relajamiento de los esfuerzos como defectos de superficie, agrietamiento, deformaciones y deficiencias de juntas, pero la mayoría de estas condiciones no se pueden clasificar como problemas de durabilidad. Los tres problemas principales de durabilidad relacionados con los materiales del concreto son la resistencia al congelamiento – deshielo, las reacciones álcali – agregado y la abrasión. Tanto el congelamiento – deshielo como la abrasión están fuera del marco teórico de esta tesis.

Un pavimento de concreto expuesto a congelamiento – deshielo funcionará cuando no esté críticamente saturado, la pasta de cemento tenga el sistemas de vacíos de aire adecuado, los agregados no sean susceptibles al congelamiento y los químicos del concreto no sean aplicados en concretos inmaduros. La saturación crítica puede controlarse con buenas prácticas de diseño, deben diseñarse para tener un buen drenaje y juntas , para mantener los cambios de volumen al mínimo. Las juntas frecuentemente son las partes más débiles de un pavimento por lo que requieren atención especial.

Para la reacción álcali – sílice debe especificarse un cemento bajo en álcalis y pueden emplearse cementos mezclados con ceniza volante, escorias de alto horno granulada y pulverizada o con humo de sílice. Para la reacción álcali – carbonato debe especificarse un cemento bajo en álcalis. Para asegurar un concreto resistente a la abrasión debe especificarse una adecuada resistencia a la compresión y la calidad de los agregados.¹⁹

Un pavimento de concreto tiene que soportar las carga a la fatiga de los variantes de tráfico y cambios frecuentes de las presiones internas originadas por cambios de la temperatura y gradientes de humedad. Durante el día el calor solar de la superficie tiende a deformar la losa, de modo que la losa está en tensión. En la noche sucede lo contrario.

Los gradientes de humedad tal vez refuercen o cancelen estos efectos. El tráfico se suma a estos ciclos, el cual puede ocurrir algunas veces a lo largo del día, lo que puede conducir al agrietamiento con efectos tanto en la durabilidad como en la calidad del pavimento y del rodaje.

¹⁸ CAMPBELL-ALLEN, DENISON AND ROPER HAROLD, *Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair. Cap.1.Logman Scientific and Technical.1991.*

¹⁹ LAMOND, J.F. *Durability of Concrete Pavements.. Durabilidad del concreto. UANL.1993*

La resistencia al patinaje es un requerimiento esencial para la seguridad de un pavimento. El proveer una textura a la superficie que resista el uso es el primer requerimiento para aeropuertos y autopistas, los problemas de aquaplaneo deben ser considerados también. Se requiere de una descarga rápida del agua en la superficie, y al mismo tiempo se asegura que la película de agua está rota o interrumpida para que permita el contacto entre llanta y pavimento. Si una superficie apropiada es producida para prevenir el acuaplaneo, ésta debe continuar operando sin resultar afectada por usos subsecuentes.

Las carreteras, aeropistas y las estructuras asociadas representan una fuerte inversión pública y el público espera que dure y que no sea interrumpido el tránsito por mantenimiento frecuente. Los costos por las reparaciones de dichos pavimentos pueden ser de menor orden comparados con los costos que se ocasionan a terceros por las reparaciones, costos de mercancías paradas o que no se pueden trasladar de una ciudad a otra, costos hora – hombre. Al evaluar el costo de un pavimento y seleccionar la vida útil que éste tendrá sería conveniente considerar estadísticamente algunos costos que no necesariamente están ligados a la construcción, como los descritos previamente.

Algunos estudios en Estados Unidos han mostrado que la vida de servicio promedio de un pavimento de concreto hidráulico en ese país es de 27 años, se entiende por vida de servicio promedio al tiempo promedio requerido para la primera rehabilitación significativa por razones estructurales.

Los pavimentos al igual que todas las demás estructuras tienen que ser considerados integralmente, es decir, se debe tener presente los materiales empleados, el diseño geométrico, los procedimientos de construcción y mantenimiento. El proceso de construcción de un pavimento hidráulico se muestra en la figura 1.7. Los pavimentos pueden repararse con el empleo de cubiertas o revestimientos. Los métodos de unión y el posible empleo de concretos especiales, tales como el concreto con fibras refuerzo y los adhesivos demandan especialización de los reparadores.²⁰



Fig.1.7. Pavimento hidráulico en construcción.
Fuente: Obras, mayo, 2003.

I.4.D. PUENTES

El concreto es un material idóneo para puentes, lo que se manifiesta en su uso cada vez más frecuente en todas las partes del mundo. Las razones son funcionales y económicas, pero las ventajas estéticas son también importantes.

Aunque el concreto sufra varias formas de deterioro, el registro de puentes bien diseñados y construidos es bueno y podría ser mejor si se tuviera un mayor cuidado. En la extinta República Federal Alemana se reportó en 1982 que aunque 30,000 puentes de concreto presfocado se habían construido en los 35 años previos, solamente estaban dañados de 500 a 600 puentes. En 40 puentes el daño era serio. Un molesto tráfico y altos costos resultaron. Aunque la proporción de los puentes dañados severamente es pequeña (0.14%) cualquier incremento originaría una carga financiera pesada para las próximas generaciones. Los puentes combinan los riesgos de los pavimentos y de las construcciones de concreto reforzado, adicionalmente algunos se encuentran en climas fríos sujetos a ataques por cloruros severos a causa de las sales descongelantes. Algunos puentes también han sufrido las consecuencias del incremento exacerbado del uso de las sales descongelantes tanto en Estados Unidos como en Inglaterra.

²⁰ CAMPBELL-ALLEN, DENISON AND ROPER HAROLD, *Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair*. Cap.1. Logman Scientific and Technical. 1991.

En México los puentes y estructuras viales de concreto tienen una amplia aceptación por sus características; en la figura 1.8. se presenta su uso para una línea del Sistema de Transporte Colectivo.

La exposición de varias partes de un puente a agentes corrosivos depende de la geometría de la estructura completa y de su relación con la sal dispersada, así como de los vientos, las mareas y la efectividad del drenaje. El comportamiento resultante requiere un entendimiento de la acción y de la reacción de los materiales, así como del clima general y local.²¹



Fig. 1.8 Línea B del Sistema de Transporte Colectivo (Metro). Estructura de Concreto, Ciudad de México, 2002.

Otro caso importante son los puentes presforzados, que han logrado la construcción de puentes con claros antes impensables. Sin embargo, la tensión provocada en el acero de las estructuras presforzadas tiene un precio: los aceros embebidos son más susceptibles a la corrosión denominada bajo esfuerzo, particularmente en aquellas regiones donde el medio ambiente es agresivo, como es el caso de prácticamente la totalidad de las costas de México.

1.4.E. ESTRUCTURAS MARINAS

La durabilidad en las estructuras marinas es la propiedad más importante del concreto marino, en lugar de las tradicionales propiedades de resistencia a compresión, módulo de elasticidad, flujo plástico o contracción. Mientras los esfuerzos se concentran en regiones de alta calidad del concreto, el proceso deteriorante del concreto se concentra usualmente en los más débiles, la mayoría en partes inferiores. La penetración de la humedad es un factor importante en este proceso de deterioro. Los efectos adversos están relacionados con la permeabilidad, porosidad, absorción de humedad, vínculo reducido entre materiales y resistencia a la tensión del concreto, esto es, en las insuficiencias del concreto que corresponden a problemas de durabilidad.

Conforme a la experiencia de campo y a los estudios realizados en estructuras en operación debe tenerse en cuenta las variaciones del clima local y global y la altura de las zonas de exposición. La construcción de un puente con pilas sumergidas y en ambiente marino se presenta en la figura 1.9.

1.4.F. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

Las estructuras hidráulicas son especialmente sensibles a la durabilidad por su condición de contacto constante con el agua. Históricamente se han reportado varias presas que han presentado problemas por durabilidad, causado por alguna reacción álcali – agregado o por ataque de sulfatos, entre otros. El efecto del agua en el concreto puede presentarse de tres formas distintas:

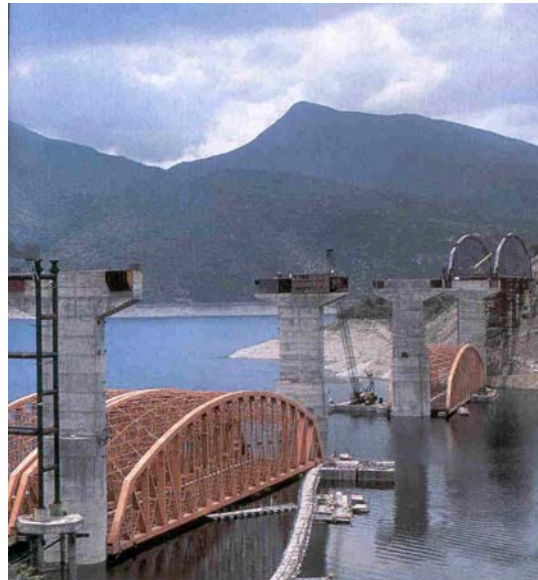


Fig. 1.9 Puente en etapa de Construcción. Fuente: Obras, 2003

²¹ *Ibid.*

- a) El ataque químico directo puede ocurrir. El agua por sí misma puede ser corrosiva. Puede contener sales las cuales reaccionan con los componentes del cemento hidratado o con los agregados, los sulfatos son los ejemplos más comunes. La presencia de cloruros puede originar corrosión en el acero de refuerzo.
- b) El agua puede afectar la superficie del concreto por el flujo y por la materia abrasiva que está suspendida en el flujo. Una velocidad alta del flujo puede originar cavitación, la cual puede causar una erosión extensa y rápida aún en los concretos de alta calidad y aun puede penetrar placas de acero. Las burbujas de vapor se forman en la corriente del agua cuando la presión en el líquido es reducida. Estas burbujas de vapor se dirigen aguas abajo y entrando a una zona de mayor presión colapsan súbitamente y con un gran impacto. El daño producido por cavitación se reconoce por los hoyos y las picaduras formadas, las cuales se distinguen de la superficie más lisa producida por la abrasión de los sólidos en el flujo del agua. Si el flujo es inseguro, la presión fluctuante pueden actuar en grietas y aberturas para desalojar partículas de concreto.
- c) La tercera forma prevalece en estructuras marinas, envuelve la acción de las mareas por las cuales las sales son depositadas en ciclos de humedecimiento y secado y subsecuentemente rompen el concreto y corroen el acero de refuerzo. Las zonas de marea son especialmente propensas a acciones congelantes y rompimientos subsecuentes. El acero de refuerzo que se encuentra sujeto a carga por fatiga en presencia del agua es el más susceptible a fallar que cualquier otra condición de fatiga. Los cementos especiales pueden proveer de una resistencia al ataque químico por el agua de mar y por agua agresiva, pero su uso no necesariamente supera las varias formas del ataque físico o asegura que el refuerzo esté libre de corrosión.

En los siguientes capítulos se presentarán los aspectos de durabilidad con mayor detalle, así como las estrategias para mitigar los efectos deletéreos que pueden ocasionar en diversos tipos de estructuras.

1.5. CONCLUSIONES CAPITULARES

La durabilidad del concreto ha inquietado desde que éste surgió como nuevo material de construcción. Las lecciones históricas han permitido valorar su alto impacto socioeconómico y dar el lugar e importancia que le corresponde. Debido a que el deterioro del concreto requiere de largos períodos para identificarlo macroscópicamente, es conveniente primeramente prevenirlo en la etapa de diseño y posteriormente en la etapa de construcción. En el caso de que se haya detectado cualquier señal de deterioro del concreto o de corrosión en el acero de refuerzo, conviene monitorear e identificar sus causas y corregirlo antes de que se extienda más.

La durabilidad es una característica muy importante a considerar en la construcción de obras de interés nacional, privada o personal. Puede ser un factor determinante para la rentabilidad de un proyecto. En la medida que se considere se pueden evitar gastos a futuro, ya sea de tipo de mantenimiento mayor, operativo u otro.

Independiente del tipo de estructura que se tenga, edificio de concreto, pavimento, túneles, cimentaciones (pilotes, zapatas o cajones), aeropistas, canales, presas u otras estructuras marinas, centrales hidroeléctricas, etc. se debe evaluar si existe la posibilidad del desarrollo de efectos deletéreos por algún aspecto de durabilidad. Por lo que deben identificarse plenamente los factores de servicio y tipo de uso a los que la estructura estará sujeta a lo largo de su vida útil.

La durabilidad de la infraestructura de concreto reforzado y presforzado requiere de la óptima selección de innovadores materiales, procedimientos de diseño y construcción, así como de programas de mantenimiento para incrementar la vida de servicio de la estructuras, con el objetivo de reducir costos y obtener ahorros a largo plazo.

<i>CAPÍTULO I. DURABILIDAD E INFRAESTRUCTURA</i>	3
I.1. INTRODUCCION	3
I.2. ASPECTOS GENERALES	4
<i>I.2.A. AGRESIVIDAD AMBIENTAL</i>	5
I.3. IMPACTO SOCIOECONOMICO DE LA DURABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN.....	6
<i>I.3.A. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DE LA CORROSION:</i>	7
<i>I.3.B. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DE LA REACCION ALCALI – SÍLICE</i>	9
<i>I.3.C. IMPLICACIONES SOCIOECONÓMICAS DEL ATAQUE POR SULFATOS</i>	9
<i>I.3.D. COSTOS DE MANTENIMIENTO IMPUTABLES A DEFECTOS DE DURABILIDAD</i> .	10
I.4. DURABILIDAD E INFRAESTRUCTURA.....	10
<i>I.4.A. CONSTRUCCIONES DE CONCRETO REFORZADO</i>	11
<i>I.4.B. ESTRUCTURAS INDUSTRIALES</i>	13
<i>I.4.C. PAVIMENTOS HIDRAULICOS</i>	14
<i>I.4.D. PUENTES</i>	15
<i>I.4.E. ESTRUCTURAS MARINAS</i>	16
<i>I.4.F. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS</i>	16
I.5. CONCLUSIONES CAPITULARES	17

CAPITULO II. CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE QUÍMICO

II.1.INTRODUCCIÓN

La durabilidad del concreto al ataque químico está determinada por la velocidad a la que el concreto es destruido por alguna reacción química. Las reacciones químicas tienen lugar porque las sustancias agresivas son transportadas desde alguna parte, normalmente desde el medio ambiente al propio concreto, el cual tiene a su vez sustancias reactivas. Para que las reacciones químicas accedan al interior del concreto y adquieran importancia en la práctica se requiere la presencia de algún líquido o gas. En términos generales, la reacción entre la sustancia o agente agresivo y la sustancia reactiva del concreto sucede inmediatamente en que ambas se encuentran. Sin embargo, debido a la baja velocidad con que se transportan las sustancias agresivas al interior del concreto, las reacciones necesitan de varios años para apreciarse macroscópicamente, y por tanto ser perjudiciales al concreto. La accesibilidad de las sustancias agresivas está determinada por la permeabilidad del concreto y por la capa de pasivación de los productos de la reacción.

La mayoría de las aguas y suelos contienen químicos agresivos. Sin embargo, existen ambientes para los cuales la vida del concreto es reducida drásticamente. Si se prevén tales situaciones o ambientes se pueden tomar las medidas necesarias para evitar el deterioro o reducir la velocidad con que se presenta.

El ataque al concreto por sustancias sólidas y secas es raro, normalmente son sustancias líquidas que permean dentro del concreto las que originan el deterioro. Deben ser soluciones que estén por arriba de concentraciones mínimas. La velocidad de deterioro generada por un ataque químico de una solución que fluye, es decir, que tiene movimiento, es mayor a la que tiene una solución estancada. Un concreto que esté sujeto a soluciones agresivas bajo presión es más vulnerable que sin esta condición, debido a que la presión tiende a forzar la solución agresiva dentro del concreto. En la tabla 2.1 se sintetizan los agentes químicos más agresivos al concreto. En el apéndice C se presenta una tabla con diversas sustancias químicas y los efectos que producen al concreto.

Los ataques químicos más importantes que deterioran las propiedades mecánicas del concreto y por tanto su calidad y aspecto son.

- Ataque de sulfatos
- Exposición al agua de mar.
- Ataque de ácidos (sales de amonio, sales de magnesio y aguas suaves).
- Carbonatación.

II.2.ATAQUE DE SULFATOS

Los sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio son sustancias que deterioran al concreto, estos pueden causar expansiones, pérdidas de resistencia mecánica y eventualmente transforman al concreto en una masa blanda. Se encuentran en suelos adyacentes a las estructuras de concreto o disueltos en aguas freáticas o de mar. Cuando la evaporación sucede en una cara expuesta, los sulfatos pueden acumularse en la superficie de concreto, entonces incrementan su concentración y potencial para causar deterioro. Los sulfatos forman parte de las sales inorgánicas que se pueden encontrar en el suelo, en aguas freáticas y superficiales, o en agua de mar, aunque su concentración puede ser extremadamente variable.

Se considera que los sulfatos son inofensivos al concreto de cemento Pórtland si tiene una concentración menor a 0.01 % de sulfatos (SO_4) en el suelo, o menor a 150 ppm de sulfatos en el agua.²²

TABLA 2.1. EFECTO DE LOS QUIMICOS USADOS COMÚNMENTE EN EL CONCRETO					
Índice de ataque a temperatura ambiente	Ácidos inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Misceláneas
Rápido	Hidroclórico Sulfuro Nitrato	Acético Fórmico Láctico		Cloruro de aluminio	
Moderado	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio* > 20%∞	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sodio Sulfato de magnesio y sulfato de calcio	Bromo (gas) Licor sulfito
Lento	Carbónico		Hidróxido de sodio* 10 - 20%∞ Hipoclorito de sodio	Cloruro de amonio Cloruro de sodio Cianuro de sodio	Cloro (gas) Agua de mar Agua suave
Despreciable		Oxálico tartárico	Hidróxido de sodio *< 10%∞ Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio	Amonio (líquido)

* El efecto del hidróxido de potasio es similar al del hidróxido de sodio.
∞ Evitar agregados con sílice porque son atacados por fuertes soluciones de hidróxido de sodio.
Fuente: Guide to Durable Concrete p.8. ACI

Los sulfatos se pueden encontrar en la forma de sulfato de sodio (NaSO_4), sulfato de potasio (K_2SO_4), sulfato de magnesio (MgSO_4), y sulfato de calcio (CaSO_4), estas sales son altamente solubles.²³ El ataque de sulfatos ha ocurrido en varias partes del mundo, y es un problema particular en áreas áridas, como las grandes planicies del noreste de Estados Unidos, algunas provincias de Canadá, partes del oeste de Estados Unidos, en países cercanos al Golfo Pérsico y en Corea, por citar algunos. El ataque por parte de estos elementos se evita usando materiales cementantes apropiadas y una mezcla de concreto adecuadamente proporcionada, la cual debe sujetarse a un adecuado control de calidad.

II.2.A. MECANISMO DEL ATAQUE DE SULFATOS

Algunos autores han sugerido (Lea, 1971; Metha, 1976) que hay aparentemente dos reacciones químicas envueltas en el ataque de sulfatos en el concreto:

1. La combinación de sulfatos con los iones de calcio liberados durante la hidratación del cemento para formar sulfato de calcio, mejor conocido como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).
2. Y la combinación del ión sulfato y el aluminato de calcio hidratado para formar sulfoaluminato de calcio, mejor conocido como etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

Ambas reacciones incrementan el volumen sólido de los productos resultantes en más del doble de los compuestos originales que reaccionaron. La formación de etringita causa la mayor parte de la expansión y ruptura de los concretos causados por soluciones sulfatosas.

²² Manual de Tecnología del Concreto. CFE. Sección 3, p. 233.

²³ Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures. WEE T.H. et. a. ACI Materials Journal, V.97. September October, 2000.

Cuando los sulfatos están en contacto con la superficie del concreto producen un debilitamiento y posterior desintegración de esta. La razón es que debido a que los materiales resultantes de la reacción ocupan un mayor volumen no pueden acomodarse en los poros de concreto, por lo que se producen esfuerzos internos de tensión en el seno del concreto, que primeramente lo microfisuran para posteriormente desintegrarlo paulatinamente. La figuras 2.1, 2.2 y 2.3 muestran el efecto del ataque por sulfatos en el concreto. La importancia del curado del concreto ante el ataque químico se aprecia en la figura 2.2.

En contraste con el ataque ácido, donde el sistemas de poros es completamente destruido porque los ácidos reaccionan con los componentes del cemento, los sulfatos sólo atacan ciertos componentes del cemento.

Los principales parámetros que influyen en la expansión en la práctica son:

- Condiciones de exposición, por ejemplo, la severidad del ataque (cantidad de sustancia agresiva).
- Accesibilidad, por ejemplo, la permeabilidad del concreto (velocidad de transporte).
- Susceptibilidad del concreto. Por ejemplo, tipo de cementante empleado (cantidad de sustancia reactiva).
- Cantidad de agua disponible.

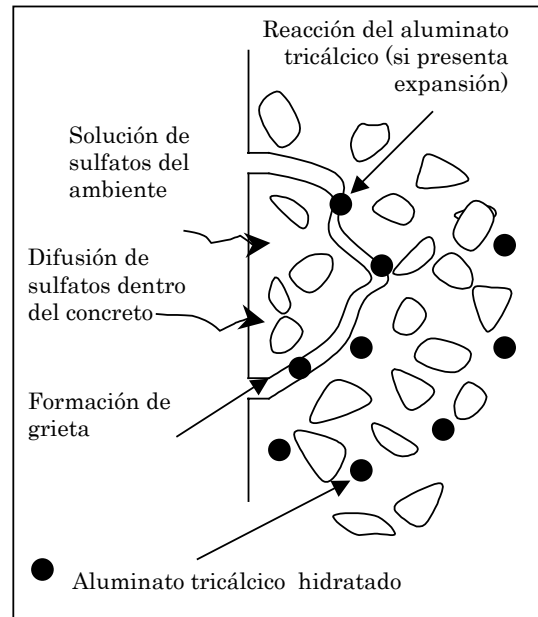


Fig.2.1. Efecto del ataque por sulfatos en el concreto. Fuente: Durable Concrete Structures, CEB p.21.

Algunos sulfatos son más agresivos que otros, por ejemplo, los sulfatos de amonio $[NH_4SO_4]$ y el sulfato de magnesio $[MgSO_4]$. Los mayores ataques de estos sulfatos se deben a que se descomponen los silicatos de calcio hidratados, además de reaccionar con aluminatos e hidróxidos de calcio. Ambos sulfatos se pueden encontrar en tiraderos industriales y en escurrimientos de tierras agrícolas.²⁴ De hecho Park Y.S (1999) ha reportado que el sulfato de magnesio es el que más afecta la reducción en la resistencia a la compresión del concreto bajo ambientes con sulfato, comparado con el sulfatos de sodio.²⁵

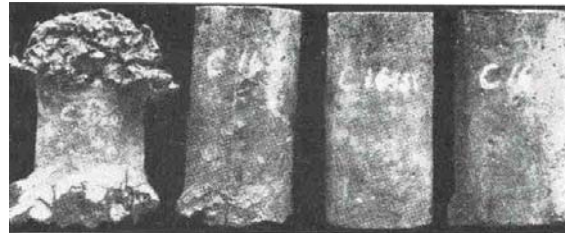


Fig.2.2 Efecto de la inmersión de concreto en solución de sulfato de magnesio. Cilindros de concreto de cemento Portland 1: 2:4, sumergido por 2 años en una solución al 10% de sulfato de magnesio, después de un curado inicial de 24 horas, 7 días, 28 días y 3 meses, respectivamente. Fuente: Biczók, I. Concrete Corrosion, Concrete Protection.

²⁴ PERKINS, Philip. Resistencia a la Corrosión de Estructuras Sanitarias de Concreto. p.27.

²⁵ PARK, Y.S. et.al. Strength Deterioration of High – Strength concrete in sulfate environment. Cement and Concrete Research, 29,1999,1397 – 1402.

II.2.A.1. CONDICIONES DE EXPOSICIÓN

Las condiciones de exposición pueden ser modificadas por la presencia de otros constituyentes diferentes a los sulfatos, que deben ser considerados, como por ejemplo, los iones de cloruro, que tienen una influencia moderada originada por la formación preferencial de cloroaluminatos, el cual no genera una expansión detrimental. Debido a este mecanismo el agua de mar solamente es moderadamente agresiva, a pesar de que por su alto contenido de sulfatos se puede considerar como severamente agresiva.

II.2.A.2. ACCESIBILIDAD DEL CONCRETO

El grado de impermeabilidad necesitado por un concreto para resistir el ataque de sulfatos se puede expresar con valores límite de profundidad de la penetración del agua en un período determinado de tiempo. Para fines prácticos estos se transforman en valores límite de la relación agua / cemento o agua / cementantes.

II.2.A.3. SUSCEPTIBILIDAD DEL CEMENTO

Los diferentes tipos de cemento se clasifican de acuerdo a su habilidad para resistir el ataque de sulfatos. La *American Society of Testing and Materials* (ASTM) limita los aluminatos a un máximo de 8% para una resistencia a los sulfatos moderada, y a un 5% para una alta resistencia a los sulfatos. En Europa un límite de 3% normalmente es aceptado para una alta resistencia a los sulfatos.²⁶

Es importante considerar el tipo de cemento a escoger para resistir el ataque por sulfatos. Debe considerarse adicionalmente la posibilidad de ataques combinados, lo que puede modificar la elección del cementante a usar. Por ejemplo, el comportamiento diferente de un cemento Pórtland de baja alúmina y un cemento con escoria de alto horno con alto contenido de escoria, ambos son cementantes con alta resistencia a los sulfatos, pero tienen una permeabilidad muy diferente a los iones de cloruro (como en el agua de mar o en el deshielo con cloruros); el cemento Pórtland de baja alúmina resulta en una de las más altas permeabilidades para los iones de cloruro. Lo que debe considerarse si el riesgo de corrosión del acero de refuerzo está presente.

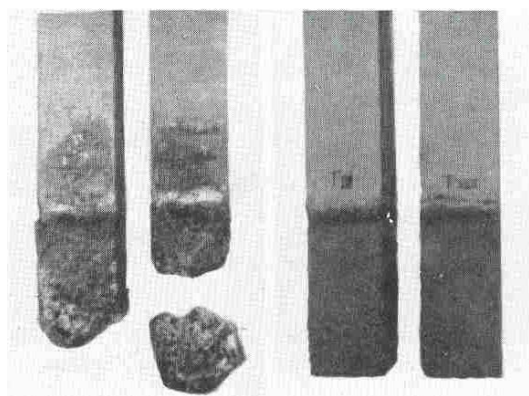


Fig.2.3 Efecto de sulfatos en el concreto. Ensayes de vigas de concreto 1: 2:4 con relación agua / cemento de 0.60, después de un curado inicial a la humedad atmosférica de 28 días . Se sumergió la parte inferior en 20 cm por dos años en una solución con sulfato de magnesio igual a 332.5 mg de SO_3 . Fuente: Biczók, I. Concrete Corrosion, Concrete Protection. Cap. III.

II.2.A.4. EL CEMENTO PORTLAND ANTE EL ATAQUE POR SULFATOS

Los componentes del cemento Pórtland tienen una función protagónica en este tipo de ataque químico, como se observa en las dos reacciones descritas que originan este ataque. Por tal motivo es claro que la composición del cemento tiene un desempeño preponderante. La figura 2.4 muestra la influencia de la composición del cemento en la expansión de elementos de mortero, donde se representa la expansión de especímenes de mortero elaborados con distintos cementos Pórtland y almacenados en agua de mar, con un ambiente medianamente agresivo (3000 ppm).

²⁶ Durable Concrete Structures. CEB p. 23.

En la figura 2.4 se observa la injerencia de los compuestos reactivos del cemento $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ y C_3A que reaccionan con los sulfatos. Desde un punto de vista más práctico es notorio que se tiene una menor expansión, y por tanto una menor incremento de volumen en aquellos cementos que tienen menor porcentaje en su composición de aluminato tricálcico $[\text{C}_3\text{A}]$.

Adicionalmente se aprecia que la expansión más rápida y alta se presentó en aquel cemento con porcentajes más altos de C_3A y silicato tricálcico $[\text{C}_3\text{S}]$.

Este último componente es el que aporta mayor resistencia mecánica a corto y mediano plazo del cemento Pórtland, por ende, es el que libera mayor cantidad de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a edades tempranas. El resultado es que el mortero que más se expande es el que contiene mayores cantidades tanto de C_3A como de C_3S .²⁷

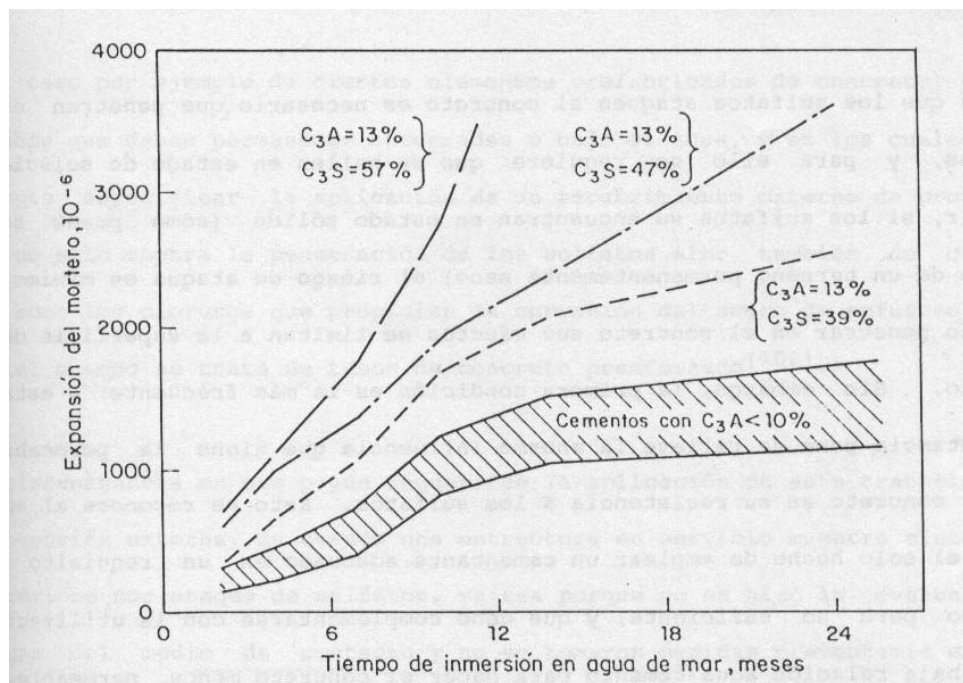


Fig.2.4. Influencia de la composición del cemento en la expansión de morteros almacenados en agua de mar. Fuente: Manual de Tecnología, Sección 3.CFE. P.235.

En términos prácticos, se tiene dos observaciones:

- 1) Un cemento con bajo contenido de aluminato tricálcico es más resistente al ataque por sulfatos. En el mercado se tienen cementos con estas características. El cemento tipo II ($\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$) para ataques moderados de sulfatos y el tipo V ($\text{C}_3\text{A} \leq 5\%$) para una mayor resistencia a los sulfatos.
- 2) Para moderar el contenido de hidróxido de calcio en el concreto se puede emplear un material puzolánico, con la finalidad de que este último reaccione con el hidróxido de calcio para convertirlo a compuestos útiles que no reaccionen con los sulfatos existentes.

²⁷ Manual de Tecnología del Concreto, Sección. 3. p. 235.

II.2.A.5. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO PARA MITIGAR EL ATAQUE POR SULFATOS

Como se indicó anteriormente el ataque de sustancias sólidas o secas es raro, para el caso de los sulfatos esta condición se tendría en un terreno permanentemente seco, donde el riesgo es mínimo porque los sulfatos no penetran en los poros del concreto. Normalmente los sulfatos se encuentran disueltos, es decir, en estado líquido por lo que son agentes potencialmente agresivos al concreto. Por lo que un concreto deber ser impermeable, para lo cual se requiere una baja relación agua / cemento, adicionalmente de emplear un cementante adecuado.

En ambientes extremadamente agresivos y con altas concentraciones de sulfatos se debe considerar una tercera opción: el uso de recubrimientos superficiales u otros materiales que formen una barrera protectora entre concreto y medio agresivo. Estos materiales pueden ser de utilidad cuando se requiera dar mayor protección al concreto, o cuando se trata de proteger estructuras existentes que no tuvieran las previsiones indicadas. Dichas barreras protectoras se discutirán en el capítulo V.

II.2.B. ESTRATEGIAS PARA EVITAR EL ATAQUE POR SULFATOS

La protección contra el ataque por sulfatos se obtiene por el uso de un concreto denso, un control de calidad para lograr una relación agua / cementantes baja, y los ingredientes adecuados para producir un concreto resistente a los sulfatos. El contenido de aire es benéfico, en la medida que se reduce la relación agua / cementantes y por tanto, la permeabilidad. Debido al mecanismo de ataque por sulfatos, es necesario involucrar a los componentes químicos del cemento. Como se señalo previamente un concreto ofrecerá mejor resistencia a los sulfatos si su contenido de aluminato tricálcico (C_3A) es menor, por lo que se recomienda el empleo de los cementos tipo II y V ($C_3A \leq 8\%$ y $C_3A \leq 5\%$ respectivamente).

Se tienen evidencias de que la alúmina en la fase aluminoferrita del cemento Pórtland participa en el retraso del ataque de sulfatos, por lo que el ASTM establece que el cemento tipo V no debe tener más del 25% de C_4AF , a menos que se recurra a requerimientos alternos basados en el desempeño de pruebas. En las figuras 2.5 y 2.6 se muestran especímenes de concreto expuestos a distintas soluciones de sulfato (SO_3); en la figura. 2.5 los especímenes se elaboraron con concreto no resistente a sulfatos, en la figura 2.6. se tienen especímenes con concreto resistente a sulfatos.

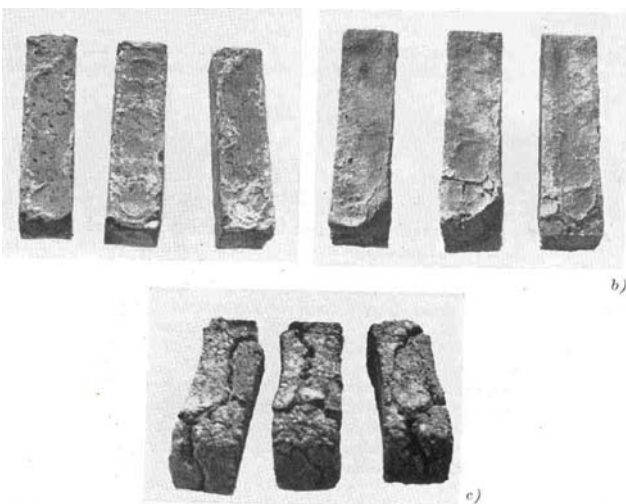


Fig.2.5. Especímenes de concreto con cemento sin resistencia a los sulfatos, en soluciones de SO_3 que contenían: a) 2170, b) 12290, c) 30700 mg/lit. Fuente: Biczók, I. Concrete corrosion, concrete protection. Cap. I.

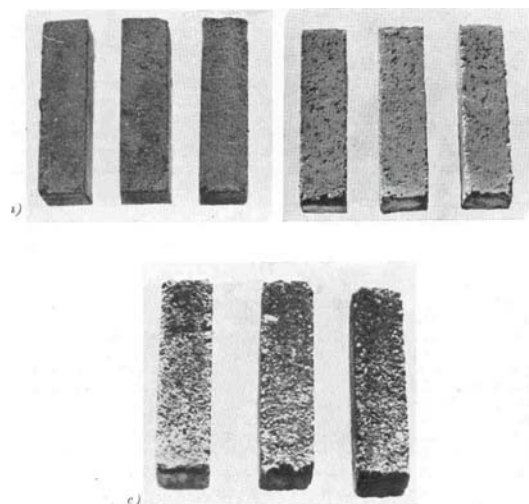


Fig.2.6. Especímenes de concreto con cemento resistente a los sulfatos, clinker 58%, escoria de alto horno 36% y yeso 6%, en soluciones de SO_3 que contenían: a) 2170, b) 12290, c) 30700 mg/lit. Fuente: Biczók, I. Concrete Corrosion, Concrete Protection. Cap. I.

Como se puede observar la integridad estructural del concreto tiene un mejor desempeño cuando se considera desde su origen las propiedades requeridas por el mismo desde las características del cemento y su proporcionamiento.

Algunos estudios han mostrado que determinadas puzolanas y escorias de alto horno granuladas, usadas en cementos mezclados o agregados por separado al concreto en la mezcladora, incrementa considerablemente la esperanza de vida del concreto expuesto. Se ha reportado que los cementos mezclados que contienen microsílíce y escorias de alto horno mejoran el desempeño del concreto sujeto a un ambiente de sulfato de sodio, tanto en términos de resistencia como de expansión, comparado con los que contienen cementos convencionales.²⁸ Ciertas puzolanas, especialmente, las cenizas volantes, clase C, disminuyen la resistencia al ataque por sulfatos en morteros.

El cloruro de calcio en el concreto reduce su resistencia al ataque por sulfatos, y su uso está prohibido en concreto expuesto a condiciones severas y muy severas.

Las recomendaciones del ACI - 201 se expone en la tabla 2.2. la cual es de utilidad al diseñador de mezclas porque indica se acuerdo al grado de exposición las relaciones agua/cemento máximas a emplear.

TABLA 2.2. RECOMENDACIONES PARA CONCRETOS DE PESO NORMAL EXPUESTOS AL ATAQUE DE SULFATOS				
EXPOSICIÓN	Sulfatos solubles en agua* (SO ₄) en el suelo [%]	Sulfato en agua, ppm	Cemento	Relación agua / cementantes máxima
Ligera	0.00 - 0.10	0 - 150	---	---
Moderada	0.10 - 0.20	150 - 1500	Tipo II, IP (MS), IS(MS)	0.50
Severa	0.20 - 2.00	1500 - 10000	Tipo V	0.45
Muy severa	> 2.00	> 10000	Tipo V + puzolanas o escorias	0.45

Fuentes: ACI -201. Guide To Durable Concrete. p.11

El empleo de concretos con cemento y microsílíce con la aplicación apropiada de un recubrimiento epóxico resistente al agua en los miembros expuestos es una opción racional para proteger al acero de refuerzo embebido en el concreto, tanto para el ataque por sulfatos como por la corrosión del acero en ambientes con sulfatos.²⁹

La investigación del proceso químico del ataque de sulfatos sigue progresando en el ámbito académico; la tecnología actual con microscopio electrónico, un procesamiento informático más rápido de la información otorgan varias ventajas. Actualmente hay autores (Kurtis, 2000, et. al.) que están proponiendo modelos empíricos para predecir la expansión causada por el ataque de sulfatos³⁰ o que están realizando análisis de confianza para el ataque de sulfatos en el concreto (Corr, 2001)³¹. Ambos temas están fuera del marco de la presente Tesis.

²⁸ AL-AMOUDI, O.S.B. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended cements Exposed to Sulfate Environments. Building and Environment. V.33No.1,1998. y MBESSA M. & PÉRA J. Durability of High-Strength Concrete in Ammonium Sulfate Solution. Cement and Concrete Research, 31 (2001), 1227-1231.

²⁹ AL-AMOUDI, O.S.B. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended cements Exposed to Sulfate Environments. Building and Environment. V.33No.1,1998.

³⁰ Para más información: KURTIS K. Et.al. Empirical Models to Predict Concrete Expansion Caused by Sulfate Attack. ACI Materials Journal. V.97, March - April, 2000.

³¹ CORR, David, et. al. Sulfate Attack of Concrete: Reliability analysis. ACI Materials Journal. V.97, March -April, 2001.

II.2.C. TIPOS DE ESTRUCTURAS SUJETAS AL ATAQUE DE SULFATOS

Las estructuras que normalmente presentan ataque por sulfatos son canales, tuberías, alcantarillas, cimientos para torres de transmisión y pavimentos de carreteras.³² La lista no es limitativa, como es el caso del vertedor de concreto de la presa Alcoba, Wyoming, EE.UU. como se indicó en el capítulo anterior.

II.2.D. EL ATAQUE DE SULFATOS EN MÉXICO

En el territorio nacional es muy frecuente la existencia de altas concentraciones de sulfatos en el suelo y en las aguas freáticas. De modo que es necesario realizar una evaluación para determinar la agresividad, sobretodo en aquellos sitios donde no se tienen antecedentes de las condiciones al respecto. Se tienen pruebas que indican que la zona del Ex lago de Texcoco, en el Valle de México, tiene altas concentraciones de sulfatos.

II.3. EXPOSICIÓN AL AGUA DE MAR

El agua de mar se presenta con una variedad de concentraciones de sales disueltas, aunque siempre con una proporción constante de los constituyentes. Las concentraciones son más bajas en regiones con climas fríos y especialmente altas en áreas costeras con rangos de evaporación excesivos durante el día. En términos generales el agua de mar posee un total de 35,000 ppm de sales disueltas, de las cuales cerca del 90% son cloruros y el 10% son sulfatos, y con 0.2% de diversa sales. Debido a la alta concentración de cloruros el agua de mar puede propiciar la corrosión. En el caso de los sulfatos se puede suponer un nivel ordinario de 3,000 a 3,500 ppm, un grado de agresividad entre moderado y severo.

Se admite que al agua de mar es menos dañina en lo que se refiere al ataque por sulfatos. Debido a su alto contenido de cloruros. Este hecho transforma al agua de mar en un medio en el cual se disuelven con gran facilidad el yeso y la etringita producidos en el ataque por sulfatos. Ya que ambos productos tienden a ser extraídos por lixiviación antes de generar demasiadas presiones internas en el concreto.

Si un concreto se expone continuamente al agua de mar no se produce microfisuramiento ni desintegración, como sucede en el ataque por sulfatos típico; esto no quiere decir que no se tengan efectos colaterales, solamente que se manifiestan a través de un incremento en la porosidad superficial del concreto. En la zona de fluctuación del nivel de agua, el concreto está permanentemente expuesto a ciclos de secado y humedecimiento, por lo que se tiene un efecto de desintegración producido por el aumento de volumen que experimentan las sales. A estos efectos se deben agregar los efectos deletéreos de la marea y de la corrosión del acero de refuerzo. Independientemente de la corrosión, tema que se abarcará en el siguiente capítulo, el concreto expuesto a agua de mar presenta daños por acciones físicas y químicas. Las de índole química que se deben al ataque por sulfatos, se pueden suponer moderadas. Para prevenir sus efectos puede emplearse un cemento Pórtland tipo II o en su defecto un cemento Pórtland puzolánico, elaborado con clinker tipo II, y una relación agua / cemento baja. En tanto que para evitar las acciones físicas producidas por el efecto expansivo de las sales y por los efectos abrasivos del oleaje en las zonas de fluctuación de la marea y/o en las salpicaduras producidas por las olas, es necesario proveer un concreto con mayor impermeabilidad y resistencia.

Se requiere también considerar las zonas bajas inmediatas a la costa, donde se tiene poco movimiento del agua o se encuentra estancada prácticamente. Esta condición de carencia de movimiento favorece la concentración de sales por la evaporación. Por lo que el agua adquiere concentraciones elevadas de sulfatos que la transforman en un medio agresivo. Para proteger al concreto se pueden emplear un cemento tipo V o un cemento Pórtland puzolánico con clinker tipo V o incluso un recubrimiento superficial.

³² HARBOE EDWARD M. *Resistencia del Concreto a los Sulfatos: Experiencias de Campo*. Revista IMCYC, abril, 1983, México.

En todos estos casos es necesario tener presente que la concentración de los sulfatos tiene variaciones en el transcurso del año, en función de varios factores, por ejemplo, de las aportaciones pluviales. Es recomendable que se evalúe la agresividad al concreto mediante muestreos en todas las épocas del año, con la finalidad de determinar las condiciones más desfavorables y tenerlas presentes en el diseño.

II.3.A. MECANISMO DEL DETERIORO POR EXPOSICIÓN AL AGUA DE MAR

En las cimentaciones ubicadas en zonas costeras y por debajo de los niveles de agua salina, la succión capilar y la evaporación tal vez causen una supersaturación y cristalización en el concreto colocado abajo del suelo, resultando en dos tipos de ataque químico: en la pasta de cemento (sulfatos), agravada por la corrosión del acero, debida a los cloruros; En climas tropicales la combinación de ambos efectos puede causar daños muy severos en unos cuantos años.

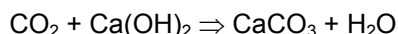
La concentración del ión sulfato en el agua de mar puede ser incrementada a altos niveles por la acción capilar y la evaporación bajo condiciones climáticas extremas. La presencia de los iones de cloruro, sin embargo, altera la extensión y naturaleza de la reacción química. Así que una menor expansión es producida por un cemento con un determinado contenido de C_3A , del que sería esperado del mismo cemento en una exposición al agua fresca, donde el agua tiene el mismo contenido de iones de sulfatos.

El desempeño de concretos sumergidos en agua de mar permanentemente y elaborados con contenidos menores del 10% de C_3A han tenido un comportamiento adecuado, y se ha visto que su permeabilidad es baja. El *Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos* y la *Pórtland Cement Association* (PCA) señalan que el contenido de C_3A máximo debe ser 10% para concretos sumergidos, y la relación agua / cementantes inferior a 0.45.³³ Una atención especial debe también ser dada a los aspectos estructurales, con un diseño y juntas de construcción adecuadas para asegurar que el agrietamiento sea minimizados para prevenir la exposición del refuerzo.

II.4. CARBONATACIÓN

La carbonatación del concreto es un proceso que resulta del contacto entre el cemento hidratado y el bióxido de carbono (CO_2) que se encuentra en el aire. Al gas CO_2 se le encuentra en toda la atmósfera, ocupa aproximadamente el 0.03% por volumen del aire de las zonas rurales, el 0.01 % en un laboratorio no ventilado y hasta el 0.3% en las grandes ciudades.

El mecanismo es el siguiente: el CO_2 en forma de gas se combina con la humedad del concreto para convertirse a la forma de ácido carbónico y reacciona así con los hidróxidos del concreto, particularmente con el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ que es liberado en la hidratación del cemento. Para el hidróxido de calcio ocurre la siguiente reacción:



El resultado de la reacción tiene dos efectos: a) la conversión del hidróxido a carbonato reduce la alcalinidad del concreto, con lo que se disminuye la protección del propio concreto al acero de refuerzo contra la corrosión, y b) la extracción de agua del hidróxido propicia una contracción que evoluciona al par de la carbonatación.

La carbonatación es un fenómeno progresivo. Las construcciones urbanas pueden carbonatarse con más frecuencia y más rápido. Es el problema que sufren las construcciones coloniales de la Ciudad de México.

³³ Cfr. ACI-201, *Guide to Durable Concrete*. p.10

Adicionalmente hay que considerar el servicio que prestarán las estructuras, por ejemplo, las construcciones destinadas a procesos de combustión, como centrales termoeléctricas, donde el efecto de la carbonatación debe considerarse para prevenir las consecuencias indeseables de la corrosión del acero de refuerzo y la consiguiente disminución de la durabilidad de las estructuras del concreto.

La carbonatación es más rápida si la humedad relativa en la región oscila entre 50 y 60%. Por debajo de estos valores se tiene una cantidad insuficiente para que la reacción sea significativa. Arriba de esta cantidad el agua se incrementa en los poros e inhibe el ingreso de los bióxidos de carbono. Con una humedad cercana al 95% la carbonatación prácticamente se inhibe.³⁴

El proceso de la carbonatación se efectúa de la superficie de concreto al interior del mismo, pero su velocidad de penetración en concreto compacto de alta calidad es muy lenta, la velocidad de penetración se hace más lenta con el tiempo, hasta llegar a ser prácticamente insignificante.

La carbonatación no causa decremento en la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto, pero si reduce drásticamente su alcalinidad.³⁵ Este hecho es importante para la protección del acero de refuerzo. En el capítulo III se discutirá la influencia de la carbonatación en el proceso de corrosión.

II.5.ATAQUE DE ÁCIDOS

Algunos aspectos de durabilidad del concreto tienen efectos tanto físicos como químicos, como el ataque de sulfatos que inicia por reacciones químicas y provoca un incremento de volumen o la propia corrosión; pero el ataque al concreto por sustancias ácidas tiene exclusivamente efectos químicos.

El concreto está sujeto a los ataques de ciertos ácidos producto de una gamma de situaciones. A modo de ejemplo, se puede mencionar que al quemar varios combustibles se liberan productos que contienen gases sulfurosos que al combinarse con la humedad forman ácido sulfúrico, el cual cae en forma de lluvia ácida.

Las aguas de albañal o residuales al recolectarse pueden formar determinados ácidos. Las aguas de minas y las aguas residuales de origen industrial llegan a contener ácidos detrimentales para el concreto. Los ácidos orgánicos de las industrias agrícolas o de las industrias manufactureras o procesadoras representan un peligro constante para la integridad del concreto.³⁶

Un concreto con buena calidad resistirá ocasionalmente una exposición a ácidos, pero ningún concreto ofrece una resistencia adecuada al ataque por ácidos fuertes o componentes que tal vez se transformen en ácidos. Para estos casos es necesario alguna protección especial.

II.5.A. MECANISMO DEL ATAQUE POR ACIDOS

La pasta de cemento hidratada posee un ambiente netamente alcalino, de modo que al estar en contacto con alguna sustancia ácida reacciona y tiende a neutralizarla. El producto de dicha "neutralización" es la formación de sales cálcicas solubles en agua. En otras palabras los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) que constituyen el gel de cemento y que se distinguen por proveer de resistencia y ser insolubles se ven solubilizados por el ácido, por lo que la pasta de cemento pierde sus atributos principales, pierde adherencia y se desintegra paulatinamente, conforme el ataque progresa. El resultado es la destrucción de la pasta endurecida.

³⁴ *Durable Concrete Structures, CEB .p. 37.*

³⁵ *PERKINS, Philip. Resistencia a la Corrosión de Estructuras Sanitarias de Concreto. P.27.*

³⁶ *CASTRO BORGES, P. Et. al. Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Cap.1.*

Si se tiene un concreto con agregados inertes a los ácidos, esto es, que provienen de rocas que no reaccionan con los ácidos, el ataque se concentra exclusivamente en la pasta de cemento; conforme se va desintegrando la pasta los agregados quedan expuestos hasta que se disgregan por falta de aglutinamiento. El efecto del ataque ácido se expone en la figura 2.7.

Los agregados calcáreos reaccionan con los ácidos, de modo que en un concreto con este tipo de agregados se presentará la reacción tanto en la pasta de cemento como en los mismos agregados. El resultado es que el efecto será incrementado y se presenta con mayor regularidad en toda la superficie tratada.

II.5.B. FACTORES DEL ATAQUE POR ÁCIDOS

La intensidad con la que un ácido origina deterioro al concreto está en función de varias causas, entre ellas del tipo de sustancia ácida, que determina el grado de solubilidad en el agua de las sales producto de la reacción, del tipo de exposición a dicha sustancia, si es ocasional o permanente.

II.5.B.1. TIPO DE SUSTANCIA ÁCIDA

Dependiendo del tipo de sustancia ácida se determina el grado de solubilidad en el agua de las sales producto de la reacción.

Una sustancia entre más soluble es más dañina al concreto. Por ejemplo, los siguientes ácidos originan un deterioro de mayor a menor intensidad en el concreto.³⁷

1. **Ácido clorhídrico:** Sumamente agresivo, porque incentiva la formación de cloruro de calcio, sal muy soluble en agua.
2. **Ácido sulfúrico:** Mediana agresividad, provoca sulfato de calcio, que es medianamente soluble.
3. **Ácido húmico:** Poca agresividad, alienta la formación de humato cálcico, cuya solubilidad es reducida. Se le encuentra en determinados suelos
4. **Ácido oxálico:** muy poca agresividad debido a que forma oxalato cálcico, que provoca una película prácticamente insoluble en el concreto, que lo protege del propio ácido, por lo que no presenta deterioro.

II.5.B.2. GRADO DE EXPOSICIÓN

La profundidad del daño al concreto dependen también del grado de exposición del concreto a la *sustancia* ácida, si es eventual o continua. Por ejemplo, un ácido de acción enérgica si tiene una aportación limitada puede ocasionar un daño superficial, debido a que esta se consume conforme se neutraliza por la reacción hasta agotarse, pero si se tiene una exposición constante o se renueva el ácido continuamente el ataque progresa hasta destruirlo completamente.

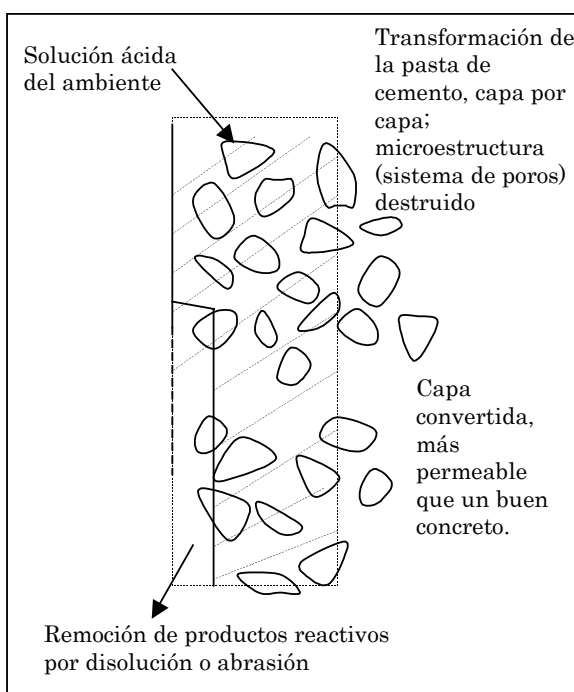


FIG.2.7. Efecto el ataque ácido.
Fuente: *Durable Concrete Structures*. CEB. p.21

³⁷ *Manual de Tecnología del Concreto, Sección 3. p. 335.*

La presencia de un ácido débil posiblemente puede pasar inadvertidamente, pero si dicho ácido tiene una aportación constante posiblemente genere severos daños en el concreto.

Independientemente de la velocidad de reacción, lo primero que se debe calcular cuando se discute la posibilidad de ataque por ácidos o ataque por sales de magnesio o sales de amonio o agua suave es la cantidad de sustancias con las que el concreto estará en contacto durante su servicio.

Debe distinguirse una diferencia fundamental entre el ataque por ácidos y el ataque por sulfatos o álcalis. En el último caso existe una conversión completa de la pasta de cemento, que destruye el sistemas de poros. Con el ataque ácido, la permeabilidad del concreto tiene una importancia mínima, sin embargo, para los otros tipos de ataque la permeabilidad del concreto es de máxima importancia.

II.5.C. EL ATAQUE POR ÁCIDOS EN LA INFRAESTRUCTURA

Solamente determinadas estructuras de concreto están en contacto con ácidos, especialmente las que tienen un uso industrial, donde se realizan procesos que requieren o involucran en algún proceso a los ácidos. Para estos casos es recomendable proteger al concreto con un recubrimiento a prueba de ácidos, como es el caso de las chimeneas.

El hecho de que una estructura no tenga un uso industrial no la excluye de que presente este tipo de ataque. Las siguientes estructuras pueden verse afectadas, aunque en menor intensidad que las de uso industrial:

- a) Todo tipo de estructuras expuestas a "lluvia ácida".
- b) Tuberías de drenaje que conducen aguas residuales industriales y domésticas.
- c) Estructuras hidráulicas expuestas al contacto con bióxido de carbono disuelto.

II.5.C.1. ESTRUCTURAS EXPUESTAS A "LLUVIA ÁCIDA".

El agua de lluvia adquiere un carácter ácido en las zonas densamente pobladas o industriales. El motivo es que el aire en estas zonas posee gases sulfurosos en el ambiente. El resultado de la combinación de dichos gases con la lluvia es el ácido sulfuroso que existe en forma de solución, el cual ataca severamente al concreto. Su contenido en la lluvia ácida no alcanza un nivel suficiente para atacar energicamente al concreto, su efecto detrimental consiste en participar en el proceso de carbonatación y "despasivación" del concreto superficial. Sus efectos por tanto son principalmente en el inmediato y largo plazo. Para proteger al concreto debe considerarse una alta calidad del mismo, que sea denso e impermeable y que posea un recubrimiento adecuado sobre el acero de refuerzo.

II.5.C.2. TUBERÍAS DE DRENAJE: AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES Y DOMÉSTICAS.

Si las aguas residuales son de carácter ácido pueden dañar al concreto. Con las reglamentaciones actuales de las descargas en el sistema de drenaje esta condición es poco frecuente. Por su parte las aguas residuales domésticos (aguas negras) normalmente son alcalinas y no constituyen un medio agresivo al concreto, aunque pueden serlo indirectamente. Por ejemplo, los elementos de azufre que existen en las aguas negras se convierten a gas sulfhídrico [H₂S] por la acción reductora de las bacterias anaeróbicas, y este gas al desprenderse y oxidarse en ambiente húmedo forma ácido sulfúrico [H₂SO₄] que se adhiere a la superficie interior de la tubería de drenaje, por encima del nivel de escurrimiento, y lo desintegra en el corto y mediano plazo. De modo que es característico de esta forma de ataque manifestarse exclusivamente en la zona superior de la tubería que no tiene contacto con las aguas negras, en tanto que en el perímetro mojado el concreto no suele mostrar daño por este concepto.

El concreto no es apto para soportar el ataque del ácido sulfúrico en las condiciones descritas, por lo que para protegerlo se pueden emplear barreras de protección superficial.³⁸

Está fuera del contexto de este trabajo exponer el probable efecto sobre el concreto de un gran número de compuestos químicos usados en la industria, los cuales pueden estar presentes en los desechos industriales. A continuación se comentarán las sustancias más comunes encontradas en los desechos industriales y que dañan al concreto de diferente grado.

Los ácidos siempre reaccionan con el cemento Pórtland en el concreto, pero a veces no es significativo. Se puede tener presencia de ácidos en descargas industriales, en el subsuelo de tiraderos industriales o se pueden formar por encima de la línea de agua en las tuberías, resumideros, túneles, etc. Que lleven aguas negras. El ácido que se forma de este modo es el ácido sulfúrico y surge por acción bacteriana de dos etapas³⁹.

En el caso de las descargas industriales, la temperatura, y la dilución son factores importantes, determinándose el último por la hora del día en que se descarga al drenaje. Si se descarga entre la media noche y las 4 de la mañana el flujo de sequedad estará al mínimo y el efecto de la descarga será más severo que si se realiza durante el día.

Normalmente se tiene reglamentos que rigen las descargas industriales, pero se requiere un control, estricto para su cumplimiento. Otros tipos de ataque por ácidos menos severos pueden surgir en estructuras de suministro de agua; tuberías, túneles, tanques de almacenamiento y tanques de plantas de tratamiento de agua. En estas últimas se emplea frecuentemente soluciones de sulfato ferroso y de aluminio en el proceso de tratamiento de aguas, con el propósito principal de promover la formación de flóculos antes de la filtración. Las soluciones de estos sulfatos son ácidos, por lo que atacan al concreto.⁴⁰

Las aguas de albañal o residuales al recolectarse pueden formar determinados tipos de ácidos. También las aguas de algunas minas y las aguas residuales industriales pueden contener ácidos. Los ácidos orgánicos de las industrias agrícolas, manufactureras o procesadoras representan un peligro latente para la integridad del concreto.⁴¹

II.5.C.3. ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS EXPUESTAS AL CONTACTO CON BIÓXIDO DE CARBONO DISUELTO.

Como ya se indicó en la sección anterior de carbonatación el bióxido de carbono del aire atmosférico produce carbonatación, y los efectos se presentan a largo plazo. Sin embargo, el bióxido de carbono no solamente se encuentra en el aire, también está en las aguas subterráneas y freáticas, el cual en solución acuosa toma la forma de ácido carbónico [H₂CO₃]. El agua contiene demasiado bióxido de carbono, lo que le confiere acidez (pH ≤ 7). Bajo estas circunstancias el agua se convierte en un ambiente agresivo para el concreto de cemento Pórtland, pero de modo distinto al bióxido de carbono que se encuentra en el aire; la reacción del ácido carbónico con el hidróxido de calcio produce bicarbonato de calcio, que es relativamente soluble. De esta forma las estructuras de concreto que se encuentran expuestas a agua con ácido carbónico desarrollan un efecto pronunciado de lixiviación del hidróxido de calcio, que produce una porosidad superficial. La acción progresiva alcanza manifestaciones de mayor degradación si el CO₂ disuelto es alto y si los agregados son calcáreos.

³⁸ Vid. Cap.V.

³⁹ En los sistemas de drenaje, cuando se vuelven sépticos se puede generar sulfuro de hidrógeno [H₂S] de los compuestos sulfurosos en el drenaje, por acción de bacterias anaeróbicas en el fango y depósitos en el nivel del agua, y en presencia de humedad, es convertido en ácido sulfúrico [H₂SO₄] por bacterias aeróbicas.

⁴⁰ PERKINS, Philip. Resistencia a la Corrosión de Estructuras Sanitarias de Concreto. P.28.

⁴¹ CASTRO BORGUES P. & CASTILLO R.M. Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. p. 32.

No se tiene un valor índice que indique el nivel de agresión que posea una agua con ácido carbónico, porque esta condición también depende de la dureza del agua. Para explicar esto se debe mencionar que el ácido carbónico se halla de dos formas en el agua 1) combinado químicamente, en forma de carbonatos de calcio y de magnesio, el cual no reacciona con el hidróxido de calcio. 2) como ácido carbónico libre, en forma de CO_2 disuelto, que reacciona con el hidróxido de calcio del concreto, por lo que es agresivo al mismo.

Las aguas de contacto más peligrosas son por tanto aquellas aguas suaves que tengan un alto contenido de bióxido de carbono disuelto libre, su agresividad se determina por su pH. Se considera que un agua de baja dureza, con un contenido de 15 mg/lit (ppm) de CO_2 disuelto libre es factor suficiente para adoptar medidas de protección, en particular si el pH es menor a 7. Para evaluar la agresividad de las aguas con altos contenidos de CO_2 disueltos libres se puede emplear el método Tillmans – Heublein.

La gráfica 2.8. muestra la agresividad del agua de contacto en función de su contenido de ácido carbónico libre y su dureza, donde se indican las zonas de inocuidad y agresividad. En zonas cercanas a la línea limítrofe conviene estar del lado de la seguridad por lo que se recomienda, para brindar una seguridad suficiente a la estructura, el uso de un concreto de alta compacidad y resistencia, elaborado preferentemente con agregados no calcáreos y un amplio recubrimiento sobre el acero de refuerzo.⁴²

En casos extremos o muy severos se deben emplear recubrimientos superficiales, los cuales se detallan y describen en el capítulo V.

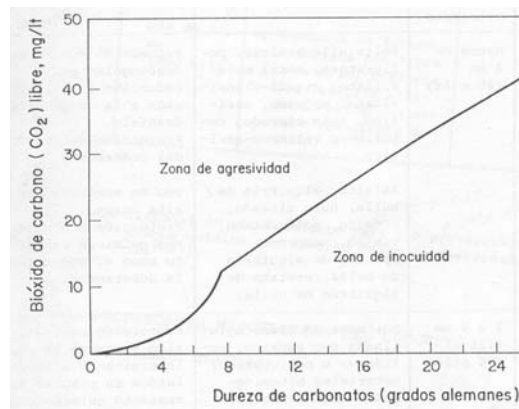


Fig.2. 8 Agresividad del agua de contacto con el concreto en función de su contenido de ácido carbónico libre y su dureza, según el método Tillmans – Heublein. Fuente. Manual de Tecnología del Concreto, Sección3. p.339.

II.6. CONCLUSIONES CAPITULARES

El ataque químico del concreto está íntimamente ligado con las condiciones de servicio de la estructura, llámese ataque de sulfatos en el subsuelo de una cimentación o en agua freática, o un ataque por ácidos en plantas industriales o de procesamiento de alimentos, e incluso la carbonatación o la lluvia ácida, estos fenómenos o circunstancias se presentan con relativa frecuencia en la construcción. Aunque con la tecnología actual se puede evitar o minimizar las posibilidades de que se desarrolle o presente, el profesionista no debe confiarse.

Este tipo de ataque requiere del conocimiento de la química debido a su naturaleza, de hecho en ciertas circunstancias puede requerir de grupos multidisciplinarios, donde se evalúe la viabilidad de aplicar determinada solución.

Las estructuras sanitarias son proclives a presentar ataques por ácido, y que debido a su dificultad para inspeccionarlas conviene tomar las medidas preventivas correspondientes para evitar un eventual ataque.

Las estructuras de concreto urbanas en ciudades industrializadas, como es el caso de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara están sujetas a las denominadas lluvias ácidas.

Las estructuras marinas o costeras están expuestas al agua de mar que por su alta salinidad puede dañar la integridad del concreto. En una estructura real debe tenerse presente la interacción de los diversos fenómenos descritos y de las singularidades de proyecto o de medio ambiente.

⁴² Cfr. Manual de Tecnología del Concreto, Sección 3. p. 339.

CAPITULO II. CONCRETOS EXPUESTOS AL ATAQUE QUÍMICO 19

II.1. INTRODUCCION	19
II.2. ATAQUE DE SULFATOS.....	19
II.2.A. MECANISMO DEL ATAQUE DE SULFATOS.....	20
II.2.B. ESTRATEGIAS PARA EVITAR EL ATAQUE POR SULFATOS.....	24
II.2.C. TIPOS DE ESTRUCTURAS SUJETAS AL ATAQUE DE SULFATOS	26
II.2.D. EL ATAQUE DE SULFATOS EN MÉXICO	26
II.3. EXPOSICIÓN AL AGUA DE MAR.....	26
II.4. CARBONATACIÓN.....	27
II.5. ATAQUE DE ÁCIDOS.....	28
II.5.B. FACTORES DEL ATAQUE POR ACIDOS.....	29
II.5.C. EL ATAQUE POR ACIDOS EN LA INFRAESTRUCTURA.....	30
II.6. CONCLUSIONES CAPITULARES	32

CAPITULO III. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

"Los problemas de la corrosión del refuerzo son los más extensos y los menos entendidos en la industria. Las dificultades son mayores cuando el acero presforzado es afectado, las consecuencias de una falla de tendón puede ser catastróficas".

Denison Campbell- Allen & Harold Roper Concrete Structures: Materials, Maintenance and Repair

III.1. INTRODUCCIÓN

La atención a la corrosión de metales embebidos en el concreto, y en especial el acero, ha crecido paulatinamente en los últimos años, debido principalmente a su amplia ocurrencia en determinados tipos de estructuras y a que ha originado altos costos en reparaciones. Este fenómeno se observó primeramente en estructuras marinas y en plantas industriales químicas; recientemente se ha reportado en puentes, estructuras para estacionamientos y en otras estructuras expuestas a cloruros.⁴³ La corrosión del acero de refuerzo ha sido y aún es el mecanismo de mayor deterioro para estructuras de concreto reforzado y presforzado. Adicionalmente origina costos por mantenimiento y/o reparaciones importantes, que en casos extremos se tiene la necesidad de demoler parcial o totalmente las estructuras.

Las investigaciones realizadas al respecto han incrementado el conocimiento del problema, en especial, del importante papel que desempeñan los iones de cloruro en este proceso.

En el presente capítulo se discutirán las causas que la originan, su mecanismo, y los factores que influyen en ella, tanto ofensivos como defensivos. Se indicarán algunas recomendaciones para proteger al acero de refuerzo contra la corrosión, principalmente de índole preventivo, con fines de diseño y de construcción. Adicionalmente se plantean los principales sistemas constructivos existentes hasta nuestros días para restringir o evitar la corrosión.

III.2. PRINCIPIOS Y MECANISMO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO

III.2.A. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN

La corrosión es un proceso que se presenta en todos los metales y se aprecia macroscópicamente porque daña los equipos, utensilios o estructuras que empleamos. Su manifestación más común es la herrumbre, que se observa en automóviles, equipos, estructuras, utensilios, etc. En la elaboración de un metal se invierte una determinada energía y trabajo, desde que se extraen las materias primas para su elaboración hasta el proceso mismo de fundición y aleación. Un metal en proceso de corrosión se desintegra paulatinamente, a pesar de que para su obtención se haya invertido determinada energía. La corrosión se puede definir como *'un proceso de deterioro y destrucción de un material (generalmente un metal) o de sus propiedades debido a su reacción con el medio ambiente'*⁴⁴

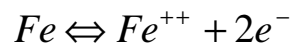
⁴³ ACI 222. *Corrosion of Metals in Concrete*.p.222R-2.

⁴⁴ *Corrosión Basics. An Introduction. NACE USA. Citado por CASTRO. et.al. "Corrosión de Estructuras de Concreto Armado. Cap. 2.*

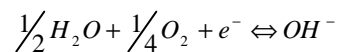
III.2.B. CORROSIÓN: UN PROCESO ELECTROQUIMICO

La corrosión de los metales puede ser de dos formas dependiendo del tipo de ambiente en que se produzca. La *corrosión química* se presenta ante el ataque de sistemas no electrolíticos, por ejemplo, gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica o por líquidos no conductores de corriente eléctrica. Por su parte la *corrosión electrolítica* se presenta cuando hay transferencia de iones y electrones en un medio acuoso. Aunque el acero puede corroerse por ataque químico, la forma más común de corrosión en un medio acuoso es el electrolítico.⁴⁵

El proceso es parecido al que sucede en una pila. Un ánodo, donde la oxidación electroquímica toma lugar, y un cátodo, donde la reducción sucede. Se requiere un conductor eléctrico y un medio acuoso. Cualquier superficie de metal que presente corrosión está compuesto de ánodos y cátodos eléctricamente conectados a través del cuerpo del mismo metal. En el ánodo el acero es oxidado y se presenta la siguiente reacción:



y por su parte en el cátodo se presenta, una reducción. En un medio ácido la reacción que se tiene es la reducción de los iones de hidrógeno a hidrógeno. Como el concreto es un medio altamente básico y usualmente tiene un suministro de oxígeno adecuado, la reacción resultante es:



III.2.C. PENETRACIÓN Y DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO EN EL CONCRETO

Los iones de cloruro son comunes en la naturaleza y pequeñas cantidades son adicionadas sin intención durante la elaboración de la mezcla de concreto; se pueden encontrar en los materiales constituyentes del concreto o en medios externos a él o se pueden agregar intencionalmente, como es el caso de un constituyente de los aditivos aceleradores. El cloruro de calcio es conocido como un acelerador excelente para la hidratación del cemento Pórtland, que normalmente se agrega hasta el 2% del peso del cemento. También los aditivos reductores de agua pueden tener cloruros. En algunos casos, cuando no existe la disponibilidad de emplear agua potable se recurre a agua de mar o agua con altos contenidos de cloruro para realizar la mezcla. En algunas partes del mundo los agregados expuestos a agua de mar pueden contener también cloruros.

Aquellos iones de cloruros que pueden tener una inclusión accidental se encuentran en bs contaminantes de agregados o pueden penetrar al concreto por sales descongelantes, rocío marino, niebla o llovizna.⁴⁶ Los iones de cloruro solubles posiblemente penetren aquellas estructuras de concreto no protegidas y expuestas a condiciones marinas o sales descongelantes. Los iones de cloruro pueden causar corrosión si el oxígeno y la humedad están también disponibles para realizar la reacción.

Puede darse el caso de que la corrosión suceda sin la intervención de los iones de cloruro. Por ejemplo, la carbonatación del concreto causa que el concreto pierda su alcalinidad, permitiendo la corrosión del acero de refuerzo. La carbonatación como se señaló en el capítulo anterior es un proceso lento en un concreto con una baja relación agua / cemento. Este tipo de corrosión inducida por carbonatación no es tan común, como la corrosión por la penetración de los iones de cloruro.

La penetración del ión cloruro es probablemente el fenómeno más devastador de las estructuras de concreto.

⁴⁵ ACI 222. *Corrosion of Metals in Concrete*.p.222R-3.

⁴⁶ *Ibid*.p.4.

Cuando los iones de cloruro penetran en la solución intersticial, ellos reaccionan con el C₃A no hidratado para formar monocloroaluminatos (3CaO·Al₂O₃·CaClO₂·10H₂O), los cuales pueden modificar la estructura del concreto favorablemente o más devastadoramente, buscan las varillas de acero de refuerzo y puede corroerlas rápidamente. Esta corrosión usualmente comienza con el desarrollo de una red de microgrietas, la cual facilita la penetración de iones de cloruro adicionales y termina con el desconchamiento o rompimiento del recubrimiento, originada por la fuerza de expansión resultante de la formación de óxido. El desconchamiento del recubrimiento expone a su vez a una nueva superficie de concreto a la acción de los iones de cloruro, por lo que el proceso sucede nuevamente.

Se ha aceptado (como primera aproximación) que la difusión de los iones de cloruro en un flujo constante dentro del concreto es gobernado por la ley de Fick, la cual establece que el flujo de los iones es proporcional a la concentración del gradiente:

$$J = -D_x \frac{dC}{dx}$$

donde J corresponde al flujo medido en moles/cm²/s; D_x es el coeficiente de difusión medido con una celda de difusión en la cual dos soluciones contienen diferentes cantidades de iones que son colocados en cada lado, en un disco de espesor de 50 mm, este coeficiente caracteriza la facilidad con que penetran los iones de cloruro en los poros del concreto; C representa la concentración de ión cloruro en moles/cm³. Debe señalarse que los cloruros se difunden aún en un concreto de buena calidad y no necesitan de grietas para tal fin.

III.2.D. FUNCIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS IONES DE CLORURO

Existen tres teorías modernas que explican los efectos de los iones de cloruro en el concreto⁴⁷:

- a) **Teoría de la película de Óxido:** de acuerdo con esta teoría una película de óxido en una superficie de metal es responsable de la pasividad y protección contra la corrosión. Esta teoría postula que los iones de cloruro penetran la película de óxido del acero a través de poros o defectos en la película más fácil que otros iones (por ejemplo, SO₄²⁻) Alternativamente los iones de cloruro pueden dispersarse sobre la película por lo que la hacen más fácil de penetrar.
- b) **Teoría de la absorción:** los iones de cloruro son absorbidos en la superficie del metal en competencia con el oxígeno disueltos (O₂) o los iones hidroxilo. Los iones de cloruro promueven la hidratación de los iones de metal y entonces facilita la disolución de estos últimos
- c) **Teoría Compleja Transitoria:** De acuerdo con esta teoría, los iones de cloruro compiten con los iones hidroxilo por los iones férricos producidos por la corrosión. El producto es un complejo soluble de formas de cloruro férricas. Este complejo puede difundirse lejos del ánodo destruyendo la capa protectora de Fe(OH)₂, permitiendo que continúe la corrosión. A cierta distancia del electrodo, el complejo se debilita y los hidróxidos de hierro se precipitan, de modo que el ión de cloruro es libre para transformar más iones férricos del ánodo. La evidencia de este proceso puede ser observada cuando el concreto con una corrosión activa es demolido. El producto de la reacción es un semisólido verde que se encuentra frecuentemente cerca del acero, el cual en la exposición del aire, cambia a un color negro y subsecuentemente a un color rojo con el óxido.

⁴⁷ *Ibid.*

Si la corrosión no es detenida, más iones férricos continúan migrando dentro del concreto lejos del sitio de la corrosión y reaccionan con el oxígeno para formar óxidos más altos que resultan en un incremento de volumen cuatro veces superior. Esta es la expansión de los óxidos férricos, cuando se transforman a estados de oxidación superiores producen presiones internas, que eventualmente agrietan al concreto. La formación de complejos de cloruros férricos también puede llevar a fuerzas disociadoras.

III.2.E. MECANISMO DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO

La corrosión del acero de refuerzo tiene dos consecuencias perjudiciales para la durabilidad de estructuras:

1. La corrosión reduce la sección transversal del acero de refuerzo, merma su adherencia con el concreto y se degradan sus propiedades mecánicas, demeritando su función estructural.
2. De la corrosión se forma el óxido de hierro, es decir, herrumbre o herrín, cuyo volumen es varias veces superior al de los elementos que le dan origen, por lo que se provocan presiones internas que progresivamente agrietan el recubrimiento del concreto e incluso lo desprenden en situaciones de corrosión avanzadas. La figura 3.1 muestra un elemento de concreto de un muelle en ambiente marino dañado por corrosión.

El acero de refuerzo puede ser corroído ocasionalmente por ataque químico directo, sin embargo, como se indicó previamente, generalmente se debe a un proceso electroquímico que involucra la existencia de una corriente eléctrica. A veces esta se induce por corrientes parásitas, debidas a la generación de celdas electrolíticas creadas por diferencia de potencial electroquímico a lo largo de las propias varillas de acero. El fenómeno de corrosión electrolítica es la principal causa de corrosión prematura del acero de refuerzo.

Una celda electrolítica consiste en dos metales de diferente potencial eléctrico (llamados ánodo y cátodo), conectados mediante un conductor eléctrico e inmersos en una solución (denominada electrolítica) de composición química adecuada. En estas circunstancias se crea un flujo de electrones del ánodo al cátodo por conducto de la conexión eléctrica, que descompone químicamente el electrolito y produce un movimiento de iones a través de éste. Para la corrosión del acero de refuerzo no se requiere la presencia de dos metales para formar la celda; el ánodo y el cátodo son constituidas por zonas de diferente potencial electroquímico sobre la misma varilla, el electrolítico corresponde a la solución acuosa de sales que de ordinario existe en los poros del concreto, y el conductor eléctrico es la propia varilla de acero. *vid. fig.3.2.*

El acero de refuerzo ahogado en el concreto se protege de la corrosión por dos motivos:

1. Para generar la corrosión es indispensable que en los poros del concreto exista humedad y oxígeno para producir las reacciones químicas inherentes al proceso electrolítico. Se inhibe la corrosión si falta alguno de estos dos elementos. El acero de refuerzo no se corroe si el concreto que lo circunda permanece seco, ni tampoco si está continuamente inmerso en agua. Ante el riesgo de corrosión, el recubrimiento será el elemento que impida la penetración del agua y el aire externos, lo que está en función del espesor del recubrimiento y de la permeabilidad del concreto.



Fig.3.1. Daños por corrosión en elemento de concreto reforzado. Fuente: Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.

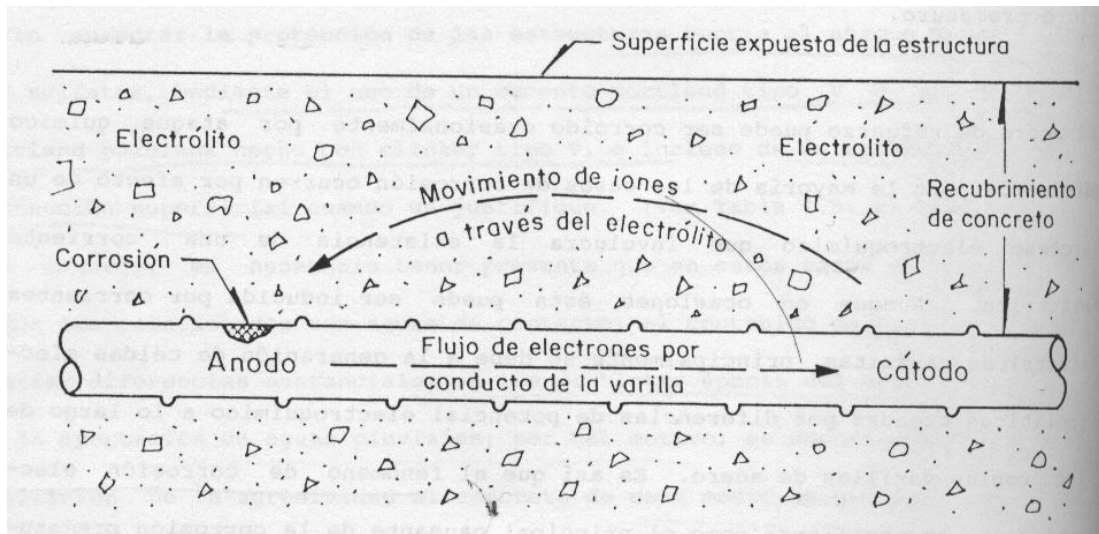


FIG.3.2. ESQUEMA DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA EN EL CONCRETO REFORZADO

Fuente: Manual de Tecnología del Concreto. Sección 3. p. 242.

- Al hidratarse el cemento Pórtland se libera hidróxido de calcio y aunado a la presencia de otras sales al concreto un alto nivel de basicidad (pH próximo a 13). En dicho medio básico, los primeros productos de la corrosión electrolítica se constituyen por una forma de óxido férrico que origina una delgada película de recubrimiento sobre las varillas, que la protege de la corrosión ulterior. Este proceso se denomina "pasivación" del acero de refuerzo. Esta película existe solamente si el concreto se conserva con un pH mayor de 11.5, para un pH inferior la película se pierde y no existe protección contra la corrosión.

Esta película protectora puede ser dañada por diversas acciones perjudiciales, destacando la carbonatación del concreto y la existencia de cloruros en el medio de contacto con las varillas. La fig.3.3 muestra gráficamente el desarrollo del deterioro por corrosión del acero de refuerzo. Se tienen dos etapas:

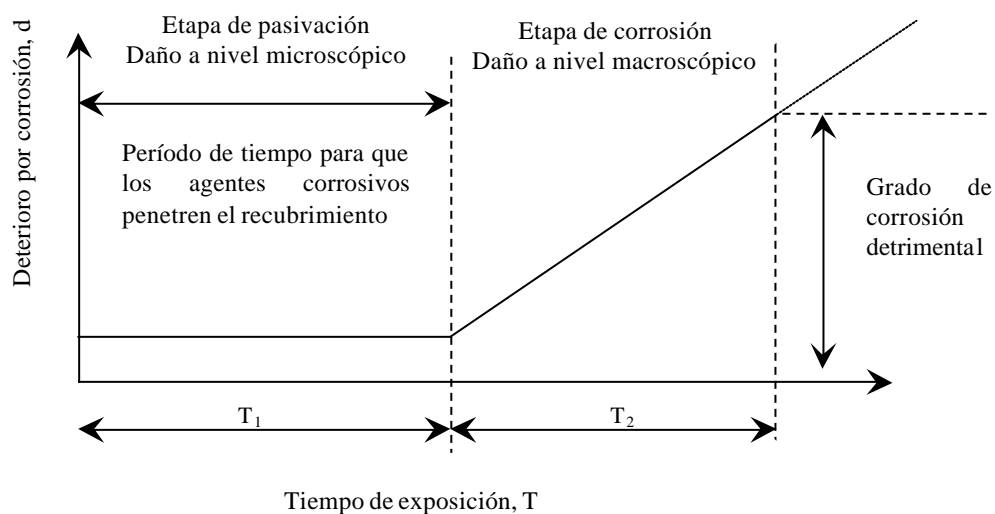


Fig. 3.3. Evolución del deterioro por corrosión del acero de refuerzo del concreto.

Fuente: Manual de Tecnología del Concreto, Sección. 3. p. 256.

En la primera etapa los agentes corrosivos, CO_2 y el ión Cl^- principalmente, penetran paulatinamente en el concreto hasta alcanzar el acero de refuerzo. Una vez alcanzado el acero de refuerzo se inicia el deterioro de la película de pasivación y por ende se inicia la corrosión. El daño puede llegar a un grado de corrosión detrimental. Se puede estimar el lapso T_1 , en función de la velocidad de penetración de los agentes de corrosión (carbonatación, difusión del ión cloruro y penetración del agua), por su parte el lapso T_2 es prácticamente impredecible, porque es multifactorial. De acuerdo con este criterio el espesor del recubrimiento debe ser lo suficientemente grueso para que los agentes corrosivos tarden un tiempo T_1 para penetrarlo.

La velocidad de penetración de los agentes corrosivos dependerá de dos situaciones:

La acción ofensiva: grado de intensidad, incluyendo presión, del medio externo corrosivo.

La acción defensiva: la permeabilidad del concreto (relación A/C) y el espesor del recubrimiento.

Por tanto el espesor del recubrimiento se debe definir en función del grado de riesgo de corrosión y de la relación agua / cementantes del concreto. De la intensidad de estas acciones, del espesor del recubrimiento y de la permeabilidad del concreto dependerá el grado de protección que se brinda a las varillas de acero. De modo que es necesario considerar los factores ofensivos o dañinos (carbonatación y cloruros) y los factores defensivos (permeabilidad y espesor del recubrimiento del concreto).⁴⁸ En el apéndice B se incluye un modelo para calcular en la etapa de diseño el tiempo inicial de corrosión.

III.2.E.1. EFECTO DE LA CARBONATACIÓN

En el capítulo anterior se explicó el fenómeno de la carbonatación, que se genera por la reacción entre el bióxido de carbono [CO_2] del aire atmosférico con hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] proveniente de la hidratación del cemento. Dicha reacción tiene como resultado la formación de carbonato de calcio [CaCO_3]. Simultáneamente se tiene una reducción del volumen del concreto, denominada *contracción por carbonatación* y se disminuye gradualmente la alcalinidad del concreto, que avanza desde el paño exterior del elemento al interior de este, hecho que contribuye en mayor medida a la corrosión.

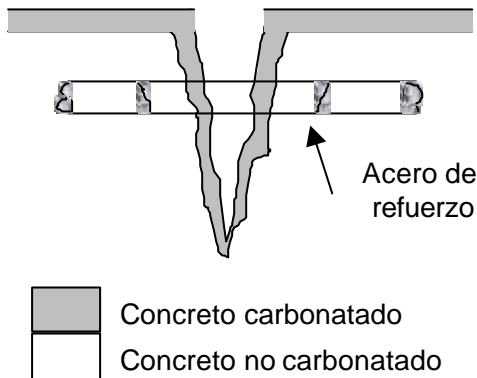
La alcalinidad del concreto se debe al hidróxido de calcio que es liberado durante el proceso de hidratación del cemento, desde que se mezcla el cemento y el agua y durante todo el proceso de hidratación.

El hidróxido de calcio tiene la ventaja de hacer al concreto un medio favorable para el desarrollo de la película de pasivación en el acero de refuerzo. Su desventaja es que es susceptible a ser lixiviado⁴⁹, por lo que dejaría espacios vacíos que incrementarían la porosidad del concreto y demeritan sus propiedades. De modo que si el concreto tiene hidróxido de calcio puede conservar la película de pasivación, si este compuesto disminuye por la carbonatación, el medio alcalino disminuye, y como consecuencia la película de pasivación puede ser más vulnerable ante agentes corrosivos. Normalmente el concreto tiene un pH de 12.5. o superior, si por alguna razón el pH disminuye el acero de refuerzo puede perder su película de pasivación, usualmente se considera que si el valor del pH es menor a 11.5, el medio no favorece a la pasivación del acero. Este valor no es riguroso, ya que por las diversas condiciones de exposición puede variar, dependiendo de la presencia de cloruros y los agentes de corrosión.

Un concreto de buena calidad expuesto a condiciones ordinarias de servicio puede presentar un daño mínimo por carbonatación, por ejemplo, unos cuantos milímetros de penetración en el recubrimiento, a pesar de tener varios años de servicio .

⁴⁸ Cfr. Manual de Tecnología del Concreto, CFE. Sección 3. Edit. Limusa, p.220-224.

⁴⁹ Lixiviación: proceso químico mediante el cual una sustancia alcalina se disuelve en agua.



Lo que se debe a que en un concreto de buena calidad la velocidad de la carbonatación es baja, adicionalmente los productos de carbonatación obstruyen algunos poros del concreto por lo que se impide el acceso de CO_2 y humedad adicionales; por lo que el proceso de carbonatación se reduce hasta lograr una velocidad insignificante. Sin embargo, si se produce una grieta por cualquier motivo, el proceso reinicia y puede llegar a hasta al acero, en ese instante se reduce la alcalinidad del acero e inicia la corrosión.⁵⁰ La figura 3.4. muestra la carbonatación de una grieta abierta. La carbonatación tiene mayor relevancia en los siguientes casos:

Fig.3.4. Carbonatación en una grieta abierta. Fuente: Corrosión del acero de refuerzo en el concreto. Neville, 1983.

- a) Cuando el aire atmosférico que rodea al concreto tiene un cantidad elevada de CO_2 . hecho común en ciudades altamente contaminadas, parques industriales o en instalaciones industriales que realizan procesos de combustión.
- b) Cuando el concreto es poroso, es decir, permeable. Facilita la penetración del CO_2 proveniente del aire atmosférico, y puede presentar agrietamientos.
- c) Cuando el recubrimiento sea mínimo o reducido. El recubrimiento tiene la función de retardar la penetración del CO_2 a las varillas de refuerzo por lo menos en un tiempo similar a la vida útil de la estructura o elemento. Evita el acceso de agua y aire exteriores.
- d) Cuando la humedad relativa ambiental sea del 50% por tiempos prolongados (climas tropicales). Condición que favorece a la carbonatación.

Dado lo anterior se observa claramente que la permeabilidad y la calidad del concreto, así como el espesor del recubrimiento son factores esenciales para resistir los efectos dañinos de la carbonatación. Por lo tanto para que un concreto resista al deterioro por carbonatación es necesario que tenga una buena calidad, que sea poco permeable y no presente agrietamientos. Por su parte el recubrimiento debe tener espesor adecuado y debe especificarse de acuerdo a las condiciones de exposición.

III.2.E.2. INFLUENCIA DE LOS CLORUROS

Tanto los cloruros como los sulfatos son sales inorgánicas, que tienen una presencia considerable en la naturaleza, suelen encontrarse en los componentes del concreto, en aguas y suelos que tienen contacto con estructuras de concreto e incluso en determinados ambientes atmosféricos. Ambos tipos de sales son perjudiciales. Los cloruros favorecen la corrosión del acero de refuerzo, en tanto los sulfatos reaccionan con los productos de la hidratación del cemento, que provocan expansiones capaces de agrietar y desintegrar al concreto. El ión cloruro impulsa a la corrosión mediante dos efectos principales:

- a) Al agregar cloruros a la solución de poro del concreto que actúa como electrolito, se incrementa la conductividad del mismo y facilita con esto el movimiento de los iones de hidroxilo $[\text{OH}]^-$ entre cátodo y ánodo (vid. Fig. 3.2).

⁵⁰ NEVILLE, Adam. Corrosión del Acero de Refuerzo en el Concreto. Revista IMCYC. Trad. Octubre, 1984.p.35-39.

- b) El mayor efecto se debe a que la cantidad de cloruros que alcanzan altas concentraciones producen reacciones químicas que generan puntos de deterioro (picaduras) en la película de pasivación de óxido férrico, los cuales al funcionar como ánodos forman celdas electrolíticas.

Previamente se indicó que la cantidad excesiva de cloruros puede originarse por vía interna o externa. El primero se refiere a los cloruros incluidos en el proceso de elaboración de la mezcla, ya sea en el agua, los agregados o algún aditivo; el segundo a los cloruros que se encuentran en el medio de exposición que están en contacto con la estructura (suelo, agua, aire) y que penetran al concreto a través de fisuras u otras discontinuidades o incluso por difusión.

Para el caso de los cloruros incorporados desde la elaboración de la mezcla se debe restringir su cantidad, con el objetivo de que su grado de concentración no exceda un nivel de inocuidad, a partir del cual exista riesgo de propiciar la corrosión. Dicha cantidad de cloruros es tolerable, debido a que no hay riesgo de iniciar un proceso corrosivo, es difícil de definir debido a su naturaleza multifactorial, entre estos el sistema de refuerzo, las características químicas del cemento y las condiciones ambientales.

III.2.E.2. i. SISTEMA DE REFUERZO

En el sistema de refuerzo hay que distinguir si es reforzado o presforzado. Los daños por corrosión para el concreto presforzado son mayores, debido principalmente:

- a) Al reducido diámetro del acero de presforzado,
- b) Por la elevada pérdida de su capacidad estructural que representa la corrosión para el concreto presforzado
- c) Porque el acero sometido a altos niveles de esfuerzo resulta más susceptible a la corrosión.

Por estas causas las concentraciones tolerables para el acero presforzado deben ser menores y se requiere un mayor cuidado con este tipo de estructuras. En el capítulo VII se discute con mayor profundidad dicho aspecto.

III.2.E.2.ii. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL CEMENTO

Determinadas características químicas del cemento contribuyen a evitar o facilitar la corrosión. El aluminato tricálcico (C_3A) del cemento Portland reacciona con los cloruros, el producto es cloroaluminato de calcio, que es insoluble y no contribuye a la corrosión. Así que los cementos con alto contenido de aluminato tricálcico pueden disminuir el grado de corrosividad porque fijan una mayor proporción de cloruros en el concreto. En una investigación experimental de corrosividad acelerada se comparó el comportamiento de un cemento tipo I con 9.5 % de C_3A y un cemento tipo V con 2.8% de C_3A , el primero se comportó 1.7 veces mejor en términos del tiempo transcurrido para el inicio de la corrosión. Por tanto, para concretos expuestos a agua de mar (estructuras marinas), que se caracterizan por un ataque mayor al concreto derivado por los cloruros que por los sulfatos, puede ser conveniente aplicar un cemento tipo II que protege moderadamente de los sulfatos, pero no aumenta el riesgo por corrosión, como sucede con un cemento tipo V.⁵¹

III.2.E.2.iii. CONDICIONES AMBIENTALES

El grado de riesgo de corrosión por condiciones ambientales se evalúan de acuerdo a sus condiciones de exposición:

1. **Bajo riesgo:** concreto en condición permanentemente seca

⁵¹ Cfr. Manual de Tecnología del Concreto, CFE. Sección 3. Edit. Limusa, p.249 – 250.

2. **Mediano riesgo:** concreto expuesto al contacto con aire húmedo o con agua
3. **Alto riesgo:** concreto expuesto a la penetración de cloruros provenientes del medio externo y con posibilidad de acceso al oxígeno.

Debe considerarse también si el concreto estará sujeto a sustancias químicas agresivas, si serán solubles o insolubles, y si ejercen alguna presión sobre alguna superficie. El concreto es más vulnerable si se encuentra expuesto al ataque de sustancias agresivas en solución, ejerciendo presión en alguna superficie. La presión tiende a forzar la penetración de las soluciones deletéreas.⁵²

Por su parte la velocidad de corrosión es muy lenta cuando la humedad relativa se encuentra entre 50 y 60% y se incrementa cuando oscila entre 90 y 95 %. Por encima de este valor la velocidad de corrosión disminuye drásticamente a un valor mínimo porque el concreto se encuentra saturado y no hay presencia de oxígeno.⁵³

El riesgo de corrosión depende también del uso o servicio que brindará la estructura, así como de la ubicación y exposición a ambientes agresivos; por ejemplo, el problema de corrosión es mayor en zonas húmedas que en secas, en marinas que en continentales y en industrializadas que en rurales.

III.2.F. DESEMPEÑO DEL CONCRETO ANTE LA CORROSIÓN

El concreto tiene la característica de proteger natural y eficazmente las diversas estructuras o armados de acero embebidas en él contra el medio ambiente o agentes agresivos. Esta característica es de gran importancia para la construcción. Dicha protección posee un doble efecto:

- 1) La solución contenida en los poros del concreto tiene un pH relativamente alto (medio alcalino), por lo que se mantiene inactivo al acero ante alguna reacción química. Los silicatos y principalmente los óxidos de sodio (Na) y potasio (K), ambos álcalis, que están presentes en el cemento al hidratarse forman el hidróxido de calcio, que a su vez permite que el pH de la fase acuosa contenida en los poros de concreto fabricado con cemento Pórtland varíe entre 12.5 y 13.5. Con este ambiente alcalino se forma una película de pasivación de óxidos de hierro, cuyas características son: transparente, delgada, compacta y continua. De modo que preserva al acero contra la corrosión por períodos indefinidos, a pesar de que se presenten humedades excesivas en el concreto endurecido.
- 2) El concreto brinda una protección física al acero de refuerzo contra los agentes externos que originan la corrosión. El concreto que rodea al acero de refuerzo restringe el acceso de agua, oxígeno, cloruros, sulfatos, ácidos u otras sustancias químicas que lo deterioren. Adicionalmente si tiene baja permeabilidad minimiza la penetración de sustancias que induzcan a la corrosión. La baja permeabilidad también incrementa la resistividad eléctrica del concreto, lo que impide el flujo de las corrientes electroquímicas de la corrosión.⁵⁴

La corrosión del acero de refuerzo ocurre aún cuando el recubrimiento fue supuesto para proteger el acero de refuerzo contra la oxidación o corrosión, no cumpliendo su función por varias razones: una relación agua / cementantes alta, una práctica de curado pobre o la ausencia del mismo, o una colocación inadecuada del armado de refuerzo, de modo que ingresan los iones de cloruro (Neville, 1995), bacterias, carbonatación (Hansson y Sorensen, 1990), etc. El deterioro del concreto se presenta porque los productos resultantes de la corrosión tienen mayor volumen que el acero y ejercen una presión considerable en los alrededores del acero. Las manifestaciones externas incluyen deformación, agrietamiento y desconchamiento del concreto. Concurrentemente la sección del acero se ve reducida (*vid.* fig.3.1).

⁵² CASTRO BORGES, P. *Et. al.* Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Cap.1.

⁵³ Durable Concrete Structures, CEB, p. 38.

⁵⁴ ACI 222. Corrosion of Metals in Concrete.

Este último efecto puede ser de particular interés en estructuras presforzadas porque pequeñas cantidades de la pérdida de metal posiblemente induzcan a una falla de tendón.⁵⁵

La investigación en corrosión hasta la fecha no ha producido un acero u otro tipo de refuerzo que no se corra cuando se emplee en el concreto y que tenga un empleo factible técnica y económicamente. Aunque a la fecha se sigue trabajando en este rubro. La investigación ha señalado la necesidad de un concreto de calidad, un cuidadoso diseño, buenas prácticas de construcción y límites razonables en la cantidad de cloruros en los ingredientes del concreto.

III.2.F.1. CEMENTO PÓRTLAND

Las diferencias entre los distintos tipos de cemento resultan de las variaciones en composición química y en finura, por tanto, cada cemento proporciona diferentes grados de protección al acero embebido. Según Presler *et. al.* Un cemento Pórtland bien hidratado que puede contener de 15 a 30 % de hidróxido de calcio del peso de cemento original, en condiciones normales, es suficiente para mantener una solución en el concreto con un pH de 13, independientemente del contenido de humedad.⁵⁶ Por otra parte el uso de cementos mezclados puede ser detrimental debido a la reducción de la alcalinidad. Sin embargo, proporcionan una reducción de la permeabilidad del concreto e incrementan la resistividad eléctrica, específicamente aquellos concretos donde una reducción de la relación agua / cemento fue posible. Este tipo de cementos proporcionan hasta cinco veces más resistencia a la penetración de cloruros que los exclusivamente realizados con cementos Pórtland. Al parecer son más las ventajas que se obtienen en las propiedades del concreto endurecido al emplear estos cementos mezclados que sus defectos.

III.2.F.2. AGREGADOS

El agregado tiene poco efecto sobre la corrosión. Solamente aquellos agregados que contienen sales de cloruro son los que pueden contribuir a la corrosión, hecho que sucede cuando la arena es suministrada del mar, playas o zonas áridas. Los agregados porosos pueden absorber una cantidad considerable de sales.

III.2.G. VELOCIDAD DE CORROSIÓN Y pH.

La figura. 3.5 muestra como la velocidad de corrosión decremanta como el pH aumenta. Debido a que el concreto es un medio alcalino, con pH del orden de 12.5 protege al acero. Solamente en aquellas situaciones donde las sales están presentes o el recubrimiento haya sido carbonatado el acero es vulnerable a la corrosión. La velocidad de corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto está fuertemente influida por los siguientes factores:⁵⁷

- Heterogeneidades en el concreto y el acero
- El pH del agua de poro de concreto
- Carbonatación de la pasta de cemento Pórtland
- Grietas en el concreto
- Espesor del recubrimiento sobre el acero
- Corrientes eléctricas extraviadas⁵⁸

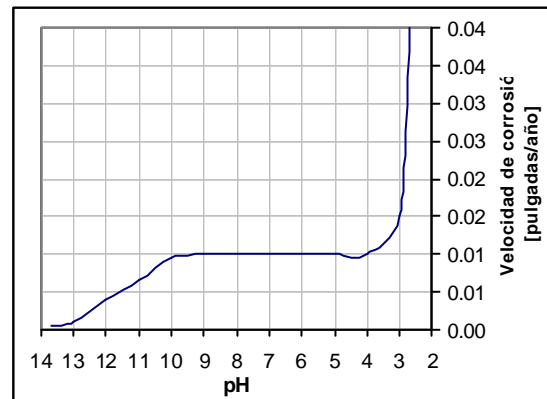


Fig. 3.5. Efecto del pH en la corrosión de acero en agua suave aereada a la temperatura de cámara

Fuente: ACI -222. Corrosion of Metals in Concrete. p.5.

⁵⁵ Vid. Capítulo VII. Durabilidad de Estructuras Especiales.

⁵⁶ ACI 222 P.222R.-8

⁵⁷ ACI 222. Corrosion of Metals in Concrete.p.222R-2.

⁵⁸ Vid. Supra.

- g) Factores ambientales: humedad y aire deben estar presentes para que la corrosión electroquímica tenga lugar. El concreto reforzado, con gradientes importantes de los iones de cloruro, es vulnerable a las macroceldas de corrosión, especialmente si está sujeto a ciclos de secado y humedad.
- h) Efectos galvánicos debidos a la presencia de otros metales embebidos

III.2 H. DIAGRAMAS DE POURBAIX

Marcel Pourbaix, un investigador belga, concibió los diagramas de potencial – pH, un resumen compactado de los datos termodinámicos en la forma de diagramas de potencial eléctrico contra pH. Los cuales incluyen el comportamiento electroquímico y de corrosión del acero en un medio acuoso. Su finalidad es mostrar las condiciones del pH del electrolito y el potencial electroquímico que es proclive a la corrosión. Las funciones principales de dichos diagramas son tres:

- a) Predecir si hay o no corrosión
- b) Estimar la composición de los productos de corrosión formados
- c) Predecir cambios ambientales que prevengan o restrinjan la corrosión.⁵⁹

En estos diagramas los equilibrios entre un metal y el agua a 25°C se representan por líneas que están en función del potencial, del pH o de ambos, con ello limitan zonas termodinámicamente estables, en donde el metal existe en alguna de sus formas (disuelto, como óxido, como hidróxido, como metal, etc).

La gráfica.3.6 muestra el diagrama Pourbaix que aplica para las propiedades protectoras del concreto y en la ausencia de corrosión en el acero embebido en concreto y cuando no hay presencia de cloruros o solamente en pequeñas cantidades. En ella se puede observar que para que el acero esté pasivado requiere un ambiente alcalino (pH >7) y un potencial poco negativo o positivo.

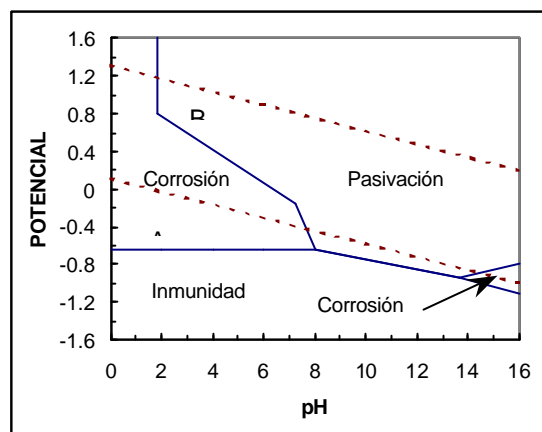


Fig.3.6. Diagrama Pourbaix del Acero.

Fuente: ACI-222. Corrosion of Metals in Concrete. p.5.

III.2.I. CORROSIÓN POR CORRIENTES EXTRAVIADAS

Las corrientes eléctricas extraviadas o parásitas son aquellas que siguen otras rutas que las de un circuito intencional. Pueden acelerar el proceso de corrosión del acero o de refuerzo. La fuente más común de estas corrientes son los ferrocarriles eléctricos, plantas de galvanoplastia y sistemas de protección catódica.

III.2.J. OTROS IONES DE SALES

Se ha reportado que las sales de sulfato y el carbonato pueden causar corrosión en el acero de refuerzo, sin embargo, todavía no está adecuadamente documentado. Otras sales como los percloratos, acetatos y sales de halógeno diferentes al cloro pueden ser corrosivas al acero embebido en el concreto. Se ha citado al hidrógeno de sulfuro como agente corrosivo.⁶⁰

⁵⁹ CASTRO BORGES, P. *El. al.* Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Cap.2.

⁶⁰ ACI 222. Corrosion of Metals in Concrete.p.222R-7.

III.3. PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO CONTRA LA CORROSIÓN

Para solucionar los problemas de corrosión en el acero común se pueden seguir dos consideraciones:

1. Los concretos demasiado permeables continúan siendo especificados, por lo cual es absolutamente obligatorio especificar acero 'libre de corrosión' o una protección catódica sofisticada. Un concreto con una resistencia a la compresión de 30 MPa (294 kg/cm²) es un concreto permeable, sin importar el ambiente en que es usado⁶¹. Es bien conocido y documentado que dicho concreto no ofrece una protección adecuada a la carbonatación. Lo anterior es una solución sencilla y costosa, en la cual se olvida que las dos causas de la corrosión son las altas relaciones agua / cementantes y un curado pobre. Se olvida que es sencillo y no tan caro combatir estas dos razones, que requerir implementar soluciones muy costosas y no tan infalibles.
2. Cuando los concretos impermeables son especificados y se realiza un curado óptimo no es necesario especificar acero 'libre de corrosión' ni considerar acero protegido para toda la vida útil de la estructura.

El primer paso para mejorar la resistencia a la corrosión del acero ordinario es el decremento de la relación agua / cementantes, y entonces ver si es necesario mayor protección a la corrosión. La eficiencia del microsílíce para proteger el acero de refuerzo es recomendada (Wossiefer,1991), así como el uso de hojas permeables y capas en la superficie (Sugawara et al,1993)⁶².

Un concreto con una relación agua / materiales cementantes de 0.35 tiene una impermeabilidad suficiente para proveer una protección suficiente contra la corrosión del acero ordinario, siempre y cuando exista un recubrimiento adecuado y una práctica de curado adecuada. El espesor del recubrimiento debe ser adaptado a la severidad del ambiente. Cuando la colocación y curado son ejecutados adecuadamente no hay necesidad de considerar el uso de varillas libres de corrosión o ingredientes anticorrosivos, y no hay necesidad de protección catódica. Una relación agua / materiales cementantes baja y una adecuada colocación y curado son el precio que se tiene que pagar para proteger las estructuras de concreto reforzado contra la corrosión. Cuando se observan con base en la vida de servicio y el costo social, el costo por pagar no es tan caro. La figura 3.7 muestra un armado de acero de refuerzo convencional.

Los factores que favorecen la corrosión son:⁶³

- Relación agua /cementantes alta
- Mala práctica de curado o ausencia de éste
- Colocación inadecuada del acero de refuerzo
- Ingreso de los iones de cloruro
- Bacterias
- Carbonatación

Por lo que algunos medios para prevenir o reducir el daño por corrosión en el concreto son:



Fig. 3.7. Acero de refuerzo convencional, sin óxido

⁶¹ AITCIN P.C. *High Concrete Performance*. Great Britain, 1998.

⁶² *Passim*. *Ibid*. Cap.17.

⁶³ *Ibid* p.487

- Eliminar el cloruro del medio ambiente
- Evitar o reducir la exposición al agua
- Reducir la permeabilidad del concreto mediante una relación agua / cementantes baja, y/o agregar una puzolana o un cemento mezclado
- Evitar pérdidas o imponiendo corrientes eléctricas. Los circuitos aterrizados directamente al acero y que transportan corrientes sujetarán al acero a un inevitable ataque electroquímico.
- Proteger al acero con capas defensivas
- Emplear algún inhibidor de la corrosión.

La tabla 3.1. muestra los agentes corrosivos y algunas recomendaciones para evitar su efecto en el concreto.

TABLA 3.1. AGENTES CORROSIVOS Y MEDIOS PARA MITIGAR LA CORROSIÓN	
AGENTE CORROSIVO	MEDIO DEFENSIVO
Relación agua /cementantes alta (alta permeabilidad)	Reducir la permeabilidad del concreto mediante una relación agua / cementantes baja., y/o agregando una puzolana o un cemento mezclado
Mala práctica de curado o ausencia de éste	Curado adecuado, continuo y prolongado
Colocación inadecuada del acero de refuerzo	Mano de obra calificada y una supervisión atenta y responsable
Ingreso de los iones de cloruro	a) Eliminar el cloruro del medio ambiente b) Empleando algún inhibidor de la corrosión. c) Protegiendo al acero con capas defensivas d) Evitando pérdidas o imponiendo corrientes eléctricas. Los circuitos aterrizados directamente al acero y que transportan largas corrientes sujetarán al acero a un inevitable ataque electroquímico. e) Evitar o reducir la exposición al agua
Bacterias	Evitar o reducir la exposición al agua
Carbonatación	a) Reducir la permeabilidad del concreto mediante una relación agua / cementantes baja. b) Espesor adecuado del recubrimiento. c) Evitar agrietamientos o fisuras en el concreto
<i>Fuente: Realizada por el autor con información de: Aitcin P.C. High Concrete Performance. 1998.p.487.</i>	

Cuando se tienen condiciones corrosivas, lo necesario para disminuir el riesgo a la corrosión es restringir la penetración de agua y de aire a través del concreto, es decir, que el concreto sea impermeable y para ello se requieren bajas relaciones agua /cementantes. Es importante señalar que reducir la relación agua / cementante es una medida potencial y para que sea efectiva necesita completarse con prácticas de diseño y constructivas eficaces para lograr que el concreto en la estructura sea homogéneo, compacto, y libre de fisuras. Como ya se indicó anteriormente el recubrimiento es un protector vital ante la corrosión, por lo que debe tener un concreto de buena calidad y un espesor que permita que el tiempo de ingreso de los agentes corrosivos sea compatible con el de la vida útil de la estructura.

Los sistemas protectores contra la corrosión del acero de refuerzo empleados actualmente en la construcción son:

1. Recubrimientos con espesor de 9.0 cm o superior en zonas de compresión de puentes (el recubrimiento excesivo en zonas de tensión exacerba el ancho de la grieta en la superficie).
2. Recubrimiento de concreto denso con bajo revenimiento
3. Recubrimiento de concreto modificado con látex
4. Acero de refuerzo inoxidable
5. Acero de refuerzo galvanizado
6. Acero de refuerzo con capas epóxicas

7. Refuerzo con fibras de vidrio
8. Ingredientes o aditivos inhibidores de corrosión en el concreto
9. Sistemas de barreras protectoras
10. Selladores con o sin recubrimiento
11. Microsilíce u otras puzolanas que reducen significativamente la permeabilidad del concreto
12. Protección catódica
13. Concreto superplastificado con bajas relaciones agua / cemento, monolítico o recubrimiento
14. Revestimiento con concreto polimérico
15. Impregnación con polímeros
16. Cementos mezclados con microsilíce u otras puzolanas para reducir la permeabilidad
17. Presfuerzo longitudinal y lateral para control de grietas

El propósito de la mayoría de estos sistemas es retrasar o evitar el contacto de los iones de cloruro con el acero de refuerzo. La mayoría de dichas estrategias pueden emplearse individual o en combinación para reparación y mantenimiento de estructuras deterioradas. Dependiendo de la situación de cada obra o estructura, de los recursos económicos y de la disponibilidad del método en la región puede ser conveniente un sistema u otro. En la siguiente sección se describirán a detalle las características y ventajas de emplearlas.

III.4. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA EVITAR CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

La industria de la construcción anhela costos bajos y un modo sencillo de combatir la corrosión del acero de refuerzo. Actualmente no se tiene un método milagroso que satisfaga ambas características. El estado de arte actual ofrece varios sistemas o técnicas que normalmente incrementan el costo inicial y que posiblemente requieran cambios en los procesos de construcción, pero hay que tener presente que el esfuerzo y la inversión adicional favorecerá en más años de vida de una estructura.

Adicionalmente a la protección natural contra la corrosión que brinda el concreto al acero de refuerzo, se puede proteger por otros sistemas o medios de diversa naturaleza. Estos se han ido desarrollando y perfeccionando a través de los años y la experiencia. Estos sistemas se clasifican en tres categorías:

1. Diseño y prácticas de construcción que permiten maximizar la protección permitida por el concreto de cemento Pórtland
2. Tratamientos que penetran o son aplicados en la superficie del miembro de concreto para excluir los iones de cloruro del concreto.
3. Técnicas que previenen la corrosión del acero de refuerzo directamente.

La tabla 3.2. señala los sistemas constructivos disponibles en la actualidad para evitar y/o restringir la corrosión. En las secciones siguientes se exponen estos sistemas de protección disponibles. Cabe señalar que cada día es más común que los diseñadores especifiquen niveles múltiples de protección a la estructura. Por ejemplo, ahora es común especificar que las estructuras de estacionamientos postensadas contengan una capa epóxica en el acero de refuerzo y microsilíce en el concreto.⁶⁴ Esta práctica permite mejorar la durabilidad del concreto, incrementar su vida útil y difundir las nuevas tecnologías en el medio de la construcción.

⁶⁴ HOLLAND, Terence C. *Corrosion Protection for Reinforced Concrete. A Summary of Prevention Strategies.*

TABLA 3.2. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA EVITAR CORROSIÓN

CLASIFICACIÓN				PRODUCTOS COMERCIALES	EFECTO	OBSERVACIONES	
TRATAMIENTOS SUPERFICIALES O QUE PENETRAN AL CONCRETO	TELAS PLASTICAS			POLIETILENO	BARRERA DE PROTECCIÓN	SU APLICACIÓN SE LIMITA A ELEMENTOS PREFABRICADOS O PARTES DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS O SUMERGIDAS EN AGUA	
	RECUBRIMIENTOS QUE FORMAN PELICULA			RESINAS EPÓXICAS A BASE DE ALQUITRAN DE HULLA	BARRERA DE PROTECCIÓN E IMPERMEABILIZANTE	AMPLIO USO COMO IMPERMEABILIZANTES EN ESTRUCTURAS EN CONTACTO CON AGUA	
	SELLADORES			A BASE DE SILANOS	RESTRINGIR ACCESO AL IÓN CLORURO [Cl ⁻]	NO FORMA PELICULA. NO MODIFICA ASPECTO NI FUNCIONES DE ESTRUCTURAS. UTIL EN PISOS, PAVIMENTOS Y LOSAS DE CONCRETO REFORZADO. COSTOS PERIODICOS DE MANTENIMIENTO	
TÉCNICAS QUE PREVIENEN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DIRECTAMENTE.	RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL EN VARILLAS	METÁLICO	METALES MENOS NOBLES QUE EL ACERO	ZINC (GALVANIZADO) Y CADMIO	PROTECCIÓN VARILLAS	DE ESTOS RECUBRIMIENTOS SOLO SE APLICA COMERCIALMENTE EL GALVANIZADO (ZINC). AMPLIAMENTE DIFUNDIDO EN LA CONSTRUCCIÓN.	
			METALES MAS NOBLES QUE EL ACERO	COBRE Y NIQUEL	PROTECCIÓN VARILLAS		
	NO METÁLICO	RESINA EPOXICA	RESINA EPOXICA	RESINA EPOXICA	RESINA EPOXICA	PROTECCIÓN VARILLAS, ADHERENCIA ACERO - CONCRETO SATISFACTORIA	RECUBRIMIENTO NO METÁLICO MÁS EMPLEADO. SE APLICA EN FORMA DE POLVO. DE PREFERENCIA DEBE APLICARSE A TODO EL ACERO DE REFUERZO.
	CORRIENTE ELECTRICA APLICADA	CORRIENTE ELECTRICA APLICADA			PROTEGER VARILLAS	SE PUEDEN EMPLEAR ANODOS CON MATERIALES DE MAYOR DURACIÓN (FIERRO COLADO CON ALTO CONTENIDO DE SILICATO O GRAFITO). ALTO COSTO	
		ACEROS ESPECIALES	ACERO INOXIDABLE			COSTO ELEVADO	
DISEÑO Y PRACTICAS DE CONTRUCCION	BUEN DISEÑO					BAJO COSTO	
	PRACTICAS DE CONSTRUCCIÓN					BAJO COSTO	
	INHIBIDORES DE CORROSIÓN	INORGÁNICO	ANÓDICOS	NITRITO DE CALCIO, NITRATO DE SODIO, BENZOATO DE SODIO Y CROMATO DE SODIO	INHIBIR CORROSIÓN	POSIBLE EFECTO COLATERAL	
			CATÓDICOS	COMPUESTOS ALCALINOS (HIDROXIDO DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO)	INHIBIR CORROSIÓN	INCREMENTA EL pH DEL CONCRETO, POR LO QUE OFRECE MAYOR PROTECCIÓN A LA PELÍCULA DE PASIVACIÓN. POSIBLE EFECTO COLATERAL	
			COMBINADO		INHIBIR CORROSIÓN	ANODICOS Y CATODICOS. MEJOR COMPORTAMIENTO POSIBLE. EFECTO COLATERAL	
	ORGANICO		A BASE DE AMINAS Y ESTERES		NO TIENE EFECTO COLATERAL. EXCELENTE DESEMPEÑO EN LABORATORIO. REQUIERE UN ALTO CONTENIDO DE AIRE INCLUIDO EN LA MEZCLA. COSTO MEDIO		
	ADITIVOS	REDUCTORES DE AGUA DE MEZCLADO			REDUCIR POROSIDAD Y PERMEABILIDAD		
		SUPERFLUIFICANTES			REDUCIR PERMEABILIDAD		
		MINERALES CON PROPIEDADES PUZOLANICAS	PUZOLANAS		REDUCIR PERMEABILIDAD INTRÍNSECA DE LA PASTA	TIENE DOBLE EFECTO, 1. AUMENTA LA ALCALINIDAD DEL CONCRETO (FACTOR QUE AUMENTAR LA PASIVACIÓN) Y 2. MODIFICA LA ESTRUCTURA POROSA, Y MEJORA LA PERMEABILIDAD. EL MICROSÍLICE ES MUY EFECTIVO. COSTO MEDIO	
	MICROSÍLICE						
CENIZAS VOLANTES							
CONCRETOS ESPECIALES	CONCRETO SIN REVENIMIENTO			BAJA PERMEABILIDAD	CONVIENE AGREGAR SUPERPLASTIFICADORES PARA INCREMENTAR LA TRABAJABILIDAD. COSTO RELATIVAMENTE BAJO		
	CONCRETO MODIFICADO CON LATEX			MODIFICA ESTRUCTURA DE PORO Y BAJA LA PERMEABILIDAD	POSIBLES PROBLEMAS DE AGRIETAMIENTO. ALTO COSTO. ALTA EFECTIVIDAD		

FUENTE: REALIZADA POR EL AUTOR CON INFORMACIÓN DE LAS REFERENCIAS : CFE, AITCIN, HOLLAND

III.4.A. DISEÑO Y PRÁCTICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA MAXIMIZAR LA PROTECCIÓN AL ACERO DE REFUERZO

A través de un buen diseño y prácticas adecuadas de construcción se maximizan las características que protegen al acero embebido en el concreto de la corrosión. Por ejemplo, el drenaje adecuado y un método para remover el agua de drenaje de la estructura son particularmente importantes. Las superficies de concreto deben tener una pendiente para permitir un drenaje adecuado y el concreto debe ser adecuadamente colocado, acabado y curado.⁶⁵

Los cloruros forman parte de la naturaleza, por lo que especificar un concreto con un contenido nulo de cloruros no es realista. Es bien conocido que en cualquier sitio pueden estar presentes los cloruros en el concreto y que el riesgo a la corrosión se incrementa conforme aumenta el contenido de cloruros, por lo que los aditivos que contengan cloruros deben evitarse. Es difícil establecer un valor debajo del cual el riesgo por corrosión sea despreciable, y que sea apropiado para todos los ingredientes de la mezcla, bajo todas las condiciones de exposición, y que puedan ser medidas mediante una prueba estándar. Obviamente la tolerancia máxima a los cloruros en la mezcla de concreto debe disminuir conforme aumente el riesgo por corrosión por factores externos. Los contenidos máximos de cloruros tolerables en el concreto normalmente se expresan como un porcentaje del contenido de cemento, en peso. Existen tres valores analíticos diferentes para determinar el contenido de cloruro en el concreto fresco, endurecido o en cualquiera de los ingredientes de mezcla del concreto:

- a) Cloruros totales
- b) Cloruros solubles en ácido (nitríco)
- c) Cloruros solubles en agua

Los resultados no son comparables, pues los cloruros solubles en ácido son definitivamente más altos a los solubles en agua. Ciertas investigaciones han indicado que bajo determinadas circunstancias un contenido tan bajo como 0.15 % de cloruros solubles en agua (o 0.20% de cloruros solubles en ácido) son suficientes para iniciar la corrosión del acero embebido.⁶⁶

Como se indicó arriba los agregados poco afectan a la corrosión, sin embargo, se ha establecido un límite de 0.06 % del ión cloruro soluble en ácido en los agregados (arena y grava en conjunto y con respecto al peso de agregado); también se ha sugerido que el concreto no deber contener más del 0.4% de cloruro derivado de los agregados (por peso del cemento).

Los límites máximos de los cloruros en los Reglamentos de Construcción varían ampliamente. La tabla 3.3. muestra los límites entre dos reglamentos y comités del ACI, dependiendo si se trata de cloruros solubles en agua o en ácido. En la tabla 3.4 se presentan los límites se acuerdo a métodos de prueba para determinar el contenidos de cloruros en el concreto.

La corrosión en el concreto presforzado es más delicada y puede tener mayores consecuencias, que en el concreto convencional, la causa es que la corrosión puede originar una reducción del área transversal y falla del acero. La alta tensión a la que se encuentra el acero también le proporciona mayor vulnerabilidad a la corrosión bajo esfuerzo,⁶⁷ y donde la carga es cíclica se puede presentar la llamada corrosión por fatiga.⁶⁸ Debido a que la gran vulnerabilidad del concreto presforzado los límites máximos son inferiores al convencional.

⁶⁵ NAWY, E.G. *Concrete Construction Engineering Handbook*, 1997, p. 5 - 40.

⁶⁶ ACI 222.P.222R-12.

⁶⁷ **Corrosión bajo esfuerzo:** Forma de ataque localizado que requiere la presencia de un medio corrosivo específico y la presencia de esfuerzos a tensión, ya sea aplicados o residuales en el material. Los puentes en países con climas fríos presentan este fenómeno debido a que en el invierno se depositan sales descongelantes, que contienen cloruro y adicionalmente están sometidos a las cargas impuestas por el tráfico vehicular.

⁶⁸ **Corrosión por fatiga:** ataque parecido a la corrosión bajo esfuerzo, sólo que los esfuerzos son de tipo cíclico y pueden ser introducidos por procesos térmicos o mecánicos.

De acuerdo al estado de arte actual del tema, el ACI 222 ha recomendado los siguientes límites máximos, expresados como porcentaje del peso del cemento Pórtland para minimizar el riesgo por corrosión inducida por cloruros.

TABLA 3.3. LÍMITES MÁXIMOS TOLERABLES DE CLORUROS EN EL CONCRETO PARA MINIMIZAR EL RIESGO DE CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO				
TIPO DE CONCRETO Y CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	Contenido máximo tolerable de ión cloruro (cl^-) en el concreto, porcentaje en peso del cemento *			
	Reglamento noruego NS 3474 _{B1}	ACI 201 _A	ACI 222 _B	ACI 318 _A
Concreto presforzado	0.002	0.06	.08	0.06
Concreto reforzado convencional	0.6 *			
Todo concreto: condiciones con riesgo de corrosión.		---	0.20	---
Concreto expuesto a la penetración de cloruros externos.		0.10	---	0.15
Concreto expuesto a la humedad, sin cloruros.		0.15	---	0.30
Concreto en condición permanentemente seca		Sin limite	---	1.00

Notas: A Cloruros solubles en agua, B – Cloruros solubles en ácido.
 * sólo para concretos elaborados con Cemento Pórtland.
 FUENTES: ACI 222, ACI 318. Manual de Tecnología del Concreto, CFE. Sección 3, p. 251.

TABLA 3.4. LÍMITES MÁXIMOS PARA EL CONTENIDO DE CLORURO DE ACUERDO A MÉTODOS DE PRUEBA			
CATEGORÍA	Limite de cloruro		
	Soluble en ácido	Soluble en agua	
	ASTM C 1152	ASTM C 1218	Soxhlet*
Concreto presforzado	0.08	0.06	0.06
Concreto reforzado en condiciones húmedas	.010	0.08	0.08
Concreto reforzado en condiciones secas	0.20	0.15	0.15

* Método de prueba propuesto por el ACI 222. Al parecer con este método sólo se miden los cloruros que contribuyen al proceso de corrosión, par mayor información sobre el método consúltese ACI 222. FUENTE: ACI 222, p.222f-13.

En la tabla 3.5 se presentan los espesores mínimos recomendados en Australia para diferentes ambientes, dependiendo de su resistencia a compresión. En el *Manual de Tecnología del Concreto* se recomienda su aplicación para la República Mexicana, debido a la similitud de condiciones ambientales. El espesor del recubrimiento deber ser tan amplio como sea posible, consistente con un buen diseño estructural. La severidad del ambiente de servicio y el costo.

Cuando se tienen condiciones de riesgo de corrosión más severas, como estructuras expuestas a sales descongelantes, agua salina o agua de mar en la zona de marea, se debe incrementar el espesor del recubrimiento y disminuir la relación agua / materiales cementantes; el ACI 201 recomienda que el recubrimiento mínimo sea 75 o 90 mm, según se utilicen las relaciones agua / cemento de 0.40 o 0.45 respectivamente.

TABLA 3.5. ESPESORES MÍNIMOS RECOMENDADOS PARA RECUBRIMIENTO DE CONCRETO [mm]					
AMBIENTE	Resistencia característica del concreto, medida en cubo, f'c [kg/cm²]				
	200	250	320	400	500
A1. Ambiente interior o exterior árido, no industrial	20	20	20	20	20
A.2. Ambiente exterior moderado, no industrial	–	30	20	20	20
B1. Ambiente exterior tropical, no industrial, entre 1 y 50 km. de las costa	–	--	50	40	30
B.2. Ambiente exterior costero, a menos de 1 km. de la orilla de mar	–	--	--	60+	50+
Resistencia característica del concreto, medida en cilindro, f'c [kg/cm ²]*	160	200	250	320	400
Relación agua / cemento, máxima probable	0.70	0.65	0.60	0.50	0.42

*Aplicando un factor de conversión (aproximado) de 0.8
+ Con más de 7 días de curado, preferentemente 28 días.
Fuente: Manual de Tecnología del Concreto, Sección 3. p.257

Entre las buenas prácticas constructivas para evitar corrosión en el acero de refuerzo se tienen las siguientes⁶⁹:

- **Emplear relaciones agua / cemento bajas**, preferentemente entre 0.32 y 0.44. Tanto la permeabilidad del concreto y la corrosión decremantan severamente conforme la relación agua cemento disminuye. En investigaciones se ha demostrado que la permeabilidad del cloruro a largo plazo a la profundidad de 25 mm en el concreto disminuye hasta un 80 y 95% cuando la relación agua / cemento se reduce de 0.51 a 0.4 y 0.28, respectivamente.⁷⁰
- **Limitar el contenido de cloruros incluidos en la mezcla.**
- **Maximizar el recubrimiento sobre el acero de refuerzo.** Debe ser del mayor espesor posible para minimizar la penetración de largo plazo de agua y iones de cloruro.
- **Proveer un curado adecuado**
- **Usar un aditivo reductor de agua de alto rango**, para proporcionar al concreto suficiente trabajabilidad para que los trabajadores no intenten agregar agua a la mezcla.
- **Consolidar el concreto adecuadamente**
- **Usar acero postensado para minimizar el agrietamiento**, en aquellos secciones donde sea apropiado
- **Incluir provisiones para reparar las grietas en las especificaciones originales.** Asumir que el concreto se agrietará. Estar preparado para reparar las grietas antes de que la estructura entre en servicio.

Dichas prácticas constructivas son el primer paso para controlar la corrosión.

⁶⁹ HOLLAND, Terence. *Corrosion Protection for Reinforced Concrete*.

⁷⁰ *Protective Systems for New Prestressed and Substructure Concrete FHWA/RD-86/193 [Federal Highway administration, 1987], op.cit. en NAWY, E.G. Concrete Construction Engineering Handbook, 1997, p. 5 - 40.*

III.4.A.1. DISEÑO DE LA MEZCLA, CONSOLIDACIÓN Y RECUBRIMIENTO

Si el concreto estará expuesto a cloruros se debe contemplar en el diseño de la mezcla una baja relación agua / cementantes (A/C), en conjunto una adecuada consolidación y densidad del concreto. En la figura 3.8 se muestra el efecto de la relación agua /cemento en la penetración de sales y en la figura 3.9 se aprecia el efecto de la consolidación en la penetración de sales. Un concreto con una relación agua /cemento de 0.40 resiste mejor la penetración de sales que aquellos con una relación agua /cemento de 0.50 o 0.60.

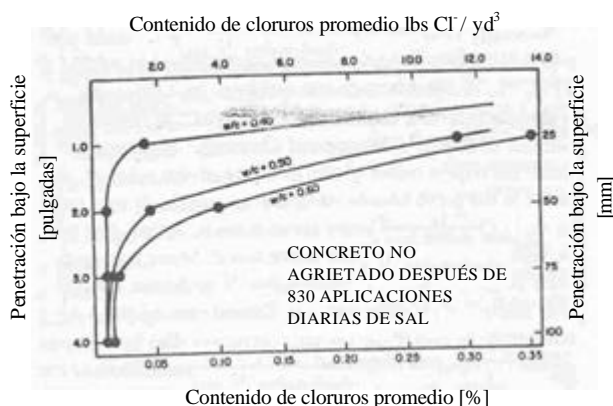


Fig. 3.8 Efecto de la relación agua / cemento en la penetración de sales. Fuente: ACI 222 p.14.

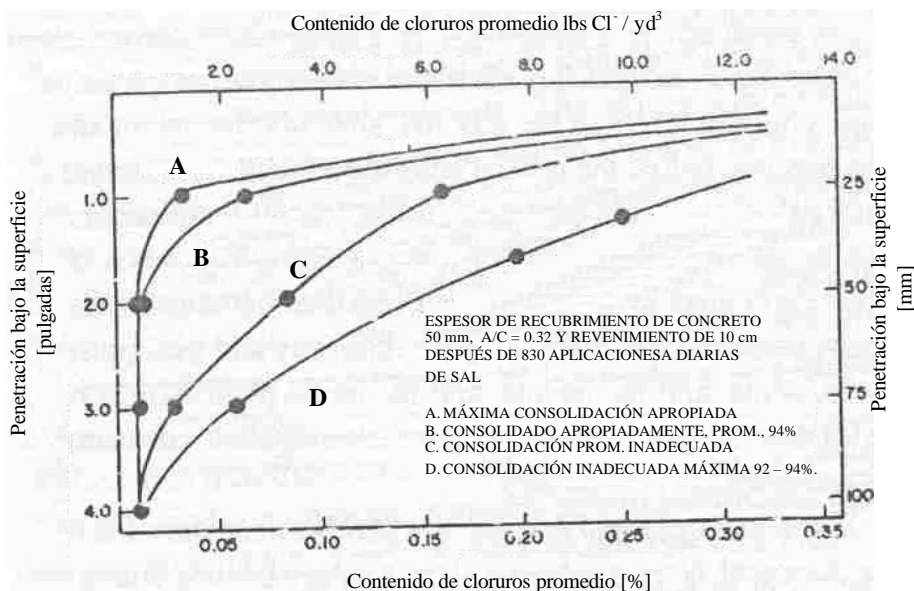


Fig. 3.9 Efecto de la consolidación inadecuada en la penetración de sales. Fuente: ACI 222 p.14.

El efecto combinado de la relación agua / cemento y el espesor del recubrimiento se presenta en la figura 3.10 que ilustra el número de aplicaciones diarias de sales antes de que el cloruro alcance el valor crítico (0.20 % soluble en ácido) a varias profundidades. Por ejemplo, un concreto con A/C = 0.40 es suficiente para proteger al acero embebido ante 800 aplicaciones de sal con un recubrimiento de 40 mm, un concreto con A/C = 0.50 brinda la misma protección con un recubrimiento de 70 mm, por su parte un concreto con A/C = 0.60 necesita para el mismo fin un recubrimiento de 90 mm. Es decir, a medida que un concreto posea menor relación agua / cemento requerirá menor recubrimiento para proteger al acero de refuerzo de un ambiente agresivo dado. Por tanto, para la protección del acero se necesita un diseño adecuado de mezcla y buenas prácticas constructivas, como consolidar y vibrar adecuadamente al concreto.

Aún cuando se especifique un recubrimiento determinado debe asegurarse durante la construcción que el recubrimiento indicado sea el ejecutado realmente.

Se deben considerar las tolerancias, el método de construcción y el nivel de inspección debe ser considerado para determinar el recubrimiento especificado.

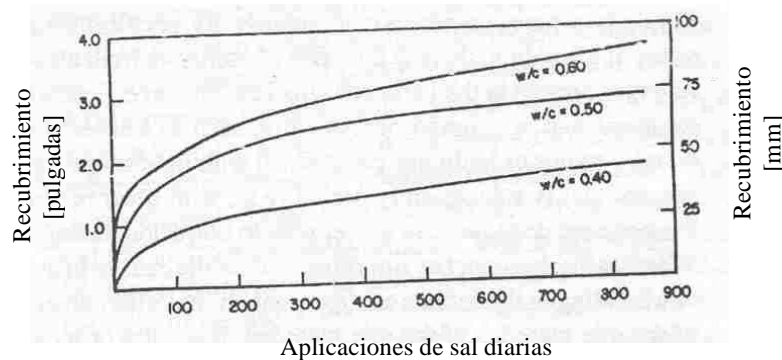


Fig. 3.10 Efecto de la relación agua / cemento y profundidad de recubrimiento en el tiempo relativo a la corrosión. Fuente: ACI 222 p.14.

III.4.A.2. AGRIETAMIENTO

Existe una controversia acerca del papel de las grietas en la corrosión. Se tienen dos escuelas, la primera indica que las grietas reducen la vida de servicio de las estructuras porque permite la penetración rápida de la carbonatación y es un medio de acceso a los iones de cloruros, humedad y oxígeno, entre otras sales, hacia al acero de refuerzo. Las grietas aceleran el ataque por corrosión y simultáneamente proveen espacio para el depósito de los productos de corrosión. La otra escuela señala que las grietas pueden acelerar el ataque por corrosión, dicha corrosión es localizada. Debido a que los iones de cloruro eventualmente penetran aún en el concreto no agrietado e inician una mayor difusión de la corrosión del acero, el resultado es que después de pocos años de servicio se tiene poca diferencia de la cantidad de corrosión entre el concreto agrietado y el no agrietado.

Las diferencias entre los puntos de vista se explican parcialmente, debido al hecho de que el efecto de las grietas son función de su origen, ancho, intensidad y orientación. Por ejemplo, si la grieta es perpendicular al acero de refuerzo, la longitud corroída de las varillas interceptadas no es mayor a tres diámetros de la varilla.⁷¹ Las grietas que son paralelas al refuerzo, como las originadas por contracción plástica, son más dañinas porque la longitud corroída de la varilla es mayor y la resistencia del concreto al desconchamiento es menor.

Se tienen estudios que demuestran que aunque las grietas con espesores menores a 0.3 mm tiene poca influencia en la corrosión del refuerzo. No hay correspondencia entre el espesor de la grieta y su espesor interno.

Es útil diferenciar las grietas en controladas y no controladas para fines de diseño. Las controladas son las que se pueden predecir razonablemente derivado de la sección geométrica y aplicación de cargas. Las no controladas son las que son causadas por contracción plástica, colocación o una condición de sobrecarga. Estas grietas son frecuentemente anchas y usualmente causan inquietud, particularmente si son activas. Sin embargo, estas pueden ser dirigidas con procedimientos de diseño y tomando medidas para evitar su ocurrencia. En el caso de que fueran inevitables, como es el caso de algunos pavimentos o losas se pueden dirigir, sellar o predisponer en ciertas longitudes o miembros.

⁷¹ BEEBY, A.W. "Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete in Its Relation to Cracking". *The Structural Engineer (London)*, V. 56A, No.3, 1978, pp.77-81. Referenciado en ACI 222 p. 222R-15.

III.4.A.3. ADITIVOS

Los aditivos anticorrosivos pueden ser sustancias químicas o compuestos minerales que se agregan al concreto al elaborar la mezcla para prevenir la corrosión del metal embebido. Su función es disminuir la permeabilidad y hacer al concreto menos penetrable por los agentes de corrosión, principalmente cloruros, bióxido de carbono, oxígeno, agua y sales disueltas, e inhibir su acción corrosiva. Se clasifican en dos categorías:

- a) **Inhibidores de corrosión:** aquellos aditivos que químicamente inhiben el proceso de corrosión, es decir, restringen a los agentes corrosivos. Los inhibidores más comunes son químicos o inorgánicos que al integrarse al concreto restringen el desarrollo de las reacciones electrolíticas entre el acero de refuerzo y el medio que los rodea. Pueden ser anódicos, catódicos o compuestos, dependiendo del sitio de celda en que ejecuten su acción.
- b) **Aditivos que mejoran las características del concreto:** Estos aditivos mejoran la permeabilidad y porosidad del concreto para reducir la penetración de los iones de cloruro u otros agentes de corrosión. Entre los aditivos químicos destacan los reductores de agua de mezclado, los superfluidificantes; por parte de los aditivos minerales destacan las puzolanas (microsílice, cenizas volantes, etc.).

III.4.A.4. INGREDIENTES INHIBIDORES DE CORROSIÓN EN EL CONCRETO

En Estados Unidos el mayor ímpetu por desarrollar los inhibidores de corrosión en el concreto en gran escala se debió a las fallas prematuras que se presentaron en los puentes de concreto reforzado del sistemas de autopistas interestatal. El problema en aquel entonces fue severo, y continúa siéndolo hasta hoy. Los estudios al respecto se iniciaron en la década de los 60's del siglo pasado, con el resultado de un ingrediente de nitrito de calcio que se empezó a comercializar en 1980 por varias compañías proveedoras de productos para el concreto. Actualmente el uso de los inhibidores es común y se basa en el buen desempeño que han tenido estos productos.⁷² Para que un inhibidor trabaje adecuadamente no sólo debe controlar la corrosión, debe también ser compatible con el concreto.

Las presiones originadas por el incremento de volumen de los productos de corrosión conducen al desconchamiento de la superficie del concreto en forma de delaminaciones o manchas ampliamente visibles, producto de las grietas que se forman. Los inspectores tienden a notar dichos daños antes de que la estructura completa presente una reducción en su resistencia mecánica. Adicionalmente la apariencia de la estructura puede ser dañada, requiriendo reparaciones antes de lo esperado.

La flexibilidad de los inhibidores de la corrosión con respecto a su dosificación y su compatibilidad con todos los aspectos de construcción y operación de las estructuras, los convierte en una protección útil contra la corrosión. El inhibidor trabaja como un guardaespaldas dentro del concreto para proveer un ambiente más protector al acero. Los sistemas que cubren al acero reducen el vínculo y no aprovechan la ventaja de la protección natural ofrecida por el concreto. Además, es imperativo mantener la integridad de la capa durante la construcción. Como se indicó arriba los inhibidores pueden ser anódicos, catódicos o compuestos, dependiendo del sitio de celda en que ejecuten su acción. Se ha sugerido una gran cantidad de inhibidores químicos, tanto orgánicos como inorgánicos, sin embargo, pueden presentar efectos detrimentales a largo plazo. Entre los inhibidores inorgánicos se encuentran: dicromato de potasio, cloruro de estaño, zinc y cromatos de plomo, hipofosfito de calcio, nitrito de sodio y nitrito de calcio. Entre los inhibidores orgánicos que se han sugerido benzoato de sodio y anilina etílica, algunos de sus efectos colaterales son resistencias bajas, tiempos erráticos de colocación, eflorescencias e incremento a la susceptibilidad a la reacción álcali – sílice.⁷³

⁷² GAIDIS J.M. & ROSENBERG A.M. Avoiding Corrosion Damage in Reinforced Concrete. *Concrete International*, November, 2001.

⁷³ ACI 222. 922R-10. *La reacción álcali sílice se expone n el capítulo IV.*

III.4.A.4.i. INHIBIDORES ANÓDICOS

Sustancias con gran capacidad para aceptar electrones por lo que absorben una cantidad importante del flujo de iones que se dirigen al ánodo y reducen la intensidad del proceso de corrosión. Los compuestos principales de este tipo de inhibidores son: nitrito de calcio, nitrito de sodio, benzoato de sodio y cromato de sodio. El primero (nitrito de calcio) es el más conocido y usado en la construcción, se tiene información de que su empleo retrasa el inicio de la corrosión, y disminuye su velocidad. Frecuentemente se requiere emplear una elevada proporción, lo cual debe evaluarse dependiendo del riesgo de corrosión del medio externo.⁷⁴ El nitrito de calcio ha sido reportado como inhibidor corrosivo efectivo, sin embargo, las investigaciones continúan.

III.4.A.4.ii. INHIBIDORES CATÓDICOS

Sustancias que aceptan protones, por lo que tienden a desempeñar la función de cátodo, inhibiendo la formación de celdas de corrosión. La mayoría de estos compuestos son alcalinos, como el hidróxido de sodio y el carbonato de calcio, por lo que al integrarlos al concreto incrementan el pH de éste, favoreciendo la conservación de la película de pasivación.

III.4.A.4.iii. INHIBIDORES COMPUESTOS

Los inhibidores compuestos son una mezcla de catódicos y anódicos, donde se complementan para mejorar la eficacia de sus efectos. Se ha indicado por algunos autores que los inhibidores pueden tener efectos colaterales perjudiciales a las propiedades mecánicas del concreto.⁷⁵

III.4.A.4.iv. INHIBIDORES ORGÁNICOS

En la última década han surgido nuevos desarrollos y productos, el uso de aditivos de origen orgánico a base de aminas y ésteres se ha señalado como superior con respecto a los inorgánicos y que además no producen efectos colaterales en las propiedades del concreto fresco o endurecido.⁷⁶

En esta categoría sólo se tiene un producto, es nuevo en la industria del concreto. Dicho producto combina químicos orgánicos probados exitosamente en la inhibición de corrosión distintos al concreto. El aditivo se agrega en el mezclado. El inhibidor de protección orgánico forma una capa protectora en el acero de refuerzo, la cual previene reacciones entre el acero y los iones de cloruro. El material también reduce la permeabilidad del concreto para disminuir la velocidad de la difusión del cloruro. Este efecto secundario juega también un papel secundario. Debido a que no existe una reacción que compita entre los inhibidores de corrosión orgánicos y los cloruros, no se tiene necesidad de estimar la carga de cloruros para la estructura. La dosificación es de 6 lt/m³ (aproximadamente un galón por yd³).

Las pruebas de laboratorio indican que este tipo de inhibidores funcionan bien en concretos agrietados. La barrera formada continua funcionando aún cuando los cloruros tengan una ruta directa al acero en una grieta. Su desempeño es excelente de acuerdo a las pruebas de laboratorio. El concreto con inhibidores de corrosión orgánicos debe proporcionarse con altos contenidos de aire incluido. Su costo relativo es medio.

⁷⁴ CFE.S3.p.264.

⁷⁵ ACI 222 "Corrosion of Metals in Concrete".

⁷⁶ SECRE, W. & ZOLLOS G. "New Developments in Corrosion Inhibiting Admixture Systems for Reinforced Concrete". Seminario Internacional sobre Durabilidad del Concreto, México, 1993.UANL.

III.4.A.5. INHIBIDORES INORGÁNICOS

Sólo un producto está disponible en esta categoría. Su mineral activo es el nitrito de calcio. El aditivo se agrega durante el mezclado. El nitrito de calcio rompe el proceso de corrosión porque incrementa la formación de la capa de pasivación en la superficie del acero de refuerzo. Los iones de nitrito compiten con cualquier ión de cloruro presente para reaccionar con los iones libres de acero. Si se tiene una cantidad mayor de nitritos a los iones de cloruro en el nivel del acero, la reacción será entre el nitrito y el acero para aglutinar el acero dentro de un óxido, con lo que se refuerza la capa de pasivación en el acero. Si se tienen más cloruros que nitritos, los iones de cloruros reaccionarán con el acero para empezar el proceso de corrosión. Durante la reacción química entre el nitrito y el acero, el suministro de los iones de nitrito se reduce.

La dosificación del nitrito de calcio debe ser determinada con base en la carga de cloruros anticipada de la estructura de acuerdo a su vida de diseño esperada. Las actuales dosificaciones van desde 12 a 24 lt/m^3 (de 2 a 4 galones por yd^3). Su desempeño es de bueno a excelente. Su costo relativo es medio.

Se ha propuesto una clasificación diferente para los sistemas de inhibidores de corrosión, que pudiera ser más aplicable y menos confusa. Los sistemas de inhibidores de corrosión se pueden clasificar como activos, pasivos o activos – pasivos.

Los sistemas de inhibición activos previene a la corrosión mediante una reacción química entre los elementos activos del ingrediente y el acero de refuerzo. Esto provee de una película protectora o capa de óxido en la superficie del acero. Un ejemplo de este tipo es el inhibidor anódico clásico, el aditivo inhibidor de corrosión formulado con nitrito de calcio. Los sistemas inhibidores pasivos son aquellos que restringen o inhiben el ingreso de los iones de cloruro por reducción de la permeabilidad. Como ejemplos de este tipo se encuentran, los materiales que obstruyen los poros, los selladores de superficie, impermeabilizantes y la adición de ingredientes puzolánicos para reducir la permeabilidad.

III.4.A.6. CONCRETO CON MICROSÍLICE U OTRAS PUZOLANAS

La microsílíce es un material puzolánico extremadamente efectivo que reacciona con el hidróxido de calcio de la pasta de cemento Pórtland para formar materiales cementantes adicionales. Las puzolanas se emplean para modificar la estructura de poro de la pasta de cemento hidratada y lograr un concreto menos permeable a los agentes de corrosión.

Los materiales puzolánicos en general tienen un doble efecto respecto a las características que proporcionan al concreto con su empleo. 1) Por una parte reducen la alcalinidad del concreto, debido a que su función básica es reaccionar con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento, con lo que disminuyen la capacidad del concreto para conservar la película de pasivación, favoreciendo el proceso de corrosión. Simultáneamente sucede que al reaccionar el hidróxido de calcio con las puzolanas, se suprime el componente del concreto que reacciona con el bióxido de carbono del aire en el proceso de carbonatación. 2) Las buenas puzolanas modifican la estructura porosa de la pasta de cemento hidratada, reduciendo el tamaño de los poros más grandes, por lo que reduce la permeabilidad intrínseca de la pasta y se tiene un concreto menos proclive a ser penetrado por agua y el oxígeno del aire.

Al realizar un balance de estos dos efectos contradictorios, las investigaciones se han inclinado a favorecer el papel de la puzolana como reductor de permeabilidad en la pasta de cemento, siempre y cuando se trate efectivamente de material con actividad puzolánica. Como es el caso de la microsílíce que ha demostrado que mejora la capacidad del concreto para brindar la protección al acero de refuerzo contra la corrosión, porque reduce la penetración de cloruros, un efecto similar se atribuye a determinadas cenizas volantes.⁷⁷

⁷⁷ CFE. S3. 267

Las mezclas de concreto con microsilíce típicamente contienen 387 kg/m^3 (658 lb/yd^3) de cemento, de 8 a 10% de microsilíce por peso de cemento, una relación agua / cementantes menor a 0.40.⁷⁸ y una cantidad suficiente de aditivos superplastificadores para lograr revenimientos de 15 a 20 cm. Su desempeño va desde bueno a excelente. El agrietamiento por contracción plástica ha sido un problema recurrente debido al bajo contenido de agua en la mezcla. Por lo que el curado de un concreto con cementantes puzolánicos es de mayor relevancia que uno convencional, de modo que se debe realizar un curado húmedo eficiente y prolongado. Se ha reportado efectos adversos por el uso de cenizas volantes sobre la permeabilidad y la carbonatación del concreto cuando no se cura adecuadamente. Su costo relativo es medio.⁷⁹

III.4.A.7. PROTECCIÓN CATÓDICA

El principio de protección catódica es cambiar el potencial de un metal para reducir el flujo de corriente y subsecuentemente la velocidad de corrosión. Se acompaña de la aplicación de una corriente protectora en un voltaje mayor que el de la superficie anódica. La corriente fluye a la superficie anódica original teniendo como resultado reacciones catódicas que ocurren ahí. El método tiene la desventaja o dificultad de determinar el potencial adecuado por aplicar al sistema y asegurarse de que se aplique uniformemente.⁸⁰

En otras palabras la protección catódica controla la corrosión del acero de refuerzo mediante la aplicación externa de una corriente al acero embebido. Un ánodo metálico es embebido en el concreto y una corriente eléctrica es aplicada a este ánodo y al acero embebido. Esto conlleva al acero a tender a ser catódico, condición que lo provee de protección. La protección catódica es el único sistema para detener el avance de corrosión en una estructura de concreto. Tiene altos costos iniciales y los costos operativos son entre bajos y medios. Algunos ingenieros lo consideran un proceso complicado por requerir de una ingeniería preinstalada y costosa, además de un caro monitoreo después de su instalación.⁸¹

III.4.A.8. CONCRETO CON BAJO REVENIMIENTO

Los concretos sin revenimiento o con poco revenimiento, también llamados concretos densos son concretos con altos contenidos de cemento y un bajo contenido de agua, con estas características se reduce la permeabilidad. Se desarrollaron primeramente para ser empleado en pisos de puentes. Los contenidos típicos de cemento oscilan alrededor de 470 kg/m^3 (800 lb/yd^3) y relaciones agua / cemento de 0.35 o menores. Se pueden emplear aditivos superplastificadores de alto rango para aumentar su trabajabilidad. Su desempeño no es tan bueno como los concretos con microsilíce o modificado con látex. Su limitada trabajabilidad puede dificultar su colocación y consolidación. Tiene un costo relativamente bajo comparado con otras opciones.⁸²

III.4.A.9. CONCRETO MODIFICADO CON LÁTEX

El concreto modificado con látex es un concreto elaborado con cemento Pórtland y con la adición de un látex polimérico. El agua de suspensión en la emulsión hidrata al cemento y al polímero, provee propiedades de vinculación suplementarias para producir un concreto con una baja relación agua / cemento, buena durabilidad, propiedades de adhesión. El látex es una dispersión coloidal de partículas de caucho sintético en agua.⁸³

⁷⁸ Agua cementantes = agua / cemento más microsilíce, en este caso

⁷⁹ HOLLAND, Terence C. *Corrosion Protection for Reinforced Concrete*.

⁸⁰ ACI 222 "Corrosion of Metals in Concrete". Cap.2.

⁸¹ HOLLAND, Terence C. *Corrosion Protection for Reinforced Concrete*.

⁸² *Ibid.*

⁸³ ACI 222 "Corrosion of Metals in Concrete". Cap.3.

El concreto modificado con látex es preparado agregando látex de estireno butadieno líquido al concreto convencional. Típicamente contiene 390 kg de cemento por metro cúbico (658 lb de cemento por yd³), 15% de látex sólido por el peso del cemento, y una relación agua / cemento de 0.35. El látex modifica la estructura de poro del concreto y reduce la permeabilidad. Su desempeño puede ir de bueno a excelente. Los posibles problemas son el agrietamiento. Para disminuir el agrietamiento se puede colar en la mañana o en la noche para minimizar el agrietamiento. Su costo es alto.⁸⁴ El concreto modificado con látex tiene un alto revenimiento. A su vez tiene propiedades que pueden ayudar ante ciertos ambientes: *“Los modificadores acrílico y látex incorporan agentes antiespumosos muy fuertes, que permiten controlar la densidad de los concretos modificados con látex, y la baja permeabilidad a la humedad, lo que también resulta en una mayor resistencia a los ciclos de congelamiento deshielo. La misma característica hace del concreto modificado con látex una efectiva pantalla contra los contaminantes acuáticos, como las sales y las soluciones ácidas ligeras”*.⁸⁵

III.4.B. TRATAMIENTOS QUE PENETRAN O SON APLICADOS EN LA SUPERFICIE DEL MIEMBRO DE CONCRETO PARA IMPEDIR EL INGRESO DE LOS IONES DE CLORURO AL CONCRETO.

Estos sistemas o productos tratan de restringir la penetración de los agentes corrosivos a través del concreto mediante un material que se interpone entre la superficie del concreto y los agentes dañinos. Entre estos se encuentran: las telas plásticas, los recubrimientos que forman una película sobre el concreto y los selladores que actúan por penetración en los poros superficiales del concreto.

La tela plástica más empleada es la de polietileno con un espesor suficiente para brindar la resistencia requerida. Su aplicación como barrera protectora se limita a partes de estructuras o piezas prefabricadas de concreto que deben permanecer cerradas o bajo agua, debido a que su aplicación inhabilita a los elementos de concreto para ciertas funciones.

Los recubrimientos que forman una película sobre el concreto y que simultáneamente actúan como impermeabilizantes o como barreras de protección tiene un amplio campo de aplicación. No solamente para evitar la corrosión, también para corregir fallas de impermeabilidad de estructuras que prestan servicio en contacto con el agua. Por tanto existe un amplio mercado de estos productos. El ACI 515 desglosa una descripción de dichos elementos, en el capítulo V se detallará más el tema.

III.4.B.1. MEMBRANAS IMPERMEABILIZANTES

Las membranas impermeabilizantes han sido ampliamente usadas para minimizar el ingreso de los iones de cloruro dentro del concreto. Debido a que las fuentes externas de los iones de cloruro son solubles una barrera al agua también actuará como una barrera a los iones de cloruro disueltos.

Un sistema de impermeabilización debe cumplir con lo siguiente:

- a) Fácil de instalar
- b) Tener un buen vínculo con el sustrato
- c) Ser compatible con todos los componentes del sistema, incluyendo el sustrato, el primer, los adhesivos y recubrimientos, cuando se usen.

Mantener la impermeabilidad a los cloruros y humedad bajo condiciones de servicio, especialmente temperaturas extremas, envejecimiento, y cargas impuestas.

⁸⁴ HOLLAND, Terence C. *Corrosion Protection for Reinforced Concrete*.

⁸⁵ EDISON M.P. *Cemento Modificado con Látex. Construcción y Tecnología, Marzo, 1994.*

La clasificación más adecuada es la que diferencia entre sistemas prefabricados y sistemas de aplicación líquida. Las hojas prefabricadas se producen con un control de calidad de fábrica, solamente que su aplicación es difícil, normalmente requiere adhesivos y son muy sensibles a la calidad de mano de obra en zonas críticas. Aunque es más difícil el control de calidad de los sistemas líquidos su aplicación es más sencilla.

La formación de ampollas se tiene en ambos sistemas, líquidos y prefabricados. Las ampollas se originan por la expansión de gases atrapados, solventes y humedad en el concreto después de la aplicación de la membrana. El agua o el vapor de agua no es un requerimiento para la formación de ampollas pero si contribuye a su formación. Las membranas se pueden colocar sin ampollas si las condiciones atmosféricas son adecuadas durante el curado. Una vez curada, la adhesión de la propia membrana al concreto es tal que es lo suficientemente resistente para nulificar la aparición de ampollas. Para asegurar una buena adhesión la superficie de concreto debe ser cuidadosamente preparada, así como estar seca y libre de membranas de curado, contaminantes y gotas de aceite.

Sus costos relativos van de bajos a altos, se tiene costos por mantenimiento periódicos que se deben incluir al comparar costos.

III.4.B.2. IMPREGNACIÓN CON POLÍMEROS

La impregnación con polímeros consiste en rellenar los vacíos del concreto endurecido con un monómero y polimerizarlo en el sitio. Los estudios de laboratorio realizados han demostrado que el concreto con impregnación de polímeros es resistente, durable y casi impermeable. Las propiedades de estos concretos están fuertemente influenciadas por la carga (contenido) de polímeros en el concreto. Las cargas de polímero máximas son realizadas mediante el secado del concreto para remover toda el agua evaporable de las capas superficiales, removiendo el aire por técnicas de vacío, saturación con un monómero bajo presión y polimerizando el monómero en los vacíos del concreto mientras simultáneamente se previene la evaporación del monómero.

Al principio se realizaba la polimerización con rayos gamma, sin embargo, esto no era práctico en el campo, por lo que sólo se aplicaban iniciadores químicos en el campo, los cuales se descomponían bajo la acción del calor o un promotor químico. Los monómeros multifuncionales se emplean frecuentemente para incrementar la velocidad de la polimerización. Debido a que el calor prolongado y la saturación de vacíos son difíciles de realizar, lo que conlleva un incremento de costos considerable, la mayoría de las aplicaciones de campo solamente se han dirigido a producir superficies de impregnación de polímero de sólo 25 mm. Esta capa de impregnación brinda una buena resistencia a la penetración de cloruros de acuerdo a los estudios de laboratorio, pero en las aplicaciones de campo no siempre se tiene buenos resultados..

Hasta la fecha se tienen pocas aplicaciones de impregnación de polímeros para proteger al acero de refuerzo y aún se considera que el proceso está en proceso experimental. Sus desventajas son que los monómeros son caros y que el proceso es lento y costoso. La principal deficiencia identificada a la fecha es que el concreto tiene la tendencia a agrietarse durante el tratamiento por calor.⁸⁶

III.4.B.3. RECUBRIMIENTOS CON CONCRETO POLIMÉRICO

El recubrimiento con concreto polimérico consiste en la mezcla de un cementante polimérico con agregados, este método se ha probado experimentalmente. La mayoría de los monómeros presentan una baja tolerancia a la humedad y a las bajas temperaturas, de ahí que el substrato debe estar seco y por arriba de los 4 °C. Una mezcla inapropiada de los dos o más componentes del polímero es fuente común de problemas en campo. Los agregados deben estar secos, para que no inhiban la reacción de polimerización.

⁸⁶ ACI 222.p.16.

Los trabajadores deben usar ropa de seguridad cuando trabajen con epóxicos u otros polímeros debido a la sensibilidad de la piel y a la dermatitis. Se deben seguir las instrucciones del fabricante respecto al almacenaje y manejo de los químicos.

Una capa de polímero limpio se aplica normalmente antes del concreto polimérico. Las ampollas, comunes en la membranas, también han causado problemas en la aplicación de los recubrimientos con concreto polimérico.

III.4.B.4. RECUBRIMIENTO CON CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND

Los recubrimientos con concreto de cemento Pórtland se colocan como una segunda etapa de construcción. El recubrimiento puede ser colocado antes de que la primera etapa se haya completado o cuando esta ya tenga varios días. La ventaja de la primera opción es que los tiempos de construcción se acortan y se minimizan los costos. Con la segunda opción se asegura el recubrimiento del acero de refuerzo y se tienen pequeñas tolerancias de construcción debido a que las deflexiones de las cargas muertas del recubrimiento son muy pequeñas. Varios tipos de concreto han sido empleados como recubrimiento, incluyendo al concreto convencional, al concreto con fibras de acero. Sin embargo se han empleado en mayor cantidad dos tipos de concretos: el de bajo revenimiento y el modificado con látex.

III.4.B.5. RECUBRIMIENTOS CON CONCRETO DE BAJO REVENIMIENTO

El desempeño del concreto de bajo revenimiento depende solamente del uso de materiales convencionales y de una buena mano de obra. La relación agua /cemento es reducida a la mínima posible, en términos prácticos, 0.32 y con un consumo de cemento alto, alrededor de 470 kg/m³ y un contenido de agua suficiente para producir revenimientos menores a 25 mm. El concreto tiene aire incluido y debe emplearse aditivos reductores de agua o retardante suaves.

Después de la primera etapa del concreto un agente adhesivo debe colocarse, puede ser un mortero o pasta de cemento sobre la superficie de concreto, inmediatamente antes de la aplicación del recubrimiento. El recubrimiento de concreto se mezcla normalmente en el sitio, empleando una mezcladora móvil, debido a que las ollas de mezclado no son convenientes para producir la cantidad ni la consistencia requerida. El concreto debe compactarse y colocarse sobre la superficie requerida, empleando equipo especialmente diseñado para manejar mezclas secas.

La permeabilidad del concreto a los iones de cloruro se controla con su grado de consolidación, la cual es verificada con un densímetro nuclear. La superficie base no se humedece previamente. Debe tenerse un curado continuo por 72 horas. Los recubrimientos son propensos a agrietamientos, especialmente en estructuras continuas.

III.4.B.6. RECUBRIMIENTOS CON CONCRETO MODIFICADO CON LÁTEX.

El concreto modificado con látex es concreto con cemento Pórtland con una emulsión de látex polimérica. El agua de suspensión en la emulsión hidrata al cemento y el polímero provee de propiedades cementantes adicionales para producir un concreto con una baja relación agua / cemento, con buena durabilidad, adecuadas características de adherencia con el acero y un alto grado de resistencia a la penetración del ión cloruro. Características deseables de todo recubrimiento. El látex es una dispersión coloidal de partículas de caucho sintético en agua. Las partículas son estabilizadas para prevenir la coagulación y los agentes antiespumosos son agregados para prevenir el exceso de aire atrapado durante el mezclado.

El procedimiento constructivo de estos recubrimientos es similar al descrito para los recubrimientos con concretos de bajo revenimiento. Las principales diferencias son:⁸⁷

⁸⁷ ACI 222P.17.

- a) La superficie de concreto debe humedecerse previamente por al menos una hora antes de colocar el recubrimiento, porque el agua ayuda a la penetración de la base y a la formación retardada de la película de látex.
- b) Un agente adhesivo no siempre es necesario, debido a que en ocasiones una porción del concreto mismo es aplicado sobre la superficie de la base.
- c) El quipo de mezclado debe tener un medio para almacenar y dispersar el látex.
- d) El concreto modificado con látex tiene un alto revenimiento así que el equipo para acabados normales puede ser empleado.
- e) Al parecer no se requiere aire incluido en el concreto para resistir efectos de congelamiento y deshielo.
- f) Se requiere un curado mixto. Un curado húmedo para hidratar al cemento Pórtland y un curado seco para desarrollar la película que forma las cualidades del látex.

El agua ayuda a la penetración a la base y a la formación de película de retrasos de látex.

A pesar de que los recubrimientos de concreto modificado con látex se empezaron a usar desde 1957, la amplia mayoría se han aplicado a partir de 1975. El desempeño ha sido generalmente exitoso; se han reportado agrietamientos y algunos desprendimientos, la deficiencia más reportada es el agrietamiento por contracción en los recubrimientos. Se ha encontrado que algunas de estas grietas no se extienden a través del recubrimiento y es incierto si estas dañan el desempeño a largo plazo.

III.4.B.7. SELLADORES

Los selladores de superficie de concreto tienen el objetivo de proteger al acero de refuerzo contra la corrosión, tienen la función específica de evitar la penetración del ión cloruro $[Cl^-]$ por difusión a través del recubrimiento de concreto. Como no forman película su uso es menor, comparado con los recubrimientos de concreto. Tienen la ventaja de que no modifican el aspecto ni las funciones de las superficies de concreto en que es aplicado, hecho que resulta muy conveniente en pisos, losas, pavimentos de concreto reforzado destinados al tráfico vehicular, como es el caso de puentes donde se emplean sales descongelantes durante el invierno (agente de corrosión). Existen selladores de silano muy eficaces para inhibir la penetración de cloruros.

Al igual que las membranas sus costos relativos van de bajos a altos, y se presentan costos por mantenimiento periódicos que deben incluirse al comparar costos.

III.4.C. TÉCNICAS QUE PREVIENEN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DIRECTAMENTE.

La finalidad de estas técnicas es inhibir la corrosión aún en presencia de agentes corrosivos mediante la protección directa del acero de refuerzo; para realizarlo existen varios modos: a) aplicando un recubrimiento superficial en las varillas de refuerzo para aislar al acero de refuerzo del aire, la humedad y cloruros, b) instalando un sistema de protección catódica, y c) empleando aceros especiales (no corrosibles).

Los recubrimientos deben asegurar una adecuada adherencia acero – concreto. Pueden ser metálicos o no metálicos. Los metálicos pueden ser:

- a) Con metales menos nobles que el acero, como zinc o cadmio. Al ocurrir la corrosión se “sacrifica” el metal de recubrimiento debido a que opera como ánodo, protegiendo de este modo al acero recubierto.
- b) Aquellos recubrimientos con metales más nobles que el acero, como el cobre y el níquel no brindan protección de “sacrificio”. Su eficacia depende de la correcta e íntegra aplicación al acero. Si se daña el recubrimiento el acero funciona como ánodo y presenta corrosión.

De estos recubrimientos solamente el de zinc se aplica comercialmente con el procedimiento de galvanización.

El requerimiento más importante y esencial es la durabilidad del recubrimiento, el cual generalmente debe tener una vida de servicio mayor a la vida útil estimada de la estructura, lo anterior se debe a que la reparación del recubrimiento en la varilla es prácticamente imposible sin la demolición total o parcial de la propia estructura. Los recubrimientos metálicos normalmente cumplen estos requerimientos, principalmente bajo condiciones de buena estabilidad en el medio alcalino del concreto y considerando la presencia posible en el concreto de algunos constituyentes agresivos (cloruros y sulfatos solubles, otros componentes de sulfuro, partículas de carbón, etc). y también los cambios del concreto que suceden bajo la influencia de los constituyentes agresivos del medio.⁸⁸

Por su parte el recubrimiento no metálico más empleado es aquel que se realiza con resina epóxica en forma de polvo, para lo cual al acero debe estar perfectamente limpio y calentarse previamente para que el polvo se adhiera electrostáticamente al propio acero. La adherencia acero – concreto con este recubrimiento ha mostrado buenos resultados. Es conveniente aplicarlo en todo el armado de acero debido a que de no hacerlo se forman celdas de corrosión electrolítica. En una sección posterior se discutirá el uso de acero de refuerzo galvanizado, y uso de aceros especiales (no corrosibles).

III.4.C.1. ACERO DE REFUERZO INOXIDABLE

Debido a que el acero de refuerzo realizado con acero normal no se comporta satisfactoriamente ante la humedad y los cloruros. El acero de refuerzo realizado con acero inoxidable o no corrosible ha sido empleado para aplicaciones especiales, por ejemplo, se han empleado para unir elementos en la construcción de estructuras presforzadas.⁸⁹ Ping Gu (1996) demostró que el acero de refuerzo inoxidable presenta un excelente comportamiento en concretos contaminados con cloruro, pero el costo del acero inoxidable es alto.⁹⁰ Su costo alto no significa que no deba ser especificado, particularmente en casos extremos, pero cuando una solución extrema tiene que ser usada en ambientes agresivos particulares, en los cuales el concreto estará expuesto, todas las demás soluciones debe analizarse cuidadosamente y eliminarse.

En años recientes Knudsen y *et. al.* (1998) ha sugerido el “uso *inteligente del acero inoxidable*”, es decir, el uso del acero inoxidable en áreas críticas debido al deterioro o inaccesibilidad para la reparación de estructuras de concreto deterioradas. Knudsen (1998) ha demostrado que el uso inteligente del acero inoxidable es una opción rentable y viable cuando se consideran varias alternativas de reparación.

Tanto el acero inoxidable y el acero al carbón derivan su resistencia a la corrosión de una película o capa natural rica en cromo, la cual está presente en su superficie y herméticamente adherida al metal. Cuando la película de pasivación se deteriora, se requieren medidas de rehabilitación. Entre las medidas de rehabilitación modernas el acero inoxidable se ha convertido en una alternativa atractiva cuando se compara con métodos tradicionales como el acero de carbón (puro), capas epóxicas, inhibidores de corrosión, protección catódica, etc.

El acero inoxidable cada vez es más económico, sin embargo, todavía es de 5 a 8 veces más caro que el acero convencional. Por tanto, una aproximación atractiva tanto técnica como económica, puede ser sustituir acero al carbón por acero inoxidable en áreas críticas, tales como las secciones inferiores de una columna en un puente, ver figura 3.11, la cual muestra algunas de las áreas críticas.

⁸⁸ ALEKSEEV S.N. *ert. Al. Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Media, USA, 1993.*

⁸⁹ ACI 222. p.18.

⁹⁰ AİTCIN, *High Performance Concrete.*

Adicionalmente el acero inoxidable puede tener una resistencia mayor que el tradicional acero al carbón. Estos aspectos deben considerarse al diseñar estructuras delgadas combinando la resistencia adicional con la reducción del recubrimiento en el acero inoxidable.

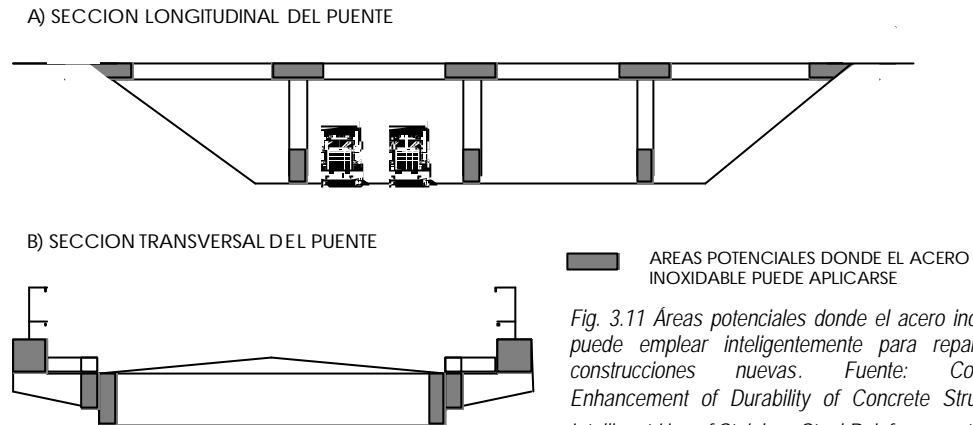


Fig. 3.11 Áreas potenciales donde el acero inoxidable se puede emplear inteligentemente para reparaciones y construcciones nuevas. Fuente: *Cost-effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement*. Knudsen.

III.4.C.1. i. ASPECTOS DEL MATERIAL

El acero inoxidable se refiere a un grupo de acero con un mínimo de 12% de cromo. En principio, el acero inoxidable puede ser dividido en cuatro grupos principales: martensítico, ferrítico, austenítico y duplex. Todos incluyen un largo número de miembros ligados. Los dos grupos de aleaciones más baratas – acero martensítico y ferrítico – no ofrecen suficiente protección, por su parte el acero austenítico y duplex paulatinamente están alcanzando un costo más competitivo y proveen de una resistencia al alta a la corrosión. Las características del acero inoxidable se muestran en la tabla 3.6.

TABLA 3.6. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DEL ACERO INOXIDABLE			
TIPO	% Cromo	% Níquel	% Molibdeno
FERRITICO	12 – 19.5	0	0
AUSTENITICO	18 – 26	8 – 21	2 – 4
AUSTENITICO / FERRITICO (DUPLEX)	21 – 28	4 - 6	1.5 – 6.0

Fuente: *Cost-Effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement*. Knudsen. et al. 1998

El acero austenítico es resistente a la corrosión en concreto con un contenido de cloruro muy alto, por lo que se recomienda para acero de refuerzo. La alta ductilidad del acero permite doblar el material a un radio determinado sin agrietamiento inicial. Varias investigaciones han confirmado que el acero inoxidable es muy superior al acero tradicional en su habilidad para resistir los cloruros que inician la corrosión cuando se embeben en el concreto.

Hasta ahora los aceros inoxidables más empleados son austeníticos, los cuales son fácilmente disponibles y han mostrado tener una mayor tolerancia a los cloruros, del orden de 5 a 10 veces mayor que el acero convencional. El acero duplex, que tiene una microestructura ferrítica /austenítica, combina un material de alta resistencia con un incremento en la resistencia a la corrosión debida al alto contenido de molibdeno.

III.4.C.1. ii. ASPECTOS PRÁCTICOS

La manejabilidad del acero inoxidable en sitio es comparable al del acero al carbón normal, por tanto, no requieren precauciones especiales cuando se emplea. Debido al trabajo en frío que se le aplica en su fabricación el acero inoxidable requiere un mayor esfuerzo para el doblado. Para aquellas reparaciones que comprenden una sustitución selectiva del acero al carbón por acero inoxidable en un área limitada se pueden emplear tres métodos para conectar el acero inoxidable con el acero de refuerzo al carbón: traslape tradicional no soldado, traslape soldado y cople mecánico.

El diámetro del refuerzo principal está típicamente en el rango entre 15 y 40 mm (5/8" a 1 5/8"), el cual requiere una longitud mínima de sujeción o de amarre de más de 50 cm en ambos extremos. Entonces la junta de traslape no es una opción muy competitiva debido a que se requiere retirar de 1 a 1.5 m del concreto.

Las varillas inoxidables son soldables en sitio, frecuentemente se cuestiona si se puede soldar o no al acero al carbón y en algunos casos la respuesta es desconocida, por lo que la soldadura no siempre es posible. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable es disminuida por la soldadura y por la contaminación con depósitos de hierro proveniente de las herramientas usadas en su manejo, sin embargo, tales problemas pueden ser evitados con un tratamiento posterior cuidadoso, por ejemplo, lavando con arena a presión.

Los coples mecánicos entre el acero al carbón y el inoxidable es una alternativa a la soldadura. Algunos de estos requieren que la cuerda se realice en el acero al carbón, lo cual puede ser difícil y consumir en el sitio demasiado tiempo. Otra opción es emplear coples que mecánicamente fijan las varillas al cople, logrando con ello una resistencia más alta que la propia resistencia de las varillas. Con el uso de tales coples no se requieren traslapes. Los coples mecánicos pueden ser de acero inoxidable.⁹¹

III.4.C.1. iii. ASPECTOS DE CORROSIÓN

El acero inoxidable libremente expuesto a agua de mar puede, si está en contacto con un metal menos noble, tales como el acero al carbón, iniciar una corrosión tipo galvánica del metal más noble. La velocidad de la corrosión dependerá de la relación de áreas entre el acero al carbón y el inoxidable.

Cuando el acero inoxidable es colado dentro del concreto, la reacción catódica es muy lenta debido a que ninguna actividad catalítica toma lugar en la superficie del acero inoxidable. Como consecuencia, la conexión entre acero inoxidable y acero al carbón no debe producir una corrosión galvánica significativa. Mientras ambos metales estén en condiciones pasivas sus potenciales serán similares cuando se encuentren embebidos en el concreto. Aún si existen diferencias menores de potencial, ambos (el acero al carbón y el inoxidable) pueden ser polarizados significativamente sin algún riesgo serio de corrosión. Esto es porque sus potenciales se aproximarán a un valor común dentro del pase de la corriente significativa; por consiguiente se asume que el uso del acero inoxidable, en todas las posiciones donde se tenga ingresos de cloruro y subsecuentemente puede ocurrir la corrosión, los dos metales pueden ser unidos sin problemas. Este comportamiento y el hecho que el acero inoxidable es por mucho un cátodo menos efectivo en el concreto que el acero al carbón, hace al acero inoxidable un material de refuerzo útil para su aplicación en proyectos de reparación.

Es importante indicar que para el uso inteligente del acero inoxidable combinado con el acero al carbón deben emplearse proporciones que garanticen un desempeño óptimo y una solución económica efectiva.

⁹¹ KNUDSEN A. *et.al.* *Cost-Effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of stainless Steel Reinforcement.* 1998

Por esta razón las pruebas o ensayos pueden incluir combinaciones de volumen probables entre ambos aceros. Los experimentos con la combinación de acero inoxidable y al carbón han mostrado que no se tiene un riesgo extra de corrosión en el acero al carbón. Los resultados experimentales señalan que para trabajos de reparación es más conveniente y benéfica la combinación acero inoxidable y al carbón que la colocación de acero al carbón junto con el refuerzo antiguo y corroído.

El acero inoxidable se puede emplear para estructuras nuevas o en reparación, en ambas ha demostrado su viabilidad técnica y económica.⁹²

III.4.C.2. ACERO DE REFUERZO GALVANIZADO

El nombre de galvanización se debe a Luigi Galvani, uno de los primeros científicos interesados en la electricidad. Se denomina galvanización porque al entrar en contacto el zinc y el acero se produce una diferencia de potencial eléctrico. Si el recubrimiento de zinc que aísla al acero del contacto con el ambiente, se daña en un punto, esa diferencia de potencial origina una pila de corrosión o celda electrolítica en la que el zinc será el ánodo y el acero el cátodo, de modo que el zinc se oxidará y el acero permanecerá inalterado.

Es bien conocido que una delgada capa de zinc puede mejorar drásticamente la resistencia a la corrosión del acero. Este efecto de protección puede ser explicado fácilmente por las consideraciones electroquímicas. De hecho, es el zinc el que se oxida en lugar del acero. Sin embargo, debe ser entendido que el acero está protegido contra la corrosión, sólo cuando algo de zinc está por oxidarse. Cuando la capa de zinc ha sido consumida, el acero no será protegido y comenzará su proceso normal de corrosión. Por tanto, el espesor de la capa de zinc y el proceso de manufactura usado para su aplicación debe ser considerado, dado que influye en la vida de la protección. El proceso de aplicación en frío es económico, en tanto el proceso de inmersión en caliente tiene un mayor costo.

Los recubrimientos galvanizados recién obtenidos tienen un aspecto metálico brillante, el cual va desapareciendo conforme transcurre el tiempo, hasta adquirir un color gris metálico mate. Tal cambio se origina por la reacción entre el aire y el zinc, que da lugar a la formación de una fina capa de hidróxidos y carbonatos básicos de zinc (capa de pasivación). Dicha capa es muy fina y muy difícil de detectar con el microscopio óptico.⁹³ En la figura 3.12 se presenta un corte transversal del recubrimiento galvanizado, en las figura 3.13 se presentan dos muestras de varilla, una de acero convencional ya oxidada y otra de acero galvanizada por inmersión en caliente.

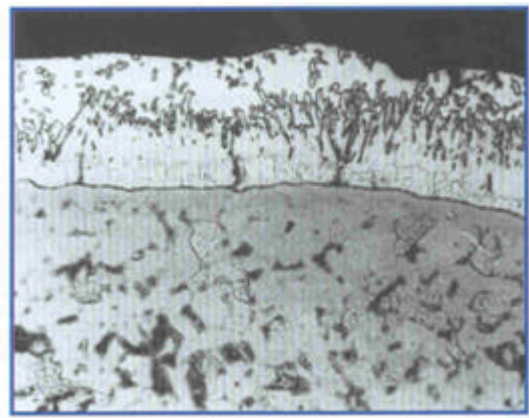


Fig.3.12 Aspecto del corte Transversal del recubrimiento galvanizado. Fuente: Ficha Técnica Galvanizado en caliente. AEG. 2004.

El uso del acero galvanizado presenta algunas desventajas prácticas:

1. Si la capa protectora no es suficientemente gruesa, se puede romper cuando las varillas son dobladas, por ejemplo, para elaborar estribos, grapas o escuadras. Una proporción de acero es entonces expuesta a la corrosión y una celda galvánica es formada, con lo cual puede resultar en la fractura de la varilla de acero en un período corto de tiempo.

⁹² *Ibid.*

⁹³ NOTA informativa núm.2. Asociación Europea de Galvanización General. p.2

2. El acero galvanizado no debe ser permitido a entrar en contacto con acero sin galvanizar, porque una celda electrolítica o galvánica se crea inmediatamente, lo que resulta en una corrosión rápida del acero no galvanizado.
3. El acero galvanizado no puede ser soldado, porque durante la soldadura, la capa de zinc se evapora. El vapor de zinc es particularmente nocivo y debe considerarse un cuidado especial por parte del soldador. Las capas protectoras para restaurar la protección de corrosión a la soldadura son menos eficientes debido a la dificultad práctica de cubrir el área soldada completamente.
4. Cuando el concreto es colado con acero galvanizado, dos reacciones pueden ocurrir:



Fig. 3 13. Muestras de acero convencional oxidado y acero galvanizado.

- A) El zinc tal vez reaccione con la cal contenida en el cemento y la cal liberada por la hidratación temprana del C_3S , para producir gas hidrogeno. Estas burbujas de hidrogeno pueden adherirse al acero de refuerzo y disminuir significativamente la adherencia entre concreto y acero de refuerzo.
- B) El hidróxido de zinc que se forma durante la reacción entre zinc y cal libre es un agente retardante muy fuerte de la hidratación de C_3S . El zinc reacciona con el C_3S para formar una capa muy impermeable que retrasa todavía más la hidratación de C_3S . De hecho, el oxido de zinc es empleado como agente retardante. El efecto retardante es muy localizado en el concreto, sólo alrededor del acero galvanizado, el resto del concreto no es afectado, por lo que endurece normalmente. Desde el punto de vista práctico, este efecto retardante puede ser detrimental, especialmente en el caso de paneles prefabricados que son removidos de sus cimbras y manejados rápida y rudamente; por tanto una adherencia pobre se desarrolla entre el acero de refuerzo y el panel de concreto usado, lo que resulta en grietas prematuras del panel de concreto debidas a los esfuerzos de tensión que no son tomados por el acero.

III.4.C.2. i. ESTRUCTURAS PROCLIVES A EMPLEAR ACERO GALVANIZADO

La experiencia e investigaciones han mostrado que el recubrimiento con zinc (galvanizado) puede ser útil para proteger el acero de refuerzo contra la corrosión en las siguientes estructuras:

Estructuras viales: puentes, banquetas y postes de luz, sujetos a la acción de sales usadas para limpieza de nieve.

Estructuras marinas: muelles, puentes, plataformas de perforación y presas, así como estructuras costeras expuestas a la acción de cloruros en el agua de mar y en el aire.

Estructuras no protegidas de la acción de la humedad natural: balcones, márgenes de río y lago y puentes .

Estructuras delicadas o sensibles de muros externos y fachadas

Construcciones industriales: con un régimen de trabajo húmedo, especialmente instalaciones agrícolas.

Miembros insertos y juntas de estructuras presforzadas, especialmente de muros y balcones.

Conductos de chimenea o estructuras sujetas a la acción agresiva de materiales crudos, semiprocesados, productos, vapores y gases, o involucrados en algún proceso de combustión.

Estructuras elaboradas con materiales con cloruros: Estructuras elaboradas con agregados, aditivos, cementantes, agua de mezclado que contengan cloruros; estructuras únicas de larga duración tales como monumentos, a las cuales son difíciles de reparar.

Estructuras sólidas y estructuras monolíticas pretensadas con acero de refuerzo pretensado en el concreto (reactores atómicos, escudos protectores, puentes con un gran claro, silos, recipientes, etc.).⁹⁴

III.4.C.2. ii. CUIDADOS Y ESPECIFICACIONES PARA ACERO GALVANIZADO

A los cuidados normales que se tienen en el acero tradicional, de deben agregar los siguientes para el acero galvanizado:⁹⁵

Con respecto al concreto:

- A. Elaborar el concreto con cementos de baja alcalinidad como, por ejemplo, puzolánicos, debido a que un pH alto ataca al zinc.
- B. Para alcanzar la máxima adherencia y duración posible se recomienda que el cemento contenga por lo menos 0.002% de cromatos.
- C. Respetar los tiempos de fraguado antes de retirar la cimbra; el proceso de adhesión concreto - acero galvanizado es más lento que con el acero tradicional o negro. Este es un punto importante a considerar en la práctica constructiva, porque se empleará más tiempo para iniciar el descimbrado.
- D. Se debe procurar una baja relación agua / cemento para reducir la porosidad.

Con respecto a la varilla:

- E. Emplear alambcón y alambre de amarre galvanizados y de preferencia galvanizados desde fabrica para que se puedan doblar y no tenga desprendimientos de la capa de zinc. Debe recordarse que no debe combinarse acero galvanizado con acero sin galvanizar.
- F. En caso de no contar con estos elementos galvanizados, se puede realizar todo el armado de acero y galvanizar posteriormente todo el armado, después de haber sido doblados, amarrados y cortados.
- G. Si se emplea acero previamente galvanizado se deben realizar los dobleces con grandes radios de curvatura para evitar desprendimiento de la capa de zinc en el dobléz. La tabla 3.7 muestra los radios de acuerdo al tipo de varilla y diámetro.

TABLA 3.7. RADIOS DE CURVATURA DE DOBLECES SEGÚN EL TIPO DE VARILLA Y DIÁMETRO		
Diámetro de la varilla (d)	Diámetros de la curvatura	
	Varilla R – 42	Varilla R – 60
Hasta 20mm (<3/4")	6d	6d
De 20 mm (3/4") a 25 mm (1")	6d	8d
Mas de 25 mm (>1")	8d	8d

Fuente: Fichas Técnicas. Galvanización en Caliente.

⁹⁴ ALEKSEEV S. N. et. Al. *Durability of Reinforced Concrete in Aggressive Media, USA, 1993.Cap.9.*

⁹⁵ Fichas Técnicas. Galvanización en Caliente.

Peladuras y cortes: Cuando la capa de zinc se dañe por arrastre, corte o doblez del acero de refuerzo (varilla, malla, alambre, o alambtrn) es necesario reemplazar dicha capa, lo cual se logra con una limpieza de xido y de suciedad hasta que el acero brille y posteriormente aplicar una capa gruesa de galvanizado en fro (compuesto orgnico con 95% de zinc en polvo), se aplica tres centmetros alrededor de la secci3n daada, de modo que el galvanizado en fro sustituya a la capa original de zinc.

Soldaduras: El acero de refuerzo galvanizado puede soldarse del mismo modo que el acero tradicional, pero el soldado provocar3 una p3rdida de capa de zinc, tanto en la zona soldada como en la zona circundante que se haya sobrecalentado. Por este motivo al terminar se debe limpiar las escorias residuales y hacer brillar el acero de las partes que hayan quedado sin capa protectora, y aplicar posteriormente sobre ellas y sobre 3 centmetros a su alrededor una capa gruesa de galvanizado en fro, tal y como debe realizarse tambi3n sobre cortes y otras partes daadas que presenten acero expuesto.

El acero galvanizado tiene un costo superior al acero tradicional o negro, que puede ser del 50% o superior, sin embargo, su impacto en el costo total de una obra suele ser inferior al 0.5%. Su aplicaci3n en varios pa3ses alrededor del mundo han demostrado que este m3todo reduce los riesgos de corrosi3n y el deterioro de las estructuras de concreto satisfactoriamente. Al analizar los riesgos y las implicaciones de los efectos destructivos causados por la corrosi3n sobre los inmuebles y el alto costo e inseguridad de las reparaciones, el m3todo es rentable y conviene emplearlo en un n3mero significativo de casos.⁹⁶

III.4.C.3. ACERO DE REFUERZO CON CAPAS EP3XICAS

Al acero de refuerzo se le puede aplicar un recubrimiento, una capa ep3xica que lo proteja contra ambientes agresivos. La capa ep3xica es un material polim3rico muy fuerte, perfectamente impermeable al gas, a los iones cloruro y sulfatos, a cidos, etc., usualmente tiene un espesor de micras. Se empez3 a usar en 1973 y desde entonces el acero con capas ep3xicas ha sido ampliamente promovido con xito para solucionar el problema de la corrosi3n del acero. Sin embargo, existen algunas desventajas de usar las capas ep3xicas que no deben ser ignoradas:

1. La protecci3n que proporciona la capa ep3xica se tiene s3lo en la medida que esta es perfecta. Si dicha capa ep3xica es daada severamente por cualquier raz3n, la capa ser3 desconchada, araada o rayada, con la p3rdida de la protecci3n prevista.
2. La pasta de cemento no se vincula qu3micamente igual al acero con capas ep3xicas que con el acero sin recubrimiento; esta desventaja es seria, por lo que anchos y longitudes tienen que ser incrementados para permitir una mayor adherencia entre ambos materiales. Con el fin de incrementar la transferencia de esfuerzos a la interfase ep3xica - acero, granos de arena finos pueden ser proyectados en la superficie ep3xica hasta que empiece a endurecerse, para proveer una superficie externa aspera que desarrolle un mejor v3nculo mec3nico.
3. El costo de la capa ep3xica es m3s alto que el precio de las varillas de acero normales, y es necesario usar una mayor cantidad de acero para lograr el mismo nivel de esfuerzos transferido.
4. Su desempeo puede ir de pobre a excelente. A menos que la capa ep3xica se aplique posteriormente al doblado de la varilla, se tiene el problema potencial de agrietamiento de la capa ep3xica durante el doblado. Su costo es relativamente medio.⁹⁷

⁹⁶ Fichas T3cnicas. Galvanizaci3n en Caliente.

⁹⁷ HOLLAND, Terence C. Corrosion Protection for Reinforced Concrete.

III.4.C.4. REFUERZO CON FIBRAS DE VIDRIO

Usualmente hebras de vidrio son adheridas junto con una resina de poliéster. El refuerzo con fibra de vidrio está disponible con superficies de diferente espesor; pueden tener un terminado brillante sencillo, un terminado de arena como el de las varillas con capas epóxicas, o pueden tener un corrugado como el del acero ordinario. Una ventaja de este refuerzo es que no conduce electricidad, y por lo tanto, pueden ser usado para concretos reforzados expuestos a contracorrientes a corrientes inducidas de Foucault, como tal vez se encuentren en plantas de procesamiento de aluminio.

Este tipo de varilla es absolutamente libre de corrosión: la reactividad de la fibra de vidrio no representa un problema serio, porque las fibras están usualmente hechas de vidrio resistentes a álcali y porque cada hebra de fibra está embebida en resina de poliéster. Aparte de su reducida adherencia con el concreto, el refuerzo con fibras de vidrio sufre una segunda debilidad: no es dúctil. Las fallas ocurren instantáneamente dentro de una deformación plástica, al contrario que el acero. Esta es una desventaja seria para elementos estructurales donde la ductilidad después del valor pico es necesario para brindar seguridad estructural. Además, dicho refuerzo no puede ser dobladas, por lo que accesorios especiales deben ser empleados para lograr las formas complicadas, algunas veces necesarias. Son mas costosos que el acero original. Sin embargo, el uso de acero de refuerzo con fibra de vidrio en las partes donde el concreto está más expuesto a corrosión, con acero ordinario en las partes menos expuestas pueden constituir una solución interesante para la corrosión del acero de refuerzo.

III.5. ESTRUCTURAS PROCLIVES A PRESENTAR CORROSIÓN

Las estructuras de concreto que experimentan daños inducidos por iones de cloruro se pueden clasificar en dos categorías principales.

- a) Estructuras marinas inmersas en o cerca de agua de mar.
- b) Estructuras de concreto reforzado, tales como puentes, pavimentos, balcones exteriores y estacionamientos expuestos a sales descongelantes.

Tanto para las estructuras de concreto reforzado como presforzado que estarán sujetas a cloruros durante su vida de servicio, es aconsejable mantener los niveles de cloruro al mínimo posible en la mezcla para maximizar la vida útil del concreto. Los cloruros no se deben agregar intencionalmente, no obstante que la cantidad de cloruros de los ingredientes sea menor a los límites establecidos para estos. En algunas condiciones de exposición tales como autopistas, estructuras de estacionamientos, ambientes marinos, plantas industriales donde los cloruros estén presentes, se requiere protección adicional contra la corrosión del acero embebido. Para el caso de nuestro país se pueden excluir las autopistas y las estructuras para estacionamientos debido a que la corrosión para tales estructuras se presentan en aquellos países con clima frío que emplean sales descongelantes, que actúan como agente corrosivo. Dado el clima de nuestro país no se usan dichas sales en la mayor parte de la República, salvo a lo mejor en el norte de la misma, donde si ha habido casos aislados de congelamiento deshielo y se pueden emplear estas sales en pavimentos.

La corrosión requiere de oxígeno y humedad para originarse. El concreto sumergido en agua, raramente presenta corrosión, debido a que prácticamente no hay presencia de oxígeno, factor indispensable para originar corrosión. Por otro lado aquellas estructuras en condiciones secas, tales como interiores de las edificaciones tiene bajo riesgo de presentar corrosión en el concreto endurecido. Sin embargo, áreas interiores sujetas a una humedad ocasional si son proclives a desarrollarla, tales como cocinas, lavanderías o construcciones construidas con agregados ligeros y que son selladas subsecuentemente con azulejo antes de que el concreto se seque completamente.⁹⁸

⁹⁸ ACI 222.p. 222R-14.

La corrosión es el principal problema de durabilidad del concreto en México.⁹⁹ Es un fenómeno común en la práctica, por lo que es una de las causas principales de que las estructuras de concreto reforzado sufran deterioro prematuro. El hecho de que la corrosión ocupe este sitio se debe a varios factores:

1. Carencia o insuficiencia de recubrimiento
2. Colocación inapropiada del acero de refuerzo
3. Curado inadecuado o nulo
4. Defectos constructivos
5. Concretos de mala calidad, con relaciones agua / cemento altas y alta permeabilidad.
6. Zonas costeras. México tiene 10,000 km. de costas, zona potencial para que las obras de concreto sufran daños por corrosión.
7. Suspensión de obras. La suspensión de obras es un problema que deteriora a todos los materiales suministrados, sin embargo, el acero reviste una mayor importancia debido a que la corrosión tiene varios efectos colaterales e incluso estructurales.



Fig.3.14. Acero oxidado en una columna de concreto del Distribuidor vial Zaragoza. (Etapa de construcción). Ciudad de México. 2002.

En México se tienen amplias zonas con ambientes corrosivos. Prácticamente toda la región del Golfo de México presenta un ambiente agresivo. Por ejemplo, las zonas de Tampico y Coatzacoalcos son consideradas como unas de las zonas más agresivas debido al ambiente altamente corrosivo.¹⁰⁰ Se debe tener presente que nuestro país cuenta con miles de kilómetros de costas y que las estructuras construidas en esas zonas son susceptibles de presentar y desarrollar daños por corrosión. En la costa yucateca se pueden observar comúnmente daños severos por corrosión en el acero de refuerzo en diferentes estructuras y con distinto fin: escuelas, iglesias, casa habitación, etc.¹⁰¹

Algunas dependencias gubernamentales dedicadas a la infraestructura como la *Secretaría de Comunicaciones y Transportes* tiene un número importante de estructuras y puentes construidos con concreto presforzado que se localizan en ambientes agresivos, como las del Golfo de México, de las cuales una parte de estas ya han presentado procesos corrosivos, otras están bajo estudio. Es indudable que la corrosión ocupa un lugar muy importante entre los factores de deterioro de la infraestructura nacional. El deber de la ingeniería civil mexicana es realizar la evaluación, conservación y mantenimiento adecuado y oportuno para minimizar costos y mantener a su máxima capacidad la infraestructura actual.

El distribuidor Zaragoza es una obra vial que se inició a finales de la década de los 90's, sin embargo, la obra se suspendió por motivos económicos o políticos. La suspensión se realizó en el momento en que uno de sus frentes estaba colocando acero de refuerzo en las columnas de los puentes. Debido a que se realizaba el colado de este elemento paulatinamente y con una cimbra deslizante, se tuvieron columnas donde se dejó al acero de refuerzo expuesto al intemperismo, se presentaron las lluvias, aunado al aire atmosférico y sin tener protección alguna, con el paso del tiempo se desarrolló el proceso de oxidación del acero de refuerzo, llegando a originar manchas en la superficie de concreto de las columnas. La figura 3.14 muestra la oxidación del acero de refuerzo de la columna y las manchas que ha causado en la superficie.

⁹⁹ Vid. Resultados de la Encuesta de Durabilidad del Concreto en México (apéndice A).

¹⁰⁰ CARRION MIRAMONTES J. HERNANDEZ RIVERA J. Y MARTINEZ MADRID M. Estudios de Corrosión en Puentes de Concreto Presforzado, Cables de pre-esfuerzo. IMT, SCT. México, 1999. p IX

¹⁰¹ CASTRO BORGUES P. & CASTILLO R. M. Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. p. 32 y 33.

III.6. CONCLUSIONES CAPITULARES

La **corrosión del acero de refuerzo** debe ser considerada en todas las estructuras de concreto reforzado, desde su etapa de diseño, donde se deben considerar las condiciones de servicio y el tipo de concreto a emplear, así como procurar la aplicación de buenas prácticas constructivas. La afirmación anterior puede ser conservadora, sin embargo, el alto índice de ocurrencia justifica esta medida. Debe tenerse especial cuidado al respecto en estructuras expuestas a cloruros y a carbonatación.

La **corrosión del acero de refuerzo** es un fenómeno multifactorial para el cual se han ideado varias soluciones. Una herramienta importante a considerar en la prevención de la corrosión es el espesor del recubrimiento y la permeabilidad del concreto. Si estos factores defensivos no son suficientes para proteger el acero de refuerzo el diseñador debe considerar la aplicación de los sistemas constructivos señalados aquí para controlar la corrosión.

De las soluciones propuestas para la **prevención de la corrosión del acero de refuerzo**, es necesario hacer una evaluación de su uso y viabilidad para cada proyecto. La aplicación de cada solución estará dada por las condiciones del proyecto u obra.

La diversidad de los **sistemas de protección o control de la corrosión** generan varias soluciones para el diseñador. Cada opción es viable dependiendo de las necesidades, condiciones de servicio, mano de obra y recursos económicos. Para la aplicación de un método u otro se requiere realizar una evaluación técnico - económica.

Es necesario que se siga desarrollando el estudio de la corrosión y de la tecnología del concreto y otros sistemas para evitarla, así como el desarrollo de métodos de diagnóstico, protección y reparación y control, los cuales son de vital importancia, ya que con estos se pueden identificar oportunamente los daños y de este modo ahorrar recursos económicos, que de otra forma se destinarían a reparaciones o rehabilitaciones.

No se tiene un proceso milagroso para la corrosión, sin embargo, se tienen técnicas efectivas disponibles que pueden aplicarse. El mejoramiento de materiales, de las tecnologías y de los procesos de investigación conducen a que cada día se reduzcan los impactos adversos que produce la corrosión.

Es conveniente que si por motivos ajenos a los procedimientos técnicos o constructivos, como pueden ser políticos o económicos se lleguen a suspender las obras, se tomen las medidas necesarias para evitar la corrosión. Obviamente el ingeniero experimentado argumentará, ¿quién va a pagar por esta protección?, ¿quién se responsabilizará? Aún así el costo por un proceso de sanblasteo se tiene que realizar al reiniciar la obra, con la consecuencia de que es necesario revisar si el área del acero de refuerzo es todavía suficiente.

La tecnología, y la difusión de ésta, juega un papel preponderante ante los nuevos esquemas, sin embargo, es necesario y fundamental crear conciencia en el ingeniero mexicano, para que pueda prevenir, identificar y reparar daños que afectan la durabilidad de las estructuras, cuando se tenga un riesgo determinado. La tarea es clara, primeramente es necesario hacer conciencia en el recurso humano, y una vez realizado este paso, proveerle de las herramientas tecnológicas y capacitación necesaria y suficiente para enfrentar y prevenir daños que afectan la durabilidad.

Con el mejoramiento de la especificaciones y un mantenimiento adecuado, la probabilidad de realizar construcciones y mantenimientos con un valor presente neto cada vez más bajo irá incrementándose.

CAPITULO III. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	33
III.1. INTRODUCCIÓN.....	33
III.2. PRINCIPIOS Y MECANISMO DE CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.....	33
III.2.A. DEFINICIÓN DE CORROSIÓN.....	33
III.2.B. CORROSIÓN: UN PROCESO ELECTROQUIMICO.....	34
III.2.C. PENETRACIÓN Y DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO EN EL CONCRETO.....	34
III.2.D. FUNCIÓN ELECTROQUÍMICA DE LOS IONES DE CLORURO.....	35
III.2.E. MECANISMO DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL CONCRETO.....	36
III.2.F. DESEMPEÑO DEL CONCRETO ANTE LA CORROSIÓN.....	41
III.2.G. VELOCIDAD DE CORROSIÓN Y pH.....	42
III.2.H. DIAGRAMAS DE POURBAIX.....	43
III.2.I. CORROSIÓN POR CORRIENTES EXTRAVIADAS.....	43
III.2.J. OTROS IONES DE SALES.....	43
III.3. PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO CONTRA LA CORROSIÓN.....	44
III.4. SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA EVITAR CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO.....	46
III.4.A. DISEÑO Y PRÁCTICAS DE CONSTRUCCIÓN PARA MAXIMIZAR LA PROTECCIÓN AL ACERO DE REFUERZO.....	48
III.4.B. TRATAMIENTOS QUE PENETRAN O SON APLICADOS EN LA SUPERFICIE DEL MIEMBRO DE CONCRETO PARA IMPEDIR EL INGRESO DE LOS IONES DE CLORURO AL CONCRETO.....	57
III.4.C. TÉCNICAS QUE PREVIENEN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DIRECTAMENTE.....	60
III.5. ESTRUCTURAS PROCLIVES A PRESENTAR CORROSIÓN.....	68
III.6. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	70

CAPITULO IV. REACCIONES QUÍMICAS EN AGREGADOS

IV.1. INTRODUCCIÓN

En los primeros años de la utilización del concreto en la construcción, se consideraban a los agregados minerales inertes, es decir, como materiales complementarios o de relleno y que no tenían actividad alguna. Posteriormente el aumento del conocimiento de sus características, y propiedades indicó que desempeñaban un papel más activo dentro del concreto. Actualmente es conocido que los agregados presentan al igual que el concreto cambios volumétricos, deformaciones e incluso reacciones químicas. En el presente capítulo se analizarán las reacciones que tiene los agregados una vez que están en el seno del concreto en servicio. Aunque las reacciones suceden a nivel microscópico tienen claras manifestaciones macroscópicas que impactan directamente a la durabilidad, seguridad estructural y apariencia del concreto.

En la naturaleza se encuentran agregados que al entrar en contacto con la pasta de cemento desarrollan reacciones químicas que en su mayoría tienen consecuencias que afectan la durabilidad del concreto. Sin embargo, algunas pueden ser para bien, como es el caso de la reacción “*epitaxia*”, una reacción que mejora la adherencia entre determinados agregados calizos y la pasta de cemento.¹⁰² La mayoría de las reacciones son perjudiciales porque originan expansiones nocivas a la integridad estructural del concreto.

Dichas reacciones se producen entre ciertas rocas y minerales que forman parte de los agregados y los álcalis (óxidos de sodio y potasio) que normalmente proceden del cemento, aunque pueden ser aportados por algunos agregados o aditivos. Los componentes deletéreos de los agregados se hallan en forma de óxidos, sulfuros, vidrios, sulfato de calcio, zeolitas, arcillas y también ciertas calizas dolomíticas. El óxido de sílice en sus formas inestables destaca por ser reactivo con los hidróxidos alcalinos de la pasta de cemento. Dicha reacción del tipo sólido-líquido produce un gel de silicato alcalino que incrementa su volumen conforme absorbe agua del medio en que se encuentra. Tal expansión origina presiones internas en el concreto, que con el transcurso del tiempo puede destruirlo. Entre las formas de sílice inestables se encuentran las amorfas, las microcristalinas y criptocristalinas intensamente deformadas y fisuradas. Estas formas de sílice se encuentran frecuentemente en las rocas, por lo que está latente el riesgo de emplear estos agregados.

Una vez que inician las reacciones entre los agregados y la pasta de cemento no existen medios para detenerlas, de ahí la importancia de su estudio, análisis, conocimiento de sus causas y las herramientas tecnológicas para evitarla.

En 1938 se presentó el primer caso de una reacción entre agregado y pasta de cemento, esta sucedió en algunos pavimentos de concreto de California, EE.UU. En este caso los principales efectos deletéreos de los agregados se asociaban con la presencia de pedernal, una roca sedimentaria compuesta por una o varias formas de sílice: ópalo, calcedonia (cuarzo fibroso microcristalino) o cuarzo microcristalino, en el vidrio volcánico predomina la sílice en estado amorfo. Con respecto al cemento los reactivos identificados con estas formas de sílice fueron los óxidos de sodio y de potasio, conocidos como álcalis del cemento. En aquél tiempo sólo se tenía evidencia de este tipo de reacción, por lo que se le denominó “reacción álcali - agregado”. Nuevamente fue la experiencia la que identificó el error del nombre. Posteriormente se identificó que los álcalis también reaccionan con ciertos tipos de calizas dolomitas, donde no estaba involucrado el sílice, por lo que se decidió denominarlas reacción álcali - sílice “ y reacción álcali - carbonato respectivamente, siendo la primera más frecuente que la segunda.

¹⁰² MENA FERRER, Manuel. *Reacción Álcali – Sílice en el Concreto*. Revista IMCYC, Agosto, 1983.

Actualmente se reconocen tres tipos de reacciones:

1. Reacción álcali - sílice
2. Reacción álcali - silicato
3. Reacción álcali- carbonato

Se admite normalmente que existen tres condiciones necesarias para que se produzca y manifieste una reacción álcali - agregado en grado deletéreo, estas son:

- a) **Presencia de rocas y minerales reactivos en los agregados**, en las proporciones que cada caso resulten críticas, de acuerdo a su origen y naturaleza.
- b) **Elevado contenido de álcalis en la mezcla de concreto**, por arriba de ciertos límites establecidos empíricamente.
- c) **Suficiente humedad en el interior del concreto** para mantener una solución fuertemente alcalina en contacto con los agregados.¹⁰³

Debe indicarse que en la República Mexicana existen factores de riesgo, debido a que se han identificado agregados potencialmente reactivos y se utilizan cementos con altos contenido de álcalis, por lo que debe considerarse la posibilidad de que ocurra, de ahí la necesidad de identificar las zonas con agregados potencialmente reactivos.

IV.2. REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE

El mecanismo de la reacción álcali - sílice se parece más al del ataque por sulfatos que al del ácido, debido a que éste ataque es solamente en determinadas sustancias del concreto. La diferencia entre el ataque por sulfatos y el ataque de álcalis es que la sustancia reactiva en el primer caso está en el cemento y en el último está en los agregados. En la figura 4.1. se aprecia el efecto de la reacción álcali - sílice en el concreto.

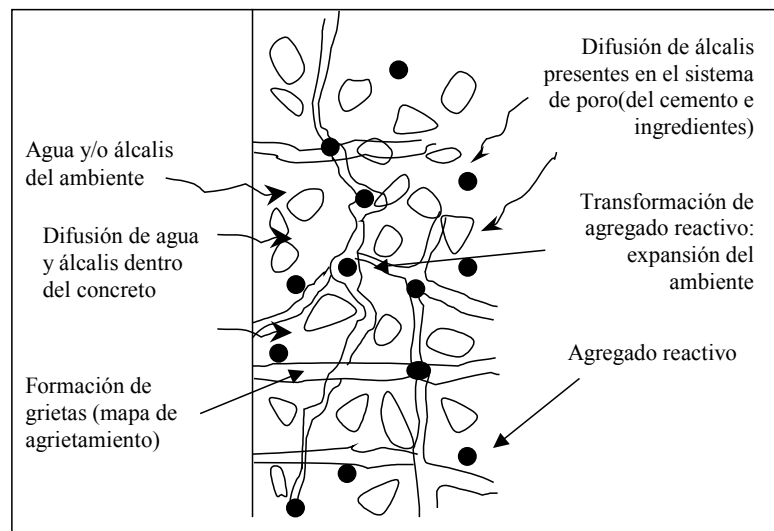


Fig. 4.1. Efecto de la reacción álcali - sílice. Fuente: Durable Concrete Structures, CEB p.23

La solución alcalina en los poros de concreto está siempre saturada de cal y contiene varias cantidades de iones de sodio y potasio. Los agregados que contienen sílice pueden ser atacados por las soluciones alcalinas. Este hecho puede conllevar a una expansión destructiva.

¹⁰³ Guía para la Durabilidad del Concreto. ACI México. p.26.

Los daños al concreto visibles comienzan con pequeñas grietas en la superficie en un patrón irregular, seguido posteriormente por una disgregación completa. Generalmente el desarrollo de la expansión es en la dirección de menor resistencia, generando patrones de agrietamiento paralelos que se desarrollan hacia el interior de la superficie (para losas), o agrietamiento paralelo a la trayectorias de compresión para miembros sujetos a compresión, como es el caso de columnas o miembros presforzados. Otras manifestaciones típicas son estallidos (*pop outs*), los exteriores y escurrimientos de gotas vítreas de composición variante. En la figura 4.2. se presenta una fotografía del daño por reacción álcali - sílice en una banqueta de concreto.

Los principales parámetros que influyen en la expansión en la práctica son:

- a) La reactividad del agregado, que se determina por la presencia de sílice cristalizada o amorfa.
- b) La cantidad y el tamaño de las partículas de los agregados reactivos.
- c) Concentraciones de calcio y álcali en el agua de poro (cantidad interna de sustancias agresivas).
- d) Tipo de cemento (velocidad de transporte).
- e) La cantidad de agua disponible.

La presencia de sílice reactiva es un factor delimitante. La evaluación de la reactividad es difícil de determinar. No existe un método que de resultados satisfactorios para todos los agregados potencialmente reactivo bajo todas las circunstancias posibles.

El efecto deletéreo de la reacción álcali - sílice no incrementa simplemente con la cantidad de agregado reactivo; en una cierta fracción, la expansión alcanza un máximo. Generalmente esta fracción no alcanza más que un pequeño porcentaje. También influye el tipo de cemento y la mezcla de concreto y del tamaño de las partículas del material reactivo.

La concentración de álcalis es un factor decisivo, el contenido de álcalis del concreto es importante en cualquier tiempo. Los álcalis libres son suministrados principalmente por el cemento, aunque pueden ser suministrados eventualmente por el agua de mezclado, los agregado y algunos aditivos. Se deben considerar las afluencias de álcalis disueltos en el agua que penetra en el concreto.

Los cementos Pórtland con contenido limitado de álcalis son cementos especiales para la reacción álcali - sílice han sido empleados por varios años.

Para limitar la presencia de álcalis se sugirió desde hace tiempo evaluar el contenido de álcalis en la mezcla de concreto, de acuerdo con las proporciones de sus componentes y sus respectivos contenidos de álcalis, se han propuesto limitaciones de 2.1 a 2.5 kilogramos de álcalis como máximo en un metro cúbico de concreto.¹⁰⁴ El ACI Sección México propone limitar los álcalis a 3.0 kg. por m³.¹⁰⁵



Fig.4.2. Reacción álcali - sílice en una banqueta de concreto

El empleo de cementos mezclados origina un decremento de la concentración de álcalis y calcio, junto con una decremento de la permeabilidad.

¹⁰⁴MENA FERRER, Manuel. Reacción Álcali – Sílice en el Concreto. Revista IMCYC, Agosto, 1983.p.20.

¹⁰⁵ Guía para la Durabilidad del Concreto, Guía del Consumidor de Concreto Profesional. p.25

Las condiciones de exposición se desprecian en ocasiones, sin embargo, pueden marcar la diferencia en la velocidad de deterioro del concreto. Para la evaluación del concreto se juzga al agregado con base en ensayos realizados con una humedad y temperatura constantes. Se conoce bien que se tendrá mayor expansión si los ciclos de secado y humedad son intermitentes.¹⁰⁶ Por lo que es necesario mejorar y adaptar más la realidad de ciertas pruebas de laboratorio, con el objetivo de que aporten resultados más apegados a la realidad y diversidad de condiciones ambientales. Se puede retardar o aún prevenir el deterioro progresivo si se emplea algún impermeabilizante en el concreto.

IV.2.A. SÍLICE REACTIVA EN LOS AGREGADOS

No todos los agregados que contengan sílice (SiO_2) son reactivos con los álcalis del cemento. De hecho se requieren de dos condiciones para considerar a un agregado potencialmente reactivo.

- a) Que contenga sílice reactiva
- b) Que esta se encuentre en cantidades suficientes para originar la reacción deletérea

También se debe considerar el tamaño y distribución de las partículas. El sílice puede identificarse reactivo con los álcalis si corresponde a la sílice inestable, que comprende los estados vítreo, criptocristalino, microcristalino, y en ocasiones cristalino intensamente deformado. Dichas formas se encuentran fundamentalmente en minerales como el ópalo, la caldenonia, la trimidita y la cristobalita. Las rocas que frecuentemente contienen sílice reactiva son:

- Rocas silíceas como el pedernal (con ópalo y /o calcedonia) y las calizas y dolomías silíceas.
- Rocas volcánicas ácidas e intermedias (con vidrio volcánico), como las riolitas, latitas, dacitas, andesitas y sus respectivas tobas.
- Algunas formas de cuarzo criptocristalino, microcristalino o cristalino intensamente deformado.

Para detectar la presencia de sílice reactivo en los agregados es necesario realizar un examen petrográfico cualitativo y cuantitativo, como lo establece la norma ASTM C 295. La norma ASTM C227 en vigas de mortero es más confiable y experimentada para identificar agregados capaces de producir reacciones álcali - sílice.

IV.2.B. GRADO DE HUMEDAD EN EL CONCRETO

En investigaciones se ha identificado que la condición de humedad para favorecer la reacción álcali - sílice corresponde a los cambios cíclicos de humedecimiento y secado; y también al movimiento de humedad a través del concreto, como es el caso de una estructura con un paramento seco y otro húmedo (una presa, por ejemplo). Por lo tanto cualquier medida para restringir el paso de humedad por el concreto coadyuvará, si no evita, a retardar la manifestación de expansiones dañinas en la estructura. Normalmente estas expansiones requieren de varios años para lograr niveles destructivos en elementos estructurales.

IV.2.C. OTROS ASPECTOS DE LA REACCIÓN

Por lo general se reconoce que existen dos tipos distintos de reacción –sílice: la reacción clásica con agregados que contienen ópalo, pedernal, y vidrio volcánico, que ocurre con relativa rapidez y la que involucran rocas silíceas, que se expanden lentamente, como las grauvacas, cuarcitas, ortocuarcitas, argilitas y filitas. Para evaluar la primera se ha recomendado el método ASTM C227, para la segunda algunos autores (MENA,1983; GRATTAN BELLEW, P.E. 1981) indican que el método canadiense CSA 23.2-14^a es más apropiado.

¹⁰⁶ Durable Concrete Structures. CEB. p.25.

Además de las características de la sílice reactiva interfieren otros factores, tales como la temperatura, la proporción de sílice reactiva con respecto a los álcalis disponibles, y el tamaño y granulometría de las partículas de agregados.

IV.2.D. ESTRATEGIAS PARA EVITAR LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE

Las estrategias actuales para evitar este tipo de reacción son las siguientes:¹⁰⁷

1. **Seleccionar un agregado no reactivo.**
2. **Emplear cementos con bajos contenidos de álcalis.** La *American Society of Testing and Materials* limita el contenido de álcalis, expresado como un óxido de sodio equivalente ($0.658K_2O + Na_2O$), a 0.6% por peso.
3. **Indicar una tolerancia apropiada para la entrada de álcalis del exterior.**
4. **Considerar las condiciones ambientales.** Las condiciones de exposición son subestimadas en la práctica. El secado y humedecimiento intermitente propicia una amplia expansión: el impermeabilizado tal vez prevenga o retarde la expansión lo suficiente. Dentro de las consideraciones de diseño se debe contemplar minimizar la humedad disponible y los ciclos de humedad – secado. La reacción álcali - sílice necesita al menos un 80% de humedad relativa a 23 °C para desarrollarse. En algunas aplicaciones puede ser posible secar la superficie al concreto hasta una humedad relativa inferior a 80%. Otro factor que afecta la reactividad es la temperatura. Como cualquier reacción química, la velocidad de la reacción se incrementa con la temperatura, por lo tanto, las estructuras expuestas a ambientes cálidos son más susceptibles a la reacción álcali - sílice que las expuestas a climas fríos.¹⁰⁸
5. **Uso de ingredientes puzolánicos.** Especialmente microsílíce. El empleo de estos ingredientes reduce las expansiones debidas a la reacción álcali - sílice, gracias a su propiedad de cementarse con los álcalis del cemento.
6. **Uso de cementos mezclados.** Se considera que los cementos con escoria de alto horno con un mínimo de 65% de escoria y los cementos puzolánicos con un mínimo de 30% de material puzolánico (natural o sintético), son protección suficiente con cualquier tipo de agregado, independientemente del contenido de álcalis. La adición de algunas puzolanas incrementa el requerimiento de agua, si no se emplean superfluidificantes. Debe notarse que las puzolanas no son efectivas en controlar la reacción álcali - carbonato.
7. **Aire incluido.** Se ha encontrado que el aire incluido es efectivo en reducir las expansiones debidas a la reacción álcali - sílice.
8. **Baja relación agua / cemento.** Una baja relación agua / cemento permite un concreto resistente y con baja permeabilidad, por su parte la autodesecación del concreto endurecido disminuye el riesgo a las reacciones álcali - sílice.

La reactividad del agregado con sílice se ve afectada por el tamaño de su partícula y porosidad. El ASTM C 33 incluye un apéndice para evaluar el potencial reactivo de los agregados.

Una descripción petrográfica del mismo manifiesta un primer índice, un procedimiento exhaustivo se establece en el ASTM C 295. Una prueba química como la ASTM C 289 puede eliminar material no susceptible a la reacción, aunque los resultados de prueba positivos tal vez incluyan materiales inofensivos.

¹⁰⁷ *Durable Concrete Structures. CEB. P.71.*

¹⁰⁸ *NAWY E.G. Concrete Construction Engineering Handbook. 1997. p.5-43.*

La prueba ASTM C 227, realizada con vigas de mortero se emplea frecuentemente, aunque su utilidad se discute ampliamente. Su principal desventaja es que requiere 6 meses para llevarse a cabo; algunos materiales pueden requerir más tiempo para iniciar algún efecto deletéreo. En la tabla 4.1 se indican algunas guías para evitar la reacción álcali - sílice en el concreto.

TABLA 4.1. GUÍA PARA PROTEGER AL CONCRETO CONTRA LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE		
Prueba del agregado	Mecanismo de protección si las pruebas resultan negativas o sospechosas	Medida de protección
Procedimiento general	Limitando los álcalis totales	Cementos con bajo contenido de álcalis. Cemento Pórtland < 0.6 % equivalente Na ₂ O.
Descripción petrográfica	Tipo de cemento	Cementos mezclados: a) Cementos de escoria de alto horno > 65% de escoria b) Cementos puzolánicos > 30% puzolanas
Prueba química - rápida, pero no limitativa, no aplicable para carbonatos.	Una cantidad suficiente de agregado fino en la mezcla de concreto	Mezcla de concreto modificada Agregar finos a la proporción del agregado reactivo.
Pruebas de vigas de mortero	Incrementar la proporción de material reactivo (a una distancia segura de la proporción).	
Pruebas de cilindros prismas de concreto , para carbonatos o silicatos que se expanden lentamente.	Limitando el valor límite de agua	Baja relación agua / cemento. Impermeabilización y sellado de grietas para prevenir el deterioro progresivo.
Fuente: <i>Durable Concrete Structures</i> . CEB. p.72.		

En el cuadro sinóptico 4.2 y 4.3. se presentan las pruebas sucesivas que deben llevarse cabo para la definición, así como los criterios de decisión y evaluación de la reactividad de los agregados para la reacción álcali sílice y álcali – carbonato.

IV.2.D.1. ESTRATEGIAS MENORES

Dependiendo del estado y de las circunstancias de cada obra o estructura se pueden tomar diversas medidas, ya sean menores o mayores.

Se denominan estrategias menores porque su adopción y cabal seguimiento en obra representan bajo costo y poca dificultad, aunque tienen una eficacia limitada. Entre estas se encuentran las siguientes:

Reducción del contenido o consumo de cemento

Se puede lograr mediante las siguientes prácticas:

- Considerar una resistencia de proyecto del concreto moderada al realizar el diseño estructural
- Establecer especificaciones realistas. La finalidad es que las resistencias promedio obtenidas no sean innecesariamente altas.
- Lograr una uniformidad de resistencia en el concreto, para reducir el margen de seguridad ($f_{cr} - f_c$) necesario para cumplir las especificaciones.
- Procedimientos constructivos y equipos aptos para operar con mezclas de bajo revenimiento
- Emplear aditivos superplastificadores en la mezcla, para reducir el agua de mezclado.

- Incrementar el tamaño máximo del agregado grueso hasta donde lo permitan las características geométricas de los elementos y refuerzo de la estructuras
- Lavar los agregados para eliminar finos en exceso, que contribuyan a incrementar la demanda de agua de la mezcla.

Protección del concreto endurecido

- Mantener seca la estructura en la medida de lo posible. Un estado seco no garantiza que no se desarrolle la reacción, pero si incrementa la posibilidad de que no lo haga. Evitar ciclos de humedecimiento y secado. Esta práctica no se contraponen con el curado.
- Adecuado diseño de drenaje de aguas pluviales, sobretodo en estructuras con amplias superficies horizontales para evitar el almacenamiento de agua. Sellar juntas sujetas a movimientos con material elástico que conserve sus propiedades y condiciones de exposición y servicio de la estructura.
- Impermeabilizar al concreto en estructuras verticales o inclinadas. En aquellos casos en que tengan un paramento en contacto con el agua. Emplear aditivos inclusores de aire, para restringir el movimiento de humedad a través del concreto endurecido.

IV.2.D.2. ESTRATEGIAS MAYORES

Se denominan estrategias mayores porque su aplicación puede resultar costosa e impactar en el costo del concreto y no siempre se pueden aplicar, aunque si tienen mayor eficacia para combatir la reacción álcali - sílice. Se aplican cuando la aparición de dicha reacción es inminente y no se tienen alternativas para cambiar los agregados. Básicamente se tratan de dos estrategias: a) emplear un cemento con bajo contenido de álcalis y b) emplear aditivos minerales que inhiban la expansión del concreto.

Cemento con bajo contenido de álcalis. Actualmente un cemento con bajo contenido de álcalis representa un mayor costo, debido a que requiere de medidas especiales en su fabricación, principalmente por las medidas ecológicas y colocación de válvulas derivadoras en su proceso de fabricación para desviar los gases hacia sistemas colectores de polvo. Por lo que se vuelve difícil encontrar un cemento con bajo contenido de álcalis, por lo que su aplicación como estrategia para mitigar la reacción álcali - sílice es ahora menos accesible.

Aditivos puzolánicos. El componente principal de los materiales con propiedades puzolánicas es precisamente la sílice reactiva. Una condición necesaria para el desarrollo de su actividad puzolánica es que sean muy finos. Como consecuencia de tales características determinadas puzolanas son eficaces para evitar el riesgo de una expansión deletérea en el concreto, quedando sólo por definir la proporción necesaria para cada caso particular. Para aplicar esta práctica primeramente se debe verificar si la puzolana es efectiva para reducir la expansión, mediante la prueba ASTM C 441, en la cual se ensayan vigas de mortero elaboradas con cemento de alto contenido de álcalis y vidrio reactivo como agregado. Se considera que la puzolana es adecuada si la expansión es reducida hasta en un 75% a los 14 días de edad. Como segundo paso se debe definir la proporción de puzolana, puede emplearse nuevamente el método ASTM C441, combinando el cemento y la puzolana de la obra en diversas proporciones. Se considera tolerable una expansión inferior al 0.02% a los 14 días, e inferior al 0.06% a las 8 semanas. La adición de puzolana debe conciliarse con la resistencia y la contracción. Una vez definida la proporción de puzolana el tercer y último paso es el diseño de la mezcla.

IV.2.E. ADITIVOS A BASE DE LITIO

Los ingredientes o tratamientos en el concreto endurecido basados en litio se han propuesto como métodos alternativos para prevenir o mitigar la reacción álcali – sílice. El mecanismo que ejerce el litio para controlar la reacción es el siguiente: el litio forma un gel álcali – sílice que no es expansivo. Los silicatos de litio son menos solubles que el agua y no absorben o unen agua al grado que lo hacen los silicatos de sodio o potasio.

La reacción del litio con el producto de la reacción álcali – sílice parece irreversible, debe haber suficiente litio presente en la solución de poro para proteger contra un futuro ataque por los álcalis remanentes en la mezcla de concreto.

Los aditivos de litio ofrecen las siguientes ventajas:

- Permiten el uso de agregados locales, para obtener un costo efectivo de los mismos
- Incrementa la duración de la vida de las estructuras de concreto
- El nitrato de litio y los aditivos basados en vidrio no tienen un efecto significativo en otras propiedades

Se obtiene un mejor resultado si se combina con puzolanas, debido a que se obtiene un concreto manufacturado económicamente, que es resistente a la reacción álcali sílice con una mayor durabilidad generada por las puzolanas.¹⁰⁹

IV.3. REACCIÓN ÁLCALI – SILICATO

Esta reacción es muy poco frecuente, en ella intervienen los filosilicatos que por su estructura laminar tienden a ser exfoliados por la acción de los álcalis.

IV. 4. REACCIÓN ÁLCALI - CARBONATO

Los minerales de carbonato son susceptibles al ataque alcalino. En dolomitas o magnesio que contienen calizas, la reacción puede producir hidróxido de magnesio. Esta “dolomitización” conduce a un mapeo de agrietamiento, que resulta en la destrucción completa del concreto.¹¹⁰ Tiene una frecuencia intermedia entre las dos reacciones descritas previamente.

Las puzolanas no son efectivas para controlar la reacción álcali - carbonato.¹¹¹ El suplemento mexicano del ACI 201 señala que hay pocas expectativas de que una puzolana pueda inhibir los efectos de la reacción sílice – carbonato. La capacidad inhibidora de una puzolana se verifica con pruebas de expansión en concreto con los agregados reactivos en cuestión y un cementante compuesto por el cemento de uso previsto y la puzolana propuesta, aplicando el método ASTM C 1105. Si se tiene una expansión excesiva entonces deben considerarse las siguientes opciones:¹¹²

- Cambiar la fuente de suministro de los agregados por otra no reactiva
- Efectuar una explotación selectiva de bancos o canteras para eliminar el material reactivo, o por lo menos restringir su proporción a no más del 15% en el total de los agregados
- Seleccionar un cemento con contenido de álcalis suficientemente bajo para producir una expansión tolerable a la prueba del método ASTM C1105.

Las pruebas químicas son inútiles cuando se estima la reactividad álcali - carbonato. Un método con cilindros de roca, específicamente para la reacción álcali carbonato es el ASTM C 586, este es comparable con la prueba de los prismas de concreto para roca de carbonato y roca de silicato que se expande lentamente.

¹⁰⁹ *Passim*. ADAMS, N. & STOKES D.B. Using Advanced Lithium Technology to Combat ASR in Concrete. *Concrete International*, August, 2002.p.99-102.

¹¹⁰ *Durable Concrete Structures*. CEB. p.24

¹¹¹ *Ibid*. p.71.

¹¹² *Guía para la Durabilidad del Concreto, Guía del Consumidor de Concreto Profesional*. p.27

Para las estructuras de concreto en servicio en las que se ha detectado algún tipo de reacción álcali – agregado o que se incurrió en condiciones de riesgo durante su construcción y tienen por tanto la posibilidad de desarrollar alguna reacción álcali – agregado, a la fecha no se han desarrollado medidas efectivas para evitarles el daño predecible, aunque se recomienda mantener el concreto seco, aunque es meramente un paliativo, permite aminorar los efectos y postergar sus efectos, no se asegura que no se desarrolle la reacción, simplemente se prolonga la vida de la estructura.

IV.5. REACCIONES ÁLCALI – AGREGADO EN MÉXICO

En México se ha considerado el requisito de evitar el desarrollo de la reacción álcali - sílice, sobretudo en estructuras de concreto hidráulicas de importancia y en contacto con el agua, como son, obras hidráulicas para riego, control de ríos y generación de energía eléctrica, obras marítimas y centrales nucleoelectricas. En este caso se ha prevenido con cementos Pórtland con bajos contenidos de álcalis, puzolanas administradas en forma individuales o cementos puzolánicos¹¹³. En las figuras 4.4. y 4.5 se indican las zonas de reactividad álcali - sílice y de reacción álcali - carbonato para el país respectivamente. Conviene tener presente esta zonificación para la extracción de agregados.

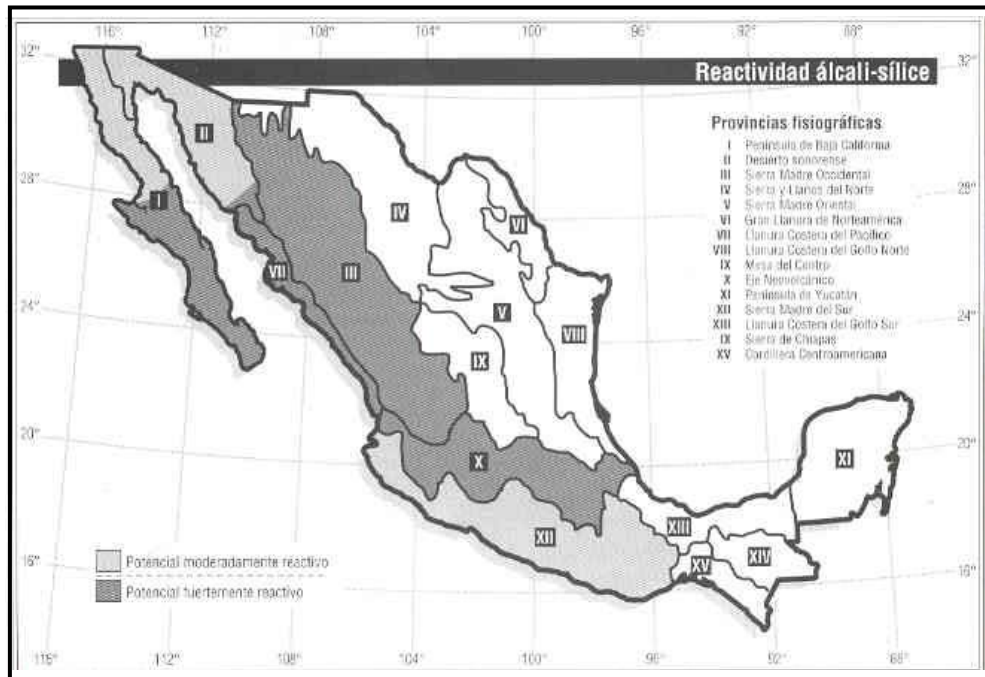


Fig.4.4. Regiones con rocas propensas a la reacción álcali - sílice
Fuente: Guía para la Durabilidad del Concreto. ACI México. p.30.

¹¹³ MENA FERRER, Manuel. Reacción Álcali – Sílice en el Concreto. Revista IMCYC, Agosto, 1983.

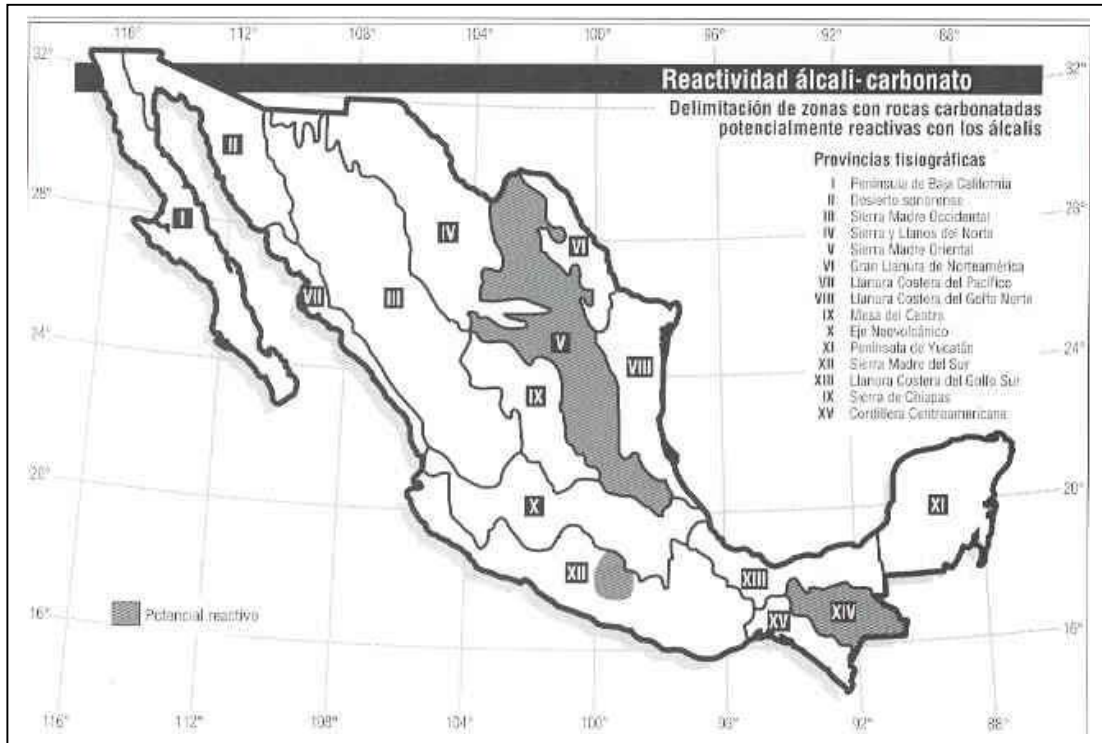


Fig.4.5. Regiones con rocas propensas a la reacción álcali - carbonato
Fuente: Guía para la Durabilidad del Concreto. ACI México.31.

IV.6. CONCLUSIONES CAPITULARES

Si se identifican factores de riesgo de aparición o desarrollo de la reacción álcali - sílice es necesario implementar medidas para evitarla, toda vez que una vez que aparezca no hay posibilidad de eliminarla. El ingeniero civil debe percatarse de la importancia de combatir estas reacciones álcali - agregado desde su origen, es decir, desde la etapa de diseño y posteriormente en la construcción.

Se debe considerar en las circunstancias donde se tenga un agregado reactivo, con contacto al agua y principalmente en obras que puedan afectar en algún grado la infraestructura pública. Se debe verificar la habilidad de la puzolana a emplear para inhibir la reacción álcali – agregado.

<i>CAPITULO IV. REACCIONES QUÍMICAS EN AGREGADOS</i>	72
IV.1. INTRODUCCIÓN	72
IV.2. REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE	73
<i>IV.2.A. SÍLICE REACTIVA EN LOS AGREGADOS</i>	75
<i>IV.2.B. GRADO DE HUMEDAD EN EL CONCRETO</i>	75
<i>IV.2.C. OTROS ASPECTOS DE LA REACCIÓN</i>	75
<i>IV.2.D. ESTRATEGIAS PARA EVITAR LA REACCIÓN ÁLCALI SÍLICE</i>	76
<i>IV.2.E. ADITIVOS A BASE DE LITIO</i>	78
IV.3. REACCIÓN ÁLCALI – SILICATO	79
IV. 4. REACCIÓN ÁLCALI - CARBONATO	79
IV.5. REACCIONES ÁLCALI – AGREGADO EN MÉXICO	80
IV.6. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	81

CAPITULO V. OTROS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

V.1. INTRODUCCIÓN

Determinadas estructuras de concreto se diseñan y construyen para contener agua; su finalidad es brindar servicio en condiciones húmedas. Otras están diseñadas para mantener un ambiente seco en su interior. Debido a que el concreto no es completamente impermeable se requieren sistemas o barreras protectoras que logren este efecto.

Algunas estructuras pueden estar sujetas a ataque químico en una o más superficies por ácidos, álcalis, soluciones salinas o por una amplia variedad de químicos orgánicos.¹¹⁴ El daño puede ser desde una decoloración en la superficie, una superficie áspera, o puede ser tan catastrófica como un ataque por ácidos, con las severas consecuencias de pérdida de la integridad estructural. Las superficies afectadas generalmente se cubren con barreras de materiales resistentes al ataque químico.

Los sistemas de barreras de impermeabilización y protección brindan una solución a aquellos sistemas descritos en capítulos anteriores que no pueden brindar la suficiente protección.

Para comprender los factores que afectan el desempeño de los diferentes sistemas de barreras, debemos considerar que estos no están aislados, que forman parte de un todo. Como ejemplo, en un sistema de barrera protectora para una estructura de concreto subterránea, los elementos específicos que lo integran son: el material de barrera, la interfase de la barrera y la superficie de concreto, el concreto con una profundidad de 6 mm, lo restante de concreto, la estabilidad del suelo que la soporta y las presiones hidrostáticas.

El concepto de los sistemas de protección hace pensar que la selección de un material de barrera es sólo uno de los varios pasos interrelacionados y necesarios para asegurar un desempeño adecuado. Resultan de igual importancia otros aspectos constructivos, como la colocación, la consolidación y el curado del concreto.

La decisión de usar o no sistemas de barreras se debe realizar en el proceso de diseño de la estructura. La configuración de la estructura, los métodos de construcción y la secuencia de los trabajos pueden afectar la instalación de la barrera. Las penetraciones de la barrera se minimizan y la instalación de la misma puede planearse mejor.

No existen fórmulas, tales como las disponibles para diseñadores de estructuras de concreto, que se puedan utilizar en la selección, colocación, aplicación e inspección de los sistemas de barreras, porque algunos de los factores que afectan su desempeño son difíciles de definir y comprenden factores intangibles. La limpieza de la superficie es el factor que más afecta la adhesión y el desempeño consecuentemente del sistema de barrera, y no se puede cuantificar. El lector debe ser consciente de que la aplicación de un sistema de barrera es un arte, no una ciencia.

V.1.A. FACTORES ECONÓMICOS PARA LA SELECCIÓN DE LA BARRERA

Es importante para el propietario o constructor reconocer que la selección, colocación, aplicación e instalación de un sistema de barrera puede ser dominado por factores económicos en lugar de su desempeño, por ejemplo, en ocasiones se tienen presiones para seleccionar el sistema de barrera con el costo inicial más bajo.

¹¹⁴ Ver Apéndice C. Efecto de Sustancias Químicas en el Concreto.

Sin embargo, estas barreras pueden tener un bajo desempeño potencial. Aparte del costo inicial se debe considerar el costo de reemplazar la barrera por falla prematura, así como aquellos costos asociados con la falla, como pueden ser el daño a las estructuras de concreto o el daño al equipo o la excavación para exponer el impermeabilizante.

El ACI 515 recomienda que la selección del sistema de barrera se debe hacer con base en la vida de servicio potencial que da el costo anual más bajo por unidad y por año. Un sistema más económico con base en un costo anual es propenso a tener una mayor erogación inicial debido a que los materiales y el trabajo de aplicación pueden ser más caros, o requiere una cantidad mayor de material.

Adicionalmente, la selección de un aplicador del material calificado o el uso de un programa de inspección pueden incrementar el costo inicial, pero no el costo anual. El fabricante y el aplicador del material de barrera deben ser seleccionados con base en el desempeño pasado, responsabilidad financiera, fiabilidad o seguridad técnica, capacidad, buena voluntad para suministrar asistencia técnica y reputación para colocarse atrás de su producto y trabajo.

V.1.B. INSPECCIÓN DURANTE LA APLICACIÓN

Se deben establecer planes para realizar una inspección al colocar la barrera, de modo que se supervise la preparación de la superficie y el trabajo de aplicación, con la finalidad de asegurar la aplicación de la barrera conforme a la especificación. La inspección debe estar antes de que la barrera sea colocada y permanecer después de que la barrera ha sido colocada.

V.2.SISTEMAS DE BARRERAS PROTECTORAS

Los sistemas de barreras protectoras sólo son aplicables cuando la superficie del concreto resulta accesible para recibir el tratamiento, como es el caso de algunos elementos prefabricados de concreto, tales como los tubos que permanecen enterrados o sumergidos en agua y en los cuales es frecuente especificar la aplicación de un recubrimiento externo de protección contra los sulfatos y contra los cloruros, para evitar corrosión del acero de refuerzo, en especial cuando se trata de tubos de concreto presforzado.

Estos tratamientos de protección externa también se pueden aplicar en aquellos casos en que no se hizo una evaluación oportuna del medio o porque las medidas adoptadas fueron insuficientes para la agresividad del medio. En esta situación el proceso debe iniciar por remover el espesor de concreto dañado, hasta descubrir el concreto sano, para colocar en seguida un nuevo concreto con un cementante y relación agua / cemento adecuadas al medio agresivo. Finalmente debe colocarse sobre el concreto último el tratamiento de protección superficial.

V.2.A. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE BARRERAS

Se tienen diferentes tipos de sistemas de barreras de acuerdo a su función. Se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Sistemas de barreras de impermeabilización
- Sistemas de barreras de impermeabilización a la humedad
- Sistemas de barreras protectoras
- Sistemas de barreras de pinturas decorativas

V.3. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN

La impermeabilización es un tratamiento en la superficie o estructura para prevenir el acceso de agua bajo presiones hidrostáticas, se pueden colocar en el lado positivo o negativo. Los sistemas de barrera del lado positivo son aquellos que se colocan en el mismo lado que se aplica la presión hidrostática. Los sistemas de barrera negativos se colocan en el lado opuesto de la presión hidrostática aplicada (ver figuras. 5.1. y 5.2.).

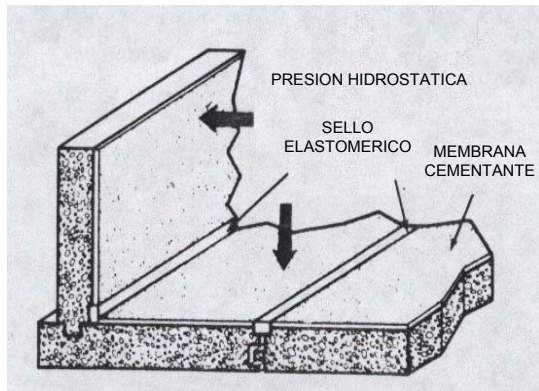


Fig. 5.1. Vista Esquemática del lado positivo, membrana cementante impermeabilizante. Fuente: ACI 515-1R-79 (85).

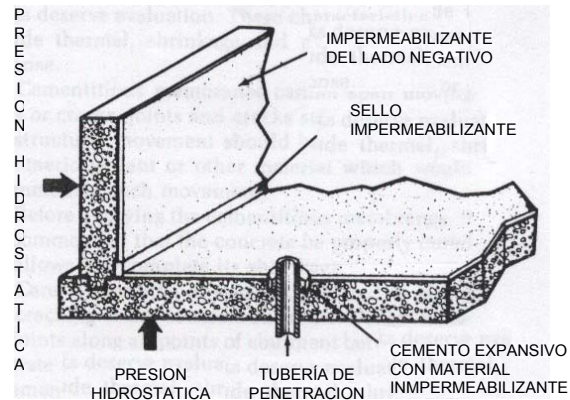


Fig. 5.2. Vista Esquemática por debajo del suelo, lado negativo, impermeabilizante de membrana cementante mostrando penetración. Fuente: ACI 515-1R-79 (85).

La impermeabilización se emplea para prevenir la filtración de agua dentro, a través y fuera del concreto bajo presión hidrostática. Este sistema se puede emplear cuando se tienen condiciones de congelamiento deshielo o si el agua contiene químicos agresivos que puedan dañar al acero de refuerzo. Si se requiere una superficie seca para aplicar algún recubrimiento se puede emplear para prevenir la humedad en la superficie.¹¹⁵

V.3.A. CARACTERÍSTICAS

La membrana de impermeabilización es el tipo de barrera más seguro para prevenir que el agua bajo presión hidrostática y en estado líquido penetre en una estructura subterránea. La alta calidad del concreto y la remoción de la presión hidrostática por drenaje ayudan a reducir la penetración. La impermeabilización consiste en cubrir completamente el lado positivo o negativo de la estructura con una barrera continua. Su propósito es prevenir la filtración dentro de un espacio útil o prevenir la pérdida de agua de una estructura de retención. Para que tenga éxito, la barrera debe ser continua y cubrir completamente muros, pisos y otras superficies sujetas al agua. Las membranas de impermeabilización tienen coeficientes de permeabilidad variables. Un concreto de alta calidad puede tener un coeficiente tan bajo como 10^{-8} cm/s.

Normalmente, las barreras de impermeabilización consisten de capas múltiples de fieltro saturado bituminoso o tejido que se cementan junto con la aplicación de alquitrán de carbón aplicado en caliente o con asfalto para las aplicaciones en lados positivos. Se tienen también sistemas aplicados en frío que emplean aplicaciones múltiples de asfalto y tejidos de vidrio. Actualmente se tienen varios sistemas que se pueden elegir para lados positivos: barreras de membranas elastoméricas, membranas cementantes, materiales bituminosos modificados, materiales basados en bentonita Para los lados negativos: membranas cementantes o materiales impermeabilizantes de óxido metálico.

¹¹⁵ ACI 515 1R-4.

Para que sea efectiva la aplicación del impermeabilizante se requiere un cuidado meticuloso y una estructura adherente a los procedimientos recomendados por el fabricante. Una mano de obra inadecuada resultará en filtraciones que resultan extremadamente difíciles de encontrar y costosas para reparar. De modo que se requiere una inspección cuidadosa durante la aplicación.

V.3.B. GUÍA PARA SELECCIONAR

Cuando se escoge un sistema de impermeabilización, el proyectista o el responsable de señalar las especificaciones debe usar su experiencia y juicio. Debe considerar la severidad de las condiciones del agua, el tipo de construcción y las condiciones en las cuales se aplicará el material.

Se debe consultar al fabricante para determinar el espesor, número de capas (donde sea aplicable), detalles de aperturas, juntas, cantos, ensenadas, penetraciones, detalles de la terminación, características de la aplicación, y otros datos pertinentes que asegurarán la actuación satisfactoria del sistema de barrera.

Al seleccionar el sistema de impermeabilizante de lado negativo o positivo, el proyectista debe revisar las ventajas y desventajas de colocar la barrera protectora en el lado positivo o negativo y de cada tipo de barrera protectora de impermeabilización. (Ver tabla 5.1).

TABLA 5.1. COMPARATIVA DE SISTEMAS DE BARRERAS IMPERMEABILIZANTES POSITIVAS O NEGATIVAS	
IMPERMEABILIZACIÓN DEL LADO NEGATIVO	IMPERMEABILIZACIÓN DEL LADO POSITIVO
Ventajas	Ventajas
<i>El concreto puede retener humedad, eliminando el secado, la contracción y el agrietamiento. La inspección y reparación es posible y económica después del relleno. No se tienen costos adicionales de excavación por aplicación o reparación.</i>	<i>Se impide el flujo de agua al interior del concreto. El concreto seco se protege del daño congelamiento - deshielo. Protección a la corrosión si se tienen químicos agresivos.</i>
Desventajas	Desventajas
<i>No ofrece protección al congelamiento - deshielo arriba del nivel del suelo o las aplicaciones expuestas. No ofrece protección a la corrosión si químicos agresivos están presentes. Puede requerirse detener el flujo de humedad para instalar el sistema.</i>	<i>Membrana inaccesible Reparaciones Costos de excavación adicionales por instalación de la membrana. Posibles daños al colocar el relleno</i>
<i>Fuente: ACI-515-IR-20.</i>	

V.3.C. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE LADO POSITIVO

Los métodos de aplicación se clasifican en sistemas aplicados en caliente y en sistemas aplicados en frío. Aunque los sistemas aplicados en caliente suelen disfrutar de una amplia difusión, las condiciones de campo, tipo de contratista, seguridad y preferencias personales pueden dictar otros sistemas de impermeabilización. Los sistemas aplicados en frío pueden ser sistemas elastoméricos o bituminosos aplicados en forma sólida (rollos u hojas o aplicadas como un líquido). Los sistemas aplicados en frío pueden ser ventajosos cuando se requiere control de la contaminación o las condiciones de fuego prohíben el uso de equipo calorífico bituminoso. En construcciones de gran altura o en sitios remotos estos sistemas pueden resultar más económicos porque no requieren subir o transportar el equipo que requieren los sistemas aplicados en caliente.

V.4. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN A LA HUMEDAD

La impermeabilización a la humedad es un tratamiento de una superficie o estructura para resistir el paso de agua en la ausencia de presión hidrostática. Tiene las mismas funciones que los sistemas de barreras de impermeabilización solamente que no puede ser usado para protegerlo contra la presión hidrostática.

V.5. SISTEMAS DE BARRERAS DE PROTECCIÓN

Estos sistemas se emplean para proteger al concreto contra la degradación por químicos y la pérdida subsecuente de su integridad estructural, con la finalidad de prevenir deformaciones del concreto o para proteger a determinados líquidos que puedan ser contaminados por el concreto.

Los sistemas de impermeabilización a la humedad, y los sistemas de pinturas decorativas juegan un papel de protección, debido a que también cubren una superficie de concreto, de modo que el contacto directo con agentes agresivo es reducido sustancialmente o en algunos casos es eliminado completamente.

Entre los aspectos de durabilidad que pueden mejorar están los siguientes:

- Ataque por ácidos y álcalis
- Ataque por sulfatos
- Corrosión del acero embebido

E incluso pueden evitar la contaminación del producto, por ejemplo, determinadas soluciones, como el agua de alta pureza o químicos pueden contaminarse por entrar en contacto directo con el concreto. También los productos alimenticios pueden afectar adversamente al concreto.¹¹⁶

V.5.A. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMAS DE BARRERA PROTECTORA

Un sistema de barrera protectora consiste del material de la barrera, la superficie de concreto que es protegida, la estructura de concreto y la cimentación. La calidad del concreto, especialmente en y cerca de la superficie influirá en el desempeño del sistema, debido a que ésta afecta la capacidad del material de barrera para desempeñarse como se espera. Los elementos de un sistemas de barrera protectora se muestran en la figura 5.3. La función de cada elemento se explica en la siguiente sección. Un entendimiento profundo de estos elementos permite obtener el desempeño óptimo de estas barreras de protección.

V.5.B. ELEMENTOS DE UN SISTEMAS DE BARRERA PROTECTORA

V.5.B.1. EL MATERIAL DE BARRERA

Para ser efectivo un material de barrera debe tener las siguientes propiedades:

- A. Cuando el material de barrera es expuesto a un ambiente químico, los químicos no deben causar degradación, expansiones, desintegraciones, agrietamiento o debilitamiento del material de barrera.
- B. La resistencia a la abrasión debe ser adecuada para prevenir al material de barrera de ser desgastada durante el servicio normal.
- C. La resistencia del vínculo adhesivo de una barrera no bituminosa al concreto debe ser al menos igual a la resistencia a la tensión del concreto en la superficie. Este vínculo puede ser afectado por la limpieza de la superficie de concreto.

¹¹⁶ Vid. Apéndice C.

V.5.B.2. INTERFASE BARRERA CONCRETO:

La mayoría de los materiales de barrera no bituminosos están específicamente formulados para usarse sobre el concreto y mantener una resistencia de vínculo adhesivo mayor que la resistencia a la tensión del concreto, cuando la superficie está adecuadamente preparada.

V.5.B.3. EL CONCRETO A UNA PROFUNDIDAD DE 6 MM

Posiblemente la parte más crítica del sistema de barrera no bituminoso es la parte de los primeros 6 mm de concreto. Cuando una falla sucede, una delgada capa de concreto se levanta y normalmente llega hasta 6 mm, usualmente es un espesor menor de 3 mm, generalmente adherida al lado inferior del material de barrera. Esto significa que el concreto falló debido a que los esfuerzos internos del material de barrera fueron superiores a la resistencia a la tensión del concreto próximo a la interfase.

Estos esfuerzos pueden presentarse debido a lo siguiente:

a) La contracción y la polimerización originan esfuerzos cuando el material se cura. Esto es común en todos los materiales poliméricos de dos componentes curados por una reacción química entre la resina y el agente de curado.

b) El cambio de volumen diferencial en el concreto y la barrera debido a la diferencia entre los coeficientes de expansión térmica, acompañados de un cambio en la temperatura. Todas las barreras poliméricas tienen un coeficiente de expansión más alto que el concreto. Un filtro se agrega normalmente para reducir la diferencia entre ambos coeficientes de expansión térmica.

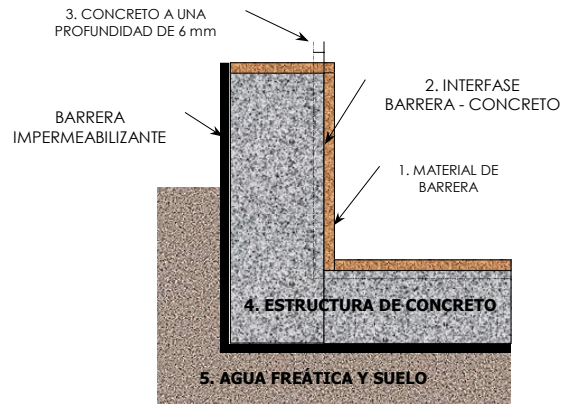


Fig. 5.3. Elementos de un sistema de barrera protectora para estructuras de concreto subterráneas, vista esquemática de sección transversal. Fuente: ACI 515.1R-79(85).

Un sistema de barrera debe tener un bajo módulo de elasticidad para prevenir esfuerzos mayores a la resistencia a tensión del concreto sobre el rango de temperatura esperado para su uso. Las superficies de concreto débiles son resultado de un exceso de trabajo en el acabado o de un curado inapropiado. Como resultado un concreto puede fallar aún con sistemas de barrera con módulo de elasticidad bajo. La remoción de las superficies débiles es esencial para el buen desempeño de estos sistemas de barreras.

V.5.B.4. ESTRUCTURA DE CONCRETO

Cualquier grieta en el concreto incluyendo aquellas que ocurren antes y después de la aplicación de la barrera se verá reflejada a través de la barrera si el concreto está sujeto a movimientos físicos o térmicos. Dicho movimiento del concreto puede destruir la capacidad de la barrera para proveer protección al concreto. Una losa de concreto de pobre calidad con una alta permeabilidad tal vez permita que se filtre el agua freática en el concreto, de modo que la superficie de éste nunca este lo suficientemente seca para permitir que la barrera alcance una buena adhesión o la presión pueda separar al material de barrera del concreto.

Las condiciones de la cimentación también influyen, por ejemplo, una base dimensionalmente inestable o una que no tenga suficiente resistencia puede causar grietas en el concreto, las cuales son perjudiciales para las barreras. También la cantidad y disponibilidad de agua freática es un factor muy importante a considerar en el éxito de una barrera.

El uso de una barrera de impermeabilización en las superficies exteriores de tanques y túneles, por ejemplo, prevendrá la entrada de agua dentro del concreto cuando se aplique un sistema de barrera de protección interior.

Los materiales que se puede emplear como barreras de protección son:

- Asfalto
- Emulsiones bituminosas
- Alquitrán de hulla
- Caucho tratado con cloro
- Resinas epóxicas, con y sin refuerzo de fibras de vidrio.
- Hojas de neopreno precuradas
- Hojas de cloruro polivinilico plastificado
- Resinas de poliéster, con y sin refuerzo de fibras de vidrio.
- Resinas de poliuretano
- Polivinilo butílico
- Resinas acrílicas
- Resinas de furano reforzadas con fibras de vidrio

La tabla 5.2 presenta los tipos de sistemas típicos de barreras de protección aplicables para distintos grados de agresividad del medio ambiente que rodea al concreto, de acuerdo al ACI 515.

TABLA 5.2. SISTEMAS DE RECUBRIMIENTO PARA DAR PROTECCIÓN AL CONCRETO CONTRA ATAQUE QUÍMICO CON DIVERSO GRADO DE SEVERIDAD			
Severidad del ambiente químico	Espesor nominal del recubrimiento	Sistemas típicos de barreras de protección	Sistemas de protección característicos, pero no exclusivos, en orden de severidad de la exposición
Benigno	Menos de 1mm	Polivinilo butiral, poliuretano, metil metalacrilato, alquil-alcoxisilano, epóxico, acrílico, hule clorado, copolímero estireno – acrílico Asfalto, alquitrán de hulla, hule clorado, epóxico, poliuretano, vinilo, neopreno, epóxico de alquitrán de hulla, uretano de alquitrán de hulla	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Protección contra sales descongelantes ➤ Reducción de la exposición a la congelación y deshielo ➤ Prevención del manchado del concreto ➤ Uso en contacto con agua de alta pureza ➤ Protección contra soluciones químicas con pH tan bajo como 4, dependiendo de la sustancia
Intermedio	De 3 a 9 mm	Morteros de arena aglutinada con epóxico, poliéster o poliuretano; materiales bituminosos. Esta arena normalmente es sílica	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Protección contra la abrasión y contra la exposición intermitente a ácidos diluidos en plantas de procesamiento químico de lácteos y alimentos
Severo	De 0.5 a 6 mm	Epóxico o poliéster reforzados con fibra de vidrio; hojas de neopreno precurado; hojas de PVC plastificado	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Protección de tanques y pisos durante exposición continua a diluciones de sustancias minerales (pH menor a 3), ácidos orgánicos, soluciones alcalinas y salinas fuertes
Muy severo	De 0.5 a 6.75 mm Más de 6 mm Más de 6 mm	Sistemas compuestos: A) Sistema epóxico con arena, recubierto con resina epóxica pigmentada, sin arena B) Membrana de asfalto cubierta con ladrillos a prueba de ácidos, junteado con mortero resistente al ataque químico C) Membrana de furano reforzada con fibra de vidrio, cubierta con ladrillo antiácido unido con mortero resistente a químicos	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Protección de tanques bajo inmersión, continua o intermitente, expuestos a aguas agresivas, ácidos diluidos, álcalis fuertes y soluciones salinas ➤ Protección contra ácidos concentrados y combinaciones ácido – solventes ➤ Protección contra diversas combinaciones de un ácido y un solvente

FUENTE: ACI 515.IR

V.5.C. BARRERAS DE COMPUESTOS ESPECIALES

V.5.C.1. CONSTRUCCIÓN COMPUESTA DE TABIQUE A PRUEBA DE ÁCIDOS.

Este tipo de barrera protectora ha sido empleado desde 1934 para proteger pisos de concreto de ambientes muy agresivos, como ácidos. Otro uso importante es en las industrias de procesamiento de alimentos y medicinas donde se requiere superficies que se limpien fácilmente.

La barrera de ladrillo a prueba de ácidos es realizada con dos componentes principales:

1. La barrera primaria es el material resistente a los químicos aplicado directamente al concreto. Un solvente a base de un primer de asfalto y una barrera de asfalto, de 6 mm es normalmente usada. El asfalto se aplica en dos capas con un tejido de fibra de vidrio como refuerzo entre ellos. Otros sistemas de barrera pueden ser empleados en lugar del asfalto.
2. El ladrillo con juntas de mortero resistente a taques químicos es aplicado entonces sobre la barrera de asfalto. Debido a que el ladrillo y las juntas pueden desarrollar grietas, su función primaria es proteger la relativamente frágil barrera de asfalto del daño causado por el abuso mecánico y con temperaturas extremas. El espesor del ladrillo está determinado por la temperatura de servicio y las cargas mecánicas. La figura 5.4 muestra una barrera de tabique y mortero a prueba de ácidos para emplearse en una excavación donde se recibirá una cimentación con suelo contaminado por ácido.

Existen tres tipos de ladrillos empleados para estos tipos de barreras. El esquisto rojo es el más frecuentemente usado y es identificado como tipo L en la ASTM C 279. El tabique de arcilla recocido, tipo H, ACI 279, es usado principalmente cuando se presenta choques térmicos. El ladrillo de carbón se emplea cuando se tiene presencia de ácido hidrófluórico o soluciones alcalinas fuertes (superiores a un pH de 12.5).

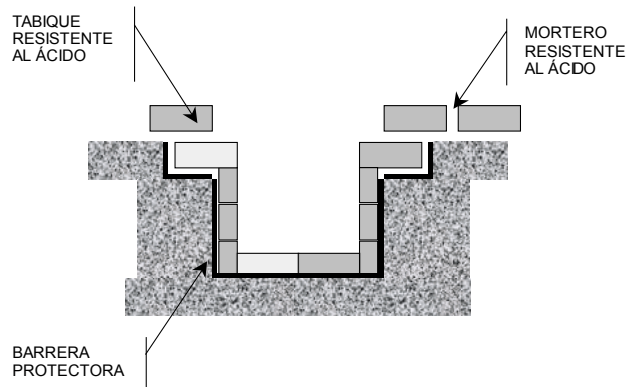


Fig.5.4. Barrera de tabique a prueba de ácido para trinchera del concreto. Fuente: ACI-515-p.36

Se tienen varios tipos de morteros resistentes al ataque químico:

- Mortero de furano
- Mortero de fenol
- Mortero de azufre
- Mortero de silicato
- Mortero de poliéster
- Mortero epóxico

V.6. SISTEMAS DE BARRERAS DE PINTURAS DECORATIVAS

Se emplean para estabilizar o cambiar la apariencia o color del concreto por estética. Estos sistemas están fuera del ámbito de esta tesis.

V.7. CONCLUSIONES CAPITULARES

Los sistemas de barreras pueden ayudar a solucionar determinados problemas de durabilidad. Existe en el mercado una amplia gama de productos con los cuales se obtienen resultados benéficos en el proceso constructivo; dependiendo de la finalidad y servicio que brindará la estructura se puede elegir algún sistema de barrera protectora.

Es conveniente que el ingeniero civil esté enterado de los distintas alternativas que ofrecen dichos sistemas, con el objetivo de difundir su aplicación en la construcción y mejorar así la calidad de la misma.

La aplicación de dichos sistemas de barreras protectoras exige una preparación adecuada de la superficie, mano de obra calificada y una supervisión constante.

Los sistemas de barreras de protección se emplean en casos extremos, es decir, en aquellas estructuras que se encuentran expuestos a ambientes muy agresivos o donde se tiene la posibilidad inminente de una filtración de un líquido o sustancia dañina, ya sean ácidos, sulfatos, cloruros u otros químicos. También tienen un uso para proteger a los productos elaborados en una industria determinada del propio concreto.

<i>CAPITULO V. OTROS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.....</i>	83
V.1. INTRODUCCIÓN.....	83
<i>V.1.A. FACTORES ECONOMICOS PARA LA SELECCIÓN DE LA BARRERA.....</i>	83
<i>V.1.B. INSPECCION DURANTE LA APLICACIÓN.....</i>	84
V.2. SISTEMAS DE BARRERAS PROTECTORAS	84
<i>V.2.A. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE BARRERAS</i>	84
V.3. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN.....	85
<i>V.3.A. CARACTERÍSTICAS.....</i>	85
<i>V.3.B. GUIA PARA SELECCIONAR.....</i>	86
<i>V.3.C. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN DE LADO POSITIVO</i>	86
V.4. SISTEMAS DE BARRERAS DE IMPERMEABILIZACIÓN A LA HUMEDAD	87
V.5. SISTEMAS DE BARRERAS DE PROTECCIÓN	87
<i>V.5.A. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMAS DE BARRERA PROTECTORA.....</i>	87
<i>V.5.B. ELEMENTOS DE UN SISTEMAS DE BARRERA PROTECTORA.....</i>	87
<i>V.5.C. BARRERAS DE COMPUESTOS ESPECIALES.....</i>	90
V.6. SISTEMAS DE BARRERAS DE PINTURAS DECORATIVAS.....	90
V.7. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	91

CAPITULO VI. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO POR DURABILIDAD

VI.1.INTRODUCCIÓN

Como se habrá percatado el lector para la elaboración de un concreto durable se deben contemplar varios aspectos, es decir, debe partirse de una mentalidad holística que contemple todos los factores involucrados, así como en las etapas en las cuales se encuentra la estructura. En la figura 6.1 se muestra detalladamente los aspectos a cuidar dependiendo de la etapa en que se encuentre el concreto.

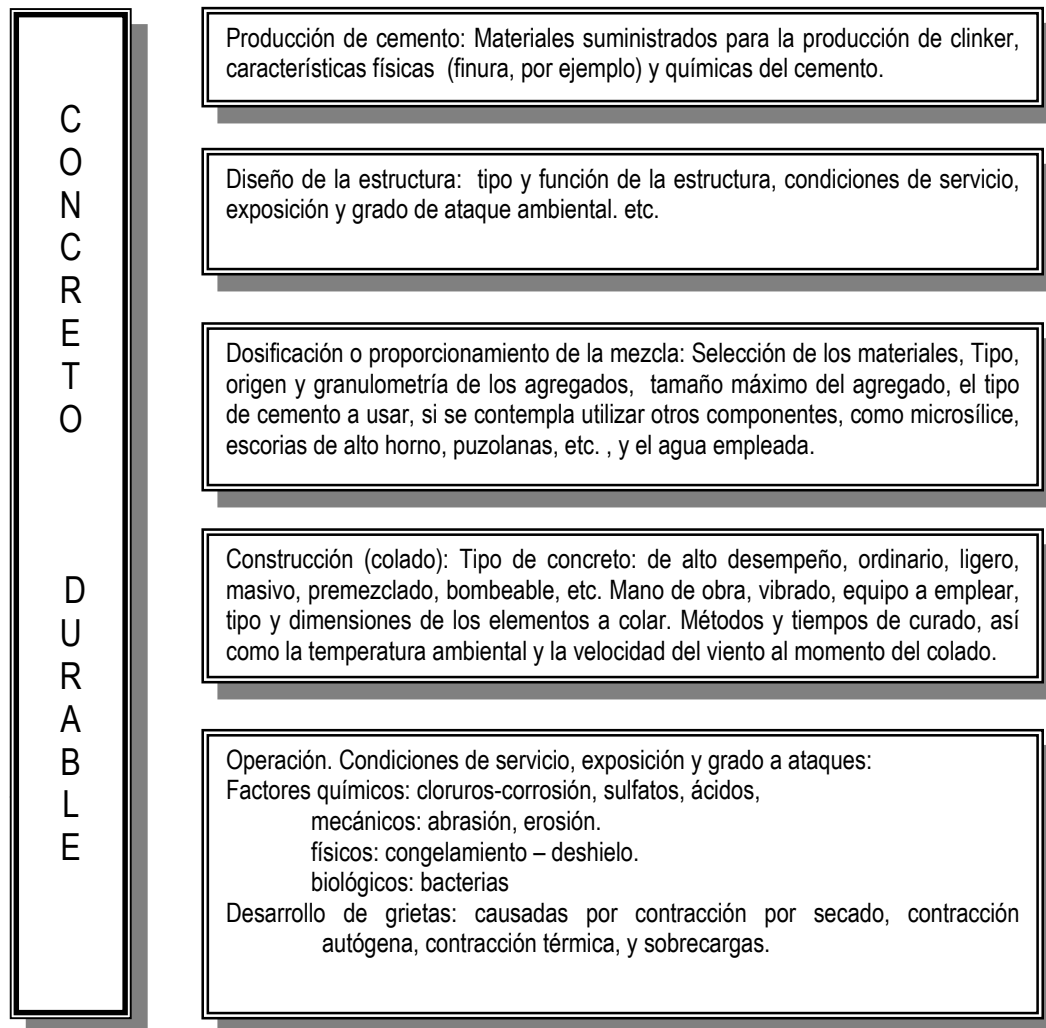


Fig. 6.1. Factores a considerar para un concreto durable

En este capítulo se expondrán aspectos de diseño y prácticas de construcción que permiten mejorar la durabilidad de una estructura de concreto, se indicará también los requisitos por durabilidad que debe tener un concreto que estará expuesto a ambientes agresivos.

VI.2. PROCESO CONSTRUCTIVO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO

En un proceso de construcción tradicional intervienen las siguientes partes:

- 1º El propietario (cliente) que definirá sus necesidades y deseos.
- 2º Los diseñadores (ingeniero y/o arquitecto) que se encargarán de preparar el diseño, las especificaciones y condiciones.
- 3º El contratista, quien deberá seguir estas instrucciones en el proceso de construcción. Los subcontratistas están normalmente involucrados.
- 4º El usuario, quien será el responsable del mantenimiento de la estructura durante su vida de servicio.

La interacción de estas partes influye de un modo u otro en la calidad de la construcción. En la figura 6.2. se presenta el círculo de calidad de una construcción. Cualquiera de las partes por sus acciones o escasez de atención contribuyen a un estado insatisfactorio de la durabilidad de la estructura. También las interacciones entre algunas de las partes puede ocasionar fallas, que pueden tener efectos adversos en la durabilidad. Es bien conocido que en los casos de deterioro prematuro, cualquiera de las partes pueden, y usualmente lo hacen, culpar a las otras partes de la pobre calidad de los resultados. Esta actitud no es muy productiva, de hecho es una postura equivocada. Todas las partes son igualmente responsables por defectos de esta naturaleza; la ayuda de cada una permite solucionar el problema constructivo, si el objetivo que se persigue es lograr estructuras duraderas y de la satisfacción de todos los involucrados.

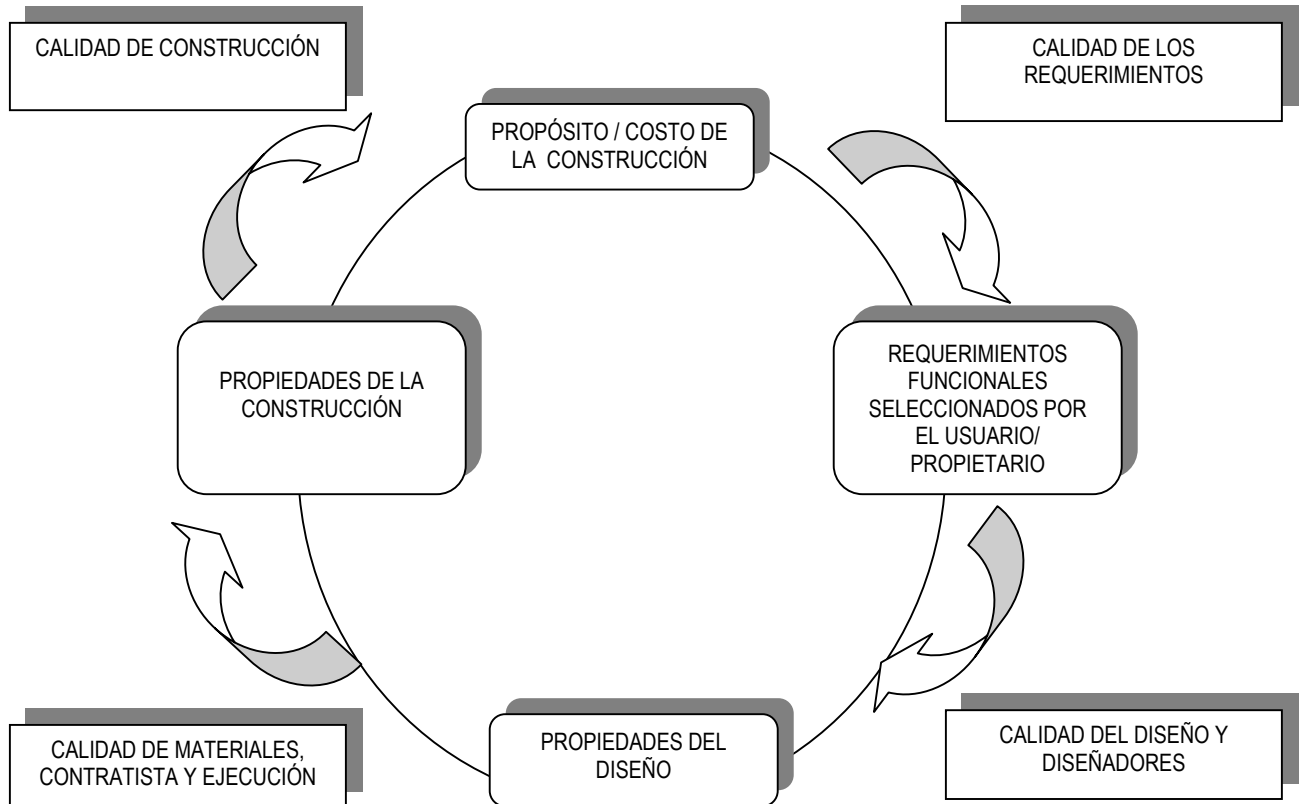


Fig. 6.2. Círculo de calidad de una construcción.
Fuente: *Durable Concrete Structures*, p. 43

Es importante percatarse que los problemas de durabilidad del concreto experimentados en el pasado pueden sólo ser evitados en el futuro si los esfuerzos adecuados y coordinados son impuestos en todas las fases del proceso de definición, planeación, construcción y operación, hasta que concluya la vida de servicio. El objetivo de estos esfuerzos es seleccionar los métodos y perfeccionar las acciones a través del proceso de construcción, los cuales pueden resultar en la optimización de los costos para la creación del proyecto y un funcionamiento apropiado durante el período de uso. La tabla 6.1. muestra las posibles interacciones entre las fases y las partes involucradas en el proceso de construcción, muestra las responsabilidades de las diversas partes involucradas, y la secuencia de acciones y decisiones que se esperan desempeñar

TABLA 6.1. INTERACCIÓN ENTRE FASES Y PARTES INVOLUCRADAS EN LA CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO		
FASE	PARTE INVOLUCRADA	INTERACCIONES
Definición	Cliente (propietario)	Definición de uso de la construcción
Planeación	Consultor	Condiciones ambientales Período de servicio
Diseño	Consultor Arquitecto Ingeniero Cliente	Material de Construcción Concepto estructural Detalles importantes Proceso de construcción Reglamentos Impacto ambiental Seguridad durante la vida de servicio Planos Reportes técnicos
Aprobación del diseño	Cliente Autoridades	Reglamentos de construcción Normas Técnicas y Especificaciones
Construcción	Contratista Consultor Cliente	Programa de obra Constituyentes del concreto Selección de ensayos Diseño de la mezcla Ensaye de concreto (condiciones estructurales) Muestreo y ensaye Sistema de aseguramiento de calidad Registro de calidad
Entrega preliminar	Contratista Consultor Cliente	Certificado de término
Período de Mantenimiento	Contratista	Trabajos de reparación Mantenimiento
Entrega final	Contratista Consultor Cliente	Certificado final de término
Período de uso	Usuario Consultor de mantenimiento Propietario Usuario Consultor especializado	Inspección inicial Mantenimiento manual Reportes de datos Inspecciones de rutina Mantenimiento preventivo Cuando se considere necesario, investigación especial Mantenimiento y renovación Mantenimiento y reparaciones

Fuente: Durable Concrete Structures, CEB. p. 44

La planeación y el diseño no sólo se deben basar en el uso intencionado de la estructura, deben también considerar las condiciones ambientales y el período de servicio planeado.

Un reporte técnico y los resultados del proceso de diseño dan al cliente una idea clara del proyecto, así como sus limitaciones. El muestreo y ensaye del concreto bajo condiciones estructurales y pruebas de durabilidad relevantes es una parte importante del trabajo preparatorio. El resultado del proceso de construcción debe describirse en un registro de calidad oficial. Los registros de calidad y los de inspección pueden proveer de un conocimiento útil, que sirvan como base para decisiones y prácticas futuras.

El trabajo del diseñador y su responsabilidad es más precisa, él se percatará que en varios aspectos tendrá que ampliar sus conocimientos o buscar un especialista en ciertos casos. Por su parte el contratista y su personal se benefician por términos o especificaciones bien definidas y de un registro de los resultados obtenidos. Un progreso exitoso de la durabilidad de las estructuras de concreto puede ser realizado si los reglamentos o normas reflejan la intención de incluir la durabilidad en las bases de diseño (de acuerdo a un período de servicio planeado) .

VI.3. DISEÑO Y DURABILIDAD

El diseño estructural comprende conceptos arquitectónicos de trazo junto con la forma estructural seleccionada, determina la geometría en conjunto de la estructura, e incluye las partes expuestas a la intemperie. Debido al enfoque tradicional de la durabilidad de considerar la composición del material, la importancia de la forma estructural en el desempeño de la durabilidad a largo plazo suele ser ignorada. Por ejemplo, los diseños arquitectónicos bien pensados, desde el punto de vista de una vida de servicio larga, pueden diferir considerablemente de la apariencia estética de un gran número de estructuras y edificaciones modernas.

Sin embargo, no solamente la disposición estructural general de la superficie de exposición es de importancia en la velocidad del ataque de un ambiente agresivo. Frecuentemente, los detalles pequeños y simples relacionados con el diseño, ejecución y mantenimiento pueden pronosticar en escala si se obtendrá o no la longevidad. La mayoría de estos detalles son abarcados en esta sección. Una conclusión es que la complejidad causa problemas y que los diseños más robustos pueden resultar en estructuras de concreto más durables.

VI.3. A. EL DRENAJE EN LA DURABILIDAD

VI.3.A.1.DRENAJE EN EL CONCRETO.

Se deben evitar las condiciones donde el drenaje se encuentre sobre el concreto, o juntas o sellos (*vid.* Fig. 6.3). Si se permite que el agua pluvial, la nieve o hielo derretido o salidas de drenaje drenen sobre el concreto, el agua y los agentes disueltos en esta, tales como cloruros pueden penetrar dentro del concreto, y éste puede ser degradado, arriesgando tanto al concreto como al refuerzo. En aquellos sitios donde se requieren juntas y sellos, se debe considerar que la estrechez de estas no permite asegurar su funcionamiento adecuado a largo plazo, por lo que deben preverse consecuencias de un funcionamiento defectuoso.

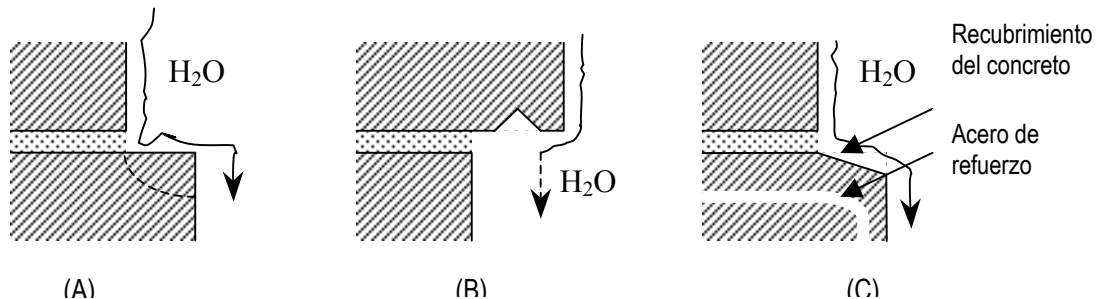


Fig.6.3. Drenaje de agua en juntas y sellos A) debe evitarse, B) arreglo preferible c) otra opción es la protección por la forma de la superficie. Fuente: Durable Concrete Structures. CEB. p. 47

Las juntas necesitan pendientes para permitir el drenaje en la superficie de elementos de soporte, como vigas y columnas y tal vez protección especial contra el agua en el caso de juntas con mal funcionamiento (Fig. 6.4).¹¹⁷

En lugares donde se emplean sales descongelantes en puentes, pisos de estacionamientos o balcones, las juntas resquebrajadas pueden propiciar corrosión por cloruros, produciendo degradación local seria, que de estar en otra forma protegerían completamente a los elementos de soporte. El costo de dichas consecuencias puede ser varias veces mayor al costo de las acciones que la evitarían.

VI.3.A.2. ESTANCAMIENTO DE AGUA

El estancamiento del agua debe evitarse a toda costa. Las superficies que necesitan estar cerradas, como es el caso de los pisos de estacionamiento, balcones, pavimentos y puentes, deben drenar el agua lejos de las zonas críticas, tales como juntas y sellos, y el drenaje debe ejecutarse y mantenerse adecuadamente (Fig.6.5).

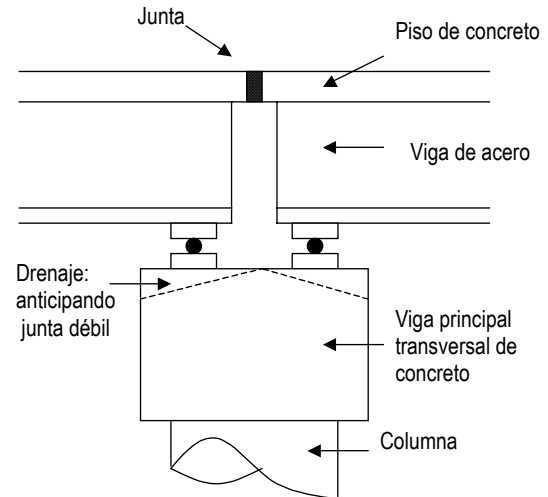


Fig.6.4. Drenaje de una junta
Fuente: Durable Concrete Structures, CEB. p. 48.

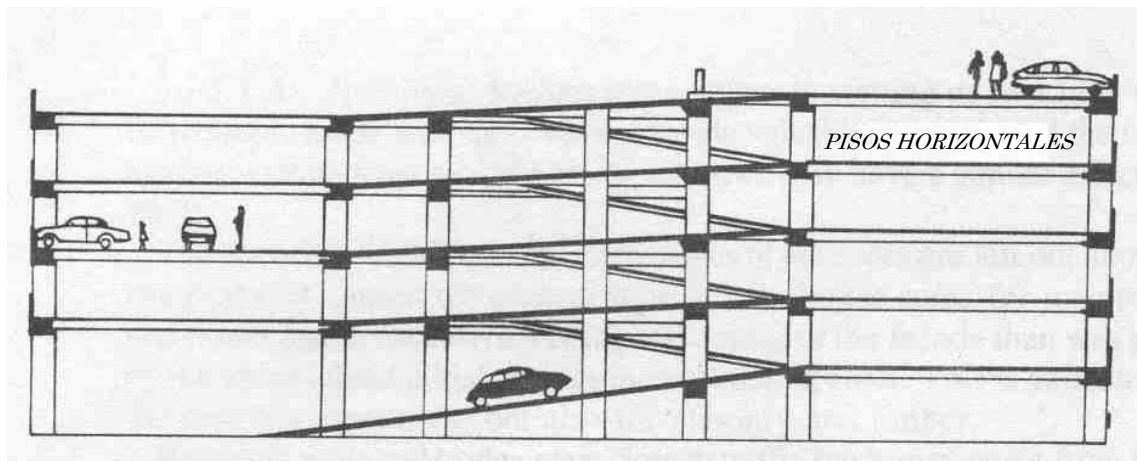


Fig.6.5 .Estacionamiento de varios niveles con entrepisos horizontales, donde el agua puede estancarse.
Fuente. Durable Concrete Structures, CEB .p.48

VI.3.A.3. SALPICADURAS.

Las áreas sujetas a salpicaduras de agua o humedad deben ser reducidas. Los techos con largos aleros proveen de un protección importante a las fachadas contra la humedad de la lluvia. Los balcones pueden proveer una protección similar (Fig. 6.6).

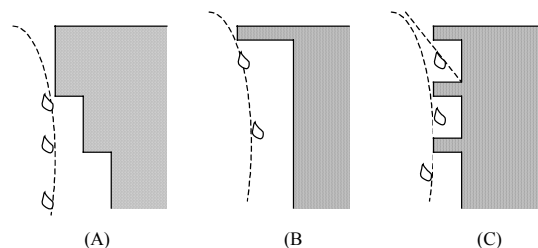


Fig.6.6. Protección de fachadas ante la lluvia. Fuente: Durable Concrete Structures, CEB. p. 48

¹¹⁷ Durable Concrete Structures, CEB.

El estilo del edificio económico donde los aleros de los tejados se omite totalmente posiblemente ha causado a los propietarios sumas más grandes para el mantenimiento y reparación, debido a la humedad excesiva y al secado de la fachada, originada por una escasa economía inicial, y una mentalidad poca previsora de lo que son los costos de la construcción.

Las muras de retención y pilas de puentes cerca del tráfico de los caminos pueden verse beneficiados al tener una distancia más grande al camino que el mínimo, conforme el agua de salpicadura y el rocío de la niebla causado por el tráfico se va reduciendo. Esto se aplica especialmente si se usan sales de descongelamiento (veáse fig. 6.7) El costo de la construcción de los puentes puede ser importante, por lo que aplicar esta solución conlleva a tener ventajas en el largo plazo.

Las superficies sujetas a salpicaduras o donde el drenaje es difícil se debe proteger. En dichas estructuras se puede aplicar una protección estructural, como un muro falso o un elemento fácilmente reemplazable. Se puede considerar también los recubrimientos de superficie

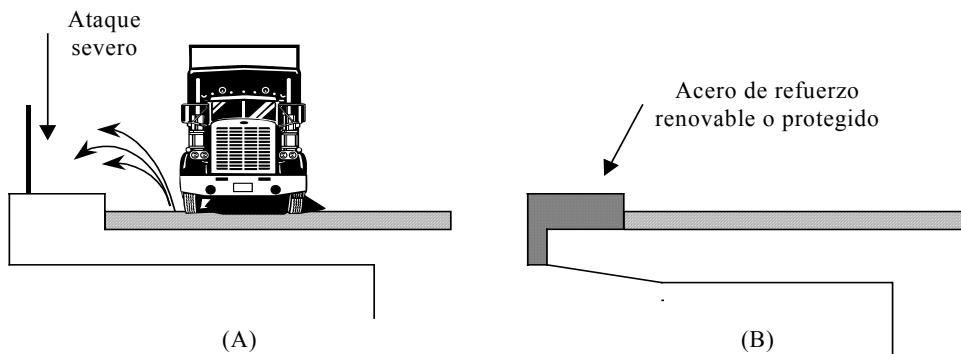


Fig.6.7. Salpicaduras al concreto: (A) Situación de ataque severo, muy común, (B) Protección agregada.
Fuente: Durable Concrete Structures, CEB. p. 49.

VI.3.A.4. DRENAJE:

Es necesario asegurar un buen drenaje y ventilación. El agua puede acumularse en cualquier vacío presente en una estructura expuesta, lo que puede incrementar las condiciones de humedad e incrementar las concentraciones de las sustancias disueltas alrededor del concreto para los niveles críticos.

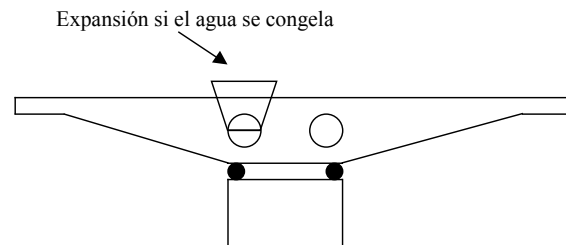


Fig. 6.8. Congelamiento y expansión de agua oculta.
Fuente: Durable Concrete Structures, CEB

Los efectos deletéreos pueden desarrollarse sin ser visibles en la superficie, lo que no proporciona un incremento del riesgo de malfuncionamiento y fallas sin precaución.

Si se acumula agua en exceso en dichos vacíos, el congelamiento puede ocasionar resquebrajamientos súbitos del concreto estructural en buenas condiciones, causando una falla local o general del elemento. Los vacíos en las losas y en el espacio de los huecos en las vigas deben ser drenadas y ventiladas (figuras. 6.8 y 6.9).

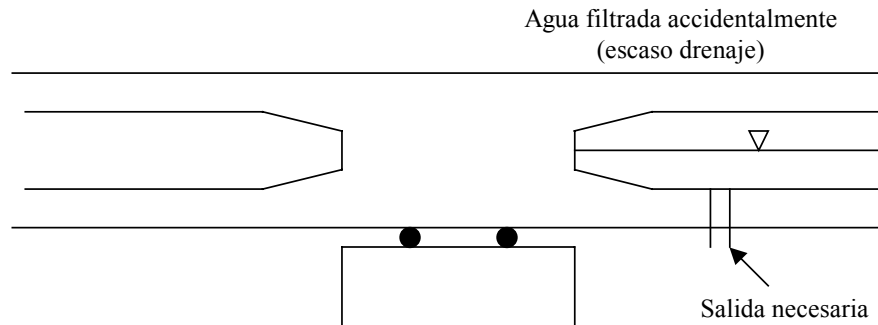


Fig. 6.9. Drenaje de espacios vacíos.
Fuente: Durable Concrete Structures, CEB

VI.3.A.5. GRIETAS

Las condiciones que propician la aparición de grietas largas deben evitarse. La desviación abrupta de esfuerzos en una estructura y cambios abruptos de las secciones resultan en concentraciones de esfuerzos que propician la aparición de grietas. El detalle del acero de refuerzo puede ser por sí mismo un factor para iniciar grietas, aunque este distribuya el agrietamiento y reduzca los anchos de estas.¹¹⁸

Los esfuerzos concentrados debido al anclaje de tendones presforzados o debidos a las reacciones de los soportes crean esfuerzos locales de magnitud considerable que generan grietas si no se distribuyen apropiadamente con un refuerzo apropiado. Otros esfuerzos se pueden presentar, como los originados por efectos de temperatura, contracción por secado, asentamiento diferencial, los cuales pueden originar grietas locales si no se prevén adecuadamente en el diseño y en el detalle del acero de refuerzo. (Fig. 6.10). Todas las grietas visibles deben ser selladas en forma correcta.

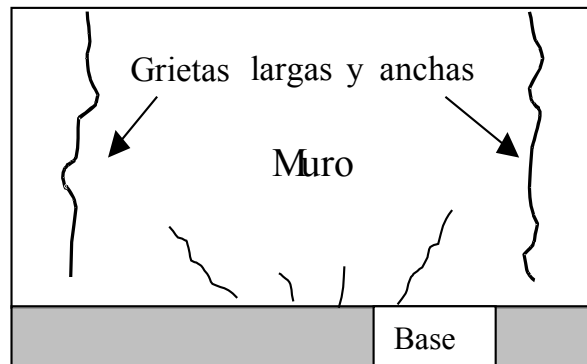


Fig. 6.10. Grietas locales largas
Fuente: Durable Concrete Structures, CEB

VI.3.A.6. EL DESCONCHAMIENTO REVELA EL INADECUADO DETALLE DE ACERO DE REFUERZO

Aunque el acero de refuerzo se encuentra oculto dentro del concreto de la estructura final, su detalle tiene una influencia considerable en la durabilidad de la estructura. El detalle inapropiado del acero de refuerzo puede ser revelado por corrosión temprana y desconchamiento del recubrimiento iniciado por grietas largas, porosidades locales del concreto recubrimientos insuficientes. Se debe tener cuidado para asegurar un detalle de refuerzo que considere los aspectos de durabilidad y por consiguiente el control en la ejecución. Véase figura 6.11 en el caso a) no se asegura una adecuada compactación, en cambio el caso b) es suficiente para compactar y vibrar adecuadamente.

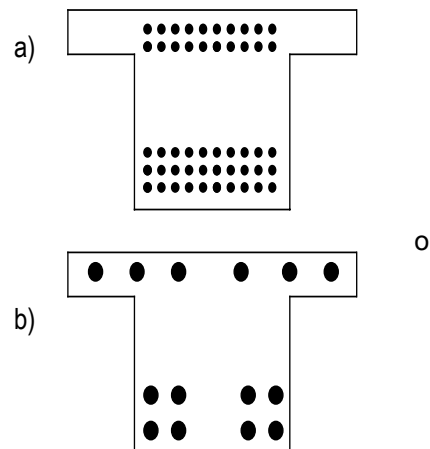


Fig.6.11. Detalle de acero de refuerzo
Fuente: Durable Concrete Structures, CEB

¹¹⁸ Durable Concrete Structures, CEB. p. 48

VI.4. CALIDAD DE CONCRETOS ESTRUCTURALES POR REQUISITOS DE DURABILIDAD

La capacidad del concreto reforzado y presforzado para resistir el uso y los ambientes adversos depende en gran medida de la calidad inicial del concreto y del acero. En esta sección se presenta un listado para asegurar que los parámetros importantes se han considerado en el diseño.

El potencial de los concretos modernos para resistir aún con ambientes químicamente adversos hace esencial evaluar la mezcla de concreto cuidadosamente. Esto incluye la selección o disponibilidad del cemento, junto con el tipo, composición y granulometría de los agregados disponibles, el agua de mezclado y sus posibles ingredientes. El parámetro más sencillo y decisivo en la permeabilidad de la capa de concreto más externa es la relación agua /cemento, la cual debe ser baja para lograr una impermeabilidad aceptable.¹¹⁹

VI.4.A. RELACIÓN AGUA / CEMENTANTE

Un concreto con una relación agua / cemento mayor 0.6 no debe ser empleado para propósitos estructurales.¹²⁰ De preferencia deben emplearse bajas relación agua / materiales cementantes.

VI.4.B. TIPO DE CEMENTO O CEMENTANTES A USAR

Las características del concreto: permeabilidad, capacidad química cementante y su resistencia a los agentes agresivos, dependen considerablemente del tipo de cemento a usar. Los agentes de la mezcla en los cementos compuestos, especialmente las puzolanas y escorias, generalmente mejoran la resistencia contra la mayoría de los ataques químicos, pero pueden incrementar la sensibilidad al curado y la disminución de la resistencia contra el congelamiento y la carbonatación, especialmente si el concreto es curado insuficientemente. Por tanto es necesario tener cuidado en el momento de seleccionar un cemento: tipo y composición, así como el ambiente agresivo al que estará en servicio.

VI.4.C. ADITIVOS

La composición química de los aditivos, como superplastificadores, agentes inclusores de aire, aceleradores y retardadores, normalmente es difícil de descubrir, pero estos pueden contener agentes altamente perjudiciales para el concreto o para el acero de refuerzo (ordinario o presforzado). Es bien conocido que el cloruro de calcio es un acelerador eficiente pero que puede tener consecuencias desastrosas para el acero de refuerzo.

VI.4.D. AGREGADOS

Las reacciones de los álcalis y la no resistencia al congelamiento por parte de los agregados deben evitarse. Las sustancias agresivas tales como los sulfatos e impurezas orgánicas e inorgánicas, tales como el ácido húmico, arcillas y otras impurezas finas no deben ser menospreciadas cuando se evalúe la disponibilidad de los agregados para mezclas de concreto. Las técnicas modernas de separación por densidad de agregados y medios de selección de agregados inertes están a disposición para ayudar a resolver estos problemas.

Se debe considerar también el contenido de otras sustancias en los agregados, por ejemplo, los agregados en el Medio Oriente contienen sales, sulfatos y cloruros agresivos.¹²¹

¹¹⁹ *Durable Concrete Structures. CEB. p.51.*

¹²⁰ *Ibid. p.66.*

¹²¹ *PERKINS, Philip. Resistencia a la Corrosión de Estructuras Sanitarias de Concreto. p.28.*

VI.4.E. AGUA DE MEZCLADO

El agua potable normalmente es aceptable para emplear como agua de mezclado en el concreto. El agua de mezclado puede estar contaminada con sustancias agresivas, como Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , y álcalis (Na^+ , K^+). Estas y otras impurezas pueden contribuir desfavorablemente al contenido total de los agentes agresivos mezclados dentro del concreto.

VI.4.F. CURADO DEL CONCRETO

Un curado apropiado es vital para evitar el agrietamiento. Con el curado se puede evitar la contracción plástica, y se puede minimizar la contracción autógena, al menos en la superficie del concreto expuesta al curado, la cual es la parte más sensible e importante del concreto para asegurar una buena durabilidad, precisamente por encontrarse expuesta.

Un concreto durable depende de un buen curado. Tanto la compactación como un buen curado son dos factores que tienen gran influencia en la durabilidad de las estructuras de concreto, y éste es de particular importancia en la capa superficial del concreto. El curado del concreto es parte del proceso de endurecimiento del concreto, el cual asegura el desarrollo adecuado del concreto fresco y recién colado en un concreto endurecido, resistente, impermeable, libre de grietas, y durable.

VI.4.G. ADITIVOS MINERALES

Las puzolanas minerales agregadas a la mezcla de concreto reducen el desarrollo del calor de hidratación, lo que puede contribuir positivamente al desarrollo de la resistencia a edades posteriores, y puede mejorar la resistencia al ataque químico considerablemente, pero incrementa la sensibilidad al curado y puede tener efectos negativos en la resistencia al congelamiento. Se debe tener un cuidado especial cuando se combinen aditivos minerales y cementos compuestos.

VI.4.H. ACERO DE REFUERZO

La calidad y el espesor del recubrimiento y el ancho de las grietas deben ser tales que logren una protección adecuada contra la despasivación (carbonatación o contaminación por cloruros) y corrosión dentro de la vida de servicio prevista para el acero de refuerzo. El acero presforzado es de especial interés debido a que se deben considerar medidas especiales contra los peligros de una falla frágil causada por la corrosión bajo esfuerzo.

VI.5. CONSTRUCCIÓN Y DURABILIDAD

VI.5.A. EJECUCIÓN Y CURADO

Investigaciones de las causas primarias del deterioro prematuro de las estructuras de concreto, tanto reforzadas como presforzadas, revelan por unanimidad que las discrepancias aparentemente menores que ocurren durante la fase de ejecución y durante el período inmediatamente posterior son los responsables en la mayoría de los casos, esto incluye una composición inadecuada del concreto, una compactación pobre e insuficiente curado. Se tienen demasiados casos por una alta permeabilidad del concreto y un espesor insuficiente del recubrimiento. Este último probablemente es la característica más determinante de la durabilidad y de la vida de servicio de la estructura completa.

VI.5.B. LAS ESTRUCTURAS BIEN CONSTRUIDAS SERÁN DURABLES

Una estructura fácil de construir tiene más posibilidades de ser construida adecuadamente, y de aquí que sea más durable. Los detalles difíciles deben ser evitados. El acero de refuerzo debe ser fácil de colocar. Debe amarrarse adecuadamente, con la finalidad de evitar desplazamientos previos o durante el colado. Tales desplazamientos pueden ser obstáculos para la colocación y compactación apropiada del concreto; tal vez reducir el espesor del recubrimiento. Las secciones no esforzadas y cortes deben ser evitados porque pueden ser fuentes excesivas de agrietamientos.

La cimbra debe ser rígida y bien sellada. El debilitamiento o desplazamientos de la cimbra puede ocasionar porosidad o agrietamientos en el concreto y una superficie poco agradable.

La complejidad significa problemas. Deben considerarse con fines de constructibilidad la forma geométrica y el detalle del acero de refuerzo. Es aconsejable realizar una verificación de la constructibilidad antes de llevar a la ejecución un proyecto.

Las juntas de construcción deben ser seleccionadas dependiendo de sus efectos en el acero de refuerzo, flexión de las varillas de refuerzo, anclaje de tendones presforzados.

Los sistemas de presfuerzo requieren experiencia, atención y control. Las medidas requeridas para ejecutar una colocación y tensado seguro de los tendones presforzados son bien conocidos y es un proceso constructivo trivial hoy en día¹²².

Durante la etapa inicial de la vida del concreto es necesario:

1. **Emplear un proceso de endurecimiento adecuado:** El colado debe ser planeado, para que la resistencia requerida sea alcanzada en el tiempo en que se descimbra el elemento.
2. **Asegurarse contra el daño por secado:** el secado prematuro de la superficie de concreto debe ser evitada, porque favorece la aparición de grietas largas de contracción plástica.
3. **Asegurarse contra el daño por congelamiento a edades tempranas:** El concreto no debe congelarse antes de que alcance un grado mínimo de endurecimiento.
4. **Asegurarse contra daño por esfuerzos térmicos:** Los movimientos diferenciales a través de la sección o de una junta de construcción entre el concreto endurecido y el concreto recién colado no deben conducir a grietas.

VI.5.C. AMBIENTES TÍPICOS

En la práctica interactúan una gran variedad de factores agresivos, cada uno con una intensidad distinta, lo que complica seriamente tomar la decisión correcta acerca de que materiales, técnicas y procedimientos que influirán en la vida de servicio de las estructuras. Un primer paso es considerar los ambientes a los cuales están sujetas las estructuras.

VI.5.C.1. AMBIENTES INTERIORES

La diversidad de ambientes interiores es tan amplia como el número de estructuras. Generalmente el interior de una estructura no presenta agentes agresivos, como en el caso de casas habitacionales, oficinas, escuelas, etc. Normalmente se puede considerar una humedad relativa promedio de 50%, y una temperatura que oscile alrededor de 20 °C. Para estas condiciones algunos comités indican que es suficiente un recubrimiento de 15 mm.

¹²² Vid. Supra. Cap. VII.

Se debe tener cuidado de identificar aquellas áreas donde se tengan condensaciones de agua en la superficie de concreto, para incrementar el recubrimiento o proteger la superficie de concreto. La condensación incrementará la humedad relativa y por ende los riesgos por corrosión.

Dada la diversidad de ambientes interiores es difícil dar recomendaciones pero se puede partir del siguiente esquema básico:

- a) Establecer el uso de la estructura
- b) Evaluar en qué circunstancias y en qué medios es efectivo considerar una humedad relativa promedio en toda la estructura.
- c) Evaluar la temperatura promedio esperada.
- d) Decidir si se tendrá contacto con sustancias deletéreas (cloruros, gases, ácidos).

Lo anterior permite identificar los riesgos a los que estará expuesta la estructura.

IV.5.C.2. AMBIENTES EXTERIORES

Al igual que en los ambientes internos, en el mundo entero se tiene diferentes ambientes externos (humedad, precipitaciones temperatura, condiciones de servicio, usos, etc.). Se debe considerar que el microclima que rodea un elemento externo puede influir en gran medida sobre éste. El microclima varía con el tiempo, temporadas y hasta con el día y la noche.

El concreto saturado tiene mayor riesgo a sufrir ataques de congelamiento, de la reacción álcali - sílice, y cualquier otra forma de ataque químico, si se encuentran los químicos apropiados.

La corrosión por su parte no es un gran riesgo si el concreto se mantiene saturado; en algunos ambientes, particularmente donde están presentes cloruros, el incremento efectivo en la humedad relativa debido a ciclos de humedad y secado conducen a condiciones más corrosivas. Por ello es importante evitar arreglos estructurales que no permitan un drenaje fluido del agua pluvial de todas las superficies estructurales. Un ejemplo de esto son las aguas que contienen sales descongelantes, que se permiten drenar sobre juntas defectuosas en pisos de puentes y sobre la estructura soportante. Por todo ello es necesario:¹²³

- a) Evitar superficies horizontales, donde el agua se estanque.
- b) Asegurar un drenaje satisfactorio, que impida que el agua, especialmente la que tiene cloruros, drene sobre la superficie.
- c) Asegurar que el drenaje pueda recibir mantenimiento fácilmente y periódico.
- d) Permitir la posibilidad de filtración en las juntas.

IV.5.C.3. CONCRETO EN CONTACTO CON SUELOS

En el caso común de una ataque combinado de sulfatos y cloruros, y una alta temperatura y a veces alta humedad relativa, como en el medio oriente, la selección de un determinado contenido de aluminato tricálcico en el cemento es difícil. Como los cementos mezclados tienen una baja permeabilidad para los cloruros, la mejor opción parece especificar un concreto denso y homogéneo, elaborado con un cemento bajo en aluminato tricálcico con materiales puzolánicos o escorias de alto horno, o cementos mezclados equivalentes.

Los suelos contaminados con aceite mineral pueden ser agresivos al concreto si el aceite contiene componentes ácidos (por ejemplo fenol o ácidos orgánicos).

¹²³ *Durable Concrete Structures, CEB.*

VI.5.C.4. CONCRETO EN AMBIENTE MARINO

El agua de mar contiene algunas sales disueltas, las cuales afectan la durabilidad del concreto. Dichas sales se encuentran en cantidades significativas en la mayoría de los mares. Estas sales son:

- Cloruro de sodio [NaCl]
- Cloruro de Magnesio [MgCl₂]
- Sulfato de magnesio [MgSO₄]
- Sulfato de calcio [CaSO₄]
- Cloruro de potasio [KCl]
- Sulfato de potasio [KSO₄]

Las concentraciones varían de un mar a otro, aunque el contenido de sales totales promedio es de 35 g/l. Debe indicarse que el agua de mar contiene también oxígeno y dióxido de carbono, las concentraciones de dichos gases varían y dependen de las condiciones locales.¹²⁴

VI.5.C.4.i. ZONAS DE EXPOSICIÓN

La figura 6.12 indica las diversas zonas de exposición marina a las que se puede enfrentar una estructura de concreto, cada una tiene características y riesgos distintos, los cuales se señalan en la tabla 6.2. Por su parte la gráfica 6.13 muestra la variación del riesgo de la corrosión según la zona de exposición marina. La experiencia ha mostrado que el mayor riesgo a la corrosión se presenta en la zona de marea y en la zona atmosférica marina. El riesgo decrece rápidamente al tener más profundidad. El bajo riesgo de corrosión en las zonas sumergidas se debe a la baja concentración de oxígeno disponible y a la baja velocidad a la cual se difunde a través del concreto saturado. Se tiene mayor concentración de oxígeno en la zona de marea pero aquí se presenta una baja velocidad de difusión del oxígeno a través del concreto saturado.

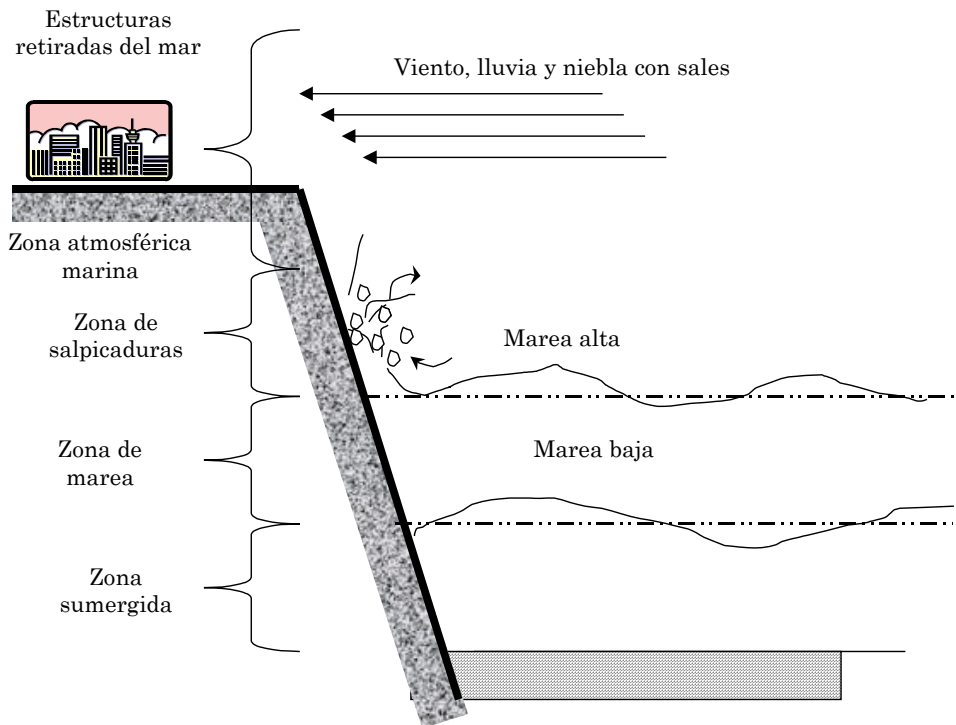


Fig. 6. 12 Zonas marinas. Fuente Durable Concrete Structures. CEB. p.80.

¹²⁴ Durable Concrete Structures. CEB.

TABLA 6.2. ZONAS DE EXPOSICIÓN MARINAS		
Zona	Características	Riesgos
Zona atmosférica marina	El concreto nunca se encuentra en contacto con el mar. Recibe sales del viento y de la niebla cargada de sales. *	a) Corrosión del acero de refuerzo por cloruros b) Daños por congelamiento
Zona de salpicaduras	Se sitúa arriba de la marea alta pero está sujeta al contacto directo con el agua de mar por las olas.	a) Corrosión del acero de refuerzo por cloruros b) Abrasión debida a la acción de las olas c) Daños por congelamiento
Zona de marea	Se ubica entre el nivel de marea alta y marea baja. El concreto está sumergido por períodos durante el día.	a) Abrasión debida al la acción de las olas, hielo flotante y otros objetos, colisión de barcos, etc. b) Corrosión del acero de refuerzo por cloruros c) Daños por congelamiento d) Crecimiento biológico e) Ataque químico en el concreto
Zona sumergida	Nivel por debajo de la marea baja, permanentemente sumergida.	a) Ataque químico en el concreto b) Crecimiento biológico y ataque por organismos.
Fondo del mar		

* Los niveles de cloruro decrecen al alejarse del mar, pero dependiendo de los vientos dominantes las sales pueden ser arrastradas varios kilómetros tierra adentro.
Fuente: Elaboración propia con información de Durable Concrete Structures, CEB. p. 81.

El ataque químico por agua de mar normalmente no es un problema serio en el concreto con una calidad razonable. Una de las razones es que el comportamiento expansivo asociado con la formación de etringita es inhibido por la presencia de cloruros. Con el objetivo de limitar el riesgo por ataque de sulfatos algunas autoridades han limitado el contenido del aluminato tricálcico del cemento empleado para estructuras marinas.¹²⁵

Como medidas prácticas para proteger al concreto contra la exposición marina se tienen las siguientes:

- a) **Cemento:** Cuando se emplea cemento Pórtland se debe considerar dar una limitante al contenido de aluminato tricálcico. Se sugiere un valor entre 5 y 10%. El cemento Pórtland resistente a los sulfatos es menos hábil para proteger el acero de la corrosión que otros componentes. Por su parte los cementos de escoria de altos hornos ofrecen una buena resistencia tanto al ataque por sulfatos como por cloruros.
- b) **Proporcionamiento de mezcla:** La relación agua / cemento debe ser tan baja como sea posible ($A/C < 0.50$) y se debe asegurar la trabajabilidad, por ejemplo, empleando fluidificantes.
- c) **Recubrimiento:** se debe incrementar el recubrimiento en aquellas zonas proclives a presentar abrasión. Se puede emplear un recubrimiento menor en zonas sumergidas.

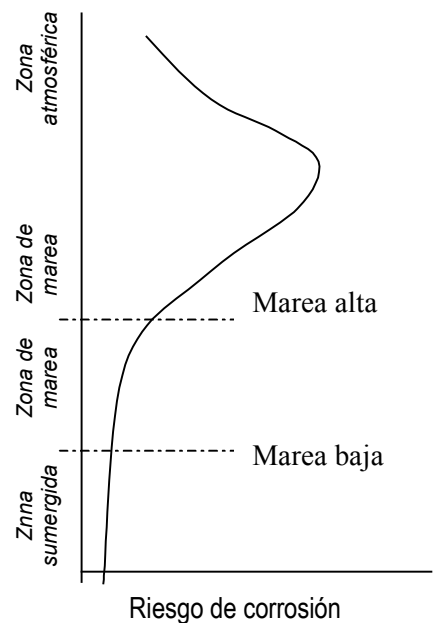


Fig.6.13. Variación del riesgo de corrosión según la zona de exposición marina. Fuente: Durable Concrete Structures. CEB. P. 81.

En el capítulo VII se exponen las características particulares de una estructura expuesta a un ambiente marino.

¹²⁵ Esta recomendación debe ser vista con reserva debido a que los cementos sin aluminato tricálcico (por ejemplo, los resistentes a los sulfatos), son menos capaces de proteger al refuerzo del ingreso de cloruros.

VI.6. MANTENIMIENTO Y DURABILIDAD

La respuesta funcional y actual de una estructura en servicio depende parcialmente de los parámetros seleccionados *a priori*, tales como dimensionamiento estructural, y selección de materiales, y parcialmente en parámetros especificados o presumidos los cuales dependen en realidad de las condiciones de servicio. Dichas condiciones de servicio son impredecibles. Lo que también es verdad para el envejecimiento de los materiales. De ahí que se necesiten ciertas rutinas de mantenimiento con la finalidad de mantener la integridad, desempeño y seguridad estructural y para evaluar las posibles necesidades de reparación y rehabilitación, cuando sean requeridas.

El período de vida de servicio es idealmente el tiempo en el cual la estructura técnicamente se vuelve obsoleta. Sin embargo, sucede en la práctica que la estructura cede previamente a la vida de servicio técnica o económica. Una buena estructura puede convertirse en obsoleta si se le han aplicado cargas excesivas o los espacios requeridos se incrementan. En tales casos se debe investigar la economía de actualizar o remodelar la estructura e incrementar su vida de servicio. Al aplicar el concepto de vida útil en la práctica se deben considerar los siguientes tipos de propiedad:

1. La estructura es propiedad y operada por un sólo propietario responsable durante su vida. Lo que se aplica para el caso de propiedades de organizaciones, donde la propiedad es de largo plazo, como plantas de energía, plantas nucleares, estructuras marinas (plataformas) o puentes.
2. La estructura es propiedad y es operada por una multitud de dueños sucesivos y privados, los cuales se ven involucrados en períodos relativamente cortos. Esto es muy común en estructuras residenciales, oficinas y en algunas estructuras tipo fábricas, operadas bajo una economía privada o capitalista.

La mayoría de las estructuras pertenecen al segundo tipo, por lo cual una inspección y mantenimiento sistemático no puede ser llevado a cabo completamente. Para estas situaciones es aconsejable diseñar y construir un esqueleto de estructura robusto, y confiar en códigos o especificaciones para alcanzar la seguridad en el período de tiempo requerido. Para elementos no estructurales: acabados e instalaciones, una vida de servicio más corta puede ser aceptable o aún deseable, lo que permite la actualización frecuente de la estructura para tener los últimos requerimientos de servicio, aislamiento, etc. La reparación y la modernización debe ser fácil de ejecutarse, las instalaciones ocultas deben evitarse.

Una vida de servicio satisfactoria requiere inspección, mantenimiento y reparación. Una inspección sistemática y regular debe ser realizada para identificar y cuantificar el deterioro progresivo. La inspección constituye una parte integral de la seguridad estructural y serviciabilidad, porque es una liga entre las condiciones ambientales a las cuales la estructura está sujeta y el modo en el cual ésta se desempeña con el tiempo. La naturaleza y la frecuencia de los procedimientos de inspección deben ser determinados con esto en mente.

En una forma avanzada la estrategia general para mejorar la durabilidad debe incorporar rutinas de inspección sistemáticas para estructuras en servicio (incluyendo registro y manejo de datos automatizados), modelos de decisión basados en pronósticos de la velocidad de degradación, y como un elemento importante, la consideración de las consecuencias económicas de considerar medidas correctivas de corto o largo plazo. Todo ello con la finalidad de obtener cifras comparativas sobre la economía de las soluciones alternativas, costos futuros de mantenimiento, reparaciones y eventuales demoliciones y remodelaciones deben ser considerados a valor presente. Estos procedimientos generales pueden ser simplificados cuando se adapten a tipos específicos de edificaciones o a estructuras individuales.

VI.6.I. ACCESIBILIDAD PARA INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.

Cuando se decide la disposición final de la estructura es necesario prever que requerimientos deben ser cubiertos en la etapa de diseño para asegurar condiciones razonables para inspección y mantenimiento en la etapa de servicio. Los elementos subterráneos (como cimentaciones y pilas) o sumergidos usualmente no se pueden inspeccionar durante las rutinas de inspección. Sólo cuando sufren algún mal funcionamiento pueden ser inspeccionados, usualmente a un alto costo. Dado que estos elementos son difíciles de inspeccionar, dichos elementos deben ser construidos con el mayor cuidado posible, incorporando una alta calidad de los materiales, y aplicando un control de calidad adecuado. En la etapa de operación se tienen las siguientes opciones para el mantenimiento:

Reemplazo: el reemplazo o sustitución de elementos expuestos con una vida de servicio corta debe ser asegurada. En algunas ocasiones las fallas de durabilidad son consecuencia de las fallas o malfuncionamiento de elementos asociados con la estructura de concreto, tales como juntas, soportes, drenaje o rompimiento del impermeabilizante.

La prevención es la mejor cura: el mantenimiento preventivo abarca un trabajo necesario para prevenir el deterioro esperado o el desarrollo de los defectos. En la medida de lo posible, el trabajo debe ser realizado a la brevedad, tan pronto como cualquier defecto incipiente o condición que conduzca a defectos sea detectada. La limpieza del sistema de drenaje es tal vez la medida de mantenimiento preventivo más simple.

La decisión de no reparar: la evaluación de la estructura dañada puede conducir a la conclusión de que el costo de la reparación es muy alto. En el caso de sistemas bien organizados de evaluación y valoración de estructuras esta decisión no dirige a una inmediata demolición, debido a que la rutina de evaluación debe dar suficientes avisos antes de que un estado inaceptable sea alcanzado.

V.7. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO

La investigación y evaluación de estructuras de concreto es una tarea combinada de todos los elementos técnicos y no técnicos del diseño estructural, construcción y tecnología de materiales, incluyendo aspectos de durabilidad, seguridad y desempeño. El nivel de detalle requerido probablemente varíe, desde una simple inspección visual durante las rutinas de inspección hasta una profunda investigación y evaluación de procedimientos, combinando técnicas de inspección y ensaye, tanto a nivel macro como micro.

Los modelos de decisión racionales que aplican métodos modernos de probabilidad incluyen políticas de seguridad y económicas, las cuales son elementos indispensables de una valoración profunda. La investigación puede incluir:

1. Inspección visual
2. Verificación del diseño original: planos y cálculos
3. Verificación de los datos disponibles de ejecución: técnicos y no técnicos; un registro de declaración de calidad y archivos de inspección facilitarían esta tarea enormemente
4. Ensaye in situ: muestreo, pruebas destructivas y no destructivas.
5. Ensaye de laboratorio: mecánico, físico, químico y morfológico
6. Recálculo

Las decisiones deben considerar las precauciones de seguridad, reparaciones, fortalecimiento, actualización, demoliciones. La prevención de la recurrencia debe ser realizada con base en estos elementos. La tabla 6.3 muestra una guía elaborada por la RILEM para facilitar la comunicación relativa al deterioro del concreto entre la industria de la construcción y las organizaciones que trabajan sobre la durabilidad del concreto.

TABLA 6.3 GUÍA PARA INVESTIGACIÓN DE CONCRETO DETERIORADO		
1. CONCRETO BAJO INSPECCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Una estructura de concreto ➤ Muestreo de concreto de una estructura (deteriorada y en buenas condiciones) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Especímenes de laboratorio almacenados en laboratorio y en sitio ➤ Almacenamiento y trato de muestras ➤ Procedimientos de muestreo
2. DATOS INICIALES	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estructura de concreto (diseño, dimensiones, historia de carga). ➤ Especificaciones de concreto ➤ Diseño de la mezcla de concreto ➤ Ensayes en materiales empleados 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Control de calidad de concreto fresco ➤ Calidad del concreto en el sitio ➤ Tipo y duración de las condiciones de curado ➤ Edad en el tiempo de ataque
3. INFLUENCIA DEL AMBIENTE	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tipo de contacto ➤ Temperatura ➤ Humedad ➤ Presión ➤ Permeabilidad del medio de entorno ➤ Agua de mar 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Concentración de sustancias agresivas ➤ Frecuencia y duración de exposición ➤ Influencias de ambientes especiales (corrientes vagabundas) ➤ Otras sustancias agresivas
4. SEÑALES VISUALES DE DETERIORO	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erosión ➤ Desconchamiento ➤ Exfoliación ➤ Limpieza ➤ Desmoronamiento ➤ Debilidad ➤ Deformación 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pop Outs ➤ Agrietamiento ➤ Exudación de gel líquido ➤ Cristalización ➤ Corrosión del refuerzo ➤ Desalineación ➤ Otros
5. EXAMINACIÓN DE LABORATORIO Y PRUEBAS	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Examinación visual ➤ Análisis químico ➤ Análisis térmico ➤ Espectrometría infrarroja ➤ Análisis de difracción de rayos X ➤ Microscopía (óptica o electrónica) ➤ Pruebas mecánicas 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pruebas sónicas ➤ Cambios de dimensión ➤ Cambios de peso ➤ Absorción capilar ➤ Permeabilidad ➤ Porosimetría ➤ Otros
6. CONCLUSIONES	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diseño inapropiado de la estructura del concreto ➤ Especificaciones de concreto inapropiadas o incompletas 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Control de la tecnología de concreto inadecuada ➤ Calidad insatisfactoria de los componentes
7. RECOMENDACIONES	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Precauciones de seguridad ➤ Demolición 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Reparación ➤ Prevención de recurrencia
FUENTE: RILEM.		

VI.8. CONCLUSIONES CAPITULARES

En el diseño de estructuras de concreto se debe tener en cuenta la realidad multifactorial con la que interactúa una estructura: condiciones ambientales, tipo y uso de estructura, materiales disponibles, mantenimiento, etc, por lo que el diseñador de estructuras debe considerar las recomendaciones aquí presentadas, con la finalidad de incrementar la durabilidad de la estructura.

El diseño por durabilidad es una medida preventiva y realizarla es una decisión inteligente, no sólo permite reducir costos de mantenimiento y operativos futuros, ayuda a preservar la vida de servicio de la estructura, y así contribuye a disminuir el uso de materiales en la construcción. Un diseño integral comprende los materiales y un diseño adecuado del acero de refuerzo, que permita las condiciones óptimas en el momento de la construcción del proyecto. En el diseño debe facilitarse la comprensión y preferentemente incluir especificaciones claras en los planos para una mejor comunicación. Un diseño sencillo conlleva una mejor ejecución y por tanto que la estructura posea mayor durabilidad.

<i>CAPITULO VI. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO POR DURABILIDAD.....</i>	93
VI.1. INTRODUCCIÓN	93
VI.2. PROCESO CONSTRUCTIVO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO	94
VI.3. DISEÑO Y DURABILIDAD.....	96
<i>VI.3. A. EL DRENAJE EN LA DURABILIDAD.....</i>	<i>96</i>
VI.4. CALIDAD DE CONCRETOS ESTRUCTURALES POR REQUISITOS DE DURABILIDAD	100
<i>VI.4.A. RELACIÓN AGUA / CEMENTANTE</i>	<i>100</i>
<i>VI.4.B. TIPO DE CEMENTO O CEMENTANTES A USAR</i>	<i>100</i>
<i>VI.4.C. ADITIVOS.....</i>	<i>100</i>
<i>VI.4.D. AGREGADOS.....</i>	<i>100</i>
<i>VI.4.E. AGUA DE MEZCLADO.....</i>	<i>101</i>
<i>VI.4.F. CURADO DEL CONCRETO.....</i>	<i>101</i>
<i>VI.4.G. ADITIVOS MINERALES.....</i>	<i>101</i>
<i>VI.4.H. ACERO DE REFUERZO.....</i>	<i>101</i>
VI.5. CONSTRUCCIÓN Y DURABILIDAD	101
<i>VI.5.A. EJECUCIÓN Y CURADO.....</i>	<i>101</i>
<i>VI.5.B. LAS ESTRUCTURAS BIEN CONSTRUIDAS SERÁN DURABLES</i>	<i>102</i>
<i>VI.5.C. AMBIENTES TÍPICOS</i>	<i>102</i>
VI.6. MANTENIMIENTO Y DURABILIDAD	106
<i>VI.6.I. ACCESIBILIDAD PARA INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.....</i>	<i>107</i>
V.7. EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO	107
VI.8. CONCLUSIONES CAPITULARES	108

VII. DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS ESPECIALES

VII.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos previos se han expuesto los aspectos de durabilidad a considerar en las estructuras de concreto en general. Sin embargo, se debe tener presente que existen estructuras que por sus condiciones de servicio son más susceptibles a desarrollar problemas de durabilidad y por lo tanto requieren cuidado especial. Con el objetivo de brindar al lector una visión clara y práctica del problema de la durabilidad, en éste capítulo se expondrán los problemas particulares de la durabilidad en determinadas estructuras, indicándose los cuidados y medidas necesarias para las características particulares y problemas singulares de cada tipo de estructura. Las estructuras expuestas en este capítulo son:

- Estructuras sanitarias
- Estructuras presforzadas
- Estructuras marinas

VII.2. ESTRUCTURAS SANITARIAS

Las estructuras sanitarias que se abarcan en esta sección son tanques, tuberías y túneles para almacenar y transportar agua potable y drenajes domésticos e industriales.

El requisito básico de una estructura terminada es que cumpla con el propósito para el cual fue diseñada. Los requisitos esenciales que deben cumplir las estructuras sanitarias son:¹²⁶

1. Debe ser hidráulicamente segura
2. Debe ser estructuralmente segura
3. Debe ser hermética y sin fugas
4. Debe ser durable, es decir, que tenga una amplia duración y sin requerir mantenimiento.

VII.2.A.. REQUISITOS DE DURABILIDAD

La vida útil depende del tipo de la estructura y del uso al cual se destina, pero por lo general no debe ser menor a 100 años.

Como se indicó anteriormente las estructuras deben ser herméticas, durables y no necesitar mantenimiento. Dichas características tienen una relación estrecha con la durabilidad. La hermeticidad de los tanques, tuberías y túneles está ligada a la durabilidad porque las filtraciones de agua a través del concreto reforzado pueden causar corrosión severa al acero de refuerzo y a largo plazo producir agrietamientos y/o descascaramientos y por último fallas. Otro factor son los desechos industriales y sépticos que se descargan por estas estructuras, las altas concentraciones y descargas continuas son condiciones críticas para estas estructuras. La fotografía 7.1 denota el daño causado a un colector de concreto por la acción de iones de sulfatos.

El buen diseño y una construcción cuidadosa son esenciales para la durabilidad. Es muy importante que los profesionales que diseñan y dan especificaciones tengan experiencia en obra, para que tengan un dominio de los problemas del contratista, de lo contrario sus diseños y especificaciones generarán revisiones de contratos y gastos adicionales.

¹²⁶ PERKINS, P.H. Resistencia a la Corrosión de Estructuras Sanitarias de Concreto. Revista IMCYC. Diciembre, 1981.



Fig.7.1. Colector deteriorado por la acción de los iones de sulfatos. Fuente: Concrete Corrosión, Concrete Protection, Riczák n.381

Los concretos de alta calidad, correctamente colados y bien compactados, preferentemente libres de grietas, son muy durables y protegen adecuadamente al acero de refuerzo. Un concreto de alta calidad es aquél que tiene la resistencia y durabilidad adecuadas para el uso que se le dé. La impermeabilidad es el requisito fundamental para que un concreto sea durable y resistente a la corrosión y a otros ataques.¹²⁷

VII.2.B. OTROS MATERIALES EN ESTRUCTURAS SANITARIAS

Las estructuras sanitarias de concreto necesitan para su correcto funcionamiento de varios materiales, como acero de refuerzo, sellador de juntas, fijadores y accesorios metálicos, algunos de los cuales son más vulnerables al deterioro y tienen menor durabilidad.

Acero de refuerzo: Se debe seguir las recomendaciones de los capítulos 3 (espesor del recubrimiento) y 5 (sistemas de protección al acero de refuerzo) para proteger al acero de refuerzo.

Selladores de juntas: la experiencia ha hecho patente que los selladores utilizados en juntas de tanques de concreto y estructuras similares, incluyendo revestimientos en túneles son muy vulnerables al deterioro y que no tienen un comportamiento predecible. Requieren renovarse cada 10 o 15 años. En albercas los polisulfatos y hules de silicón que se emplean para sellar las juntas del azulejo, en ocasiones fallan al cabo de unos cuantos años, debido a la acción del agua clorada tibia. Normalmente no existen dificultades técnicas reales para remover y reemplazar los selladores de las juntas, pero en estructuras que contienen líquidos, la estructura debe vaciarse y no usarse mientras se efectúa el trabajo. Actualmente una técnica alemana a base de cristales, desarrollada a mediados del siglo pasado permite que se sellen la superficies de concreto, sin la necesidad de vaciar la estructura, su ventaja es que esta sigue operando mientras se realiza el trabajo de mantenimiento correspondiente. Los empaques de hule utilizados para lograr juntas flexibles y herméticas en tuberías de concreto dan buen servicio, aunque se han tenido casos aislados de ataque bacteriano.

Fijadores y accesorios metálicos. Los metales ferrosos a excepción del acero inoxidable requieren de una aplicación de capa anticorrosiva. Aún con el acero inoxidable se requiere seleccionar adecuadamente, debido a que existen tres grupos básicos: martensítico, ferrítico y el austenítico. De estos, el más empleado en estructuras sanitarias es el austenítico porque ofrece alta resistencia a la corrosión y se puede soldar. Puede ser ligeramente magnético o no magnético. Se debe evitar el contacto entre el acero inoxidable y el acero de refuerzo común para evitar la celda electrolítica que favorece el desarrollo de la corrosión.

Los metales no ferrosos que se pueden emplear en este tipo de estructuras como son el cobre, el bronce fosforoso y el bronce industrial o pavonado (aleación de bronce y estaño). Generalmente todos estos son muy resistentes a la corrosión, pero el cobre es vulnerable al ataque de soluciones con algunos cloruros y compuesto de amonio, las aleaciones con base de cobre pueden presentar ataques severos de soluciones de compuestos de amonio. Debe procurarse que metales disímiles entre en contacto en presencia de humedad, con la finalidad de que uno se proteja a expensas del otro.

¹²⁷ *Ibid.*

VII.2.C RIESGO DE CORROSIÓN DE DIVERSAS ESTRUCTURAS SANITARIAS

Estructuras sanitarias de concreto presforzado: Generalmente estas estructuras son circulares en planta y con el refuerzo principal en forma de torones o alambres presforzados circunferenciales, diseñados frecuentemente con juntas deslizantes entre el piso y los muros. El acero está sometido a altos esfuerzos, a 75% de la resistencia a tensión. Normalmente se emplea concreto lanzado. Es conveniente usar resina de estireno butadieno mezclada con una lechada para sellar la superficie de concreto lanzado o resinas epóxicas de baja viscosidad o de poliuretano. La protección de varillas y cables postensados y tendones sin adherir requieren de una ejecución y supervisión cuidadosa y detallada.

Pozos de visita, alcantarillas y resumideros de estaciones de bombeo: previamente se mencionó el efecto de los desechos industriales y sépticos. Prevenir es mejor que rehabilitar. Los diseñadores no aceptan completamente especificar medidas costosas de protección que, en algunos casos no serán necesarias. Sin embargo, la introducción del equipo de tratamiento y la ejecución posterior del trabajo de reparación usualmente implican costos mayores que la aplicación de medidas preventivas en la construcción. Entre estas medidas se encuentran una buena ventilación y la turbulencia controlada para descargar el sulfuro de hidrógeno en puntos seleccionados. Se tienen otras medidas adicionales como el tratamiento de aguas negras con cal, inyección de oxígeno, ozono, cloro y peróxido de hidrógeno, las cuales han dado buenos resultados, pero implican un costo de operación elevado. Las reparaciones efectuadas deben incluir la remoción de todo el concreto deteriorado y la protección adecuada del acero de refuerzo. En la figura 7.2 se presenta una alcantarilla de concreto colapsada como resultado de la corrosión.¹²⁸



Fig.7.2. Alcantarilla de concreto colapsada como resultado de la corrosión. Fuente: *Concrete Corrosion, Concrete Protection, Biczók. p.380.*

Tanques de digestión de lodos. En teoría la digestión de lodos es inocua y debe tener un pH entre 7.0 y 8.0, con temperaturas de 25 a 30 °C. El gas liberado en tanques está constituido por un 70% de metano, 25% de bióxido de carbono y menos de 3 % de sulfato de hidrógeno.

Se supone adicionalmente que el espacio libre sobre los lodos está casi completamente lleno de cieno, por lo que el contenido de oxígeno es muy bajo. Sin embargo, Perkins (1981) ha reportado depósitos visibles de azufre y un concreto marcado profundamente en las paredes, por encima del nivel del agua y la parte inferior del techo.

Tubería en el mar. La construcción de tubería en el mar presenta ciertos problemas de durabilidad. Se debe proteger el acero de refuerzo contra los cloruros disueltos en el mar. La concentración de cloruros de un mar a otro varía. Por ejemplo la concentración de cloruros en el Atlántico es de 20,000 ppm. Se deben considerar los daños físicos por abrasión por olas, arena y otros objetos.

¹²⁸ PERKINS, P.H. Resistencia a la Corrosión de Estructuras Sanitarias de Concreto. Revista IMCYC. Diciembre, 1981.

VII.2.D. METODOLOGÍA PARA REHABILITAR ESTRUCTURAS SANITARIAS DE CONCRETO

Cada trabajo de rehabilitación presenta circunstancias especiales a resolver, sin embargo, se tienen ciertos principios, por ejemplo:

- 1° Diagnóstico de la causa del deterioro
- 2° Eliminación y reducción de las sustancias químicas agresivas, en la medida de lo posible.
- 3° Remoción de todo el concreto defectuoso y del óxido del acero de refuerzo
- 4° Protección del acero limpiado, volviendo a establecer el ambiente alcalino o suministro de recubrimiento protector o anticorrosivo.
- 5° Reposición del concreto demolido(3°), por mortero o concreto de alta calidad.
- 6° Sellado final del área reparada con resina de polímeros de baja viscosidad.

VII.3. ESTRUCTURAS PRESFORZADAS

VII.3.A. GENERALIDADES

El primer puente presforzado construido en América es el puente de Caracas - Guaira, de Venezuela en 1940 (figura 7.3). Desde entonces se han seguido empleando las estructuras presforzadas en la construcción para varias obras de ingeniería civil. Las estructuras presforzadas requieren atenciones especiales de durabilidad.

El concreto reforzado y presforzado está diseñado para proporcionar un adecuado servicio y la resistencia última sobre su vida de diseño con un mínimo de mantenimiento. De hecho la durabilidad es una de las ventajas más grandes del concreto como sistema estructural; el concreto es especialmente apropiado para emplearse en ambientes adversos. Sin embargo, la durabilidad no se asegura automáticamente por la producción del concreto de resistencia apropiada. En años recientes, la combinación de experiencia más extensa en varios ambientes y en investigaciones de laboratorio empleando modernos instrumentos, tales como el microscopio electrónico, ha aclarado algunos fenómenos complejos, los cuales degradan el desempeño del concreto a largo plazo.

Por tales motivos hoy en día el diseño por durabilidad se realiza con la misma importancia que el diseño por resistencia. Sin embargo, el diseño debe ser implementado por una tecnología constructiva apropiada bajo estrictos procedimientos de control de calidad, si se desea lograr la durabilidad.

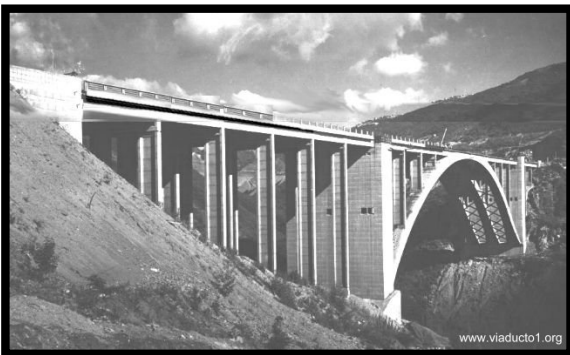


Fig.7.3. Puente en carreteras Caracas – Guaira, Venezuela. Primer puente presforzado en América. 1940.

Las figuras 7.4 y 7.5 muestran el proceso constructivo del Distribuidor Vial de San Antonio, en la Ciudad de México, como un ejemplo de las construcciones presforzadas actuales.

La escasez de durabilidad puede mostrarse en agrietamiento y desconchamiento del concreto, desintegración, especialmente de la superficie, manchas de óxido, corrosión del acero de refuerzo o del acero presforzado, corrosión de anclas y metales embebidos, deflexión excesiva y en casos extremos por la falla del miembro.

Tanto en estructuras de concreto reforzado

como presforzadas se enfrentan problemas de durabilidad. El presfuerzo por sí mismo mejora la durabilidad mediante la prevención de grietas, las cuales a su vez minimizan la penetración de agua y aire. El preesfuerzo también reduce en gran medida el agrietamiento debido a la fatiga y para la mayoría de los casos de la vida real, los elimina. Desde su origen el presfuerzo ha sido un producto con “valor agregado alto” por lo que un cuidado mayor se ha procurado en su detalle, en la selección de materiales, en el diseño de la mezcla y en la construcción. Para lograr una resistencia a corto y largo plazo alta requeridas para el concreto presforzado se emplean normalmente relaciones agua/ materiales cementantes bajas y contenidos de cementos altos, lo que conduce a una alta durabilidad. Sin embargo, el presfuerzo por sí mismo no implica mejorar la impermeabilidad del concreto no agrietado. Por otro lado, el presfuerzo introduce algunos problemas especiales, los cuales necesitan dirigirse apropiadamente.

La corrosión del acero de refuerzo y presforzado es la más frecuente y más seria forma de degradación y deterioro de las estructuras de concreto presforzado. En su forma más extrema puede suceder tan rápidamente, que en algunos casos, el daño severo ha sucedido antes de que la estructura es colocada bajo servicio. En la mayoría de los casos el ataque no es tan repentino, pero puede ser más siniestro, debido a que puede suceder en la parte más activa de la vida de la estructura.

Durante la vida de servicio pueden presentarse señales, que de estar bajo inspección pueden identificarse antes de que alcancen niveles serios: manchas de óxido, agrietamientos y desconchamiento de la superficie de concreto. El monitoreo de estructuras de importancia en la infraestructura o estructuras sensibles puede brindar indicaciones tempranas de corrosión. Entre los métodos actuales de monitoreo se incluyen el de la mitad celular electrolítica (sulfato cobre – cobre o el cloruro plata – plata), polarización lineal, la radiografía gamma, la transmisión acústica, radar y el eco del pulso ultrasónico. Un método simple y efectivo es el de la “cadena arrastrada” y el del “martillo sujetado en la mano” en muros.

El oído humano puede escuchar fácilmente el sonido hueco debido a la delaminación interna. Todos estos método se emplean en una rutina básica en estructuras críticas tales como puentes largos y túneles subacuáticos. Para la gran mayoría de la estructuras los métodos son imprácticos e innecesarios en la ausencia de otra información. La inspección visual es suficiente hasta el tiempo en que las primeras señales de corrosión se observan.



Fig. 7.4 Estructura de concreto presforzada. Distribuidor Vial San Antonio, Ciudad de México, 2003.



Fig.7.5 Viga presforzada (ballena) en planta de prefabricación. Una vez descimbrada la viga se traslada al sitio de la obra para su montaje. Distribuidor Vial San Antonio, Ciudad de México, 2003.

Como se indicó en el capítulo tres, el acero embebido en el concreto necesita cloruros, carbonatos, o sulfitos para corroerse, los cuales forman ácidos diluidos, que a su vez también requieren oxígeno y un electrolito, el cual es suministrado por el agua en los poros del concreto. Como la corrosión es un fenómeno electroquímico, la resistividad del concreto es una medida de la velocidad a la cual se puede dar la corrosión. Un concreto seco e impermeable tiene una resistividad más alta.¹²⁹

Para elementos estructurales que están permanentemente sumergidos el oxígeno disponible es exageradamente restringido, por lo que la velocidad de corrosión normalmente será baja. Para los elementos por debajo del nivel permanente de agua (nivel freático) y del suelo usualmente no existe oxígeno suficiente para sostener la corrosión, a menos que el suelo sea altamente orgánico, como un depósito antiguo de basura, o muy permeable. Recíprocamente, la exposición más dañina para el concreto reforzado y presforzado es cuando tiene ciclos de humedad y de secado. La exposición cíclica conduce al microagrietamiento, incrementa la penetración de iones de cloruro y de oxígeno.

Las grietas térmicas o estructurales, que generalmente son individuales, ampliamente espaciadas y visibles, pueden no conducir directamente a la corrosión. Los límites determinados empíricamente indican que para estructuras marítimas y en la zona de marea, los anchos de grieta de 0.15 mm normalmente no conducen a una corrosión. Bajo el agua los anchos de grieta de 0.30 mm parecen ser aceptables.

En estructuras presforzadas se debe tener un cuidado especial con los materiales embebidos en el concreto, dichas estructuras normalmente necesitan de otros elementos a base de cobre o aluminio. La corrosión, como se señaló al principio del capítulo puede tener origen a partir de una celda electrolítica formada entre metales distintos en contacto.

Las corrientes extraviadas de corriente directa, tales como equipo de operación, sistemas subterráneos, máquinas de soldar, generadores eléctricos, etc. Pueden producir una corrosión seria donde la corriente descargue al subsuelo. Un sistema de tierras por separado debe ser colocado para todo este equipo, incluyendo el de iluminación (instalaciones eléctricas).¹³⁰

VII.3.B. CORROSIÓN DE ACERO PRESFORZADO Y SU PREVENCIÓN

Debido a que los aceros presforzados son esforzados hasta cinco veces a la tensión, lo que es aceptado por la mayoría de los aceros de refuerzo convencionales, cualquier pérdida del área debido a la corrosión es más crítica, por tanto, los aceros presforzados se clasifican como sensibles a la corrosión. Además cualquier picadura puede causar concentraciones de esfuerzo que propicien una falla anticipada.

Las técnicas de manufactura y/o el uso de una química del acero inapropiada pueden producir microagrietamiento, especialmente en anclas, curvatura afiladas y en cables estirados, haciendo al acero más susceptible a la corrosión bajo esfuerzo. La corrosión bajo esfuerzo, es la propagación de microagrietamiento producida originalmente en el acero por esfuerzos locales muy altos, por el uso de aceros con química inconveniente, o por fatiga bajo ciclos de carga.

El potencial de rompimiento del hidrógeno debido a la liberación de los iones de hidrógeno monomoleculares del zinc y del aluminio ha sido previamente discutido. Aparece como una posibilidad remota con el proceso de electrogalvanización pero se cree que no es un problema cuando la galvanización ha sido llevada a cabo mediante un proceso de inmersión en caliente. Tanto la corrosión bajo esfuerzo como el rompimiento del hidrógeno puede conducir a un falla repentina del acero bajo esfuerzo alto.

¹²⁹ GERWICK C. BEN JR. *Construction Prestressed of Concrete Structures*. Cap. 5, p. 141.

¹³⁰ *Vid. Infra*, Cap.III.

Estas dos formas de corrosión, aunque posibles han sido completamente eliminadas en la práctica debido a la adopción de códigos estrictos y aseguramiento de calidad en la manufactura y por buenas prácticas en la construcción. Las formas más comunes de corrosión son las debidas a los cloruros y a la carbonatación, por lo que a continuación se presentan algunas sugerencias en el diseño. En general todas las formas de ataque en el acero de refuerzo convencional son relevantes, como son los medios de prevención. En particular, las grietas necesitan ser prevenidas para evitar la transmisión de agua, CO₂, y cloruros hasta el nivel donde se encuentra el acero. El concreto debe ser tan impermeable como sea posible.

Un incremento en el recubrimiento es provisto en el acero presforzado. Incrementos de 12 a 25 mm son normalmente provistos sobre el acero presforzado comparados con los valores adoptados para el acero convencional, dando recubrimientos totales de 35 a 75 mm e incluso de 100 mm.

El concepto esencial es que el miembro será presforzado hasta encontrar sus requerimientos de serviciabilidad con el concreto que permanece sin agrietarse; Bajo el criterio de diseño de carga última, la estructura puede agrietarse. La resistencia última en la tensión y en el cortante serán proporcionadas por el acero pasivo, como son las varillas de refuerzo de acero suave.

La durabilidad del concreto presforzado requiere que el número y anchos de grietas se limiten a valores que no conduzcan a la corrosión en el ambiente en que se encuentran los miembros. Las restricciones típicas del ancho de grieta son de 0.2 a 0.5 mm.

Las medidas que proporcionan mayor seguridad y protección de los tendones presforzados son la provisión de un recubrimiento adicional y la instalación de acero de refuerzo fuera del acero presforzado.

Se debe tener atención especial al almacenamiento de tendones presforzados, anclas y ductos en un espacio seco y por encima del suelo. En climas húmedos se requiere de un deshumedecimiento, o del uso de inhibidores en fase de vapor. El recubrimiento de los tendones se puede emplear con el postensado; el aceite soluble en agua es satisfactorio tanto como los tendones estén protegidos del ingreso de agua, pero por supuesto tal recubrimiento no está disponible para tendones que se vayan a pretensar.

VII.3.B.1. CORROSIÓN BAJO ESFUERZO

Este es un fenómeno extremadamente raro, la corrosión bajo esfuerzo es asociada a rastros minúsculos de cloruros o sulfuros, y posiblemente otros iones negativos, en presencia de una atmósfera húmeda.

Respecto al cable de acero tratado en caliente, como se usó extensivamente en Europa en años anteriores, y al cable de acero templado en aceite se tenía el concepto de que eran más susceptibles a la corrosión bajo esfuerzo que el acero templado en frío, ahora su uso es común en todo el mundo.

Se han presentado pocos casos aislados de corrosión seria, causados por la combinación del esfuerzo y iones de sulfuros, han sucedido cuando se empleó cable con acero templado en caliente, transportado en rollos, y almacenados en lodo contaminado. Después de su instalación y de hecho después de la colocación del concreto expansivo (*grout*), los cables fallaron progresivamente. Casos similares han sucedido cuando los cables han sido expuestos a la humedad del aire en la cercanías de una refinera o plantas industriales. Se cree que la concentración mínima de H₂S en la humedad del aire conduce a la corrosión y a la falla frágil. Por consiguiente los tendones preferentemente deben ser protegidos por aceite soluble en agua. Los tendones nunca deben ser enrollados o torcidos más allá del estado como los transportó originalmente el propio productor. Las fallas indicadas se clasifican generalmente como rompimiento del hidrógeno. él cual sucede cuando los iones de hidrógeno monomolecular son capaces de entrar entre las moléculas del acero.

El rompimiento del hidrógeno también es teóricamente posible cuando metales distintos, tales como zinc o aluminio, son usados en las cercanías del acero, por ejemplo, el uso de polvo de aluminio en el concreto para causar expansión (*grout*). En las pruebas de laboratorio no ha sido muy difícil producir tal reacción, pero se cree que en pocos casos que ha sucedido en la práctica actual.

Un caso de corrosión severo de tendones postensados fue reportado, en el cual las unidades arquitectónicas prefabricadas fueron inmersas en ácido clorhídrico diluido para grabar la superficie, pero aparentemente los ductos no fueron vaciados posteriormente. Subsecuentemente el concreto expansivo no se aplicó adecuadamente, resultando en vacíos que contenían ácido diluido. La falla de algunos tendones ocurrió varios meses después de concluir la construcción, y por consiguiente, al examinar los tendones restantes se encontró una corrosión seria.

VII.3.B.2. CABLE PRETENSADO

Los tendones pretensados de acero convencional están sujetos a una corrosión atmosférica rápida de la superficie, por consiguiente, no deben ser expuestos por largos períodos de tiempo fuera del almacén, solamente el requerido para su colocación y tensión y colocación del concreto. En la mayoría de los climas una exposición de hasta 24 horas de exposición no producirá más que un trazo superficial de color óxido. Esto no afecta la durabilidad, por el contrario mejora la adherencia por la corrosión del óxido adherido y por la evaporación de los componentes del lubricante empleado en el proceso de estirado en frío durante la manufactura. El grado de óxido permitido frecuentemente es *“aquel que pueda ser removido con una limpieza con una tela seca suave”*.¹³¹

El almacenamiento prolongado en una región costera o abierta puede permitir depósitos de cristales de sal en el óxido. De aquí que un almacenamiento cubierto es importante en ambientes costeros.

Los alambres pretensados que se extienden hasta la superficie del concreto, por ejemplo, al final de vigas y trabes, presentan una paradoja. La experiencia a través de los años ha mostrado que la corrosión de las puntas de los cables sucede rápidamente, pero subsecuentemente no procede hacia al interior de los cables más allá de 2 o 3 mm. Hecho que es veraz particularmente en aquellas partes donde el oxígeno está limitado, por ejemplo, en estructuras subterráneas o sumergidas. En el aire, las puntas deben ser recortadas hasta 25 mm, empleando una varilla soldable y cubierta con epóxico. Se han reportado pocos casos de corrosión en cables pretensados. Sin embargo, los puentes a los que se aplican sales descongelantes han sido sujetos a una corrosión potencial.

Las pilas de concreto dañadas por grietas térmicas y ataque por congelamiento – deshielo han experimentado una corrosión moderada de las cuerdas o cables expuestos. La práctica de colocar sales descongelantes en los puentes solamente se aplica en aquellas regiones donde se tiene ataque por congelamiento - deshielo, en nuestro país esta práctica es casi inexistente debido a que en la República Mexicana raramente se presentan bajas temperaturas. Este fenómeno sólo se presenta en algunas regiones del norte del país.¹³²

Los alambres o cables con recubrimientos epóxicos ya están comercialmente disponibles, a los cuales se han embebido arenas finas para mejorar la adherencia.

VII.3.B.3. TENDONES POSTENSADOS Y ACCESORIOS

Estos consisten de tendones (cables, alambres o varillas), los accesorios y traslapos y ductos.

¹³¹ GERWICK C. BEN JR. *Construction Prestressed of Concrete Structures*. Cap. 5,

¹³² *Guía para la Durabilidad del Concreto*. 1996.

Ductos: son importantes debido a que son de pared delgada. Las superficies grandes están sujetas a corrosión, la cual puede producir agujeros, que a su vez pueden permitir a la pasta de cemento deslizarse durante el colado, hasta bloquear al ducto o escapar afuera en discontinuidades accidentales. Deben protegerse en el almacén. Se instalan y encasillan en concreto dentro de un período breve de 1 o 2 días. Sin embargo, se colocan vacíos sin tendones o cemento expansivo por días o semanas. Durante este período deben drenarse. Deben ser sellados por cubiertas plásticas para prevenir que el agua de lluvia entre. En un puente de importancia no se pusieron las cubiertas plásticas, el resultado fue que el agua de lluvia entró a los ductos, subsecuentemente el clima congelante hizo que los ductos se congelaran, expandieran y obturaran al concreto.

El acero de los ductos debe ser galvanizado para prevenir la corrosión y reducir la fricción. Para asegurar la hermeticidad completa de los ductos, ya sean plásticos o de acero se pueden emplear coples herméticos en los traslapes o uniones de montaje, se trata obviamente de una barrera secundaria para restringir la penetración de cloruros y carbonatos al acero presforzado, considerando que los ductos semiherméticos son una barrera parcial. Un cuidado especial debe tenerse en los traslapes o uniones de montaje para mantener el grado de estrechez requerido para evitar el debilitamiento durante el colado y durante la colocación del concreto expansivo.

VII.3.B.4. PROTECCIÓN DE MATERIALES PRESFOZADOS

Los aceros de presfuerzo para postensado, incluyendo las anclas, deben ser protegidas en las diversas etapas: transportación, almacén, en sitio, en la entrega, en la instalación y hasta en la colocación del concreto expansivo y al encasillarse. Entre los cuidados, dependiendo de la etapa, se destacan los siguientes:

- **Se deben transportar en rollos o envueltos**, deben estar selladas en un empaque hermético protegido con madera o acero. Es conveniente colocar un precubrimiento con aceite soluble en agua dentro de los contenedores antes del transporte.
- **El almacenaje se debe hacer en un cobertizo o en una construcción hermética, en el piso.**
- **Se debe eliminar la humedad existente** por calor u otros medios.
- **Se debe agregar aceite soluble en agua conforme los tendones o torones se enhebran en los ductos.**
- **Sellar los extremos de los ductos hasta que se coloque el concreto expansivo**, excepto durante los intervalos cuando se abran para colocar las anclas y esforzar los tendones o torones.

VII.3.B.5. CONCRETO EXPANSIVO

Después de aplicar el presfuerzo se coloca el concreto expansivo o grout, por su nombre en inglés; debe colocarse a la brevedad. Existen varios casos donde la colocación del concreto expansivo ha tardado semanas o meses debido a huelgas o para habilitar el refuerzo después de que las pérdidas por flujo plástico o deformación diferida han sucedido. Los contaminantes industriales en niebla o en *smog* ocasionan una severa corrosión en los tendones, que se presentan por el rompimiento de cables o de tendones enteros durante la aplicación del esfuerzo. El procedimiento de colocación del concreto expansivo debe ser tal que expulse toda el agua y el aire, y que rellene efectivamente el ducto y huecos de las anclas: en particular se debe evitar los vacíos causados por el agua de sangrado, agua atrapada o sedimentación.

VII.3.B.6 PROTECCIÓN DE ANCLAS

Las anclas en la construcción postensada deben ser protegidas de la corrosión. Estas son vitales y de un material especial, elaborado con un alto estándar. Los cables en las anclas están bajo altos esfuerzos, más que en ningún otro lugar.

En las anclas tipo cuña, los esfuerzos de cortante y flexión son agregados directamente al esfuerzo por tensión. Actualmente las anclas se pueden recubrir con epóxicos. Para tendones largos se requieren huecos grandes.

VII.3.B.7. RECUBRIMIENTOS EPÓXICOS

Se han inventado recubrimientos protectores especiales para tendones presforzados para emplearse en el postensado. El uso de fundas de polietileno de alta densidad con grasa inyectada ha sido mencionado previamente. Cuerdas individuales protegidas por este medio, son extensivamente empleadas para presfuerzos no vinculados en la construcción de pisos

La galvanización de tendones era una práctica ampliamente usada en años previos: su uso estaba temporalmente suspendido debido a la preocupación a cerca del posible rompimiento del hidrógeno. Sin embargo, la "Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP)" ha establecido procedimientos que se creen completamente seguros, mediante el uso del proceso de inmersión en caliente para galvanizar y seguido del procedimiento de pasivación mediante un lavado en cromato.¹³³

VII.3.C. ESTRATEGIAS PARA PREVENIR LA CORROSIÓN DEL REFUERZO EN ESTRUCTURAS PRESFORZADAS

En la tabla 7.1 se muestran un resumen abreviado de las técnicas para obtener la máxima durabilidad en estructuras de concreto presforzadas.

VII.3.C.1. IMPERMEABILIDAD

La medida de control más sencilla y efectiva es producir un concreto de baja permeabilidad. Ahora es posible medir los coeficientes de difusión (D) y permeabilidad (k): valores de 10^{-12} a 10^{-13} m/s para ambos, son deseables en un ambiente corrosivo. La impermeabilidad restringe la penetración tanto del los cloruros como del oxígeno.

En plataformas mar adentro, del Mar del Norte, se han logrado coeficientes de permeabilidad de 3 a 5×10^{-12} m/s y de 5×10^{-13} m/s en segmentos lineales de túneles prefabricados para el túnel del canal.

Reducción de la relación agua / materiales cementantes: Las bajas relaciones agua/ materiales cementantes reducen la permeabilidad e incrementan la resistividad. El empleo de superplastificadores permiten tener relaciones A / MC de hasta 0.37 a 0.38 en concreto para aplicaciones presforzadas. Se pueden obtener valores de hasta 0.32 en productos prefabricados. Se ha hallado que la mayoría de los elementos sujetos a corrosión envuelven concretos con relaciones A /MC por encima de 0.45 o 0.50.

Inclusión de materiales puzolánicos en la mezcla: Las cenizas volantes pulverizadas pueden emplearse para reemplazar el cemento en cantidades de hasta 20 y aún 30% en concreto presforzados típicos. Estas pueden incrementar la impermeabilidad del orden de 100 a 1000 veces.

Inclusión de microsílíce en la mezcla: Este material consiste de partículas muy finas, tienen un tamaño de 1/100 de los granos de cemento. Al incorporarlos en la mezcla reducen la permeabilidad y la difusión, mientras incrementan la resistividad. De acuerdo a Gerwick (1993) es recomendable limitar la cantidad de un 4 a 6 % del cemento. Cantidades mayores a las mencionadas transforman la mezcla, llegando a tener una consistencia excesivamente cohesiva y pegajosa.

¹³³ GERWICK C. BEN JR. *Construction Prestressed of Concrete Structures*. Cap. 5,

Uso de cemento que contiene C_3A de 6 a 10%: El aluminato tricálcico (C_3A) combinado con el ión cloruro penetra y forma cloroaluminatos insolubles los cuales bloquean los poros. Probablemente este fenómeno es el responsable de la extraordinaria longevidad de algunas estructuras de concreto que han desafiado el fenómeno de la corrosión. En algunas áreas con ataques excesivos por sulfatos se emplean cementos tipo V, desafortunadamente este tipo de cementos contiene bajo porcentaje de C_3A (del 0 al 4%), hecho que origina que este tipo de cemento sea más permeable a los iones de cloruro.

Selección de agregado grueso de tamaño pequeño: El uso de un tamaño máximo del agregado relativamente pequeño (20mm) incrementa la longitud de la trayectoria y provee discontinuidades.

Uso de agregado con un coeficiente de expansión térmica lo mas cercano posible al de la pasta de cemento: Esta situación normalmente sólo se logra en proyectos especiales. La caliza normalmente es más compatible que la roca silícea.

Uso de agregado no permeable de tamaño máximo pequeño: La mayoría de los agregados gruesos son altamente impermeables por sí mismos. Sin embargo, agregados de arcillas, especialmente en el Medio Oriente, tienen alta porosidad y alta permeabilidad, lo que permite una rápida penetración de cloruros. Si su uso no puede ser evitado se debe realizar algunos pasos especiales: usar un agregado grueso muy pequeño, por ejemplo, 10 mm, y una mezcla rica en puzolanas.

El agregado grueso con tamaño máximo pequeño distribuye las microgrietas y alarga la trayectoria de la permeabilidad potencial, por tanto, en la mayoría de las aplicaciones de concreto presforzado, el tamaño máximo nominal del agregado grueso debe ser de 18 a 20 mm.

Curado apropiado: La piel de la superficie de la pasta de cemento es muy efectiva en limitar la penetración de agua, cloruro y oxígeno. Su impermeabilidad depende de una hidratación completa. El curado por agua, vapor, membranas o polietileno es importante para lograr la hidratación completa. Es importante proveer un recubrimiento completo de las superficies expuestas, a pesar de los problemas causados por el viento.

Minimizar deformaciones térmicas: El calor de hidratación del concreto causa expansión de la mezcla fresca. Después de colocar el concreto se enfría y se contrae, lo que le induce deformaciones. Entre las medidas para reducir el calor están las siguientes:

- *Pre-enfriamiento de la mezcla:* Mediante la adición de hielo en el agua de mezclado por enfriamiento de agregados, o por nitrógeno líquido inyectado dentro del agregado o concreto fresco.
- *Empleando cemento que genere menos calor,* por ejemplo el tipo II con agregado grueso triturado que genere menos calor que los cementos tipo I y III .
- *Reemplazando parte del cemento con puzolanas,* las cuales reaccionan más lentamente, un 15% de puzolanas reemplazando al cemento disminuye la temperatura máxima del concreto de 4 a 5 grados centígrados.
- *Empleando mantas húmedas o alquitranadas* para protegerlas de vientos fríos.
- *Curado de agua y un componente de curado reflectivo blanco,* que reduzca la temperatura .
- *Empleando cemento de escoria de alto horno,* la cual genera calor más lentamente. Esto sólo es efectivo si la escoria de alto horno es gruesa, menor que 3800 cm^2/gr . Hay que tener en cuenta que algunos productores elaboran escorias de 5500 cm^2/gr . Para lograr altas resistencias tempranas, las cuales liberan calor rápidamente.

El microagrietamiento de la superficie puede originarse de la contracción excesiva y de los ciclos de humedad y secado. Las mezclas ricas en cemento y aquellas que contienen microsílíce condensado son especialmente propensas a grietas de contracción. Estas pueden ser minimizadas por un curado apropiado. Usualmente el curado de agua en superficies horizontales y el curado con membranas en superficies verticales son las más efectivas.

Los componentes de las membranas de curado se degradan con el calor del concreto y el sol, en algunos casos dos aplicaciones son necesarias una inmediatamente después de descimbrar y otra a las ocho horas del descimbrado. Por supuesto dejar la cimbra a propósito también previene la pérdida de humedad. El curado a vapor y el curado de alta humedad son medios apropiados para productos prefabricados.

Impregnación de superficie. La superficie de concreto puede ser impregnada con un monómero el cual es polimerizado para formar una capa impermeable en la superficie, típicamente de 30 a 50 mm de profundidad. El monómero más común para este propósito es metilmetacrilato, un material altamente tóxico e inflamable que debe manejarse con cuidado, otros materiales pueden ser empleados para impregnar la superficie y rellenar los poros, los cuales otorgan un alto grado de impermeabilidad.

Recubrimientos en la superficie del concreto. Los recubrimientos exteriores han sido utilizados con resultados exitosos. Cuando el recubrimiento no se degrada o daña, protege la superficie del concreto del microagrietamiento debido a los ciclos alternos de humedad y secado.

Los recubrimientos epóxicos y de poliuretano apropiadamente aplicados al concreto en aquellas superficies adecuadamente preparadas son impermeables a los cloruros y en un grado limitado al oxígeno. Sin embargo, estos recubrimientos están sujetos a una degradación ultravioleta; la vida del recubrimiento exterior es típicamente de 5 a 10 años.¹³⁴ Los recubrimientos epóxicos y de poliuretano tienen un problema potencial debido a las burbujas de vapor, el vapor de agua emigra a la superficie y estalla dejando un hoyo en el recubrimiento. Si el concreto está completamente seco antes de la aplicación y si el epóxico tiene una buena resistencia y elasticidad a la tensión, este problema puede ser minimizado o prevenido.

VII.3.C.2. ADITIVOS ANTICORROSIVOS EN LA MEZCLA DE CONCRETO

Tanto el nitrito de sodio como el nitrito de calcio han sido empleado por algunas décadas como un inhibidor de corrosión. El nitrito de calcio ha emergido como el componente más confiable y ahora está ampliamente disponible. La evidencia de su disponibilidad definitivamente indica un efecto benéfico en los primeros años, el cual puede disminuir con el tiempo. Otros componentes patentados están disponibles, de los cuales se ha reportado que disminuyen la difusibilidad, la migración de los iones de cloruro a través de los poros y el agua intersticial en el concreto.

VII.3.C.3. SELLOS ALREDEDOR DE EMBEBIDOS Y ANCLAS.

Los parches de mortero frecuentemente tienen pequeñas grietas de contracción alrededor de las orillas, la soldadura dentro de una placa embebida, frecuentemente causa deformación en las orillas. El presfuerzo puede causar agrietamiento en las esquinas y orillas de las placas de acero embebidas. El sellador puede ser complementado con epóxicos colocados como una masa o con polímeros flexibles tales como thiokol.

Sin embargo los recubrimientos epóxicos no son confiables en ambientes de congelamiento y deshielo, debido a que el calor es atrapado entre el epóxico y la superficie congelada, estallando el recubrimiento. Los recubrimientos de látex y silano son preferibles en tales casos.

VII.3.C.4. JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN

¹³⁴ Vid. Cap. V.

Con frecuencia son fuente de penetración de agua y cloruros y por ende resultan en corrosión. Una mayor concentración de acero de refuerzo en tales juntas debido al traslape representa frecuentemente problemas prácticos de mantenimiento apropiado del recubrimiento, que originan un incremento potencial de la corrosión y efectos de discontinuidad. Las juntas de construcción frecuentemente tienen un concreto pobremente consolidado. Mediante una remoción cuidadosa y una exposición del agregado grueso, una superficie puede ser preparada. Esto debe ser hecho por medio de un cepillado inicial o mediante chiflón de agua a alta presión o por un chiflón de arena húmeda a presión.

VII.3.C.5. REPARACIÓN DE DAÑOS POR IMPACTO.

El impacto de cargas concentradas intensas pueden producir microgrietas y grietas visibles, las cuales forman una red interconectada que conduce a una corrosión local, las grietas mayores a 0.15 mm deben ser reparadas a la brevedad posible, asegurándose de que la sal no sea depositada en la grieta o en la superficie dañada. Las zonas que se saben que pueden tener impacto pueden ser especialmente reforzadas con estribos o mallas de alambre cerca de la superficie o por fibras en la mezcla.

VII.3.C.6. RECUBRIMIENTO ADECUADO

El recubrimiento para una estructura presforzada debe ser normalmente de 35 a 50 mm. Otras reglas empíricas (pero válidas) son: “*al menos dos veces el tamaño de la partícula de agregado grueso mayor*”, y “*dos veces el diámetro de la varilla de acero*”. Los pequeños recubrimientos permiten la carbonatación y que la penetración de cloruros progrese hasta alcanzar al acero. Un recubrimiento exagerado permite agrietamiento por contracción y carga.

VII.3.C.7. EMPLEO DE ACERO DE REFUERZO DE DIÁMETRO PEQUEÑO

Las concentraciones densas de acero de refuerzo incrementan la disposición actual de conducir al proceso electroquímico; las varillas de mayor diámetro tienden a generar un mayor microagrietamiento alrededor de ellas. El uso de varillas de diámetro pequeño poco separadas es preferible al uso de varillas de gran diámetro; las varillas bien distribuidas tienden a limitar la extensión del daño por corrosión. El macroagrietamiento también se reduce con más grietas finas y menos grietas anchas.

VII.3.C.8. RECUBRIMIENTO EPÓXICO DEL ACERO DE REFUERZO

Los recubrimientos epóxicos han incrementado su uso para prevenir la corrosión en puentes y en estructuras de estacionamientos. Estos se aplican generalmente por fusión electrostática al acero de refuerzo. El doblado del acero de refuerzo es posterior a esta aplicación. Sin embargo, cada vez es más factible aplicar este proceso al acero de refuerzo relativamente pequeño tales como estribos y zunchos. El doblado puede producir agrietamientos y algunas veces delaminación. Durante la colocación del acero de refuerzo, algunas áreas pueden desgastarse, tales áreas deben ser retocadas a mano. Las áreas desgastadas o arañadas, si están bien enclaustradas en concreto impermeable no necesariamente presentarán corrosión, subsecuentemente; mientras que el área dañada se convertirá en ánodo, no existirá un área catódica suficiente para soportar el flujo. La delaminación del recubrimiento epóxico puede conducir a la corrosión, especialmente si éste sucede en las esquinas donde el oxígeno puede fluir desde ambos lados. El acero de refuerzo recubierto con epóxicos no tiene vínculo adhesivo, pero cuenta en cambio con corrugaciones para transferir esfuerzos de cortante. Bajo estos altos esfuerzos, las espigas tienden a acuñar al concreto y desarrollar agrietamientos entre las varillas, conduciendo a la delaminación del concreto. Estos problemas pueden superarse exitosamente con el uso de acero de refuerzo de diámetro pequeño y con el proporcionamiento adecuado del recubrimiento. Los recubrimientos epóxicos con arena fina embebida ya están disponibles y desarrollan una adherencia excelente.

VII.3.C.9. RECUBRIMIENTO DE ZINC (GALVANIZACIÓN)

Este ha sido extensivamente usado con el concreto arquitectónico para prevenir las manchas por óxido. Es importante que este recubrimiento sea pasivado con un lavado de cromato después del galvanizado, para prevenir la liberación de los iones de hidrógeno cuando éste contacte al álcali del cemento. Esta es una práctica normal en la mayoría de los países desarrollados. El galvanizado por inmersión en caliente conduce a una menor liberación de hidrógeno por lo que es preferido al proceso de electrogalvanización.

VII.3.C.10. OTROS RECUBRIMIENTOS

Las varillas inmersas en un lavado de cemento fueron ampliamente empleadas por la marina de Estados Unidos de América para construcción en islas remotas donde el agua potable no está disponible, de modo que tenía que emplearse el agua de mar en la mezcla. De modo similar se aplica actualmente en la India, donde un baño de recubrimiento a base de fosfato se aplica a las varillas, con la finalidad de proporcionar una capa pasiva más durable. Ambas prácticas necesitan mano de obra excesiva y obviamente exponen a las varillas a la abrasión y rasgaduras durante su instalación, de modo que al día de hoy estas prácticas no se emplean ampliamente.

VII.3.C.11. TENDONES NO CORROSIBLES

El acero de refuerzo y los tendones presforzados pueden ser de aceros no corrosibles, por ejemplo, acero inoxidable. Una empresa de acero japonesa ha estado desarrollando un acero menos caro que tenga una alta resistencia a la corrosión.¹³⁵ El acero de refuerzo a base de titanio se ha empleado para reparar estructuras antiguas y monumentos, tales como el Partenón.

VII.3.C.12. PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica puede ser aplicada efectivamente para prevenir la corrosión. Esta se basa en el principio de suministrar un receptor anódico que atrae los electrones del acero en un voltaje que sea adecuado para convertir catódico a todo el acero. El receptor anódico, si este fuera metálico o simplemente una fuente de corriente directa, es oxidada y consumido en el proceso. Con la protección catódica es de importancia crítica que todos los elementos de acero dentro del concreto, varillas, mallas, acero de preesfuerzo, ductos, y todos los insertos están adheridos: de otra forma los elementos no adheridos se convertirán en ánodos y producirán corrosión a una velocidad acelerada.

Los ánodos de sacrificio son un camino efectivo y simple para prevenir la corrosión, aún si esta ya ha comenzado. Sin embargo, estos son solamente efectivos si el concreto y el ánodo a proteger están en un medio electrolito, por ejemplo, agua freática. Por tanto las estructuras de toma, conducción y descarga de agua salada puede ser protegidas con la instalación de ánodos de zinc.. La conexión eléctrica debe ser provista para completar el circuito. Los ánodos deben colocarse de forma que estos "vean" la superficie del elemento de concreto a proteger, debido a que los electrones sólo se mueven en rutas rectas. Los ánodos de sacrificio tienen realmente un costo competitivo con otras formas de protección. Sin embargo, estos están confinados a aplicaciones subterráneas; donde el riesgo de corrosión es ya mínimo; normalmente no se aplican. La otra forma de protección catódica es la corriente impresa, que normalmente no tiene un costo competitivo en su instalación inicial.

¹³⁵GERWICK C. BEN JR. *Construction Prestressed of Concrete Structures*. Cap. 5,

VII.4. ESTRUCTURAS MARINAS

Debido al ambiente de servicio las estructuras marinas requieren de medidas especiales respecto al diseño por durabilidad, entre los principales procesos que amenazan a las estructuras marinas se encuentran los indicados en la tabla 7.2.

TABLA 7.2. PRINCIPALES PROCESOS QUE AMENAZAN AL CONCRETO MARINO	
<i>Físicos</i>	<i>Químicos</i>
a) Formación de hielo	a) Hidrólisis y lixiviación
b) Evaporación de agua	b) Penetración de sulfatos
c) Cristalización de sales en poros	c) Difusión de CO ₂ .
d) Penetración de líquidos y gases	d) Penetración de cloruros
e) Abrasión	e) Reacción álcali - sílice

Fuente. Cabrera, 1986, Citado por MARSHALL, A. L. Concrete Marine, p124.

En el capítulo VI se indicaron las zonas de exposición y medidas generales para construcciones marinas. A continuación se mencionan algunas consideraciones y detallado de diseño para evitar la corrosión de los elementos de acero ahogados en el concreto, ya sean presforzado o no presforzado.

El diseñador tiene que iniciar el proceso de diseño partiendo de que se utilizará un concreto de buena calidad con la más baja relación agua / materiales cementantes posible y con buenas prácticas de construcción. Para asegurar una protección óptima al acero de refuerzo se debe indicar en el diseño que el concreto deberá colocarse rápida y adecuadamente, que las juntas frías se minimicen y unan de modo correcto, que se empleen esfuerzos permisibles que eviten agrietamiento, y que se brinde atención a los esfuerzos causados por todos los cambios de volumen.¹³⁶

Si lo anterior se cumple, teóricamente el diseñador puede estar tranquilo de que el acero será protegido correctamente contra la corrosión. La experiencia ha mostrado que la corrosión del acero embebido en estructuras marinas es poco probable, pero se presentan casos. En la figura 7.6 se presenta una fotografía de un muelle de concreto con una corrosión severa en su acero de refuerzo.

Alrededor del mundo se han realizado varias investigaciones del desempeño del concreto en ambientes marinos y con elementos postensados. Entre las medidas a considerar en el diseño para un desempeño óptimo del concreto se tienen las siguientes:

- Asegurar un concreto impermeable, mediante una baja relación agua / cementantes
- Es posible diseñar, detallar y elaborar un concreto postensado con aire incluido, para lograr una vida mayor a 50 años.
- Los ductos de postensado deben tener un recubrimiento mínimo de 50 mm. Para los tendones de las esquinas es conveniente un recubrimiento mayor a 50 mm y probablemente no menor que el diámetro del ducto o del empalme de éste. Un fenómeno que sucede en las esquinas es que los cloruros penetran por ambos lados del elemento, dando por resultado una corrosión acelerada.
- El tipo de protección más eficaz para los anclajes terminales es una bolsa de anclaje hueca remetida que se llena con un concreto a base de cemento Pórtland expansivo.
- Para los anclajes externos, el uso de varillas de refuerzo como acero de anclaje, que pasan a través de la junta fría, mejora sustancialmente el comportamiento de tales juntas

¹³⁶ SHUPACK M. Diseño de Estructuras Marinas Permanentes para Evitar el Deterioro. Revista IMCYC, septiembre, 1984p. 23-33.

- El empleo de un material impermeable (no poroso), como el mortero epóxico adherido, puede provocar deterioro al transcurrir el tiempo cuando el concreto se sature y esté sujeto a ciclos de congelamiento y deshielo.
- Algunos autores (M. Schupack, 1984) afirman que una lechada expansiva con polvo de aluminio como agente de expansión proporciona una excelente protección al acero de refuerzo. Otros autores afirman que el polvo de aluminio puede causar que el acero de vuelva frágil.
- De acuerdo a la experiencia de campo y a los estudios realizados en estructuras que ya están operando debe tenerse en cuenta dos aspectos: a) variaciones del clima local y global y b) la altura de la zonas de exposición.

¿Cómo puede el diseñador asegurarse que la estructura esté protegida contra la corrosión? La respuesta a esta pregunta es que no existen garantías, en especial en las obras colada in situ. Para solventar los problemas de la construcción se pueden tomar las siguientes medidas:

- Utilización de un mayor recubrimiento para proteger al acero de refuerzo
- Un incremento del recubrimiento en las esquinas de los elementos
- Especificar un factor de cemento mínimo o un consumo mínimo de cemento
- Es práctico y conviene emplear diámetros pequeños de varilla o tendones de preesfuerzo
- Colocar un ducto plástico, protegido, en los tendones postensados
- En las capas externas del refuerzo deben emplearse varillas con diámetros pequeños o una malla de alambre manejable.
- Emplear acero de refuerzo recubierto con epóxico
- Minimizar la congestión del acero de refuerzo para permitir un colado y compactación óptima
- Determinar el uso de un superfluidificante para mantener la relación agua / materiales cementantes baja y lograr una trabajabilidad adecuada
- Los anclajes de postensado deben estar de preferencia remetidos; la superficies de contacto deben quedar descubiertas y limpias, y llenar la cavidad con mortero sin contracción y con aire incluido (en exposiciones al congelamiento).
- Los extremos cortados del torón deben protegerse con un recubrimiento compatible con el concreto. Si los torones están remetidos, la cavidad seca deberá llenarse con un mortero a base de cemento Pórtland sin contracción.
- Se requiere inspección y control de calidad adecuada¹³⁷



Fig.7.6. Corrosión extrema en estructura marina.
Fuente: AMEGAC.

Si las prácticas de construcción no se controlan de modo adecuado o si el recubrimiento del concreto debe minimizarse para poder construir una estructura flotante de concreto, es necesario considerar el uso de un refuerzo recubierto con material epóxico y/o tendones aislados eléctricamente.

Existen diversos detalles de diseño y métodos de construcción disponibles para construir estructuras marinas de concreto reforzado. Es útil que el diseñador conozca el control que puede ejercer sobre la construcción, con la finalidad de que pueda tomar las decisiones básicas de diseño en relación con el método de refuerzo y los detalles apropiados.

¹³⁷ SHUPACK M. Diseño de Estructuras Marinas Permanentes para Evitar el Deterioro. Revista IMCYC, septiembre, 1984p. 23-33

Los resultados experimentales de investigaciones han mostrado que para niveles de resistencia superiores a los 40 MPa (392 kg/cm²), los concretos elaborados con cementos mezclados parecen ofrecer ventajas significativas en términos de que tienen periodos de resistencia al ataque de corrosión más largos que aquellos proporcionados por los concretos de cemento Pórtland. Desde el punto de vista de la especificación, dichos hallazgos relevantes involucran la elaboración de los requerimientos de los materiales cementantes prescritos.¹³⁸

En la tabla 7.3. se indican los componentes más propensos a deterioro en estructuras marinas, así como su causa.

TABLA 7.3 COMPONENTES MAS PROPENSOS A DETERIORO			
	NUM.	COMPONENTE	CAUSA DE DETERIORO DEL COMPONENTE INDIVIDUAL
MAYOR PROBABILIDAD AL DETERIORO	1	Apoyo superior en zona de marea	Congelamiento y deshielo, reacción química entre agua de mar y el concreto, provocando disolución y expansión disociadora
	2	Cara del muelle	Daño mecánico, reacción álcali sílice, corrosión
	3	Losa superior (cara superior)	Agrietamiento por contracción plástica, Congelamiento y deshielo, , reacción álcali sílice, corrosión
	4	Vigas de losa	Congelamiento y deshielo, corrosión
	5	Apoyo inferior en zona de marea	Reacción química entre agua de mar y el concreto, provocando disolución y expansión disociadora
	6	Losa superior (cara inferior)	Congelamiento y deshielo, corrosión
	7	Atrás del muro	Corrosión, congelamiento - deshielo
	8	Construcciones cercanas a muelles	Corrosión
	9	Construcciones alejadas del mar	Corrosión
	10	Apoyos de la zona sumergidos	En circunstancias excepcionales, la superficie se "suaviza" debido la interacción destructiva entre agua de mar y la matriz de la pasta de cemento. Se encuentra en aquellas sitios donde el concreto sumergido se colocó inapropiadamente y la pasta de cemento se ha segregado de los agregados finos y gruesos.

FUENTE: BREMNER, T.W. *Concreto en Ambiente Marino. Durabilidad del Concreto "Seminario Internacional..."*, UANL., 1993.

Las estructuras costeras, como un subgrupo de las estructuras marinas, están también expuestas a lo anteriormente descrito, sin embargo, puede haber otros aspectos que dañen también al concreto, como descargas locales de desperdicios: *"Los mayores problemas de contaminación en estructuras costeras pueden ser atribuidos a las descargas locales de volúmenes considerables de desperdicios. Estos incluyen materiales que son parcialmente biodegradables, tales como aguas residuales, lodo del alcantarillado, desperdicios procesados de comida y bebida, efluentes de la industria papelera, desperdicios de lana y algodón y efluentes de la refinería de azúcar"* (Keckes, 1983)¹³⁹ Por lo que en tales estructuras debe considerarse desde el diseño la factibilidad de ataque por descargas químicas provenientes de industrias periféricas.

¹³⁸ BAWEJA, D., *et al.* Specification of Concrete for Marine Environments: a Fresh Approach, ACI Materials Journal. July – August 1999, p.469.

¹³⁹ *Opus. Citatus.* MARSHALL, A.L. Concrete Marine, p124.

VII.4.A. ESTRUCTURAS DE CONCRETO MAR ADENTRO

Las estructuras de concreto mar adentro están diseñadas para permanecer en un ambiente marino mediante gravedad (estructura flotante), pilas o anclas. Frecuentemente se asocian con la exploración o producción de hidrocarburos, pero existen otros usos especializados. Como otras estructuras de concreto están elaboradas con materiales locales de acuerdo con las especificaciones de la región, por lo que pueden variar ampliamente en la calidad. De acuerdo con su aplicación particular su resistencia puede variar desde 25 a 65 MPa (245 a 638 kg/cm²). Requieren ser extremadamente durables. Una vez que una estructura es colocada en el mar, su mantenimiento es muy difícil y costoso, debido al ambiente hostil; algunas plataformas de concreto mar adentro tienen vidas de diseño de hasta 50 o 70 años.

El uso del concreto en estructuras marinas data desde los romanos y los griegos. La primera plataforma de concreto para producción de gas y aceite se realizó en el Golfo de México en 1950, desde entonces más de 1000 estructuras de concreto relacionadas se han construido en el área, con la primera estructura de concreto a base de gravedad en territorio estadounidense instalada en 1978. La primera plataforma con estructura de concreto larga fue instalada en el Mar de Norte (Tanque Ekofisk) en 1973. El concreto tiene una historia larga en estructuras marinas y mar adentro.

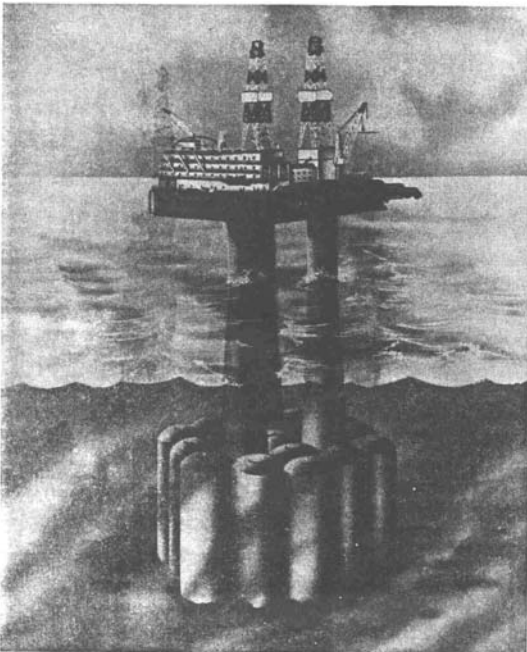


Fig.7.7. Plataforma marina. Estructura de concreto típica, base de gravedad. Fuente: *Concrete For Offshore Structures*. George C. Hoff. Durabilidad del concreto. p.471.

Las estructuras mar adentro empleadas para producción y exploración de hidrocarburos pueden clasificarse en estructuras con cimentación al fondo o flotantes. Las estructuras con cimentaciones al fondo pueden ser:

- a) Estructuras con base de gravedad (fig. 7.7)
- b) Estructuras soportadas con pilas de concreto cilíndricas
- c) Estructuras de cascarón de concreto con cimentación al fondo y flotante

Las estructuras flotantes pueden ser:

- a) Plataforma de pierna de concreto en tensión
- b) Flotadores de concreto de corriente profunda
- c) Barcazas de concreto de almacenamiento y producción

Este trabajo está enfocado a los requisitos de diseño y prácticas constructivas para incrementar la durabilidad del concreto, por lo que no se profundizará más en el tema de los tipos de estructuras mar dentro.

CALIDAD DEL CONCRETO: Normalmente se tiene la percepción de que la construcción de estructuras marinas requiere una tecnología del concreto más allá de la práctica normal para la construcción de concreto. No hay nada especial o singular en la aplicación de un colado, entrega, consolidación y curado de mezclas adecuadamente proporcionadas.

Las recomendaciones prácticas para la construcción de concreto que incluyen la selección de materiales y proporcionamiento de mezcla, existen en los reglamentos de construcción y en las especificaciones; las normas de la mayoría de los países desarrollados son completamente suficientes para la industria del concreto mar adentro.

Valores distintos de las relaciones agua / cemento, contenido de material cementante y recubrimiento del concreto al acero de refuerzo pueden variar un poco, sin embargo, estos valores están bien documentados.

Las primeras plataformas realizadas en el Golfo de México empleaban resistencias a la compresión en cilindros de 25 a 35 MPa (245 a 343 kg/cm²), recientes muestras de las mismas plataformas de 33 años muestran un incremento en la resistencia de 50 a 69 MPa (490 a 676 kg/cm²) a lo largo de la vida de la estructura. Las resistencias actuales requeridas para una estructura determinada depende de una larga lista de factores, pero es significativamente influenciada por el ambiente y las cargas de operación.

MATERIALES DEL CONCRETO: Los materiales pueden ser locales, deben evaluarse para asegurar que poseen las características adecuadas para elaborar concreto y que sean durables en el ambiente en el que serán empleados. Para eliminar los altos costos de mantenimiento y futuras reparaciones, los materiales empleados y el concreto resultante debe estar virtualmente libre de mantenimiento a lo largo de la vida de servicio de la estructura.

La durabilidad de estructuras marinas se define por su capacidad para resistir la acción del clima, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, mientras mantiene su forma, calidad y serviciabilidad original en su ambiente. Esto incluye congelamiento – deshielo, ataque químico por constituyentes del agua de mar, abrasión física debida a la marea, sólidos flotantes o suspendidos, hielo flotante, corrosión del acero y otros metales embebidos en el concreto, y reacciones químicas asociadas con los agregados en el concreto. Para la mayoría de las estructuras marinas el mecanismo más destructivo es la corrosión del acero de refuerzo asociado con el ingreso de cloruros dentro del concreto provenientes del agua de mar.¹⁴⁰

Los cementos Pórtland deben tener bajo contenido de aluminato tricálcico (C₃A), en la medida en que sea práctico para la producción local, hecho que ayuda a reducir la posibilidad al ataque por sulfatos. El total de álcalis del cemento, calculado como el óxido de sodio, no debe exceder 0.60 %, con la finalidad de minimizar cualquier potencial para reaccionar con los agregados. El cemento debe tener materiales silicios, como son puzolanas naturales, cenizas volantes, escorias de alto horno y microsílce condensado. Estos productos ayudan a formar un cementante más denso que inhibe la penetración del agua de mar dentro del concreto. Estos también se reducen con los álcalis del cemento y reducen la cantidad disponible de álcalis.

El agregado grueso puede ser grava con densidad normal o piedra triturada o agregado ligero de buena calidad. Los agregados deben ser evaluados con respecto a su potencial de reactividad con los álcalis del cemento. Los agregados potencialmente reactivos no deben emplearse. Los agregados provenientes de las cercanías del mar deben ser verificados por concentraciones de sales, dichas sales deben ser lavadas de los agregados antes de su uso. Los agregados finos deben ser arenas naturales o manufacturadas, no deben ser reactivas y deben de estar libres de materiales deletéreos.

En ningún caso debe usarse agua de mar o agua salobre para elaborar concreto. Toda el agua de mezclado debe ser potable. El lavado de agregados debe ser hecho con agua potable.

Los aditivos químicos son esenciales para la producción de concreto marino durable: se requiere aire incluido cuando se tienen ciclos de congelamiento y deshielo. Los superplastificadores pueden ser requeridos para mejorar la consolidación y la durabilidad, y a su vez, permiten reducir el agua de mezclado hasta en un 30% sin sacrificar la trabajabilidad. Esta reducción significativa de agua reduce sustancialmente la permeabilidad del concreto y contribuye a una densificación de la fracción cementante del concreto.

¹⁴⁰ HOFF, George C. *Concreto en Estructuras Mar adentro. Durabilidad del Concreto*, Nuevo León, México, 1993. p.451.

PROPIEDADES DEL CONCRETO: Para los diseñadores estructurales las propiedades de los materiales de construcción son importantes en la edad a la cual las cargas se aplican a la estructura. Para la mayoría de las estructuras mar adentro la carga máxima sucede cuando la estructura es puesta en servicio. Esta puede variar de 1 a 5 años del inicio de la construcción, dependiendo del tamaño y complejidad de la estructura y de su uso último. Las propiedades del concreto endurecido que son de interés para el diseñador de estructura mar adentro son:¹⁴¹

- | | |
|---|--------------------------------------|
| ➤ Resistencia a la compresión | ➤ Relación esfuerzo - deformación |
| ➤ Resistencia a la tensión | ➤ Resistencia al cortante |
| ➤ Módulo de ruptura | ➤ Deformación diferida y contracción |
| ➤ Módulo de elasticidad | ➤ Capacidad a la fricción cortante |
| ➤ Relación de Poisson | ➤ Resistencia la fatiga |
| ➤ Propiedades térmicas (coeficiente de expansión térmica, conductividad térmica, calor específico y difusividad). | ➤ Absorción |

Otras propiedades que son de interés para el constructor son:

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| ➤ Trabajabilidad | ➤ Consolidación |
| ➤ Bombeabilidad | ➤ Gradientes térmicos |
| ➤ Peso unitario | ➤ Acabado |
| ➤ Contenido de aire | |

Los miembros típicos de este tipos de estructuras son gruesos. Debido a que la mayoría de los reglamentos de estructuras mar adentro requieren justamente altos contenidos de cemento por durabilidad, existe la posibilidad de un desarrollo de calor significativo. Los valores límites de la temperatura máxima en su colocación y el máximo incremento de calor está señalado en los reglamentos. Se debe tener un cuidado especial para minimizar los gradientes térmicos para asegurarse que el agrietamiento térmico de los miembros estructurales no sucedan.

El acabado de la superficie del concreto no parece a primera vista como crítica en este tipo de estructuras, sin embargo, un pobre acabado puede tener por consecuencia efectos colaterales. Para la amplia mayoría de las estructuras mar adentro la carga de diseño gobernante es la causada a las fuerzas debidas a la marea que actúan en la superficie de la estructura. Las superficies ásperas tienden a incrementar las fuerzas debidas a la marea y reducir el factor de seguridad planeado para la estructura. En climas fríos una superficie áspera tiende a desgastarse más rápidamente cuando está sujeta a ciclos de congelamiento - deshielo. En mares infestados de hielo, el movimiento del hielo desgasta más aceleradamente las superficies rugosas que las superficies lisas.

PRÁCTICAS DE CONSTRUCCIÓN: No se tienen prácticas únicas para construir estructuras mar adentro. Las buenas prácticas que se realicen en cualquier proyecto importante de ingeniería civil son suficientes para construir una plataforma de concreto mar adentro. Se puede emplear concreto bombeable. Una consolidación adecuada y apropiada es esencial. Un adecuado curado debe ser provisto, esto incluye protección temprana al congelamiento donde exista la posibilidad. El tamaño máximo del agregado empleado en estas estructuras ha sido el de 19 mm (3/4") con el objetivo de permitir el movimiento del concreto fresco alrededor del acero de refuerzo. El presfuerzo también es empleado en casi todas las estructuras marinas.

CONSIDERACIONES DE COSTOS: Los costos de estas estructuras están dictados por su complejidad, la localización y los métodos de construcción empleados. Estas estructuras tienen potencial para costos de bajo capital debido a que los materiales son locales y la mano de obra no tiene que ser especializada. Cuando se realiza adecuadamente, el concreto puede estar prácticamente libre de mantenimiento, lo que produce una inversión interesante.

¹⁴¹ *Ibid.*

VII.5. DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS MARINAS

Las estructuras marinas son diseñadas normalmente para una aplicación específica, para las cuales se ha juzgado que tienen rentabilidad si ellas pueden ser mantenidas en operación a lo largo de su vida útil con costos de mantenimiento aceptables. Si utilizamos este criterio para evaluar su desempeño, entonces las estructuras de concreto marinas han mostrado un éxito rotundo, con la excepción de pocas estructuras que han requerido mantenimientos excesivos para conservar su serviciabilidad. Dichos problemas envuelven un entendimiento de la tecnología inapropiada, como las pilas de corazón hueco de la Terminal *Rodney* en *New Brunswick*, Canadá, o el uso inconveniente de materiales, tales como el empleo de agua de mar para agua de mezclado para un concreto marino ampliamente reforzado, como se empleo en el Medio Oriente.

Las estructuras marinas empleadas en la segunda guerra mundial fueron extremadamente durables y continúan actuando como una muestra de cómo el concreto debe desempeñarse. Con la excepción de los parques submarinos de *Trondheim*, Noruega, las estructuras no encuentran usos alternativos, y su buena durabilidad de hecho es una desventaja. No así en la mayoría de otras estructuras marinas. Los propietarios son varios a lo largo de la vida de servicio de estas, pero las instalaciones comerciales marinas soportan continuamente las necesidades de éxito de sus propietarios. Usualmente adquiridas por precios ridículos son modificadas para encontrar los nuevos requerimientos del propietario, y frecuentemente hacen negocios arriesgados viables, que no podrían ser de otro modo. Un caso es el muelle de concreto sin aire incluido de *Eastport, Maine*, EE.UU., que fue construido en 1920 por la compañía "*Continental Can*", vendida posteriormente a varias empresas procesadoras de pescado y finalmente comprada por la compañía "*Mearle Corporación*" para negocios de pescado a gran escala. Por último se vendió a una empresa canadiense denominada "*Maine Pride Incorporated*" quien instaló su negocio de acuicultura del salmón. Sólo ciertas áreas del concreto sin aire incluido requirieron reparaciones varias veces a lo largo de su vida pero estas se realizaron fácilmente y a un costo moderado. Desafortunadamente una parte pequeña de la instalación falló, sin embargo, la parte restante ha sido renovada para servir a su propósito admirablemente.¹⁴²

Las estructuras mar adentro localizada en Noruega y Escocia empleadas para extraer petróleo del subsuelo marino se han desempeñado por décadas excepcionalmente. Igualmente las plataformas de concreto instaladas en el Golfo de México se han desempeñado muy bien, algunas llevan instaladas más de 40 años, otras están elaboradas con concreto ligero y han mostrado un buen desempeño. Existen varios ejemplos de buen desempeño en las estructuras marinas de concreto. Las excepciones son pocas y se deben a varias razones, incluyendo que no todos los factores actuantes se consideraron.

VII.6. CONCLUSIONES CAPITULARES

En el diseño de estructuras especiales o que requieren una ingeniería de materiales avanzada se deben considerar las condiciones de servicio más críticas que pueda enfrentar la estructura, en el proyecto se indicarán las especificaciones, sistemas de refuerzo y prácticas de construcción a utilizar.

Las estructuras sanitarias por sus características requieren de un diseño adecuado ante las sustancias químicas que intervienen en su entorno. El diseñador de una estructura sanitaria debe conocer perfectamente ante que sustancias y particularidades se expondrá el concreto.

Las estructuras presforzadas son sensibles a la corrosión, por lo que es indispensable evitarla y tomar las medidas necesarias en todos los elementos que interactúan para lograr un correcto desempeño de estas estructuras. Las estructuras presforzadas constituyen una alternativa por las ventajas económicas que ofrecen muy interesante por difundir en nuestro país.

¹⁴² BREMNER, Theodore W. *Concreto en Ambiente Marino. Durabilidad del Concreto*, UANL, 1993.

En el desempeño del concreto en ambientes marinos a largo plazo intervienen varios factores críticos. A pesar que la tecnología actual permite seleccionar materiales de mayor calidad y mejorar el desempeño de concretos en ambientes marinos, existe todavía la necesidad de tener un cuidado especial en la obra, es necesario realizar programas de mantenimiento adecuadamente planeados, particularmente en el caso de elementos críticos de la estructura.

Con el mejoramiento de las especificaciones, las prácticas constructivas, un control de calidad y un mantenimiento adecuado, la probabilidad de realizar construcciones y mantenimientos con un valor presente neto cada vez más bajo irá incrementándose.

La tecnología del concreto para estructuras marinas y en particular, la durabilidad, está desarrollándose todavía; se tienen continuas investigaciones al respecto. Por lo que una recomendación muy útil y que nunca perderá validez es la capacitación constante que pueda tener el ingeniero civil, ya sea estructurista, constructor o investigador de materiales; su actualización y enriquecimiento de la tecnología contemporánea será su mejor arma para realizar estructuras seguras, durables, estables y económicas.

Las estructuras marinas han probado ser versátiles y durables y pueden servir en la mayoría de los condiciones climáticas del mundo.

VII. DURABILIDAD EN ESTRUCTURAS ESPECIALES.....	110
VII.1. INTRODUCCIÓN	110
VII.2. ESTRUCTURAS SANITARIAS	110
VII.2.A. REQUISITOS DE DURABILIDAD	110
VII.2.B. OTROS MATERIALES EN ESTRUCTURAS SANITARIAS	111
VII.2.C RIESGO DE CORROSIÓN DE DIVERSAS ESTRUCTURAS SANITARIAS	112
VII.2.D. METODOLOGÍA PARA REHABILITAR ESTRUCTURAS SANITARIAS DE CONCRETO	113
VII.3. ESTRUCTURAS PRESFORZADAS	113
VII.3.A. GENERALIDADES	113
VII.3.B. CORROSIÓN DE ACERO PRESFORZADO Y SU PREVENCIÓN	115
VII.3.C. ESTRATEGIAS PARA PREVENIR LA CORROSIÓN DEL REFUERZO EN ESTRUCTURAS PRESFORZADAS.....	119
VII.4. ESTRUCTURAS MARINAS.....	124
VII.4.A. ESTRUCTURAS DE CONCRETO MAR ADENTRO	127
VII.5. DESEMPEÑO DE ESTRUCTURAS MARINAS	130
VII.6. CONCLUSIONES CAPITULARES	130

CAPITULO VIII. EVALUACIÓN Y RETOS DE LA DURABILIDAD

VIII.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha señalado en capítulos anteriores en el desempeño de una estructura de concreto intervienen un sin número de factores: condiciones de servicio y exposición, correspondiente idoneidad del concreto para las circunstancias en que se encontrará, diseño, construcción, y mantenimiento. La vida útil de la estructura será incrementada si se considera un diseño por durabilidad, si se realizan buenas prácticas de construcción y un control de calidad adecuado y un mantenimiento periódico y oportuno

El deterioro anticipado del concreto como se discutió en capítulos anteriores incluye tanto factores estructurales como no estructurales. Los estructurales frecuentemente son causados por sobrecargas y por esfuerzos excesivos de cualquier procedencia. Los no estructurales pueden deberse a otros agentes agresivos o condiciones de servicio. Es importante observar que su interacción disminuye la vida útil de la estructura, por ejemplo, una falla aparentemente no estructural puede tener su origen en causas estructurales. Esto permite observar la importancia de detectar oportunamente los primeros síntomas o probables orígenes de deterioro, con la finalidad de incrementar la vida útil de la estructura, mediante la inspección y mantenimientos adecuados.

Las fallas no estructurales tienen diferentes orígenes y pueden tener por tanto consecuencias muy variables en la durabilidad de la estructuras, entre estas fallas se puede identificar las siguientes:

1. Ataque químico
2. Corrosión del acero de fuerza
3. Congelamiento – deshielo
4. Lixiviación de cal.
5. Reacciones álcali -agregado.

Las estructuras de concreto son diseñadas y construidas con el objetivo de satisfacer un conjunto de requerimientos funcionales en un determinado período, sin causar costos inesperados por mantenimiento o reparación. Dicho período constituye el tiempo de vida previsto o vida de servicio del diseño de la estructura. Pocos reglamentos de construcciones establecen una vida de servicio, como el Cogido Británico que establece una vida de diseño de 120 años.

Conviene aclarar que una vez que la estructura cumple su vida de servicio no implica que debe ser demolida. Solamente indica que debe realizarse una evaluación para determinar el costo beneficio. Los costos futuros de mantenimiento para que permanezca en un estado funcional completo se incrementarán más allá de los considerados durante su vida de servicio. Es necesario determinar lo más apropiado, si se justifican los costos de mantenimientos futuros o si se demuele o se remodela.

De Sitter (1983) propuso su Ley de cinco, la cual establece que la declinación y caída de una estructura insatisfactoria se puede dividir en cuatro fases a saber:

1. **Fase A: Diseño y construcción:** la semilla del desempeño insatisfactorio es sembrada en esta etapa, posiblemente debido a un mal diseño, a una especificación incorrecta del material o a una pobre mano de obra.

2. **Fase B. Fase de pre-corrosión:** la corrosión ha iniciado, pero la carbonatación o los cloruros están penetrando al interior del concreto y hacia el acero más rápidamente de lo esperado. La acción correctiva puede tomarse si el problema es identificado. Este puede consistir en aplicar cuidadosamente y selectivamente un recubrimiento superficial.
3. **Fase C. Corrosión activa local:** la corrosión ha iniciado en algunos puntos y se presenta desconchamiento local y manchas de óxido son visibles. La reparación y mantenimiento será necesario.
4. **Fase D. Corrosión generalizada:** si las reparaciones y mantenimiento no son realizadas, la estructura alcanzará el estado donde las reparaciones mayores son necesarias, posiblemente incluya el reemplazo de miembros completos.

La concepción de De Sitter es que \$1 gastado en la fase de diseño y construcción es tan efectiva como \$5 gastados en la fase B, \$25 en la fase C o \$125 en la fase D. La finalidad de la regla es mostrar la filosofía del mecanismo de prevenir gastos innecesarios, no tanto discutir si se tratan de \$3 o \$4 unidades monetarias gastadas. La regla recuerda claramente que el máximo costo y modo eficaz de asegurar una adecuada vida de servicio se obtiene a través de una estructura correcta en primer término.

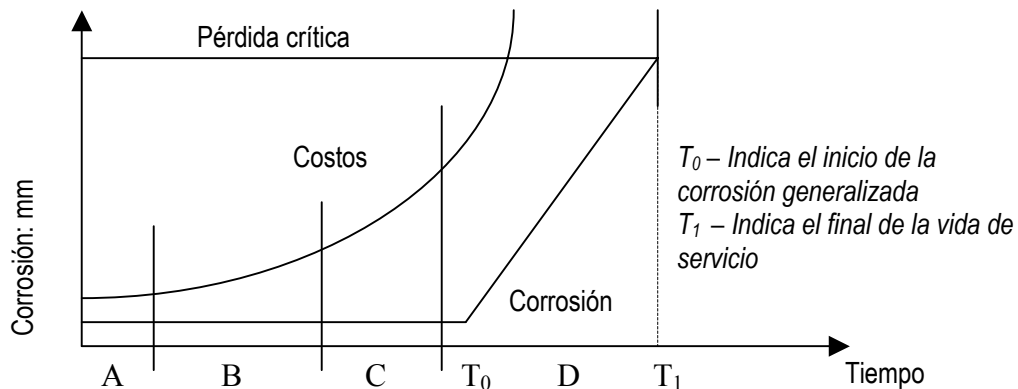


Fig. 8.1. La ley de cincos. Fuente Durable Concrete Structures, CEB. p. 39

Un peso invertido en un buen proyecto puede evitar costos futuros innecesarios. Una inversión en mejores materiales puede evitar costos de mantenimientos operativos o mayores durante la vida útil de la estructura. Las recomendaciones que se mencionan en este trabajo pretenden ayudar a diseñadores y constructores a realizar esto. Se requiere crear una conciencia en el gremio de la construcción para identificar que un mayor costo inicial representa potencialmente hablando un ahorro importante en el futuro.

Un punto digno de mencionarse es que los factores que tienen gran influencia en la durabilidad de las estructuras de concreto son la compactación adecuada del concreto y un buen curado. Si estos no son llevados a cabo, los esfuerzos del diseñador son en vano. El curado y la compactación son particularmente importantes para el concreto del recubrimiento. Debido a que está en contacto con el ambiente. El recubrimiento protege al acero y al concreto del ataque químico, desafortunadamente es la parte del concreto que tiende a ser más pobremente compactado y curado.

VIII.2. DURABILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTOS

Como se describió en el primer capítulo la durabilidad del concreto tiene un impacto económico serio en la infraestructura; por lo anterior es necesario evaluar el proyecto mediante un análisis de costos. Definitivamente podemos decir que ningún inversionista a primera instancia quiere un mayor costo inicial; normalmente para los inversionistas la construcción es un mal necesario: se construyen naves industriales, naves comerciales, hoteles, plantas hidroeléctricas, refinerías, departamentos de viviendas, plataformas, presas, etc. Con la finalidad de tener una estructura que proporcione un servicio, satisfaga una necesidad y produzca una utilidad futura para el inversionista. La finalidad durante la etapa de construcción es optimizar los costos de la misma, sin embargo, se debe tener presente que la estructura debe garantizar un período de vida útil, y que la mayoría de las veces la prevención y estudios de ingeniería básica y de materiales pueden conducir a una estructura con propiedades químicas y físicas adecuadas al ambiente o condiciones de servicio, lo que tendrá por resultado la satisfacción plena de los requerimientos de servicio, con erogaciones menores de mantenimiento y una mayor inversión inicial.

Para un proyecto que involucre concreto, al realizar la evaluación de costos se considera normalmente que el producto es el adecuado y que no requerirá mantenimiento o alguna sustitución o reparación, es decir, se asume que el concreto tiene una vida duradera.

El deterioro de una estructura es un proceso complejo, donde diversos aspectos como el concreto, el acero de refuerzo, el diseño estructural, y el ambiente pueden tener influencia. Para encontrar la estrategia óptima de rehabilitación es decisivo para el propietario que incluir todos los costos durante la vida útil remanente de la estructura, como: reparación, mantenimiento, administrativos, honorarios de consultores, etc. Todo ello con la finalidad de evaluar adecuadamente los posibles costos futuros y presentar una propuesta técnico económica real y verídica. Para ejemplificar las aseveraciones anteriores se presentan dos casos:

VIII.2.A. PLANTA FUNDIDORA DE ALUMINIO

Taylor (2002), expuso un caso de estudio que consiste en la construcción de una fundidora de aluminio en Sudáfrica, la cual se diseñó, especificó, construyó y actualmente se monitorea por durabilidad del concreto como un parámetro importante.

El dueño de la planta de fundición se acercó al *Instituto del Cemento y del Concreto (Cement and Concrete Institute, C&CI)*, en Sudáfrica. El propietario quería ayuda para especificar su nueva planta de fundición a fin de asegurarse de que no tuviera los mismos costos excesivos de mantenimiento que la planta ya existente, la cual fue construida cerca del mar usando concreto con una durabilidad inadecuada para su ambiente. El ambiente marino, la solución de cloruros empleada en el proceso, y el gas de flúor producido en el proceso de la propia planta, contribuyeron al deterioro prematuro de la estructura de concreto. El mantenimiento y reparación de la primera construcción seguía creciendo, por lo que el propietario decidió realizar una inversión adicional en la pre-construcción de la nueva planta para asegurar que ésta no presente el mismo grado de deterioro y costos de mantenimiento exagerados de la primera.

La nueva planta de fundición fue diseñada, especificada y construida con criterios de durabilidad, la construcción duró dos años, y ya en operación se realiza un monitoreo periódico, los parámetros del monitoreo son:

- **Permeabilidad al gas**, el ambiente de la fundición conducía a la carbonatación.
- **Absorción de agua**, la solución de cloruros tendían a entrar en contacto con superficies verticales de concreto, el agua o solución tendía a entrar por succión capilar.

- **Conductividad de cloruros**, un medio indirecto de evaluar la capacidad del concreto para resistir el paso de los iones de cloruro en la solución.

El propietario de la estructura ha indicado que el dinero adicional invertido para asegurar un concreto más durable era significativo en términos del precio del concreto, pequeño en términos del costo total de la construcción y muy pequeño en términos del costo total del proyecto. El propietario considero que su dinero había sido bien invertido porque el riesgo de reparaciones futuras había sido reducido.¹⁴³

En palabras del propio Taylor “La experiencia ganada en este proyecto ha mostrado que tenemos la tecnología para diseñar y proveer estructuras durables para ambientes severos. La comunicación oportuna y cooperación entre el propietario, el especificador, el diseñador, el investigador y el contratista son requeridas para realizar una estructura durable.”¹⁴⁴

VIII.2.B. HOTEL EN ZONA COSTERA

Uribe y Flores (1999 y 2001) exponen el caso de un hotel ubicado en zona costera, el edificio de 5 niveles se localiza en el área de influencia del mar Caribe, con una fachada de cara al mar a menos de 100 m de distancia de la línea de costa. Se construyó en dos etapas, la primera aproximadamente en 1989 y la segunda 5 años después de la primera etapa. Los problemas detectados en la estructura de concreto son varios, principalmente en columnas y balcones con cara al mar. La inspección de campo arrojó los siguientes resultados:

- a) Fisuramiento superficial asociado con la posición del acero de refuerzo (parte baja de balcones y columnas)
- b) Se observaron estructuras de panel de abeja en varios elementos
- c) Excesiva porosidad superficial
- d) Fallas por adherencia agregado pasta de cemento
- e) Segregación
- f) Hidratación diferencial de la pasta de cemento juntas frías, agregados con mala calidad (porosos, deleznales y suaves), incompatibilidad de la curva granulométrica elegida
- g) Pasta calcinada
- h) Colocación inadecuada del acero de refuerzo, los diámetros y posición de éste eran variables
- i) Recubrimiento de concreto escasos y variables.
- j) Corrosión del acero de refuerzo
- k) La pasta superficial de los elementos con corrosión tenía una concentración de cloruros 9 veces mayor a los máximos permitidos para una estructura de concreto, en tanto la pasta a la profundidad del acero de refuerzo tenía una concentración 3 veces superior a los límites permisibles.

La resistencia a compresión indicada por las pruebas de los especímenes del propio edificio era en promedio de 1.5 veces la requerida. Aunque la resistencia a la compresión era aceptable, las propiedades de durabilidad conferidas al concreto no eran las apropiadas, lo que se demostró con los problemas detectados y la necesidad de una reparación mayor a escasos 10 años de su construcción, entendiéndose por reparación mayor la reparación o sustitución total del producto utilizado.

El deterioro prematuro del concreto tiene un origen múltiple que normalmente involucra la mayoría de las etapas constructivas de cualquier proyecto; esta problemática es resultante de que no se consideraron las condiciones de exposición y servicio a las que estaría sometida la estructura. El deterioro de la estructura trajo consigo otros costos, que en la evaluación debe considerarse:

¹⁴³Para, mayor información consúltese: *Designing Concrete or Durability- a Case of Study. Concrete International, May 2002.p.39-43*

¹⁴⁴ *Designing Concrete or Durability- a Case of Study. Concrete International, May 2002.p.39-43*

-
-
- a) **Costos elevados de mantenimiento**, por la realización de reparaciones constantes en las áreas expuestas a los huéspedes, más los costos por materia prima empleada en la reparación.
 - b) **Costos de inoperación**. Pérdidas por conservar habitaciones cerradas durante la reparación.
 - c) **Pérdida de la imagen del hotel ante la clientela**, por estar en continúa reparación, generando una imagen de ofrecer servicios de mala calidad.
 - d) **Riesgo constante del cliente**. Riesgo a los huéspedes por algún desprendimiento de concreto en los balcones de las habitaciones, ubicadas en los andadores del hotel.
 - e) **Pago de bonificaciones a los clientes por el estado del hotel**, originado por las reclamaciones de los propios huéspedes, que en su opinión la apariencia y deterioro de las instalaciones no corresponden a un hotel de las características que han pagado.

Para este caso se realizó una valuación inmobiliaria y se presentó una propuesta técnico - comercial al propietario. La cual consistía en una ampliación, con concreto durable, que considerará las condiciones de exposición y servicio reales. Uribe y Flores (2001) concluyen *“en el análisis de costos de cualquier proyecto constructivo se debe considerar el costo del producto, evaluado con base a su vida útil última, ya que evadir esta consideración proporciona una evaluación económica falsa y por tanto no representativa”*.¹⁴⁵

De ambos casos presentados previamente se observa que se generaron costos adicionales importantes causados por la no consideración o inapropiada consideración de la durabilidad del concreto, por construir sin conocer realmente todos los factores y circunstancias particulares del proyecto. En el caso de la planta fundidora el propietario optó por construir mejor una nueva planta, esta vez diseñada, especificada, y construida por especialistas del concreto. En el caso del hotel el propietario decide por realizar una ampliación y remodelar con un concreto durable la zonas afectadas. La moraleja es que un problema netamente técnico como es la durabilidad tiene alcances económicos relevantes de no detectarse a tiempo los problemas.

Para realizar un análisis objetivo y realista se deben estimar los costos y riesgos futuros que pueda tener una obra o estructura y trasladarlos al valor presente. Con esta evaluación se pueden tomar decisiones relacionadas con la construcción y/o reparación, así como definir los criterios de diseño de concreto que se empleará. El análisis de costos se puede aplicar tanto a obras nuevas como a remodelaciones o ampliaciones.

Normalmente en la evaluación de costos se considera al concreto como un material que no requiere mantenimiento y que tiene una larga vida útil. En la práctica se ha visto que debido a esta aseveración no se consideran los costos por reparaciones o mantenimiento en el precio unitario del producto de las obras. Por lo que al presentarse problemas de durabilidad y que no se detectan oportunamente se llega al caso extremo de mantenimientos mayores, que implican erogaciones no consideradas en la evaluación del proyecto. Estos problemas de durabilidad son *“resultado de emplear productos en cuyo diseño no se consideran las condiciones de exposición y servicio a las que van a ser sometidos, la elaboración del concreto se realiza en forma artesanal, sin ningún control de calidad, y en su colocación no se atiende a los procedimientos constructivos recomendados para las actividades que se han de ejecutar”*¹⁴⁶.

¹⁴⁵ URIBE R. & FLORES, J. *Infraestructura de Concreto Armado: Deterioro y Opciones de Preservación. Cap. 10. Durabilidad del Concreto en el Análisis de Costos de un Proyecto.* 133 –139. IMCYC, 2001.

¹⁴⁶ URIBE AFIF r. & FLORES MARTINEZ, J.J. *Durabilidad del Concreto y Análisis de Costos. Construcción y Tecnología* p. 46-53.

Como profesionales de la construcción nuestro deber es lograr una estructura que primeramente sea segura, funcional y económica, por lo que para garantizarlo debemos identificar todas las variables y riesgos, de este modo se podrá realizar un proyecto con la ingeniería básica y posteriormente de detalle.

La durabilidad es una propiedad congruente con estos tres requisitos, una estructura durable, desde el punto de vista de ingeniería de materiales, es por definición segura, porque tiene un menor riesgo de presentar algún tipo de ataque ante un ambiente agresivo; es funcional porque fue diseñada para brindar un servicio prolongado, y es económica, porque a largo plazo permite una menor inversión y economía de recursos.

VIII.3. DURABILIDAD DE NUEVOS MATERIALES

Resulta particularmente difícil realizar afirmaciones acerca de la durabilidad de un nuevo material, debido a que se relaciona con el desempeño a largo plazo que este tenga, en un ambiente específico y bajo condiciones de servicio particulares. Para lograr un mayor conocimiento de la durabilidad de un material existen las siguientes consideraciones:

1. Puede ser evaluada usando las pruebas de durabilidad acelerada y que han sido estandarizadas durante varios años, en las cuales las muestras están usualmente expuestas a soluciones agresivas concentradas bajo temperaturas extremas, carga u otras condiciones. Se asume implícitamente que las condiciones de laboratorio representan las condiciones de campo bastante bien y que sólo el mecanismo destructivo es acelerado.
2. Se puede usar el material en estructuras experimentales y temporales a escala real, así que el comportamiento del material puede ser bien documentado cuando estas estructuras temporales no estarán más en uso.
3. Se recomienda usar un nuevo material en pequeños proyectos donde los riesgos financieros son menores, a fin de generar experiencia y confianza en la sustentabilidad del material para utilizarlo consecutivamente en proyectos más elaborados.
4. Permite el estudio de causas de falla de materiales similares o relacionados en ambientes parecidos y bajo condiciones de carga semejantes, con el objetivo de identificar y entender el mecanismo del proceso de falla.

De la comparación de las propiedades fundamentales entre el material fallado y el nuevo, es posible encontrar que el nuevo material puede perfeccionarse más que el probado al inicio. Una aproximación más global consiste en tratar de obtener las oportunidades para usar todas estas consideraciones al mismo tiempo, con el fin de ganar confianza en la evaluación de la durabilidad del nuevo material.¹⁴⁷

VIII.4. RETOS DE LA DURABILIDAD DEL CONCRETO

En la durabilidad del concreto se involucran varios aspectos. Dada la importancia de la construcción en las economías de los países y el impacto que esta tiene en el desarrollo de los mismos, no es de extrañarse que la construcción, y en particular la construcción con concreto, llame la atención de diversos sectores.

La ingeniería civil y la construcción se enfrentan a nuevos retos para este siglo XXI que apenas comienza. La situación económica de los países y la preocupación por el deterioro del medio ambiente originado por la conducta humana ha tocado al ámbito de la construcción, hecho que es benéfico e irreversible. Los principales retos que tiene que enfrentar son los siguientes:

¹⁴⁷ Cfr. *PIERRE CLAUDE AITCIN*, High-Performance Concrete. Cap.17.p.458-460.

I. Desarrollo tecnológico. Por una parte el desarrollo tecnológico de otras áreas puede retroalimentar a la tecnología del concreto, por ejemplo, la química, con el concreto polimérico, resinas epóxicas, látex, y otros materiales empleados desde hace algunos años, los nuevos aditivos y el desarrollo de otros más potentes, pueden mejorar las propiedades químicas del propio cemento y del concreto. La microbiología es otra rama científica que apenas anuncia su entrada para apoyar a la tecnología del concreto. Por ejemplo, Ramachandran S.K. y sus colaboradores (2001) han reportado una biotecnología innovadora utilizando precipitación mineral inducida microbiológicamente, para componer al concreto. De sus pruebas experimentales Ramachandran concluye que el bacilo *pasteurii* incrementa la resistencia a la compresión en el mortero de cemento Pórtland.¹⁴⁸

Otra área puede ser la metalurgia, con el desarrollo de un acero más económico y resistente a la corrosión, aunque a la fecha sólo se tiene en proyectos de investigación. Otras áreas de investigación por desarrollar es el análisis de confiabilidad, es decir, modelos para mejorar la seguridad de una estructura dada, modelos matemáticos para los diversos ataques (sulfatos, congelamiento – deshielo, corrosión, etc).

El objetivo es generar nuevas ideas de otras áreas como la química, la biología, la metalurgia para aplicaciones creativas en la tecnología del concreto, hecho que puede tener efectos profundos y benéficos en la elaboración de concreto, incluyendo la renovación de nuevos métodos de pruebas, especificaciones y lineamientos.

La forma de hacer concreto a través de los años ha cambiado, desde su forma clásica el concreto se hacía con agua potable, arena, y gravas limpias y resistentes y sacos de cemento Pórtland. En la década de los 50's del siglo pasado las mezclas se dosificaban por volumen. En 1990 los materiales especificados para el proyecto del Gran Cinturón de Unión en Dinamarca fueron los siguientes: cemento Pórtland, cenizas, humo de sílice, y de 3 a 4 mezclas químicas, además de tener los cuidados necesarios para evitar la reactividad de los agregados. El cemento Pórtland especial tiene bajo contenido de C_3A , y un nivel máximo de C_3S , y el calor de hidratación se optimiza gracias a los dos materiales silicosos añadidos, todo ello para satisfacer el requerimiento de durabilidad de 100 años para el túnel y puente de concreto. Se requirió una permeabilidad al cloro mínima y una resistencia a los sulfatos máxima, sin importar el bajo contenido de cloro y de sulfatos de las aguas del Gran Cinturón y lo moderado del clima. Las mezclas químicas se agregaron para asegurar la resistencia al congelamiento, para evitar el retardo o la aceleración durante la fabricación y para proporcionar la trabajabilidad del concreto fresco y bajo contenido de agua que se requiere.¹⁴⁹

Esta ingeniería de materiales se aplicó en un gran proyecto de ingeniería en un país desarrollado en 1990, a la fecha (2004) continúan las investigaciones, nuevas técnicas se proponen, las mezclas de escoria de alto horno, los cementos con grandes contenidos de aluminio, los cementos con adherencia cerámicas, los métodos de refuerzo con fibras, recubrimientos epóxicos, aditivos a base de litio para restringir las reacciones álcali - agregado, etc., Todas ellas podrán parecer exóticas a primera instancia, sin embargo, pueden conquistar mercados en el futuro, principalmente porque ofrecen una economía de recursos.

Es indiscutible que es recomendable destinar más recursos a la investigación, algunos países desarrollados ya lo están haciendo (Canadá, la Unión Europea, Japón, Estados Unidos, etc.). En nuestro país se tiene una escasa investigación de materiales, existen entidades públicas y universidades que las realizan, pero con recursos muy limitados. En el ámbito privado las empresas cementeras y concreteras son las únicas que están realizando investigaciones.

¹⁴⁸ Mayor información en. RAMACHANDRAN SANTHOSH K. *et.al.* Remediation of Concrete Using Micro-Organisms. ACI Materials Journal. V.98. January – February, 2001.p.3-9.

¹⁴⁹DORN, Huna I. Durabilidad del Concreto y Economía de Recursos. Construcción y Tecnología, Marzo,1992p. 46-48 (1ª parte) y abril, 1992, p. 44 - 46 (segunda y última parte).

2. Control de calidad. La tendencia es que cada vez se realice el control de calidad a través de un monitoreo continuo a una estructura para observar sus propiedades físico – químicas, como en el caso de la planta de aluminio, debido a que la mecanización y racionalización de las construcciones y la fabricación industrial de elementos de concreto prefabricado han hecho de la supervisión clásica insuficiente e imposible como medio de control de calidad. El monitoreo puede convertirse en la prueba más estricta en toda la historia del concreto. La vigilancia clásica se reemplazarán por un registro instrumental adecuado y sensible.

La producción del concreto y la construcción cada vez aceptarán más los modernos sistemas de control de calidad, como el ISO 9000 o los propuestos por el ACI. El ACI 121R-98. propone una guía para el desarrollo e implementación de un sistema de calidad en construcciones de concreto, en tanto el ACI 311.1R-99 es una guía para asistir e instruir a inspectores de construcciones de concreto.

3. Economía de recursos: La perspectiva y visión de la construcción actual es distinta a la de hace algunos años, las sequías en algunos países han mostrado que el agua no es inagotable, las compañías de cemento se han percatado de que las canteras no se amplían constantemente, y la carencia de agregado de buena calidad ha obligado a distancias más largas de transportes que requieren más tiempo y elevan los costos. Por lo que otro reto es la economía de recursos.

Los tiempos actuales conlleva a la economía de recursos, a maximizar su beneficio y optimizar su desempeño. La poca durabilidad del concreto es de interés público; la falla de estructuras ha causado afectaciones a la industria de la infraestructura y a la vivienda. Se ha avanzado en durabilidad porqué se han tenido experiencias dolorosas para la infraestructura, como enuncia correctamente Uribe (1999): “ *El valor de la experiencia obtenida en el pasado nos permite generar las soluciones para nuestros problemas futuros*”¹⁵⁰

La construcción de concreto es indispensables para las obras de infraestructura, industria y vivienda, con lo cual se satisfacen los requerimientos de la población, por lo que reafirma la necesidad de proveer un concreto adecuado a las construcciones, una tecnología de materiales adecuada y con un conocimiento científico que la soporte. Idorn en 1990 anunció “*El concreto certificado para una mayor durabilidad que sea elaborado con la calidad requerida, será un elemento básico en el desarrollo de las políticas de economía de recursos en todo el mundo*”¹⁵¹ y Mehta la ratifica en el 2001¹⁵²

La tendencia mundial es alcanzar un concreto óptimo mediante un mejor control de calidad y una tecnología del concreto avanzada, soportada con un mayor conocimiento científico. Una clave fundamental para ellos es la capacitación de los ingenieros civiles que construyen con concreto, aquellos que realizan el proyecto, las especificaciones, que están en la obra y que tiene el control de la misma, o que están en la planta de premezclado, aquellos que realizan o evalúan las pruebas y reciben los resultados del laboratorio de materiales.

El esquema de la certificación ha penetrado ampliamente en la industria de construcción como modelo a seguir. Actualmente las empresas concreteras, las cementeras, los laboratorios de materiales y algunas constructoras ya están certificadas o están iniciándola, sin embargo, todavía existe un porcentaje importante de empresas que no lo están. El objetivo a seguir es que todas las empresas y laboratorios de materiales involucrados en la construcción a mediano plazo cuenten con este respaldo.

¹⁵⁰ URIBE AFIF r. & FLORES MARTINEZ, J.J. *Durabilidad del Concreto y Análisis de Costos. Construcción y Tecnología* p. 46-53.

¹⁵¹ IDORN, Huna I. *Durabilidad del Concreto y Economía de Recursos. Construcción y Tecnología, Marzo, 1992p. 46-48 (1ª parte) y abril, 1992, p. 44 - 46 (segunda y última parte).*

¹⁵² MEHTA, Kumar p. *Reducing the Environmental Impact of Concrete. Concrete International. October, 2001.*

4. Reducir el impacto ambiental. De acuerdo a Hawken y sus colaboradores¹⁵³ sólo el 6% de flujo total de los materiales, algo así como 500 mil millones de toneladas al año, termina en productos deseados, mientras que la mayoría de los materiales vírgenes son regresados al ambiente en forma de desperdicios dañinos, ya sean líquidos, gaseosos o sólidos. Obviamente el desarrollo industrial en los últimos 200 años consideró una visión holística de largo plazo del impacto de los subproductos no deseados por la industria. La humanidad está aprendiendo que *“en un mundo finito el modelo de crecimiento ilimitado, el uso no restringido de recursos naturales y la contaminación ambiental no controlada es a final de cuentas una receta para la destrucción del mismo planeta”*.¹⁵⁴

Impacto ambiental del concreto: la producción mundial de concreto al año es de 1600 millones de toneladas, que contabiliza aproximadamente el 7% de la carga global del dióxido de carbono en la atmósfera. El cemento Pórtland no sólo es uno de los materiales más empleados en la construcción, es el responsables de una gran cantidad de gases de invernadero. La producción de una tonelada de cemento requiere aproximadamente de 4GJ de energía, y la manufactura del clinker de cemento Pórtland descarga aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera. La extracción de materias primas, como las arcillas y calizas, y combustible como carbón frecuentemente resulta en una deforestación excesiva y pérdida de suelos. Se estima que al año se consumen de 10 mil a 11 mil toneladas de arena, grava y roca triturada. El concreto también requiere de grandes cantidades de agua, se estima que el agua de mezclado requerida asciende anualmente a un billón de litros. La escasez de materiales durables también tiene consecuencias ambientales serias. El incrementar la vida de servicio de los productos es una solución sencilla y a largo plazo para preservar los recursos naturales de la tierra. Las estructuras de concreto normalmente se diseñan con una vida de servicio de 50 años, pero la experiencia ha mostrado que en ambientes urbanos o marinos algunas estructuras se deterioran a los 20 años. Freyermuth ha sugerido que la vida de diseño de las estructuras se incremente hasta 100 o 120 años y para puentes urbanos de al menos 150 años de vida de servicio. La tendencia hacia el diseño de la infraestructura basada en el costo del ciclo de vida no sólo maximiza el regreso del capital disponible, pero también los recursos naturales disponibles.¹⁵⁵

Sugerencias para reducir el impacto ambiental: el impacto ambiental de la industria del concreto puede reducirse a través del incremento de la productividad del recurso mediante la conservación de los materiales y de la energía para elaborar el concreto y por el mejoramiento de la durabilidad de los productos de concreto.

Conservación del cemento: la conservación del cemento es el primer paso en la reducción del consumo de energía y emisiones de gases de invernadero. Para incrementar la productividad del recurso se requiere que se minimice el consumo de cemento, mientras se debaten las demandas futuras para más concreto. Esta debe ser la primera prioridad para una industria de concreto viable. A excepción de los cementos Pórtland mezclados que contiene aditivos minerales, ningún otro cemento hidráulico parece satisfacer la colocación, endurecimiento, y características de durabilidad de los productos basados en cemento Pórtland. El consumo de cemento mundial para el 2010 se estima que alcance los 2 mil millones de toneladas y que existan suministros adecuados de subproductos cementantes y puzolánicos que puedan emplearse como sustitutos del cemento, entonces se elimine la necesidad de la producción de más clinker de cemento Pórtland. La industria cementera mexicana ha implementado medidas para la reducción del dióxido de carbono descargado a la atmósfera, sin embargo, la filosofía debe ser disminuir la descarga al máximo.

Conservación del agregado: En Norteamérica, Europa y Japón, cerca de dos tercios de desperdicios de construcción y demoliciones consisten de mampostería y escombros de concreto viejo.

¹⁵³ Citado por MEHTA, Kumar p. *Reducing the Environmental Impact of Concrete*. Concrete International. October, 2001.

¹⁵⁴ MEHTA, Kumar p. *Reducing the Environmental Impact of Concrete*. Concrete International. October, 2001.

¹⁵⁵ *Ibid.*

Este representa un oportunidad para la industria del concreto para mejorar la productividad del recurso mediante el uso de agregado grueso derivado de desperdicios de demolición y construcción. En algunas partes del mundo las arenas dragadas pueden ser procesadas como agregados finos. El reciclaje de los desperdicios en lugar del proceso de materiales vírgenes está siendo particularmente económico en los países donde la tierra es escasa y los costos de disposición de los desperdicios son muy altos. El agregado de concreto reciclado, particularmente los agregados de mampostería reciclados, tiene una porosidad más alta que el agregado natural. Por consiguiente, para una determinada trabajabilidad, los requerimientos de agua para elaborar concreto fresco tienden a ser más altas y las propiedades mecánicas del concreto endurecido de ven afectadas. El problema puede resolverse empleando mezclas de agregado natural o reciclado o por el uso de aditivos reductores de agua y ceniza volante en el concreto.

Conservación de agua. Hasta ahora el agua es abundante casi en cualquier parte y es usada libremente para todos los propósitos de la industria de la construcción. De hecho los Reglamentos y Normas de construcción recomiendan el uso de agua potable para mezclar y curar concreto, pero ahora la situación ha cambiado. Como uno de los consumidores industriales mayores de agua, es imperativo para la industria del concreto emplearla más eficientemente. El concreto premezclado emplea mucho agua para limpiar las ollas o tractocamiones del concreto premezclado. La mayoría del agua industrial reciclada puede usarse para elaborar concreto, al menos que se indique lo contrario por las pruebas, la que también se puede aplicar para el agua de curado y la de lavado de implementos (concreto premezclado). Se pueden tener ahorros considerable si en el curado con agua se emplean compuestos textiles que tiene un tejido absorbente de agua en el interior y una membrana impermeable en el exterior.

Incuestionablemente, el desafío que la industria del concreto encara para el siglo XXI es lograr un modelo sostenible de crecimiento. La tarea es formidable, pero las ideas y ejemplos de esta sección muestran que pueden lograrse mediante un cambio de paradigma de la cultura de una construcción acelerada a una cultura de conservación de energía y materiales.

VIII.4. CONCLUSIONES CAPITULARES

El reto de la tecnología del concreto es proyectar estructuras de concretos reforzado capaces de lograr vidas útiles superiores a las actuales. Lograr estructuras con mayor durabilidad y que aporten en su medida obras compatibles con el desarrollo sustentable. Alrededor del mundo se están haciendo investigaciones al respecto. Nuestro país debe impulsar esta investigación y aplicarla en el mediano plazo, con el único objetivo de que a largo plazo se logre efectivamente un desarrollo sustentable en la infraestructura nacional, y en general, en la industria nacional de la construcción. La meta está definida, hoy tenemos que dar el primer paso. La durabilidad del concreto constituye una solución de alto rango y un descubrimiento mayor para mejorar la productividad del recurso de la industria de la construcción. El conocimiento de los tópicos: evaluación de proyectos, retos de la tecnología del concreto, el impacto ambiental de la construcción, aspectos relacionados directamente con la durabilidad y con la construcción. es necesario para realizar construcciones con una economía de recursos económicos y naturales, lo que permitiría a largo plazo tener estructuras construidas con materiales capaces de lograr vidas de servicio prolongadas ante ambientes hostiles. La evaluación de proyectos es una herramienta útil para el ingeniería y para la sociedad en general, porque permite conocer el valor real de un proyecto.

El desarrollo de los nuevos proyectos de ingeniería deben ser integrales, es decir, que contemplen aspectos técnicos, económicos y ambientales. Los retos y desafíos aquí planteados tienen el objetivo de que en el presente y en el futuro se realicen acciones concretas para lograrlos. El desarrollo tecnológico, el control de calidad, reducir el impacto ambiental de la construcción y la economía de recursos son conceptos que solamente se entienden cuando existe una conciencia real de las acciones y repercusiones por transformar el ambiente de forma inteligente, con ingeniería civil bien planeada, con una construcción llevada a buen término y con un compromiso social.

CAPITULO VIII. EVALUACIÓN Y RETOS DE LA DURABILIDAD

.....	133
VIII.1. INTRODUCCIÓN.....	133
VIII.2. DURABILIDAD Y ANÁLISIS DE COSTOS.....	135
<i>VIII.2.A. PLANTA FUNDIDORA DE ALUMINIO</i>	<i>135</i>
<i>VIII.2.B. HOTEL EN ZONA COSTERA</i>	<i>136</i>
VIII.3. DURABILIDAD DE NUEVOS MATERIALES.....	138
VIII.4. RETOS DE LA DURABILIDAD DEL CONCRETO.....	138
VIII.4. CONCLUSIONES CAPITULARES.....	142

CONCLUSIONES

1. Es de importancia vital considerar las **condiciones del medio ambiente** para el diseño de una estructura de concreto. Dichas condiciones ambientales dependen de la posición geográfica y del carácter urbano, rural o industrial del lugar y de la obra, así como de las características del medio de contacto, que corresponden a las del suelo, el agua, o cualquier otra sustancia sólida, líquida o gaseosa que eventualmente esté en contacto con la estructura.
2. El **conocimiento de los aspectos de durabilidad del concreto** es un elemento importante para prevenir y enfrentar problemáticas durante el diseño y posterior proceso constructivo de una obra, así como la vida de servicio de la construcción..
3. La durabilidad del concreto está asociada con la **relación agua / materiales cementantes**, que representa un parámetro real que refleja su compactabilidad e impermeabilidad a ambientes agresivos.
4. La durabilidad del concreto debe considerarse en aquellas estructuras expuestas a condiciones desfavorables, o que por sus condiciones de servicio deban **ser diseñadas por durabilidad**.
5. La **congelación y deshielo** debe tomarse en cuenta en climas fríos, principalmente en estructuras expuestas a ciclos periódicos de congelamiento y deshielo, así como en pavimentos de concreto, donde se emplean sales descongelantes.
6. El **ataque químico** es importante cuando las estructuras estén expuestas a concentraciones químicas importantes. El **ataque de sulfatos** debe considerarse para estructuras expuestas a suelos o agua freática con sulfatos disueltos, como son estructuras de cimentación (zapatas, losas, cajones, pilotes, pilas) e instalaciones subterráneas. La **exposición al agua de mar** debe preverse en estructuras marinas, costeras o mar adentro, donde las concentraciones salinas dañan al concreto. Los **ataques de ácidos** es un problema muy particular, siendo importante en estructuras que tienen algún servicio en la industria química, fotográfica o plantas de tratamiento.
7. La **carbonatación** es un fenómeno que debe considerarse para estructuras situadas en zonas urbanas con altas concentraciones de bióxido de carbono (CO₂) y en construcciones destinadas a procesos de combustión, como centrales termoeléctricas, donde el efecto de la carbonatación debe considerarse para prevenir las consecuencias indeseables de la corrosión del acero de refuerzo y la consiguiente disminución de la durabilidad de las estructuras de concreto.
8. La **corrosión del acero de refuerzo** debe ser considerada en todas las estructuras de concreto reforzado. La afirmación anterior puede ser conservadora, sin embargo, el alto índice de ocurrencia justifica la medida anterior. Debe tenerse especial cuidado al respecto en estructuras expuestas a cloruros y a carbonatación. Es un fenómeno multifactorial para el cual se han ideado varias soluciones. Una herramienta importante para prevenirla es el espesor del recubrimiento y la impermeabilidad del concreto(relación agua / cemento baja).
9. De las soluciones propuestas para la **prevención de la corrosión del acero de refuerzo**, es necesario hacer una evaluación de su uso para cada proyecto. La aplicación de cada solución estará dada por las condiciones del proyecto u obra y el alcance económico del propietario.

10. Conviene difundir en la Industria Mexicana de la Construcción la importancia de **la durabilidad del concreto** en aquellas obras donde es necesaria; simultáneamente, indicar a los diferentes sectores: contratistas, ingenieros de campo, proyectistas, constructores, consultores, especialistas, etc., que el conocimiento del concreto atañe a todos, y no sólo a los ingenieros de materiales o de las industrias del cemento y del concreto, como actualmente ocurre en nuestro país. En la medida que seamos más conscientes de la diversidad de factores que interactúan en la construcción podremos diseñar y construir mejor, licitar un concurso con los precios justos, y podremos evitar situaciones difíciles para el gobierno, el propietario, y el constructor.

11. Si la **filosofía de la durabilidad** penetra en el gremio de la construcción se tendrán dos ventajas importantes:

- a) mejor aprovechamiento de los materiales empleados en la construcción;
- b) propiciará un mejoramiento del medio ambiente y el desarrollo sustentable.

Los recursos que de otro modo se hubieran invertido en rehabilitaciones o reparaciones se pueden destinar a nueva infraestructura o a otras necesidades de igual importancia. El objetivo es lograr una mayor vida útil, y disminuyendo con ello el impacto urbano y costos operativos por la realización de trabajos de mantenimiento. Los costos operativos causados por trabajos de mantenimiento pueden ser importantes en varios tipos de construcciones, por ejemplo, fábricas, hoteles, plantas hidroeléctricas, plataformas marítimas, plantas de tratamiento, casas habitación o residenciales, etc.

12. El lector atento a este escrito se habrá percatado de que la durabilidad del concreto es **un área multidisciplinaria** que requiere de varios campos del conocimiento, así como de varios profesionales. Se requieren conocimientos de tecnología del concreto, ingeniería estructural, química, biología, electroquímica, e incluso algunos conocimientos de geología por los agregados. El dominio y conocimiento de estos aspectos enriquecen el quehacer del ingeniero civil, quién probablemente se encuentre ocupado en otras áreas. El punto trascendental es que el ingeniero civil tenga presente estos conocimientos. Por una parte se encuentra el ingeniero que esté enfocado desde un punto de vista práctico y constructivo, el cual al detectar un problema o agente de riesgo al concreto acuda al especialista en el área. Por otra parte se encuentra el especialista en tecnología del concreto, que puede ser aquél profesionista que domine éste campo de conocimiento técnico, y que con sus conocimientos aporte una solución o mejora al proyecto u obra.

13. Para una **mejor asimilación de la durabilidad del concreto** en México se requieren varios puntos:

- a) Mayor difusión del tema y concientización de su importancia en la construcción.
- b) Mayor inversión en investigación de nuevos productos y materiales
- c) Motivar el interés por parte del gremio constructor y en los inversionistas.
- d) Incentivar y difundir el uso de sistemas que mejoren el desempeño del concreto ante su entorno mediante requerimientos técnicos, en aquellas zonas y estructuras en que se requieran, a través de las bases técnicas en licitaciones.

14. En el campo normativo conviene establecer un **mínimo de vida útil**, dependiendo del tipo de estructura e importancia, como se realiza en otros países a través de sus reglamentos de construcción. La ventaja de esta medida es incentivar la **aplicación del criterio de durabilidad** para aprovechar las ventajas que este ofrece. Otra ventaja es que al tomar esta medida se sirve a un interés colectivo y no necesariamente a intereses exclusivamente particulares.

15. Con el objetivo de **evitar el deterioro prematuro** en las estructuras de concreto en su etapa de diseño, se deben considerar los aspectos de durabilidad y no exclusivamente los de resistencia mecánica ($f'c$).

16. Debido a los constantes problemas de durabilidad se requiere **mejorar la calidad de los procedimientos constructivos**, e incrementar la supervisión (ya que estos influyen directamente en la disminución de la durabilidad de estructuras de concreto), e instalar un monitoreo periódico en aquellos proyectos de importancia.
17. Con la **tecnología actual** los ingenieros pueden estar confiados en que con el uso de un buen diseño, buenas prácticas constructivas y uno o más sistemas protectores de corrosión una estructura de concreto puede ser construida para afrontar los ambientes agresivos más extremos por algunos años y con poco mantenimiento.
18. Con el **mejoramiento de la especificaciones y un mantenimiento adecuado**, la probabilidad de realizar construcciones y mantenimientos con un valor presente neto cada vez más bajo irá incrementándose.
19. La tecnología del concreto continua desarrollándose; se realizan continuamente investigaciones al respecto. Por lo que una recomendación muy útil y que nunca perderá validez es la **capacitación constante** que pueda tener el ingeniero civil, ya sea estructurista, constructor o investigador de materiales; su **actualización y enriquecimiento de la tecnología contemporánea** será su mejor arma para realizar estructuras seguras, durables, estables y económicas.
20. Es necesario que se siga desarrollando la tecnología del concreto y en particular el de la durabilidad, así como el desarrollo de métodos y sistemas de diagnóstico, protección y reparación y control, los cuales son de vital importancia, toda vez que con estos se pueden **identificar oportunamente los daños** y de este modo ahorrar recursos económicos, que de otra forma se destinarían a reparaciones o rehabilitaciones.
21. La **tecnología y la difusión** de esta juegan un papel preponderante ante las nuevos esquemas, sin embargo, es necesario y fundamental crear conciencia en el ingeniero mexicano, para que pueda prevenir, identificar y reparar daños que afectan la durabilidad de las estructuras, cuando se tenga un riesgo determinado. La tarea es clara, primeramente es necesario hacer conciencia en el recurso humano, y una vez realizado este paso, proveerle de las herramientas tecnológicas y capacitación necesaria y suficiente para enfrentar y prevenir daños que afectan la durabilidad.
22. La tendencia mundial es la **optimación de recursos** y la participación cada vez más activa de las industrias o sectores económicos a participar en el **proceso de desarrollo sustentable**. En primera instancia parecería que la durabilidad está en contra de este precepto, debido a que normalmente la estructuras en la que se considera aspectos de durabilidad tienden a presentar un mayor costo inicial. Sin embargo, sucede lo contrario, la durabilidad cumple perfectamente con el esquema de ahorrar recursos, solamente que con una perspectiva de largo plazo. En un edificio inteligente, por ejemplo, se podrán tener los mejores acabados e instalaciones más modernas, con tecnología avanzada en sistemas contra incendio, iluminación, distribución de espacios, etc., pero esta gran inversión en materiales, horas - hombre se vería severamente dañada si la estructura en cuestión presentara o desarrollara problemas en 5 o 10 años posteriores a su construcción. Si una parte importante de los elementos estructurales presentan corrosión, si la cimentación sufre un ataque químico o se realiza la misma con agregados propensos a desarrollar alguna reacción álcali - agregado.
23. Es precisamente en este punto donde el **criterio profesional** tiene cabida. Se debe dar el valor justo a cada etapa del proceso constructivo y a cada material empleado, proporcionando la calidad especificada de los materiales y con una mano de obra calificada. Se debe tener siempre presente que el objetivo de una estructura es cumplir con la finalidad para la que fue diseñada y que pueda operar satisfactoriamente durante toda su vida de servicio.

24. El impacto de la **durabilidad en la infraestructura pública y privada** es importante. Se debe tener en cuenta que de acuerdo con el tipo de estructura y el servicio que brinde, el diseñador deberá contemplar determinado diseño y detalle del mismo, características y tipos de materiales, sistema de refuerzo empleado (presforzado o no presforzado), recubrimientos con o sin sistemas especiales, etc. Con las herramientas que brinda el conocimiento actual de la durabilidad se puede disminuir el valor presente neto de las construcciones actuales y ahorrar materiales a futuro, contribuyendo de esta forma la industria de la construcción a un **desarrollo sustentable**.
25. El **reto de la tecnología del concreto** es proyectar estructuras de concreto reforzado capaces de lograr vidas útiles superiores a las actuales, con mayor durabilidad y que aporten en su medida obras compatibles con el desarrollo sustentable. Alrededor del mundo se están haciendo investigaciones al respecto. Se debe **impulsar la investigación en nuestro país** y aplicarla en el mediano plazo, con el único objetivo de que a largo plazo se logre efectivamente un desarrollo sustentable en la infraestructura nacional, y en general, en la industria nacional de la construcción. La meta está definida, hoy tenemos que dar el primer paso.
26. La evaluación de proyectos y los retos de la tecnología del concreto: disminuir el impacto ambiental de la construcción, control de calidad y economía de recursos se relacionan directamente con la durabilidad y con la construcción. El conocimiento de estos tópicos es necesario para **realizar construcciones con una optimación de recursos económicos y naturales**, lo que permitiría a largo plazo tener estructuras construidas con materiales capaces de lograr vidas de servicio prolongadas ante ambientes hostiles. La evaluación de proyectos es una herramienta útil para el ingeniería y para la sociedad en general, porque permite conocer el valor real de un proyecto.
27. El desarrollo de los nuevos **proyectos de ingeniería** deben ser **integrales**, es decir, que contemplen aspectos técnicos, económicos y ambientales.
28. Los retos y desafíos aquí planteados tienen el objetivo de que en el presente y en el futuro se realicen **acciones concretas** para lograrlos. El desarrollo tecnológico, el control de calidad, reducir el impacto ambiental de la construcción y la economía de recursos son conceptos que solamente se entienden cuando existe una **conciencia real de las acciones y repercusiones por transformar el ambiente de forma inteligente**, con ingeniería civil bien planeada, con una construcción llevada a buen término y con un compromiso social.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS BÁSICOS Y DE CONSULTA

- ACCIÓN SOBRE LOS AGENTES QUÍMICOS Y FÍSICOS SOBRE EL CONCRETO. SANJUÁN BARBUDO M.A. & CASTRO BORGES P..PRIMERA EDICIÓN. IMCYC, MÉXICO, 2001.
- CORROSION FOR SCIENCE AND ENGINEERING. K.R. TRETHERWEY AND J. CAHMBERLAIN, SECOND EDITION, SINGAPORE, 1995.
- CONCRETE CONSTRUCTION ENGINEERING HANDBOOK, EDWARD G. NAWY. CRC PRESS, 1997.
- CONCRETE CORROSION, CONCRETE PROTECTION. IMRE BICZÓK, AKADEMAI KIADO, BUDAPEST, HUNGARY, 1964.
- CONCRETE MARINE, MARSHALL A.L. VAN NOSTRAND REINHOLD, USA, 1990.
- CONCRETE, STRUCTURE, PROPERTIES AND MATERIALS. P. KUMAR METHA & PAULO J.M. MONTEIRO, 2 ND EDITION, PRENTICE HALL, 1993
- CONCRETE STRUCTURES: MATERIALS, MAINTENANCE AND REPAIR. DENISON CAMPBELL - ALLEN AND HAROLD ROPER, CONCRETE DESIGN & CONSTRUCTION SERIES. LONGMAN SCIENTIFIC & TECHNICAL, 1991.
- CORROSION FOR SCIENCE AND ENGINEERING 2ND EDITION. K.R. TRETHERWEY, J.J. CHAMBERLAIN. EDIT. LONGMAN, 1995. Págs. 13-17 y 19, 325-326, 399-403.
- COST-EFFECTIVE ENHANCEMENT OF DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES BY INTELLIGENT USE OF STAINLESS STEEL REINFORCEMENT. KNUDSEN.A.JENSEN F.M. ,KLINGHOFFER, O. & SKOVSGAARD. CONFERENCE ON CORROSION AND REHABILITATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, FLORIDA, E.E.U.U.DICIEMBRE,1998
- DURABILIDAD DE CONCRETOS ESTRUCTURALES. MENDOZA C. J. FUENTES G. A. L. Y. FARFÁN J.C. INSTITUTO DE INGENIERÍA. UNAM. INFORME PREPARADO PARA LA SECRETARIA GENERAL DE OBRAS DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL.2000.
- DURABILITY DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES. REPORTR OF RILEM TECHNICAL COMMITTEE 130-CSL. SARJA & E. VESIKARI EDIT. E & FN SPON..FIRST EDITION, GREAT BRITAIN 1996.
- DURABILIDAD DEL CONCRETO. MEMORIA DEL SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO ORGANIZADO POR LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN. ED. RAYMUNDO RIVERA V. MÉXICO, 1993.
- DURABILITY OF CONCRETE. ACI SP-145THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE, ED V.M. MALHOTRA.. NICE FRANCE, 1994.
- DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE IN AGRESSIVE MEDIA. S.N. ALEKSEEV, F.M. IVANOV, S. MODRY, P. SCHIESEL. RUSSIAN TRASLATION SERIES A.A. BALKEMA PUBLISHERS, 1993.
- DURABLE CONCRETE STRUCTURES, DESIGN GUIDE, COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON.ED. THOMAS TELFORD SERVICES LRD.GREAT BRITAIN. 2ND EDITION, 1989, REISSUED, 1992.
- ESTUDIOS DE CORROSIÓN DE PUENTES DE CONCRETO PRE-ESFORZADO. CARRION MIRAMONTES F. C., HERNANDEZ RIVERA J. Y MARTINEZ MADRID M. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. SCT, QRO. MÉXICO, 1999.
- FREEZING AND THAWING OF CONCRETE- MECHANISMS AND CONTROL, WILLIAM A. CORDON. ACI, USA, 1966.
- GALVANIZED REINFORCEMET CONCRETE – II. INTERNATIONAL LEAD ZINC RESEARCH ORGANIZATION, INC. (ILZRO) NEW YORK, MAY. 1981.
- HIGH-PERFORMANCE CONCRETE AITCIN, PIERRE CLAUDE, EDIT. E & F SPON, LONDON, G. B.1998.
- INFRAESTRUCTURA DE CONCRETPO ARMADO: DETERIORO Y OPCIONES DE PRESERVACIÓN. COORDINADOR: CASTRO BORGES, PEDRO. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A. C. 2001.
- MANUAL DE INSPECCION, EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DE CORROSION EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo. Subprograma XV. Corrosión / Impacto Ambiental sobre materiales. DURAR. RED TEMÁTICA XV. B. DURABILIDAD DE LA ARMADURA.2ª Ed. Julio, 1998.
- MANUAL DE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD - INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM. (1994). SECCIONES 1 Y 3. ED. LIMUSA. MÉXICO, 1994.
- TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. NEVILLE A.M. Y BROOKS J.J.(1998). TRADUCCIÓN DE CONCRETE TECHNOLOGY. ED. TRILLAS. MÉXICO.

NORMAS:

- ACI 121R-98 Quality Management System for Concrete Construction
 ACI 201.2R-92(Reapproved 1997) Guide To durable Concrete. ACI Manual Of Concrete Practice 2000 Part 1, Materials and General Properties of Concrete.
 ACI 222R-96 *Corrosion of Metals in Concrete*. ACI Manual Of Concrete Practice 2000.
 ACI 311. 1R-99 *Manual of Concrete Inspection . Ninth edition*.
 ACI 515.1R-79(revisited 1985). *A guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, protective, and Decorative Barrier Systems form Concrete*. ACI Manual Of Concrete Practice 2000 Part 3. Special Topics.

ARTICULOS TECNICOS:

- ADAMS Nicholas and STOKES David B. Using advanced Lithium Technology to Combat ASR in Concrete. *Concrete International*. August, 2002.p.99-102.
- ALLYN Mark. Jr. FRANTZ Gregory C. Corrosion Tests with Concrete Containing salts of Alkenyl - substituted Succinic Acid. *ACI Materials Journal*.. Vol. 98. no. 3. May-June, 2001.
- AL MOUDI OMAR S.B. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended cements Exposed to sulfate Environments. *Building and Environment*, Vol.33. no.1.p.53-61.1998.Elsevier Science. Great Britain.
- ALMERAYA CALDERON F. TIBURCIO C. G. MARTINEZ VILLAFANE A. Monitoreo y Control de la Construcción en Estructuras de Concreto. *Revista Construcción y Tecnología*, Octubre, 1998. p. 22-26.
- BAGHABRA Omar Saeed & AMOUDI Al. *Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended Cements Exposed to Sulfate Environments*. -Building and Environment Vo. 33 No.1pp.53-61,Great Britain,1998.
- BAWEJA D. ROPER H. & SIRIVIVATNANON. V. Specification of Concrete for Marine Environments: a Fresh Approach. *ACI Materials Journal*. V. 96 No.4, July-August, 1999.
- BLAGA A. Y BEAUDOIN J.J. Polymer Concrete. CBD –242. *Canadian Building Digest*. Institute for Research in Construction. <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd242e.html>. Fecha de consulta: 08/06/03.
- BROWN M.C., WEYERS R.E. SPRINKEL M.M. Effect of Corrosion-Inhibiting Admixtures on Material Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*.. Vol. 98. no. 3. May-June, 2001.
- BUCHAS JUAN Y BUCHAS FOTIO. Evaluación , Mantenimiento y Durabilidad de Estructuras Hidráulicas. *Construcción y Tecnología*, Mayo, 1999. p. 34-44.
- BUFFENBARGER Julie K. Durability of Concrete Structures. Emphasis on Corrosion and Reaching Specified Services Lives with Corrosion inhibitors. *Concrete Technology Update*, Issue no.1. July, 1998. Master Builders technologies, Inc. [http://mbt-la.com/MB/static/Tech Articles](http://mbt-la.com/MB/static/Tech%20Articles). Consultado el 06/02/2002.
- CASTRO BORGUES P. y CASTILLO R. M. Corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Revista Construcción Y tecnología*, Agosto, 1995. p. 28-33.
- CORR David J., MONTEIRO Paulo J.M, KURTIS Kimberly E. and DER KIUREGHIAN Armen. *Sulfate attack of concrete: Reliability Analysis*. *ACI Materials Journal*. V. 98 No.2, March - April 2001.
- EDISON, Michael P. Cemento Modificado con Látex. *Revista Construcción y Tecnología*, Marzo,1994. V. Vino.70. p.12 – 18.
- EVERETT Lyndon y TREADAWAY Kenneth. Corrosión del refuerzo en el Concreto. *Revista IMCYC*. Vol. 19. no. 120. ABRIL, 1981. 53-57.Trad. *Revista BRE news*. No. 50,1979. Inglaterra.
- GAIDIS James M. & ROSENBERG Arnie M. Avoiding Corrosion Damage in reinforced Concrete. Corrosion inhibiting admixtures protect Steel reinforcing. *Concrete International*. November 2001.p.80-83.
- GOLTERMANN Per. Chloride Ingress in Concrete Structures: Extrapolation of Observations. *ACI Materials Journal*. V. 100 No.2. March - April 2003.
- HARAN B.S., POPOV B.N. PETROU.M.F. & WHITE R.E. Studies on Galvanized Carbon Steel in Ca(OH)₂ Solutions. *ACI Materials Journal*. V. 97 No.4 , July-August, 2000.
- HAYNES Harvey. Sulfate Attack: on Concrete: Laboratory versus Field Experience. *Concrete International*. July 2002. p.64-70.
- HARBOE M. Edward. "Resistencia del Concreto a los Sulfatos: experiencias de campo".en la *Revista IMCYC*, VOL.21, NUM. 144, Abril, 1983.Traducción. publicación especial no. 77 ACI.
- HASPARYK N.P. MONTEIRO P.J.M. CARASEK H. Effect of Silica Fume and Rice Husk Ash on Alkali-Silica Reaction. *ACI Materials Journal*. V. 97 No.4, July-August, 2000.
- HIME William G & MATHER. Bryant. *Sulfate attack, or is it?*, *Cement and Concrete Research* 29(1999),p. 789-791.Gr.
- HOLLAND Terence C. Corrosion protection for reinforced concrete. *Concrete Construction*, March, 1992. Vol. 37 no.3.
- HUANG Wei-Hsing. Improving the properties of cement –fly ash grout using fiber and superplasticizer. *Cement and Concrete Research*. 31.(2001) , 1033 – 1041.

- IDORN Gunna M. Durabilidad del concreto y economía de recursos. Construcción y Tecnología, Marzo, 1992. primera parte. p. 46-48.
- IDORN Gunna M. Durabilidad del concreto y economía de recursos. Construcción y Tecnología, Abril, 1992. segunda y última parte. p. 44-46.
- KNUDSEN A., JENSEN F. M., KLINGHOFFER, O. & SKOVSGAARD T. Cost Effective- Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement. Conference on corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, Florida, december8-11,1998.http: www.arminox.com/images/orlando_paper.pdf. Fecha de consulta: 08/05/03.
- KURTIS Kimberly E., MONTEIRO Paulo J.M., and MADANAT Samer M. *Empirical Models to predict concrete expansion caused by sulfate attack*. ACI Materials Journal. V. 98 No.2, March - April 2001.
- LAMOND Joseph F. Diseñar Para Obtener Durabilidad. Construcción y Tecnología, Noviembre, 1998. p. 22-25.
- LOUZILI A. AL QADI I.L. DIEFENDERFERB.K. Effects of Nitrite –Based Corrosion Inhibitor on Concrete’s Rapid Chloride Permeability and its Dielectric Properties. ACI Materials Journal. V. 97 No.4, July-August, 2000.
- MALHOTRA V. Mohan, ZHANG Min-Hong, READ Paul H., and RYELL John. *Long term Mechanical properties and durability characteristics of high-Strength/High-performance Concrete incorporating supplementary cementing materials under outdoor exposure conditions*. ACI Materials Journal. V.97,No. 5, September-October 2000.
- MBESCA Michael & PERA Jean. Durability of high-Strength Concrete in ammonium Sulfate Solution. Cement and Concrete Research. 31 (2001),p. 1227.-1231.
- McCARTER John and CHRISP Malcolm. Monitoring Water and Ionic penetration into Cover Zone Concrete. ACI Materials Journal. V. 97 No.6, November – December 2000.
- MENA FERRER, Manuel, Reacción álcali – sílice en el concreto: causas, efectos y medios de prevención. en la Revista IMCYC, VOL.21, NUM. 148, Agosto, 1983.p. 17-31.
- METHA Kumar. Reducing the Environment Impact of Concrete. Concrete can be durable and environment friendly. Concrete International. October, 2001.p. 61-66.
- MOHAMMED T.U. HAMADA H. & YAMAJI T. Alkali-Silica Reaction-Induced Strains over Concrete Surface and Steel Bars in Concrete. ACI Materials Journal. V. 100 No.2, March–April, 2003.
- MONTEIRO Paulo J.M. SHOMGLIN K. , WENK H.R., HASPARYK N.P. Effect of Aggregate Deformation on Alkali-silica Reaction. ACI Materials Journal. V. 98 No.2, March-April, 2001.
- NEVILLE. Adam. Corrosión del acero de refuerzo en el concreto. Revista IMCYC. Vol.22 num.162. Octubre, 1984. p. 35-39. Traducción. Revista Concrete. Vol.17, núm.6, junio, 1983.
- OTSUKI N. MIYAZATO S. DIOLA N.B. SUZUKI H. Influences of Bending Crack and Water Cement Ratio on Chloride –Induced Corrosion of Main Reinforcing Bars and Stirrups. ACI Materials Journal. V. 97 No.4, July-August, 2000.
- PARK Young Shik , SUH Jin-Kook, LEE Jae-Hoon, SHIN Young-Shik .*Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment*. Cement and Concrete Research 29(1999),p. 1397-1402.
- PERKINS H. Philip. Resistencia a la corrosión de estructuras sanitarias de concreto. Revista IMCYC. Vol.19 num.128. Diciembre, 1981.p. 21-32.Traducción Revista Concrete International & Construction. Vol.3 núm.4, abril, 1981.
- QING Chun Li. Corrosion Initiation of Reinforcing Steel in Concrete under Natural Salt Spray and >Service Loading –Results and Analysis. ACI Materials Journal. V. 97 No.6, Novermer-December,2000.
- RAMACHANDRAN S.K. RAMAKRISHNAN V. & BANG S. Remediation of Concrete Using Micro-organisms. ACI Materials Journal. V. 98 No.1, January-February, 2001.
- ROMERA Luis E. & HERNÁNDEZ Santiago. Modeling an Arch Dam Suffering from Alkali-aggregate Reaction. Concrete International. December, 2002p. 34-38.
- SHUPACK M. Diseño de Estructuras Marinas permanentes para evitar el Deterioro. Revista IIMCYC. SEPTIEMBRE, 1984. P. 23-33. traducción de la revista Concrete International, Design and Construction, Vol. 4. no. 3., march, 1982.
- TAYLOR Peter C. Designing Concrete for Durability- A case Study. Concrete International. May, 2002. p.39-43.
- URIBE AFIF R. & FLORESMARTINEZ J. J. Durabilidad del Concreto y análisis de costos. Cómo influye la durabilidad del concreto en el análisis de costos de un proyecto, sobre la base del concepto de vida útil. Construcción y Tecnología, Octubre, 1999. p. 46.53.
- VILLAREAL DOMÍNGUEZ Enrique. Corrosión y Protección Anticorrosiva del acero en puentes en el curso del siglo XXI. XIII Reunión Nacional de Vías terrestres. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías terrestres, A.C. Agosto, 1998. Oax. México.
- YOON S., WANG.K., WEISS J, SHAH S.P. Interaction between Loading, Corrosion , and Serviceability of Reinforced Concrete. ACI Materials Journal. V. 97 No.6, Novermer-December,2000.
- WEE T.H. SURYAVANSHI Arvind K., WONG S.F., RAHMAN Anisur A.K.M. *Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures*. ACI Materials Journal. V.97,No. 5, September-October 2000.

ZHANG Jieying , MONTEIRO Paulo J:M: and Morrison F. Noninvasive Surface Measurement of Corrosion Impedance of reinforcing bar in Concrete-part.1.: Experimental Results. ACI Materials Journal.. Vol. 98. no. 2. March-April, 2001.

DIRECCIONES DE INTERNET:

American Concrete Institute(ACI) dirección: <http://www.aci-int.org>

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., dirección: <http://www.imcyc.org.mx>

APÉNDICE A

ENCUESTA DE DURABILIDAD DEL CONCRETO

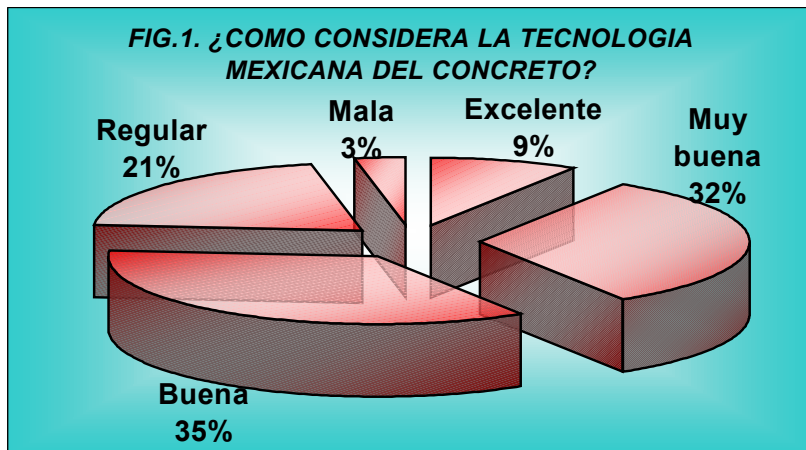
La encuesta se aplicó a profesionales de la construcción, principalmente ingenieros civiles y arquitectos, tanto de empresas, dependencias gubernamentales y universidades, durante el período de marzo a abril del 2002. La encuesta se aplicó por diversos medios: de modo personal, vía correo electrónico o fax. Se recabaron 34 encuestas contestadas de todos los cuestionarios enviados. Los resultados por pregunta son los siguientes:

1. ¿Considera que el concreto y su tecnología, es un elemento importante en la industria de la construcción?

La totalidad de los participantes respondió que **si**. Entre los motivos de que la Tecnología del Concreto es importante para la industria de la construcción destacan:

- Es un material ampliamente utilizado, cuya tecnología se ha desarrollado ampliamente y ha permitido múltiples aplicaciones en varios tipos de obras.
- Material resistente y económico, comparado con el acero y otros materiales.
- Por su uso y porque es el más empleado en la construcción
- Porque brinda seguridad, dignidad y confort en las diferentes estructuras
- Material de fácil adquisición y producción con características adecuadas.
- Por las posibilidades constructivas, difusión y precio.
- Porque el estudio del concreto se refleja en obras de mayor calidad, durabilidad menor costo y vida útil prolongada.

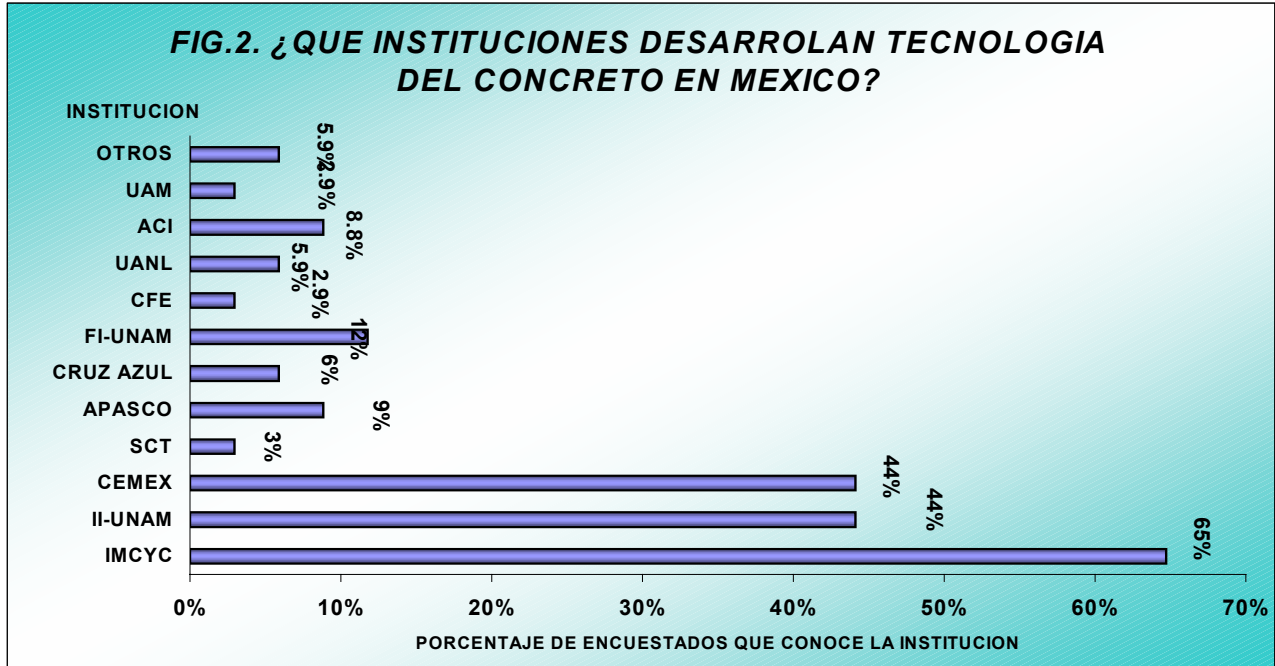
2. ¿Cómo considera la tecnología mexicana del concreto?



EVALUACION	NUMERO	PORCENTAJE
Excelente	3	9%
Muy buena	11	32%
Buena	12	35%
Regular	7	21%
Mala	1	3%
Pésima	0	0%
Nula	0	0%
Total	34	100%

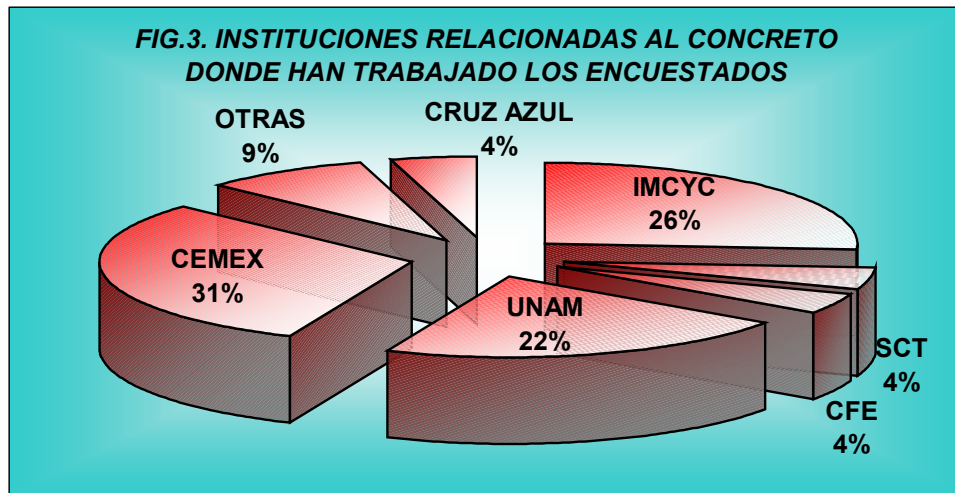
En términos generales se encuentra que los profesionales de la construcción tienen un buen concepto de la tecnología mexicana. **El 76% la califica entre buena y excelente.**

3. ¿Qué instituciones desarrollan tecnología del concreto en México?



INSTITUCION	NUMERO	PORCENTAJE
IMCYC	22	65%
II-UNAM	15	44%
CEMEX	15	44%
SCT	1	3%
APASCO	3	9%
CRUZ AZUL	2	6%
FI-UNAM	4	12%
CFE	1	2.9%
UANL	2	5.9%
ACI	3	8.8%
UAM	1	2.9%
OTROS	2	5.9%
SUMA	69	
TOTAL ENCUESTADOS	34	

4. ¿Has participado en alguna de ellas?



INSTITUCION	NUMERO	PORCENTAJE
IMCYC	6	24%
SCT	1	4%
CFE	1	4%
UNAM	5	20%
CEMEX	7	28%
OTRAS	2	8%
CRUZ AZUL	1	4%
ACI	2	8%
TOTAL	25	100%

De los encuestados el 47 % ha trabajado en instituciones relacionadas con la tecnología del concreto.

5. ¿Bajo que situación o cargo participaste en ellas?

- Instructor o Profesor (capacitación)
- Funcionario (Gobierno)
- Laboratorista
- Diseñador
- Gerente técnico de zona
- Investigador
- Gerente de Asesorías técnicas
- Conferencista
- Diseñador de normas
- Subgerente de área
- Presidente

6. ¿En tu empresa, dependencia, o institución existe algún especialista de concreto?

De los encuestados el 65% tiene en su empresa, dependencia o institución algún especialista de concreto.

7. ¿Considera útil una investigación encaminada a desarrollar soluciones para mejorar la durabilidad de los concretos elaborados para el nuevo Aeropuerto del Ex Lago de Texcoco?

LA TOTALIDAD DE LOS ENCUESTADOS CONSIDERAN QUE ES NECESARIO UNA INVESTIGACION ENCAMINADA A DESARROLLAR SOLUCIONES PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS CONCRETOS ELABORADOS PARA EL NUEVO AEROPUERTO DEL EX LAGO DE TEXCOCO

Las **RAZONES** son:

- Por el tipo de suelo y las exposiciones a las que se encuentra (intemperismo, ataque de ácidos, sulfatos, etc.). Ambiente agresivo.
- Porque reduciría los costos de mantenimiento e incrementaría la vida útil de las estructuras (que el proyecto sea rentable)
- Porque el Nuevo Aeropuerto debe construirse con concretos durables debido al ambiente agresivo
- Para evitar agrietamientos y desgastes prematuros
- Porque se requieren estructuras confiables y duraderas
- Para lograr un desarrollo tecnológico (es un reto tecnológico y profesional)
- Porque el ambiente del sitio es agresivo, y no puede emplearse un concreto convencional.
- Por la importancia y dimensiones del proyecto se requiere aplicar los mejores avances tecnológicos en todos los aspectos
- Por las características compresibles del suelo.
- Por los severos problemas en los pavimentos.
- Porque la durabilidad de las pistas es vital

8. ¿Qué aspectos técnicos o factores considerarías para realizar esta investigación?

- Concretos de alta resistencia a la tensión por flexión para pavimentos
- Concretos aligerados
- Resistencia del concreto a los sulfatos y al impacto
- Baja capacidad de carga del suelo
- Contracciones
- Estudio de mecánica de suelos y materiales pétreos
- Sustancias que atacan al concreto en el sitio para definir la mejor dosificación.
- Selección de materias primas y procesos constructivos
- Diseño de mezclas de concreto por durabilidad
- Condiciones de exposición y de servicio
- Concentraciones y tipos de sulfatos
- Condiciones ambientales
- Aditivos contra ataques químicos
- Calidad del agua y del suelo, ya que son los elementos en que se encontrará el concreto permanentemente en contacto.
- Ataque a los concretos por los sulfatos y la corrosión del acero de refuerzo por los cloruros (Presencia de sales en el subsuelo). Concretos resistentes a ambientes agresivos.
- Materiales disponibles en la zona, calidad de la mano de obra y fabricación, costos.
- Asentamientos, flexibilidad, rigidez, peso, resistencia a la fatiga.
- Composición química del cemento y la interacción con los minerales en el sitio (tipos de cemento).
- Agregados del concreto.

9. ¿Se ha considerado la durabilidad del concreto en alguna obra en que hayas participado?

El 68 % de los encuestados respondieron que si se ha considerado la durabilidad en las obras en que han participado.

10. ¿Has trabajado en una obra donde hayan tenido problemas con la durabilidad del concreto?

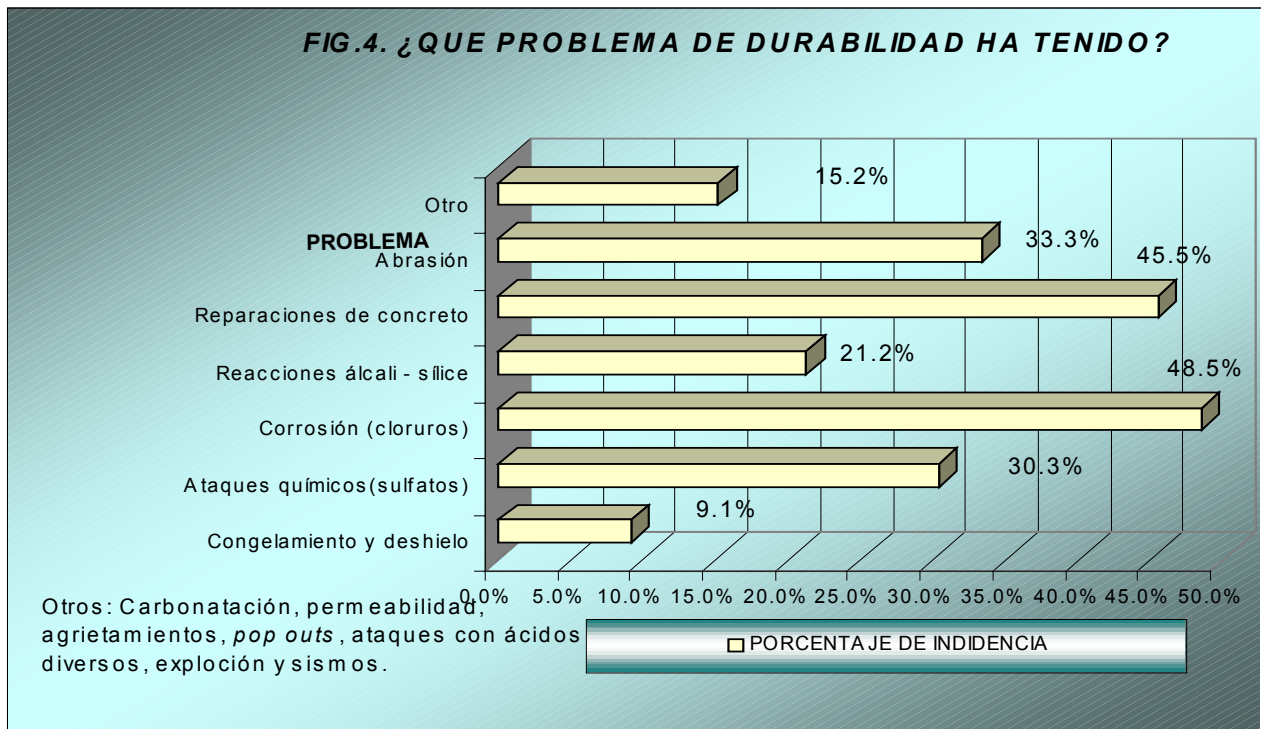
El 56% respondió que si había tenido problemas de durabilidad. De las preguntas 9 y 10 se observan los siguientes cuatro casos:

CASO	% DE INCIDENCIA
Profesionales que SI consideraron la durabilidad y NO tuvieron problemas con esta:	32.4%
Profesionales que SI consideraron la durabilidad y SI tuvieron problemas con esta:	35.3%
Profesionales que NO consideraron la durabilidad y SI tuvieron problemas con esta:	8.8%
Profesionales que NO consideraron la durabilidad y NO tuvieron problemas con esta:	23.5%

Aparentemente del cuadro anterior podemos inferir que la mayoría de los profesionales consideran la durabilidad del concreto (68%), sin embargo, debemos hacer hincapié que la encuesta fue contestada en su mayor parte por profesionales que conocen y/o dominan la tecnología del concreto, o por profesionales que han tendido una amplia experiencia y que han tenido problemas al respecto.

Se observa que el 41 % de los profesionales están en las fronteras SI-NO Y NO-SI, es decir, **tienen problemas de durabilidad**. Una investigación y difusión posterior del tema estaría enfocado a este sector, debido a que no conoce adecuadamente o no sabe implementar la tecnología del concreto y en particular los aspectos y cuidados de durabilidad en el diseño y/o proceso constructivo.

11. ¿Qué problemas has tenido al respecto?



ASPECTO O PROBLEMA	NUMERO	PORCENTAJE
Congelamiento y deshielo	3	9.1 %
Ataques químicos(sulfatos)	10	30.3%
Corrosión (cloruros)	16	48.5%
Reacciones álcali - sílice	7	21.2%
Reparaciones de concreto	15	45.5%
Abrasión	11	33.3%
Otro*	5	15.2%
* Otros problemas: carbonatación, ataque con ácidos, agrietamientos, pop outs y permeabilidad.		

De la evaluación de las respuestas se pudo concluir que un alto porcentaje de los encuestados han tenido problemas con las reparaciones del concreto, las cuales en su mayoría se deben a malas practicas constructivas o a desconocimiento del manejo, colocación y curado del concreto.

Por las condiciones climáticas del país, es obvio que el problema del congelamiento - deshielo ocupe un problema de baja incidencia.

Los problemas a cubrir para esta investigación pretenden ser **preventivas**, y no correctivas, como las reparaciones de concreto, por lo que nos enfocaremos a la **corrosión y al ataque de los sulfatos, aspectos que el 48.5 % y el 30.3 % de los encuestados ha encontrado problemas**. El problema de la abrasión no se considera por las características del proyecto, aunque para la durabilidad del concreto es un aspecto que se requiere profundizar y difundir más, debido a la alta incidencia en las obras de concreto.

12. ¿Qué medidas consideraría para reducir el ataque de sulfatos en el concreto?

- Selección y uso de cementos especiales (resistentes a sulfatos)
- Protección con capas impermeabilizantes (membranas, pinturas, etc.). Mantenimiento constante (impermeabilizar cada 3 años).
- Evitar agrietamientos.
- Diseñar un concreto denso, poco permeable y que no se microfisure o fisure por procesos constructivos
- Mayor adherencia entre cemento y los agregados.
- Uso de aditivos
- Control de sulfatos
- Controlar el contenido de aluminato tricálcico (C_3A) del cemento.
- Mejor calidad de los agregados, tanto en calidad como en tamaño. Lavado de materiales pétreos
- Bajas relaciones agua/cemento.
- Uso de agregados de origen ígneo
- Buena compactación y curado para lograr concretos poco permeables.
- Diseño correcto de la mezcla
- Aditivos a base de polímeros de recubrimientos con resinas

13. ¿Qué medidas consideraría para eliminar o disminuir la corrosión del acero en el concreto?

- Limitar la relación agua/cemento
- Control de cloruros en agua y arena
- Protección catódica de la armadura metálica
- Recubrimientos (generosos y de buena calidad)
- Impermeabilización
- Baja permeabilidad del concreto
- Concretos densos o poco permeables.
- Cuidar el vibrado (Buena Compactación)
- Galvanizar el acero de refuerzo
- Practicas constructivas adecuadas (Supervisión de obra correcta).
- Evitar el uso de demasiados aditivos.
- Concretos con materiales especiales(aditivos, puzolanas).
- Emplear otras medidas para controlar la corrosión (ánodos de sacrificio, y corriente impresa).
- Recubrimiento epóxico
- Calidad del acero
- Mejores técnicas constructivas.

14. Cuidar la durabilidad del concreto es un aspecto... (se podía responder más de una opción)

CASO	PORCENTAJE
De poca importancia	0%
Muy útil y que reduce costos de mantenimiento futuros	56%
Que deben considerar sólo diseñadores de mezcla, concreteteras y premezcladoras	12%
Importante a cuidar en ciertas obras	21%
Relevante a considerar en todas las obras	76%

El **56 %** de los encuestados considera que **la durabilidad del concreto es útil y que permite reducir costos de mantenimiento** en el futuro. por su parte **el 76%** , la percibe como un **aspecto a considerar de relevancia para las obras.**

15. ¿Como profesional de la construcción, ¿qué recomendaría para un concreto durable en el Ex Lago de Texcoco?

- Concretos que resistan el ataque de sulfatos y cloruros
- Determinación de la salinidad del agua
- Impermeabilizar la estructura expuesta para evitar el contacto con los agentes destructivos
- Cuidar su calidad, buenas prácticas constructivas
- Elaborar un concreto impermeable con el cemento adecuado
- Estudios de campo con concretos especiales
- Concretos de alto desempeño
- Cementos CPC (compuesto) y relación agua/cemento máxima de 0.45
- Cementos puzolánicos
- Concretos diseñados por durabilidad
- Relación agua/cemento baja

-
- Contenido mínimo de cemento
 - Aditivos superfluidificantes
 - Diseñar juntas de construcción adecuadas
 - Vigilar el curado y consolidación del concreto.
 - Mas tiempo de investigación y pruebas
 - Supervisión de obra adecuada
 - Recubrimiento adecuado
 - Vibrado adecuado
 - Cumplir con los requisitos de calidad de los materiales empleados y procedimientos constructivos.
 - Emplear materiales especiales (aditivos, ceniza volante, etc.).
 - Agregados de origen ígneo
 - Concretos poco permeables
 - Concretos mejorados con aditivos y puzolanas
 - Construcción correcta.
 - Concretos densos e impermeables

16. ¿Qué considerarías para el desarrollo de la especificación del concreto en el caso del Nuevo Aeropuerto Internacional de Texcoco?

- Que las desarrolle un técnico en concreto.
- Calidad del cemento, agregados, agua, aditivos, cementos con las características químicas apropiadas.
- Estudio de la calidad del suelo y del medio ambiente.
- Partir del conocimiento de la agresividad real del sitio en sus diferentes zonas
- Que se trabaje seriamente
- Consultar normas internacionales
- Los minerales del Ex Lago de Texcoco
- Un concreto especial resistente a sulfatos, impermeables, lo más denso posible, y una adecuada compactación y colocación.
- La ubicación de los elementos estructurales (cimentación, columnas, traveses, losas, etc.).
- Tipo de suelo
- Considerar la compresibilidad del suelo (deformabilidad).
- Procedencia de los agregados y del cemento
- La rapidez de la construcción
- Los parámetros del acabado estético
- La durabilidad y resistencia del concreto
- Diseño óptimo de la mezcla
- Mezclas basadas en comportamiento, más que en un requisito con materias primas.
- Uso de puzolanas
- Concreto con baja permeabilidad
- Concretos con fases compactantes resistentes a estos tipos de ataque
- Tipos de ataques, clima y condiciones de exposición y servicio.
- Que en la licitación (en los términos de referencia) se especifique diseño de concreto por durabilidad.
- Investigación de las características del terreno
- Estudios anteriores, estructuras en condiciones similares y estudios de laboratorio.
- Considerar la experiencia de los profesionales en la materia y el empleo de la tecnología avanzada existente.
- Considerar los estudios previos realizados

17. ¿Tu empresa tiene productos que incrementen la durabilidad del concreto?

CASO	NUMERO	PORCENTAJE
SI	9	26%
NO	25	74%
TOTAL	34	100%

¿Cuáles son?

- CONCRETOS DURAMAX DE CEMEX CONCRETOS (SOFTWARE DE DISEÑO DE MEZCLAS)
- ADITIVOS Y FORMULACIONES ESPECIALES EN EL CEMENTO Y AGREGADOS (CEMEX)
- ADITIVOS, HUMO DE SILICE, ETC (COTTIER CONSULTORES S.A DE C.V.)

Conviene señalar que la pregunta fue interpretada de dos modos distintos: A) la organización en que colaboro fabrica **produce productos** para tal fin, y B) la organización en que colaboro tiene **disponibilidad a dichos productos**. Nuestro objetivo es el primer criterio, para conocer los productos existentes en el mercado.

18. ¿Tu empresa, dependencia o institución destina recursos a la investigación de nuevos materiales, procesos constructivos, aditivos, o métodos de diseño, etc.?

CASO	NUMERO	PORCENTAJE
SI	17	50%
NO	17	50%
TOTAL	34	100%

19. ¿Qué limitaciones ve usted para un mayor desarrollo del conocimiento y tecnología del concreto en México?

- Falta de interés por el desarrollo tecnológico y la investigación
- Falta de implementación de equipos y maquinaria de la tecnología del concreto
- Falta de importancia que se le da a la divulgación.
- Escasez de recursos destinados a la investigación a nivel nacional
- Altos costo de maquinaria y equipo para la investigación
- Desinterés de la gente por adquirir conocimiento
- Falta de recursos humanos
- Mercado no concientizado
- Falta de Reglamentos de construcción actualizados
- Tiempo (investigaciones apresuradas por presiones políticas).
- Baja accesibilidad a laboratorios para los estudiantes del tema.
- La investigación actual es suficiente para nuestro país. Otros países ricos nos transfieren su tecnología.
- Creencia común de que la investigación debe dejarse a las concreteeras:
- Recursos financieros limitados para capacitación.
- Cargas de trabajo muy altas.
- Pocas universidades tienen en sus programas la enseñanza de la tecnología del concreto.
- Monopolio por parte de las empresas productoras del cemento.

20. ¿La información técnica y bibliográfica con que dispones para atacar estas circunstancias es suficiente?

CASO	NUMERO	PORCENTAJE
SI	15	44%
NO	18	53%
NO CONTESTO	1	3%
TOTAL	34	100%

21. ¿Te interesa tener más información del tema?

CASO	NUMERO	PORCENTAJE
SI	31	91%
NO	1	3%
NO CONTESTO	2	6%
TOTAL	34	100%

ACERCA DE LOS PARTICIPANTES

Toda la información suministrada es estrictamente confidencial, sólo se indican sus cargos para dar un perfil de los encuestados, se espera no afectar a nadie con esta medida.

Los encuestados tienen distintos cargos, tanto a nivel directivo como operativo:

DIRECTIVO	OPERATIVO
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Director General ➤ Director Técnico ➤ Subdirector ➤ Investigador ➤ Apoyo Técnico ➤ Subgerente de Area ➤ Encargado de Laboratorios ➤ Jefe de Unidad General ➤ Jefe de Laboratorios de Concreto 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Proyectista ➤ Profesor de asignatura ➤ Dibujante ➤ Laboratorista ➤ Asistente ➤ Empleado
	OTRO
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estudiante de Posgrado ➤ Becario

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Los resultados de la encuesta nos permite concluir lo siguiente:

1. El concreto es un material muy importante para la industria de la construcción.
2. En términos generales, la tecnología mexicana del concreto es bien apreciada en el sector, es nuestro deber - de todos- que está percepción mejore. A pesar de las limitaciones enunciadas para un mayor desarrollo de esta.
3. Pocas instituciones desarrollan tecnología del concreto en México, destacando el Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. (IMCYC), Cementos Mexicanos, S. A. de C.V. y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM). Lo anterior puede deberse a que independientemente de su labor tecnológica, tanto el IMCYC como CEMEX tienen una estructura de mercado y publicidad importante. Por su parte el encargado de la encuesta colabora en el II-UNAM, por lo que independientemente de la labor tecnológica de éste último, al presentarse proveniente de dicha institución, pudo haber sesgado las respuestas de los encuestados.
4. Casi las dos terceras partes de las empresas en que colaboran los encuestados tiene algún especialista del concreto. Este resultado no representa la generalidad de la empresas de construcción. Debido a que la encuesta exigía un dominio del tema, o a que la carga del trabajo de los posibles encuestados es excesiva, hubo profesionales que se negaron a contestarla, no pudieron responderla o no la enviaron.
5. Se tuvo una respuesta aproximada del 20% de los cuestionarios enviados, por lo que se decidió aplicar la encuesta en vivo, a pesar de las limitaciones de tiempo y distancia, tanto del encuestado como del encuestador. Cabe señalar que la encuesta fue bien recibida en la mayor parte de las empresas o instituciones dedicadas a la tecnología del concreto, por lo que los datos referentes a los problemas encontrados en la práctica, los consideramos representativos; debido a que estos problemas son más especializados, y cuando una estructura presenta dichos problemas se suele acudir a una de las instituciones participantes.
6. Es necesario y de vital importancia realizar una investigación enfocada a la durabilidad de los concretos empleados para las condiciones del Nuevo Aeropuerto de la Ciudad de México.
7. El 68% de los participantes ha considerado la durabilidad del concreto en las obras que ha colaborado, por su parte el 56% ha tendido problemas al respecto.
8. La corrosión es el aspecto de durabilidad que más se ha encontrado en la práctica mexicana, siguiéndole las reparaciones, abrasión, ataque químico (sulfatos), reacción álcali - sílice, congelamiento y deshielo, y otros.
9. Los aspectos de menor relevancia o encontrados en la práctica mexicana en menor grado son la carbonatación, y ataque por ácidos.
10. El 56% considero a la durabilidad como un aspecto útil y que evita inversiones a futuro por mantenimiento. El 76 % consideró que es un aspecto a tomar en cuenta en todas las obras, también encontramos un 12% que opina que es un aspecto específico y que sólo un sector de la construcción debe considerarlo.

11. Respecto a los factores a considerar para mitigar o eliminar el ataque de sulfatos y la corrosión, así como las recomendaciones y consideraciones para un concreto durable y una especificación para el Nuevo Aeropuerto de Texcoco, encontramos que se tiene en términos generales un conocimiento adecuado de los factores actuantes en las problemáticas, así como una conciencia de las condiciones de alta salinidad, tanto de sulfatos, como de cloruros del Ex Lago de Texcoco. De la diversidad de factores enlistados anteriormente se procederá a considerar aquellos que verdaderamente deban ser tomados en cuenta para el proyecto y que se puedan emplear.
12. Hay pocas empresas mexicanas o radicadas en México que tienen productos que incrementen la durabilidad, algunas de ellas, sobretudo las grandes, tienen una variedad importante al respecto.
13. Poco más de la mitad de los participantes percibe que no cuenta con la bibliografía técnica para prevenir y diseñar por durabilidad. Se aprecia aparentemente un interés general por el tema, sin embargo, se debe ser cauteloso ante esta última respuesta.
14. Conviene difundir a la Industria Mexicana de la Construcción acerca de la importancia de considerar la durabilidad del concreto en aquellas obras donde es necesaria. Y simultáneamente indicar a los diferentes sectores: contratistas, ingenieros de campo, proyectistas, constructores, consultores, especialistas, etc., que el conocimiento del concreto atañe a todos, y no sólo a los ingenieros de materiales o las industrias del cemento y del concreto, como actualmente ocurre en nuestro país. En la medida que seamos más conscientes de la diversidad de factores que interactúan en la construcción podremos diseñar y construir mejor, licitar un concurso con los precios justos, y podremos evitar situaciones difíciles para el gobierno, el propietario, y el constructor.

Creemos que la encuesta fue exitosa a pesar de que el número de participantes no fue el esperado, sin embargo, la calidad de sus contribuciones y experiencias, permite obtener resultados muy valiosos que servirán para proyectos futuros que se realicen en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se agradece ampliamente a cada uno de ustedes por su colaboración para realizar esta encuesta.

APÉNDICE B

MODELO MATEMÁTICO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO¹

AB.1. EL CONCRETO COMO UN MATERIAL PROTECTOR DEL ACERO DE REFUERZO

La interacción del acero y el concreto está basada parcialmente en el hecho de que el concreto proporciona una protección química y física contra la corrosión. El efecto químico se atribuye a la alcalinidad, que como se ha descrito en otros capítulos forma una película de pasivación, dicha película de óxido previene la propagación de la corrosión: El concreto también provee al acero una barrera física contra los agentes promotores de la corrosión, como agua, oxígeno y cloruros.

En las estructuras típicas de concreto expuestas a la intemperie, la corrosión del acero de refuerzo tiene lugar solamente si los cambios suceden en el concreto alrededor del acero. Los cambios pueden ser físicos, tales como agrietamiento y desintegración, u originadas por partes de la superficie del acero expuestas al aire y sin la protección química y física del concreto.

Los cambios químicos también toman lugar alrededor del acero de refuerzo; los más importantes son:

1. Carbonatación del concreto
2. Penetración de iones agresivos, especialmente de cloruros.

AB.2. MODELADO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Se pueden identificar dos estados límite con respecto a la vida de servicio (fig. AB.1).

1. La vida de servicio termina cuando el acero pierde la capa de pasivación. Esta regla es usualmente aplicada a toda corrosión inducida por cloruros. Como la velocidad de penetración de ataques locales no se pueden cuantificar con seguridad y las incertidumbres del periodo de propagación son bastantes, entonces la vida de servicio está limitada por el período de inicio exclusivamente.(el tiempo en que el agente alcance al acero e induzca despasivación.

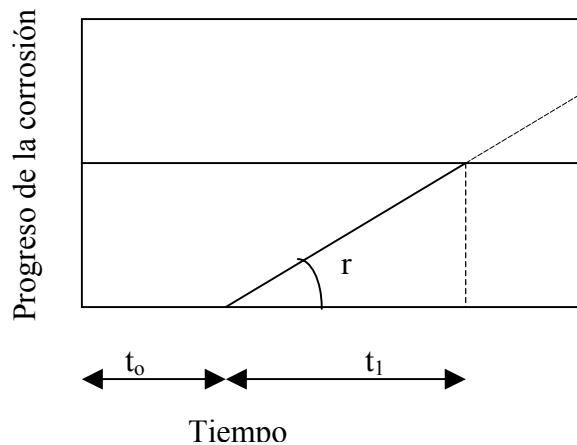


Figura AB.1. Determinación de la vida de servicio con respecto a la corrosión del refuerzo.

¹ Traducción de. "Durability Design of Concrete Structures", Cap.8. p.126 – 140, Ed. By A. Sarja y E. Vesikari. RILEM Report 14, Report of RILEM Technical Committee 130 – CSL. EDIT. E & FN Spon. Great Britain, 1996.

Esta regla también se aplica a todos los aceros presforzados. El esfuerzo de tensión de los tendones es normalmente tan alto que ninguna reducción en el área transversal es permitida y como resultado de una superficie corroída existe un riesgo de agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo. En aquellos casos donde la corrosión no es permitida se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$t_L = t_0 \quad [1]$$

donde: t_L = la vida de servicio
 t_0 = el tiempo de inicio de la corrosión

2. El estado limite está basado en el agrietamiento del recubrimiento del concreto debido a los óxidos generados durante la corrosión. En este caso la vida de servicio incluye un determinado período de propagación de corrosión durante el cual el área transversal del acero se está reduciendo progresivamente, el vínculo entre acero y concreto es reducido y el área transversal del concreto se disminuye debido al desconchamiento del recubrimiento. Esta aproximación se aplica en casos donde la corrosión generalizada está desarrollándose debido a la carbonatación.

La vida de servicio basada en el agrietamiento del recubrimiento del concreto es definido como la suma del tiempo de inicio de corrosión y el tiempo para agrietamiento del recubrimiento del concreto a un limite dado.

$$t_L = t_0 + t_1 \quad [2]$$

donde: t_1 es el tiempo de propagación. El tiempo de propagación t_1 termina cuando se alcanza un pérdida máxima permisible determinada del área transversal o una perdida del vínculo o un ancho de grieta determinado. Estos valores dependen del detalle particular y de la geometría del elemento.

En grietas originadas al comienzo de la vida de servicio, el tiempo inicial t_0 es más corto que en un recubrimiento no agrietado o aún $t_0 = 0$. En este caso se puede escribir:

$$t_L = t_1 \quad [3]$$

donde: t_1 = es el tiempo libre de corrosión. A continuación se presentan modelos para estimar t_0 y t_1 . Dichos modelos asumen que las superficies de concreto están libres de recubrimientos selladores.

AB.3. TIEMPO INICIAL DE CORROSIÓN

AB.3. A. CORROSIÓN INDUCIDA POR CLORUROS

Las fuentes más comunes de cloruros son el agua de mar (ambientes marinos) y sales descongelantes. El cloruro mezclado no es considerado aquí.

Como resultado de la penetración de cloruros un gradiente se desarrolla cerca de la superficie del concreto. El tiempo en el cual el contenido de cloruro crítico (valor del umbral) alcanza la superficie de acero y la despasiva, puede ser considerado como el tiempo de inicio de la corrosión.

El gradiente del contenido de cloruro es frecuentemente descrito por un modelo de función de error que cumple la condición de la segunda ley de difusión de Fick:

$$C_x = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2(Dt)^{1/2}} \right) \right] \quad [4]$$

donde: C_x = el contenido de cloruro a una profundidad x
 C_s = la concentración de cloruro en la superficie del concreto
 X = la profundidad de la superficie del concreto
 D = el coeficiente de difusión
 t = tiempo

El tiempo inicial por corrosión es obtenido por la fórmula:

$$C_{th} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{c}{2(Dt_o)^{1/2}} \right) \right] \quad [5]$$

donde: C_{th} = el contenido de cloruro crítico
 c = el recubrimiento del concreto
 t_o = el tiempo de inicio de la corrosión

Esta fórmula puede simplificarse empleando una función parábola:

$$C_x = C_s \left[1 - \left(\frac{x}{2(3Dt)^{1/2}} \right) \right]^2 \quad [6]$$

La fórmula para el tiempo inicial de corrosión puede entonces ser escrita en la siguiente forma:

$$t_o = \frac{1}{12D} \left[1 - \left(\frac{c}{1 - \left(\frac{C_{th}}{C_s} \right)^{1/2}} \right) \right]^2 \quad [7]$$

Algunas normas requieren valores límites no mayores a 0.4 % (Cl⁻) por peso del cemento para el concreto reforzado y 0.2% para el concreto presforzado. Lo que corresponde a 0.05 - 0.07 por peso del concreto (0.025 – 0.035 para concreto presforzado).

Respecto a los valores de C_s , la experiencia de campo ha mostrado que está cantidad puede ser variable a edades tempranas, pero tiende a un valor máximo después de algunos años. Para fines de cálculo se puede considerar constante. Los valores normales oscilan entre 0.3 y 0.4 por peso del concreto.

El coeficiente de difusión varía entre 10^{-7} y 10^{-8} cm²/s.

AB.3.B. AGRIETAMIENTO POR CORROSIÓN BAJO ESFUERZO

Afortunadamente el fenómeno de agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo es poco común. Puede desarrollarse en cable presforzados sujetos a agentes corrosivos, conduciendo a una falla frágil por pérdidas de sección transversal. La corrosión bajo esfuerzo es incubada en grietas de superficies muy pequeñas.

La despasivación del acero local se requiere para producir grietas en la superficie, en las cuales la corrosión bajo esfuerzo pueda incubarse. Por tanto la protección del acero presforzado de agentes agresivos es crucial para su vida de servicio, la cual está siempre limitada por el tiempo de inicio de la corrosión. Las reglas de cálculo presentadas en la sección anterior pueden aplicarse también al acero presforzado, dado que se trata también de una intrusión de cloruros.

AB.3.C. CORROSIÓN INDUCIDA POR CARBONATACIÓN

El dióxido de carbono en el aire penetra en el concreto, neutralizando sus sustancias alcalinas y producen un frente de carbonatación, el cual avanza hacia el interior. Cuando este frente de carbonatación alcanza al acero, la película de pasivación llega a ser inestable y se disuelve, permitiendo que la corrosión generalizada suceda. El tiempo inicial de corrosión se define como el período requerido para completar la carbonatación del recubrimiento de concreto.

La velocidad de carbonatación normalmente se asume que está relacionada con la raíz cuadrada del tiempo:

$$d = K_c t^{1/2} \quad [8]$$

donde: d = la profundidad de carbonatación en el tiempo t .
 K_c = Coeficiente de carbonatación
 T = tiempo o edad.

El tiempo inicial de corrosión puede ser determinado como sigue:

$$t_o = \left[\frac{d}{K_c} \right]^2 \quad [9]$$

El coeficiente de carbonatación depende de la resistencia del concreto, agentes cementantes, contenido de cemento y condiciones ambientales (temperatura y humedad). Existen varias fórmulas para modelar la velocidad de carbonatación, tanto analíticos como empíricos.

Con base en la primera ley de Fick la siguiente expresión puede ser derivada por la profundidad de la carbonatación (Schiessl, 1976):

$$x = \sqrt{\frac{2D_c(C_1 - C_2)}{a} t} \quad [10]$$

donde: x = es la profundidad de carbonatación (m)
 a = la cantidad de sustancias alcalinas en el concreto
 D_c = Coeficiente de difusión efectiva para el CO_2 a una distribución de humedad determinada (m^2/s).
 $C_1 - C_2$ = la diferencia de concentración del CO_2 entre el aire y el frente de carbonatación (kg/m^3)
 t = tiempo.

Este procedimiento de cálculo ha sido extendido por Baker (1993) a los casos de fluctuación de ciclos de humedad y secado. Durante las condiciones de humedad el frente de carbonatación no puede progresar. Durante las condiciones en seco la humedad se evapora y hace posible que progrese el frente de carbonatación.

De acuerdo con Baker el tiempo en la ecuación anterior es substituido por t_{eff} , el cual está determinado como sigue:

$$t_{eff} = \left[td_1 + td_2 - \left(\frac{x_1}{B} \right)^2 + td_3 + \dots + tdn - \left(\frac{x_{n-1}}{B} \right)^2 \right] \quad [11]$$

$$B = \sqrt{\frac{2D_V(C_3 - C_4)}{b}} \quad [12]$$

donde: x_n = profundidad de carbonatación después del ciclo enésimo de humedad y secado.
 t_{dn} = longitud del período de secado enésimo.
 D_V = coeficiente de difusión efectivo para vapor de agua en una distribución de humedad dada en los poros (m^2/s)
 $C_3 - C_4$ = diferencia de humedad entre el aire y el frente de evaporación (kg/m^3).
 B = Cantidad de agua por evaporarse del concreto (kg/m^3).

Si los períodos de humedad y secado son de igual longitud, entonces el tiempo transcurrido después de n ciclos es:

$$t_n = nt_d + (n-1)t_w \quad [13]$$

donde: t_w = longitud de períodos de humedad
 t_d = longitud de períodos de secado

Un modelo teórico con base en la teoría de los "límites móviles" ha sido presentado por Tuutti (1982). La teoría consiste en procesos difusión y no en condiciones del estado firmes. Otro modelo teórico para los efectos combinados del ataque de congelamiento y carbonatación han sido presentados por Fagerlund, Soomerville y Tuutti (1994).

Modelos experimentales para evaluar la profundidad de carbonatación han sido presentadas por Häkkinen y Parrot. De acuerdo con Häkkinen (1993) la profundidad de carbonatación está determinada por la ecuación 9, el coeficiente de carbonatación se determina del siguiente modo:

$$K_C = C_{ENV} C_{AIR} a f_{cm}^b \quad [14]$$

donde: C_{ENV} = Coeficiente ambiental
 C_{AIR} = Coeficiente del contenido de aire
 f_{CM} = la resistencia a la compresión principal del concreto (MPa)
 a, b = parámetros dependiendo del agente cementante.

En lugar de la resistencia a compresión principal, la característica de la resistencia puede ser usada mediante la aplicación de las siguiente relación (CEB, 1988):

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [15]$$

Las tablas AB.3.Y AB.4. muestran los valores del coeficiente de contenido ambiental y de aire respectivamente. Los parámetros a y b en la ecuación 14 son presentadas en la tabla AB.5. (Häkkinen, 1991).

TABLA AB.3. COEFICIENTE AMBIENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CARBONATACIÓN

Ambiente	C env
Estructuras protegidas de lluvia	1
Estructuras expuestas a lluvia	0.5

TABLA AB.4. COEFICIENTE DE CONTENIDO DE AIRE PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CARBONATACIÓN

Porosidad aérea	C env
Aire incluido	0.7
Sin aire incluido	1

TABLA AB.5. PARÁMETROS a Y b

Cementante	a	b
Cemento Pórtland	1800	-1.7
Cemento Pórtland+ ceniza volante 28%	360	-1.2
Cemento Pórtland + humo de sílice 9%	400	-1.2
Cemento Pórtland + escoria de altos hornos	360	-1.2

Fuente: t. Häkkinen, Research Notes 750, publicado por Technical Research Centre of Finland, (1991). Citado en Durability Design of Concrete Structures, RILEM report 14. p.134.

De acuerdo con Parrot (1992) la profundidad de carbonatación está determinada con base en la permeabilidad al oxígeno del concreto.:

$$d = \frac{64K^{0.4}t^n}{\sqrt{c}} [16]$$

donde: K = la permeabilidad al oxígeno del concreto a una humedad relativa del 60%.
t = tiempo
c = contenido alcalino del cemento
n = factor de atenuación

AB. 5. PERIODO DE PROPAGACIÓN

AB.5.A. REGLA GENERAL

La corrosión comienza cuando la película de pasivación es destruida como resultado de la pérdida de pH debida a la carbonatación, o como resultado de un contenido de cloruros creciente y por encima del umbral. El volumen de los productos de corrosión es algunas veces el del metal original.

La necesidad de mayor volumen causa esfuerzo a la tensión en el concreto localizado alrededor de la varilla, conduciendo al agrietamiento o desconchamiento del recubrimiento.

Cuando la corrosión se desarrolla aparecen tres fenómenos principales:

1. Un decremento en la sección transversal del acero.
2. Un decremento en la adherencia acero / concreto
3. Agrietamiento del recubrimiento y por tanto una disminución en la carga que puede soportar la sección transversal en el concreto.

Para determinar la vida de servicio el valor límite de la capacidad de carga soportante tiene que ser definido con relación al fenómeno de pérdida de capacidad de carga anteriormente mencionado. Este límite crítico puede frecuentemente ser expresado como pérdida crítica del radio de la varilla provocado por corrosión y por tanto, el período de propagación puede ser cuantificado de la siguiente manera (Alonso y Andrade, 1993):

$$t_1 = \frac{\Delta R_{MAX}}{r} \quad [17]$$

donde: t_1 = tiempo de propagación de corrosión (años)
 ΔR_{MAX} = La pérdida máxima del radio de la varilla de acero
 r = la velocidad de corrosión en el concreto

AB.5.B. TIEMPO DE AGRIETAMIENTO DEL RECUBRIMIENTO

En el caso de la corrosión generalizada la pérdida crítica del radio de la varilla está basado en el agrietamiento del recubrimiento. El tiempo de propagación del agrietamiento puede ser aproximado por la siguiente fórmula (Siemes. Vrouwenvelder y van den Beukel, 1985):

$$t_1 = 80 \frac{C}{Dr} \quad [18]$$

donde: C = el espesor del recubrimiento (mm)
 D = el diámetro de la varilla de refuerzo
 r = la velocidad de corrosión en el concreto ($\mu\text{m/año}$)

La velocidad de corrosión en el concreto depende fuertemente de las condiciones ambientales. Los factores ambientales relativamente importantes son la temperatura y la humedad. La velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto puede evaluarse empleando la siguiente fórmula:

$$r = c_r r_0 \quad [19]$$

donde: c_r = el coeficiente de temperatura
 r_0 = la velocidad de corrosión a 20 °C.

Los factores primarios que afectan la velocidad de corrosión en el concreto a 20 °C son la humedad relativa del aire (o concreto) y el contenido de cloruros. Otros factores como relación agua /cemento y el tipo de cemento tal vez puedan tener alguna influencia. Los valores de la velocidad de corrosión en las áreas anódicas del acero de refuerzo presentadas en la tabla AB.6 pueden ser tomadas como promedios aproximados. Estos fueron elaborados de acuerdo con los datos experimentales reportados por Tuutti (1982).

El contenido de humedad del concreto alrededor del acero de refuerzo es una mezcla compleja de varios efectos estructurales y climáticos. La humedad relativa de equilibrio del concreto en condiciones aéreas es afectada por variaciones diarias y anuales de la humedad relativa del aire, condensación de la humedad en la superficie, lluvia, salpicaduras, densidad del concreto y profundidad de la superficie (recubrimiento).

El contenido de humedad del concreto alrededor del acero de refuerzo es una mezcla compleja de varios efectos estructurales y climáticos.

La humedad relativa de equilibrio del concreto en condiciones aéreas es afectada por variaciones diarias y anuales de la humedad relativa del aire, condensación de la humedad en la superficies, lluvia, salpicaduras, densidad del concreto y profundidad de la superficie (recubrimiento).

TABLA AB.6. LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN CONCRETO CONTAMINADO CON CLORUROS Y CARBONATADO (AREAS ANÓDICAS)		
Humedad relativa (%)	Concreto carbonatado ($\mu\text{m}/\text{año}$)	Concreto contaminado con cloruros
99	2	34
95	50	122
90	12	98
85	3	78
80	1	61
75	0.1	47
70	0	36
65	0	27
60	0	19
55	0	14
50	0	9

El contenido de cloruro también tiene una gran influencia en el contenido de humedad y en la velocidad de corrosión en el concreto. Sin embargo, el tiempo de propagación es normalmente omitido por completo si los cloruros están presentes. Los datos para concreto contaminado con cloruros en la tabla 8.6 son proporcionados por comparación.

La humedad relativa promedio en estructuras expuestas a la lluvia puede ser evaluada en las cercanías del 95% (a menos que la frecuencia de la lluvia sea extremadamente baja) y para estructuras completamente protegidas de la lluvia, en las cercanías al 90%. Consecuentemente la velocidad de corrosión en el concreto carbonatado a 20 °C sería cercana a 50 $\mu\text{m}/\text{año}$ en estructuras expuestas a la lluvia y cercanas a 12 $\mu\text{m}/\text{año}$ en estructuras protegidas de la lluvia.

Los coeficientes de temperatura determinados en la base de los hallazgos de Tuutti (1982) y la temperatura diaria promedio para algunas ciudades Europeas se presentan en la tabla AB.7. Las velocidades de corrosión evaluadas de la ecuación [19] están también en listas. El efecto del sol directo en la temperaturas de las superficies no ha sido considerado en la tabla AB.7. Este efecto puede, sin embargo, ser considerable. Las características del microclima deben también considerarse al evaluar la velocidad de la corrosión.

Es bien conocido que la velocidad de la corrosión se reduce gradualmente con el tiempo. Sin embargo, como se tienen pocos datos disponibles concernientes a este fenómeno se recomienda que la velocidad de la corrosión se considere constante en el diseño de la durabilidad.

TABLA AB.7. COEFICIENTE DE TEMPERATURA Y VELOCIDADES DE CORROSIÓN EVALUADAS EN ALGUNAS CIUDADES EUROPEAS			
Ciudad	c_t	Velocidad de corrosión ($\mu\text{m}/\text{año}$)	
		Expuesto a la lluvia	Protegido de la lluvia
Madrid	0.73	37	9
Amsterdam	0.47	24	6
Helsinki	0.32	24	6
Sodankylä	0.21	11	2.65

AB.5.C. TIEMPO DE PROPAGACIÓN DE LA CORROSIÓN EN LAS GRIETAS

Si el recubrimiento está agrietado desde el inicio (debido a la contracción, esfuerzos mecánicos, etc.) y el ancho de la grieta es mayor que el intervalo de 0.1 a 0.3 mm, la corrosión normalmente comienza sin ningún período de inicio. Si la varilla de acero está completamente expuesta, es de esperarse que la corrosión suceda en toda la varilla.

Un constructor puede poner un límite para el diámetro mínimo de las varillas o la profundidad máxima de la corrosión correspondiente. Este puede depender del tipo de refuerzo, acero de refuerzo principal, refuerzo transversal, estribos, etc. y el esfuerzo actual en las varillas de acero. No se permite corrosión en los tendones presforzados.

El tiempo de propagación en las grietas es calculado con la siguiente fórmula:

$$t_1 = \frac{S_{MAX}}{r} \quad [20] \qquad t_1 = \frac{D - D_{MIN}}{2r} \quad [21]$$

donde. t_1 = el tiempo de propagación de la corrosión en la grieta
 r = la velocidad de corrosión en la grieta
 S_{MAX} = La profundidad máxima permisible de la corrosión
 D_{MIN} = el diámetro mínimo de la varilla

La velocidad de corrosión en grietas representa un problema extremadamente complicado el cual no está completamente entendido. En ausencia de más datos precisos, el supuesto de que la velocidad de corrosión promedio es del mismo orden de magnitud como en concreto no agrietado es aplicable. De acuerdo con Andrade *et al* (1994): se recomiendan las velocidades de corrosión siguientes en los cálculos:

1. Cuando solamente la carbonatación es el agente agresivo:

$$HR = 90 \text{ A } 98 \% \Rightarrow \text{VELOCIDAD DE CORROSIÓN} = 5 - 10 \mu\text{m/año}$$

$$HR < 85\% \Rightarrow \text{VELOCIDAD DE CORROSIÓN} \leq 2 \mu\text{m/año}$$

2. En ambientes contaminados con cloruros:

$$HR = 100 \% \Rightarrow \text{VELOCIDAD DE CORROSIÓN} \leq 10 \mu\text{m/año}$$

$$HR = 80 \text{ A } 95 \% \Rightarrow \text{VELOCIDAD DE CORROSIÓN} = 50 - 100 \mu\text{m/año}$$

$$HR < 70 \% \Rightarrow \text{VELOCIDAD DE CORROSIÓN} \leq 2 \mu\text{m/año}$$

APÉNDICE C

AC. EFECTO DE SUSTANCIAS QUÍMICAS EN EL CONCRETO

Material	Efecto	Material	Efecto
Ácido Acético	Lo desintegra lentamente	* Refresco	Ver bicarbonato de sodio
Acetona	Pérdida de líquidos por penetración . Puede contener ácido acético como contaminante	Hidróxido de Bario	No es dañino
Aguas ácidas (pH inferior a 6.5) (a)	Lo desintegra lentamente, en concreto poroso o agrietado ataca al acero	Corteza	Ver corteza curtida
* Alcohol	Ver alcohol etílico, alcohol metílico	* Grasa de carne	La grasa sólida lo desintegra lentamente, la grasa disuelta lo disuelve rápidamente
Alizarin	No es dañino	* Cerveza	Puede contener productos fermentados como ácido acético, carbónico, láctico o tánico
* Aceite de Almendra	Lo desintegra lentamente	Benzol (benceno)	Pérdida de líquidos por penetración .
* Alumbre	Ver sulfato, potasio aluminio	Soluciones Blanqueadoras	Ver químicos específicos, como ácido hipocloroso, hipoclorito de sodio, ácido sulfuroso, etc.
Cloruro de Aluminio	Lo desintegra rápidamente, en concreto poroso o agrietado ataca al acero.	* Borax	No es dañino
Sulfato de Aluminio	Lo desintegra rápidamente, en concreto poroso o agrietado ataca al acero.	Ácido Bórico	Efecto insignificante
Amoniaco, líquido	Dañino sólo si contiene sales de amoniaco dañinas	Agua Salada	Ver cloruro de sodio u otras sales
Vapores de Amoniaco	Puede desintegrar el concreto húmedo lentamente o atacar al acero en concreto poroso o agrietado	Bromo	El bromo gaseoso lo desintegra, el bromo líquido lo desintegra si contiene ácido bromico y humedad
Bisulfato de Amonio	Lo desintegra, en concreto poroso o agrietado ataca al acero	Suero de leche	Lo desintegra lentamente
Cabonato de Amonio	No es dañino	Estearina de butilo	Lo desintegra lentamente
* Cloruro de Amonio	Lo desintegra, en concreto poroso o agrietado ataca al acero	Bisulfito de calcio	Lo desintegra lentamente
Cianuro de Amonio	Lo desintegra lentamente	Cloruro de calcio	En concreto poroso o agrietado ataca al acero, la corrosión del acero puede causar el desconchamiento del concreto
Fluoruro de Amonio	Lo desintegra lentamente	Hidróxido de Calcio	No es dañino
Hidroxido de Amonio	No es dañino	Nitrato de Calcio	No es dañino
Nitrato de Amonio	Lo desintegra, en concreto poroso o agrietado ataca al acero	Ácido Carbónico	Ver fenol
Oxalato de Amonio	No es dañino	Dióxido de Carbono	El gas puede causar contracción permanente (ver también ácido carbónico)
Sulfato de Amonio	Lo desintegra, en concreto poroso o agrietado ataca al acero	Disulfuro Carbónico	Puede desintegrarlo lentamente
Sulfuro de Amonio	Lo desintegra	Tetracloruro carbónico	Pérdida de líquidos por penetración

Sulfuro de Amonio	Lo desintegra	Ácido Carbónico	Lo desintegra lentamente ©
Superfosfato de Amonio	Lo desintegra, en concreto poroso o agrietado ataca al acero	Aceite de Ricino	Lo desintegra, especialmente en presencia de aire
Tiosulfato de Amonio	Lo desintegra	Chile	Ver nitrato de sodio
Desechos Animales	Ver mataderos	Aceite de madera de china	Líquido, lo desintegra lentamente
Anthracene	No es dañino	Gas Clorhídrico	Desintegra lentamente el concreto húmedo
Ácido Arcénico	No es dañino	Soluciones de cromo plateado	Lo desintegra lentamente
Cenizas	Dañinas si están húmedas, cuando los sulfuros y los sulfatos lixivian fuera, ver sulfato de sodio	Ácido crómico, todas las concentraciones	Ataca al acero en concreto poroso o agrietado
Cenizas calientes	Causan expansión térmica	Chrysen	No es dañino
Gases de automoviles y diesel (n)	Puede desintegrar el concreto húmedo, por la acción del ácido carbónico, láctico o sulfuroso	* Sidra	Lo desintegra lentamente .Ver ácido acético
Carbonillas	Dañinas si están húmedas, cuando los sulfuros y los sulfatos lixivian fuera, ver sulfato de sodio	Carbonillas calientes	Causan expansión térmica
Sulfato de calcio	Desintegra al concreto que tenga una resistencia inadecuada a los sulfatos	Carbazole	No es dañino
Sulfato Ferrico	Desintegra el concreto que no tiene una adecuada calidad	Sulfuro Férrico	Dañino si contiene sulfato férrico
Carbón	Los sulfuros que lixivian del carbón húmedo pueden oxidar al sulfuro o al ácido sulfúrico, o al sulfato férreo.	Cloruro Ferroso	Lo desintegra lentamente
Aceite de carbón	Ver antraceno, benzol, carbazol, chrysen, cresota, cresol, cumol, parafina, fenatreno, fenol, toluol, xylol.	Sulfato Ferroso	Desintegra el concreto que no tiene una adecuada resistencia al sulfato
Sulfato de Cobalto	Desintegra el concreto que no tiene una adecuada resistencia a los sulfatos	Fertilizante	Ver sulfato de amonio, superfostato de amonio, estiércol, nitrato de potasio, nitrato de sodio
* Aceite de cacao	Lo desintegra, especialmente en presencia de aire	Licor de pescado	Lo desintegra (f)
* Mantequilla de cacao	Lo desintegra, especialmente en presencia de aire	Aceite de pescado	Lo desintegra lentamente
Aceite de coco	Lo desintegra, especialmente en presencia de aire	Gases de cañón	Los gases calientes provocan tensión termal. El enfriamiento, el sulfuro condensado, los ácidos hidroclicídricos, lo desintegran lentamente
Aceite de bacalao	Lo desintegra, especialmente en presencia de aire	Aceite comestible	Lo desintegra lentamente
Cocue	Los sulfuros que lixivian del coque húmedo pueden oxidar al sulfuro o al ácido sulfúrico.	Formaldehido 37 %	El ácido fórmico, en soluciones lo desintegra lentamente
Cloruro de cobre	Lo desintegra lentamente	Formalin	Ver formaldehído
Soluciones de cobre plateado (p)	No es dañino	Ácido Fórmico 10%	Lo desintegra lentamente
Sulfato de Cobre	Desintegra el concreto que no tiene una adecuada resistencia a los sulfatos	Ácido Fórmico 30%	Lo desintegra lentamente

Sulfuro de Cobre	Dañino sólo si contiene sulfato de cobre	Ácido Fórmico 90%	Lo desintegra lentamente
Almibar de maíz	Lo desintegra lentamente	Jugo de frutas	El Hidrofluoruro, otros ácidos, y la azúcar causan desintegración (ver también frutas fermentadas, granos y extractos vegetales).
Sublimado corrosivo	Ver cloruro de mercurio	Gases de diesel	Ver gases de automóviles
Semilla de algodón	Lo desintegra en presencia de aire	Gas de agua (g)	Las sales de amonio rara vez se presentan en suficiente cantidad para desintegrarlo
Creosota	Si contiene fenol lo desintegra lentamente	Gasolina	Se pierde liquido por penetración
Cresol	Si contiene fenol lo desintegra lentamente	* Glucosa	Lo desintegra lentamente
Cumol	Pérdida de líquidos por penetración	* Glicerine	Lo desintegra lentamente
Sales descongelantes	Se presentan descascaramientos en concreto sin aire incluido o concreto con poca edad.	* Granos	Ver también frutas fermentadas, granos y extractos vegetales
Dinitrofenol	Lo desintegra lentamente	* Miel	No es dañino
Fango	El ácido láctico, causa una lenta desintegración	Grasa de Caballo	La grasa sólida lo desintegra lentamente, la grasa disuelta lo disuelve rápidamente
Sales Epsom	Ver sulfato de magnesio	Ácido Húmico	Lo desintegra lentamente
Alcohol etílico	Pérdida de líquidos por penetración	* Ácido hidrociorhídrico, todas las concentraciones	Lo desintegra rápidamente, incluyendo al acero
Eter etílico	Pérdida de líquidos por penetración	Ácido Fluorhídrico, todas las concentraciones	Lo desintegra rápidamente, incluyendo al acero
Glicol Etilico	Lo desintegra lentamente	Sulfuro de hidrogeno	No es dañino en estado seco; En la humedad, el ambiente oxidante lo convierte en ácido sulfurico y lo desintegra lentamente
Heces	Ver estiércol	Ácido hipocloroso 10%	Lo desintegra lentamente
Frutas fermentadas, granos, vegetales o extractos	Los procesos de fermentación industrial producen ácido láctico y lo desintegra lentamente, ver ácido láctico	Yodo	Lo desintegra lentamente
Cloruro Ferrico	Lo desintegra lentamente	Keroseno	Pérdida de líquido por penetración del concreto
Nitrato Ferrico	No es dañino	* Ácido Láctico 5 - 25 %	Lo desintegra lentamente
Sulfito ferrico	Desintegra al concreto de calidad inadecuada	Aceite de semilla de amapola	Lo desintegra lentamente
Grasa de Cordero	La grasa sólida lo desintegra lentamente, la grasa disuelta lo disuelve rápidamente	Nitro	Ver nitrato de potasio
Manteca de cerdo y aceite de manteca de cerdo	La manteca lo desintegra lentamente, el aceite de manteca lo desintegra más rápidamente	Ácido nítrico, todas las concentraciones	Lo desintegra rápidamente
Nitrato de plomo	Lo desintegra lentamente	Acido de oleína 100%	No es dañino
Soluciones refinadas de plomo	Lo desintegran lentamente	Oleo	Ver ácido sulfurico 100%
Nitro de Leuna	Ver nitrato de amonio y sulfato de amonio	Aceite de Oliva	Lo desintegra lentamente

Aceite de Lignita	Si las partículas grasosas están presentes lo desintegran lentamente	Minerales	Los sulfatos provenientes de minerales húmedos el ácido sulfurico o el sulfato ferroso
* Aceite de Linaza	Líquido lo desintegra lentamente. Seco no es dañino	Ácido oxalico	No es dañino seco, protege los tanques contra el ácido acetico, el dióxido de carbono, el agua salada.venenoso. No usar con agua potable o comida
Gases de Locomotora (r)	Pueden desintegrar al concreto húmedo por la acción de los ácidos nítricos, carbónicos y sulfurosos (ver también gases de automóviles y diesel)	Parafina	Cuando la penetración es poco profunda, no es dañino, pero no debe ser usado en superficies altamente porosas como concreto de mampostería (u).
Aceite Lubricante	Si las partículas grasosas están presentes lo desintegra lentamente	* Aceite de cacahuete	Lo desintegra lentamente
Lejía	Ver hidróxido de sodio	Ácido perclorhidrico, 10%	Lo desintergra
Aceite de máquinas	Si las partículas grasosas están presentes lo desintegra lentamente	Percloroetileno	Pierde líquido por penetración
* Cloruro de Magnesio	Lo desintegra lentamente, en concreto poroso o agrietado ataca el acero	Petróleo	Pierde líquido por penetración, si hay partículas grasosas lo desintegran lentamente
Nitrato de Magnesio	Lo desintegra lentamente	Fenantreno	Pierde líquido por penetración
* Sulfato de Magnesio	Desintegra lentamente al concreto con resistencia inadecuada a los sulfatos	Fenol, 5 -25 %	Lo desintegra lentamente
Sulfato de Manganeso	Desintegra lentamente al concreto con resistencia inadecuada a los sulfatos	Ácido fosfórico, de 10 a 85%	Lo desintegra lentamente
Estiércol	Lo desintegra lentamente	Agua salada (salmuera)	Ataca al acero en concreto poroso o agrietado
* Margarina	La margarina sólida lo desintegra lentamente, la líquida lo disuelve rápidamente	Brea	No es dañina
Malta	El ácido láctico y el azúcar lo desintegran lentamente	Sulfato de aluminio potasico	Desintegra lentamente al concreto con una inadecuada resistencia a los sulfatos
Cloruro de mercurio	Lo desintegra lentamente	* Potasio carbonatado	No es dañino, a menos que haya sulfato de sodio presente
Cloruro Mercluroso	Lo desintegra lentamente		
Alcohol Metílico	Pierde líquido por penetración	Cloruro de Potasio	Si el cloruro de magnesio está presente ataca al acero en concreto poroso o agrietado
Acetona metil isobutil	Pierde líquido por penetración	* Alcohol	Lo desintegra lentamente
Acetona metil etílica	Pierde líquido por penetración	Ciánuro de Potasio	Lo desintegra lentamente
* Leche	No es dañino, pero ver leche cortada	Dicromato de Potasio	Lo desintegra
Agua con desperdicios minerales	Los sulfitos, sulfatos y ácidos presentes desintegran el concreto y atacan el acero en concreto poroso o agrietado	Hidroxido de Potasio 15 %	No es dañino (h)
* Aceite Mineral	Si las partículas grasosas están presentes lo desintegra lentamente	Hidroxido de Potasio 25 % ó más	Lo desintegra
Melaza	A temperaturas mayores de 120 F lo desintegra lentamente	* Nitrato de Potasio	Lo desintegra lentamente

Ácido Muriático	Ver ácido clorhídrico	Pernanganato de Potasio	No es dañino a menos que el sulfato de potasio este presente
* Mostaza	Lo desintegra, especialmente en presencia de aire	Persulfato de Potasio	Desintegra lentamente al concreto con baja resistencia a los sulfatos
Soluciones de Niquel platinado (v)	El sulfato de amonio de níquel lo desintegra lentamente	Sulfato de Potasio	Desintegra lentamente al concreto con baja resistencia a los sulfatos
Sulfato de níquel	Lo desintegra lentamente en concreto con una resistencia a los sulfatos	Sulfito de Potasio	Inofensivo a menos que el sulfato de potasio este presente
Piritas	Ver sulfuro ferríco, sulfuro de cobre	Sulfato de sodio	Desintegra el concreto que no tiene una adecuada resistencia a los sulfatos
Aceite de semilla de colza	Lo desintegra especialmente en presencia del aire	Sulfuro de sodio	Lo desintegra lentamente
Sal en roca	Ver ácido clorhídrico	Sulfito de sodio	Si el sulfato de sodio está presente, desintegra el concreto que no tiene una adecuada resistencia a los sulfatos
Colofonia (resina amarilla sólida)	No dañino	Tiosulfato de sodio	Desintegra el concreto que no tiene una adecuada resistencia a los sulfatos
Aceite de Colofonia	No dañino	* Leche cortada	El ácido láctico lo desintegra lentamente
Sal de amonio	Ver cloruro de amonio	Aceite de soya	Líquido, lo desintegra lentamente, seco no es dañino
Agua mineral	Ver carbonato de sodio	Cloruro de estroncio	No es dañino
Sales descongelantes para pavimentos	Ver cloruro de calcio, cloruro de magnesio y cloruro de sodio	* Azúcar	Lo desintegra lentamente
Salitre (nitrato)	Ver nitrato de potasio	Licor de sulfito	Lo desintegra
* Sauerkraut (chucruta)	El ácido láctico lo desintegra lentamente	Soluciones de sulfito	Lo desintegra lentamente
Agua de mar	Desintegra el concreto con inadecuada resistencia al sulfato. Ataca al acero en concreto agrietado o poroso	* Dióxido de Azufre	Con la humedad se forma el ácido sulfuroso
Aguas residuales	Normalmente no son dañinas. Ver sulfato de hidrogeno	Ácido sulfurico 10- 80 %	Lo desintega rapidamente
Ensilage	Los ácidos, acéticos, lácticos, bóricos (y algunas veces los agentes de fermentación de ácidos hidroclicos o sulfúricos) lo desintegran lentamente	Ácido sulfurico 80% oleo.	Lo desintegra
Desechos de matadero	Los ácidos orgánicos lo desintegran	Ácido sulfuroso	Lo desintegra rapidamente
Sedimento	Ver aguas residuales y sulfuro de hidrógeno	Cebo y aceite de cebo	Lo desintegra lentamente
Refresco	Ver ácido carbónico	Ácido tánino	Lo desintegra lentamente
Bicarbonato de sodio	No es dañino	Cloruro de cinc	Lo desintegra lentamente
Bisulfato de sodio	Lo desintegra	Licor tanino	Lo desintegra
Bisulfito de sodio	Lo desintegra	Solución ácida tartárica	No es dañino
Bromuro de sodio	Lo desintegra lentamente	Tabaco	Si están presentes ácidos orgánicos lo desintegra lentamente
Carbonato de sodio	No dañino excepto para el cemento de aluminato de calcio	Tolueno	Pierde liquido por penetración

* Cloruro de sodio	Si el cloruro de magnesio está presente ataca al acero en concreto poroso o agrietado. La corrosión del acero causa el desconchamiento del concreto	Tricloroetileno	Pierde líquido por penetración
Cianuro de sodio	Lo desintegra lentamente	Fosfato trisódico	No es dañino
Dicromato de sodio	Las soluciones diluidas lo desintegran lentamente	Aceite de Tungsteno	Líquido lo desintegra lentamente, seco no es dañino
Hidróxido de sodio, 1-10%	No dañino	Trementina	Ataque suave. Pérdida de líquido por penetración.
Hidróxido de sodio, superior al 20 %	Desintegra al concreto	* Urea	No dañino
Hipoclorito de sodio	Lo desintegra lentamente	Orina	Ataca al acero en poros o concreto agrietado
* Nitrato de sodio	Lo desintegra lentamente	Vegetales	Ver frutas fermentadas granos, vegetales extractos.
Nitrito de sodio	Lo desintegra lentamente	Vinagre	Lo desintegra lentamente (ver ácido acético).
Fosfato de sodio (monobásico)	Lo desintegra lentamente	Aceite de la nuez	Lo desintegra lentamente
* Suero	Lo desintegra lentamente (ver ácido láctico)	Nitrato de zinc	No dañino
* Vino	No dañino. Necesario para prevenir contaminación por sabor.	Soluciones refinadas con Zinc (x)	Hidrocloruro o ácidos sulfuricos, si están presentes, desintegran al concreto.
Pulpa de madera	No dañino	Escoria de zinc	Sulfato de zinc (el cual puede observarse a veces), formado por oxidación.
Xylol (xilene)	Pérdida de líquido por penetración.	Sulfato de zinc	Lo desintegra lentamente
Fuente: ACI 515 .1R-79(85) A Guide to the Use of Waterproofing, Dammprofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete.p. 6-11.			

* Algunas veces empleado en el procesamiento de alimentos o como alimento o ingrediente de bebidas.

(a) Las aguas con un pH mayor a 6.5 pueden ser agresivas si contienen bicarbonato. Las aguas naturales usualmente tienen un pH más alto que 7.0 y rara vez menor a 6.0, aunque valores tan bajos como 0.4 se han reportado. Para un pH inferior a 3.0 se debe proteger como si fuera ácido diluido.

(b) Frecuentemente usado como un descongelante para pavimentos de concreto. Si el concreto contiene poco aire incluido o no tiene más de un mes de edad, la aplicación repetitiva puede causar daños en la superficie. Para protección bajo estas condiciones ver sales descongelantes.

(c) El dióxido de carbono se disuelve en aguas naturales para formar soluciones de ácido carbónico. Cuando se disuelve puede extenderse de 0.9 a 3 partes por millón, resultando destructivo al concreto.

(d) Frecuentemente usado como descongelante en aeropistas. Una aplicación densa en pavimentos de pistas de aterrizaje que contengan poco aire incluido puede causar daños en la superficie.

(e) En adición a la fermentación intencional de algunas materias primas, varias veces sucede la fermentación no deseada en el estropero de alimentos o desperdicios de comida, también produciendo ácido láctico.

(f) Contienen ácido carbónico, aceites de pescado, sulfuro de hidrógeno, amina de metilo, salmuera, y otros materiales potencialmente reactivos.

(g) Agua usada para limpiar el gas de carbón.

(h) Sin embargo, en aquellas áreas de los Estados Unidos donde el concreto es elaborado con agregados reactivos, la expansión disociadora puede producirse.

(n) La mayoría compuestos de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua. También contiene hidrocarburos no quemados y parcialmente quemados, óxidos de nitrógeno y oxidos de sulfuro. El dióxido de nitrógeno y el oxígeno en la luz solar pueden producir ozono, el cual reacciona con algunos de los orgánicos para producir formaldehído y otros productos.
(o) Estos también contienen trióxido de cromo y una pequeña cantidad de sulfato o sulfato de cromo de amonio (casi saturado) y sulfato de sodio.
(p) Algunos tipos de soluciones son usadas, incluyendo:
a) Sulfatos, sulfato cobrizo y ácido sulfúrico
b) Cianuro, contiene cobre y cianuro de sodio y carbonato de sodio
c) Rochelle, contienen estos cianuros y carbonato de sodio.
d) Otros como fluoborato, pirofosfato, amina o cianuro de potasio.
(q) Contiene fluosilicatos primarios y ácido fluorsilícico
(r) La referencia aquí es la combustión de carbón, la cual produce dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, carbohidratos, amoníaco, ácido nítrico, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, hollín y cenizas.
(u) Los poros de concreto que han absorbido una cantidad considerable de parafina fundida y entonces son sumergidos en agua después de que la parafina se ha solidificado y ha presentado desintegración.
(v) Contiene cloruro de níquel, sulfato de níquel, ácido bórico, y el ión amonio.
(w) Posiblemente contengan varios mezclas de sangre, grasas y aceites, bÍlis y otros jugos gástricos, parcialmente materia vegetal parcialmente digerida, orina y estriércol, con cantidades variables de agua.
(x) Usualmente contiene sulfato de zinc en ácido sulfúrico. La concentración del ácido sulfúrico puede ser tan baja (próxima a 6% en un proceso de "densidad de corriente baja" o tan alta (de 22 a 28%) en un proceso de "alta densidad de corriente".