



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DURABILIDAD EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO
REFORZADO**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Francisco Emiliano Yáñez Arellano

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Héctor Javier Guzmán Olguín



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	4
OBJETIVO.....	6
1. CONCRETO.....	7
1.1 Concreto reforzado.....	7
1.1.1 Cemento.....	9
1.1.2 Agregados.....	13
1.1.3 Agua de mezclado.....	17
1.1.4 Adiciones.....	18
1.2 Propiedades del concreto.....	27
1.2.1 Propiedades en estado fresco.....	27
1.2.2 Propiedades en estado endurecido.....	29
2. DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO.....	32
2.1 Clases de exposición.....	33
2.2 Patología del concreto.....	39
2.2.1 Agentes que afectan la durabilidad en el concreto.....	41
3. PATOLOGÍAS DEL CONCRETO Y MEDIDAS PARA SU PREVENCIÓN.....	43
3.1 Abrasión, erosión e impacto.....	43
3.1.1 Resistencia a la abrasión.....	43
3.1.2 Mejoramiento de la resistencia a la abrasión.....	51

3.1.3 Medidas para prevenir el daño por abrasión.....	51
3.2 Ataque físico por sales.....	53
3.2.1 Resistencia al ataque físico por sales.....	54
3.2.2 Medidas para prevenir el daño por ataque físico de sales	54
3.3 Congelamiento y deshielo	55
3.3.1 Resistencia del concreto a ciclos de congelación y deshielo.....	55
3.3.2 Medidas para prevenir los daños por ciclos de congelación y deshielo	56
3.4 Ataque químico por sulfatos.....	62
3.4.1 Resistencia a los sulfatos	63
3.4.2 Medidas para prevenir el daño por sulfatos.....	64
3.5 Exposición al agua de mar.....	66
3.5.1 Resistencia del concreto en ambientes marinos	67
3.5.2 Zonas de exposición marina y causas de deterioro.....	68
3.5.3 Medidas para prevenir el daño por la exposición a ambientes marinos	73
3.6 Ataque por ácidos	74
3.6.1 Medidas para prevenir el daño por exposición a ambientes ácidos.....	76
3.7 Carbonatación.....	78
3.7.1 Factores que afectan la carbonatación	79
3.7.2 Medidas para prevenir el deterioro por carbonatación	80
3.8 Reacción álcali – agregado.....	80

3.8.1 Reacción álcali - sílice.....	80
3.8.2 Reacción álcali - carbonato.....	83
3.9 Ataque biológico.....	84
3.9.1 Biorreceptividad	85
3.9.2 Biodeterioro.....	87
3.9.3 Medidas para prevenir el biodeterioro.....	91
3.10 Corrosión del acero de refuerzo.....	91
3.10.1 Resistencia a la corrosión	92
3.10.2 Medidas para prevenir el daño por corrosión	94
4 FACTORES QUE CAUSAN DEFECTOS EN EL CONCRETO	96
4.1 Relacionados a la fase de proyecto.....	97
4.2 Relacionados con los materiales.....	99
4.3 Relacionados a los procesos constructivos	99
4.3.1 Diseño de mezcla de concreto	100
4.3.2 Procedimientos de medición y mezclado	101
4.3.3 Transporte y colocación del concreto.....	102
4.3.4 Compactación	106
4.3.5 Curado	107
4.3.6 Acabado.....	109
4.4 Relacionados con la operación y mantenimiento	110

CONCLUSIONES.....	112
BIBLIOGRAFÍA.....	114

INTRODUCCIÓN

Los primeros humanos vivían en refugios naturales, como cuevas, grutas y macizos rocosos. A medida que las comunidades humanas se volvieron sedentarias, estas comenzaron a construir viviendas con estructuras simples que consistían en bloques de piedra acomodados, tierra apisonada, pieles de animales, madera, hojas y paja. Esta actividad tuvo únicamente como propósito crear estructuras para resguardar a los seres humanos de los fenómenos climatológicos y gracias a ello, los seres humanos fueron capaces de adaptarse a una enorme variedad de climas.

Los hallazgos más antiguos de los primeros cementantes datan de los años 7000 a.C. y 6000 a.C. ubicándolos en Israel y Yugoslavia respectivamente, se encontraron vestigios de los primeros pisos una mezcla similar al concreto, elaborada a partir de calizas calcinadas.

Durante los siguientes siglos, se emplearon mezclas de calizas y yesos calcinados para unir bloques de piedra de obras tan imponentes como las pirámides de Giza, en Egipto, cercas del año 2500 a.C. o hacia el año 1950 a.C. en los muros de piedra en el mural de Tebas.

Hacia los años 500 a.C., los griegos utilizaban en sus construcciones una mezcla de materiales provenientes de depósitos volcánicos, con caliza, agua y arena. Esta mezcla ofrecía entonces mejores niveles de resistencia, siendo que para el siglo 2 a.C., en la región de Pozzuoli en las faldas del Vesubio, los romanos desarrollaron el llamado cemento romano a partir de la mezcla de caliza calcinada con finas arenas o cenizas de origen volcánico, dando origen a lo que hoy llamamos puzolanas. Uno de los mejores exponentes que podemos encontrar es el panteón de roma, construido en el año 126 d.C. y que fue durante 1500 años la mayor cúpula construida ya que con sus 43.44 metros de diámetro y

sus 4535 toneladas de peso, es aun hoy, una de las mayores estructuras de concreto no reforzado que existen en el mundo.

En 1759, John Smeaton, un ingeniero de Leeds, en el Reino unido, desarrollo un nuevo mortero para unir los bloques de piedra del faro Eddystone. Al cabo de pocos años, el reverendo James Parker, de manera accidental creó al calcinar piedras calizas, un nuevo cemento, que fue patentado en 1796 y fue utilizado en varias obras del Reino Unido. Josep Aspdin patentó el 21 de octubre de 1824 el Cemento Portland, denominado así por su color grisáceo, muy similar a la piedra de la isla de Portland en Reino Unido. Más adelante Isaac Johnson mejoró este proceso de producción aumentando la temperatura de calcinación, obteniendo en 1845 el prototipo del cemento moderno, razón por la que hoy en día se le conoce Johnson como el padre moderno del Cemento Portland.

Sin embargo, no fue hasta que en el siglo XX y debido a los experimentos de los químicos franceses Louis Joshep Vicat, Henry Louis Le Chatelier, y del Alemán Wilhelm Micháelis, quienes fueron capaces de establecer las bases para producir un cemento de características y calidad mas homogéneas, que se tuvieron los avances necesarios para poder utilizar el Cemento Portland en una gran diversidad de aplicaciones. Este caso fue importante para el desarrollo de la industrialización, la introducción de los hornos rotatorios para la calcinación, así como el molino tubular, invenciones ideadas por Frederick Ransome en 1885 y numerosas personas más que se dedicaron a perfeccionar este sistema.

Pero, como sucede con cualquier material, en sus inicios existen problemas, ya que aun no se conocen todas sus propiedades y restricciones en su uso, por lo que con el paso del tiempo se desarrollaron nuevos métodos de control y ensayos para conocer sus características y con ello anticipar los problemas que se llegaran a presentar con sus posibles riesgos y fallas. Por lo cual en 1904, se funda la Institución Británica de

Estándares; se publica la primera especificación del cemento Portland por la American Society for Testing Materials (A.S.T.M) y comienzan las investigaciones sobre las propiedades del cemento en una base científica y sistemática.

El concreto hidráulico nació siendo una mezcla de cemento, agregados pétreos y agua, el cual tiene una excelente resistencia a los esfuerzos de compresión, sin embargo su resistencia a los esfuerzos de tensión es despreciable, por lo que el concreto se empezó a utilizar con barras de acero embebidas en su interior para que estas fueran las encargadas de soportar los esfuerzos de tensión, esta simbiosis daría origen a lo que hoy conocemos como concreto reforzado.

Las estructuras de concreto se diseñan para soportar las distintas fuerzas o cargas a las que estará sometido durante su vida útil, ya sea gravitacionales o dinámicas, por lo cual, se hacen análisis para determinar los diferentes mecanismos presentes en ella y las reacciones que provocan, diseñando así una estructura segura y resistente. Existen algunas estructuras en el mundo, que a pesar de que fueron construidas hace más de un siglo, permanecen hoy en día en excelente estado por lo que durante muchos años se pensó que las construcciones tendrían una vida ilimitada, y los diseñadores y constructores estuvieron principalmente interesados en las características asociadas con la resistencia mecánica del material y no así en los efectos que ciertos climas y sustancias producen en el.

ANTECEDENTES

A partir de los años 80 se comenzaron a observar un gran número de estructuras prematuramente deterioradas por lo que se empezó a analizar con seriedad el hecho de que muchas construcciones no fueran capaces de conservar cierto grado de seguridad y utilidad para la que fueron diseñadas, muchas de ellas presentaban corrosión del acero de refuerzo, lo que ha sido un tema de gran relevancia para la industria de la construcción, dado que los costos generados por el mantenimiento o remplazo que esto genera es bastante considerable.

La durabilidad de las estructuras de concreto ha pasado a ser un tema de gran relevancia ya que al limitar el deterioro que ciertos fenómenos generan en el concreto y el acero de refuerzo, se prolonga la vida útil de la estructura, manteniendo así su capacidad para soportar las solicitaciones para la que fue diseñada. Esto motivo a muchos países a crear organismos capaces de determinar las causas, consecuencias, y alternativas de solución para combatir los agentes que degradan el concreto y el acero embebido en el.

Algunos de los organismos son:

- PCA – Portland Cement Association
- SHRP – Strategic Highway Research Program
- ACI – American Concrete Institute
- ASCE – American Society of Civil Engineers
- ASTM – American Society for Testing Materials
- NACE – The National Association of Corrosion Engineers
- RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux
- CEB – Comité Electrotechnique Belge

- CCANZ – Cement & Concrete Association of New Zeland
- NMAB – The National Materials Advisory Board
- IECA – Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones
- CYTED – Programa de Ciencia y Tecnología para el desarrollo
- DURAR – Red Temática de Durabilidad de la Armadura
- IMCYC – Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto

Hoy en día, los estudios de estos organismos acerca de las patologías que presentan las estructuras de concreto, son cada vez más avanzados y siempre encaminados a proponer técnicas de elaboración de estructuras capaces de soportar los ataques físicos, químicos y biológicos a los que se encuentren expuestas y en casos donde ya se presenten daño, se propondrán métodos de prevención, reparación y mantenimiento de las zonas dañadas para que no se vea afectado su desempeño estructural.

En México las Normas Técnicas Complementarias para el diseño y construcción de estructuras de concreto, incluyen por primera vez un apartado sobre el tema de durabilidad en el 2004.

OBJETIVO

La presente obra de investigación tiene como propósito recopilar y dar a conocer los diferentes tipos de patologías que se presentan en las estructuras de concreto reforzado, debido a las condiciones de exposición a las que están sometidas, así como las causas, efectos, medidas de prevención, mantenimiento y protección necesarias en cada una de ellas, para que estas estructuras no vean afectada su durabilidad, siendo capaces de mantener inalteradas sus condiciones físicas y químicas por lo menos a lo largo de su vida útil, sin que esto altere su capacidad de soportar las acciones mecánicas y dinámicas para la que fue diseñada.

1. CONCRETO

1.1 Concreto reforzado

El concreto hidráulico, se obtiene de la mezcla de cemento, agua, agregados naturales ya sean manufacturados o artificiales y en algunos casos se agregan una o más adiciones para mejorar propiedades específicas del concreto.

El concreto reforzado es un material de construcción ampliamente utilizado en la industria de la construcción, consiste en una combinación de dos materiales principales: concreto y acero de refuerzo.

Desde un punto de vista macroscópico, el concreto endurecido está compuesto por dos fases; la matriz de pasta de cemento y los agregados dispersos en ese mismo espacio, siendo los agregados los que ocupan un porcentaje mayor en su elaboración.

Existen muchos tipos de concreto en el mercado, todos diseñados para tener un buen desempeño, ya sea limitando ciertas características no favorables intrínsecas del material o favoreciendo otras que propicien un mejor comportamiento en diferentes clases de exposición y condiciones servicio, los más utilizados son:

- Concreto Lanzado
- Concreto Autoconsolidable
- Concreto Celular
- Concreto Masivo
- Concreto Antideslave
- Concreto Permeable
- Concreto Ligero
- Concreto Pesado

- Concreto Fluido
- Concreto de Baja Contracción
- Concreto Antibacterial
- Concreto Fibroreforzado
- Concreto Traslucido
- Concreto Alta Resistencia
- Concreto Alto Desempeño
- Concreto Ultra Alto Desempeño

La estructura altamente compleja y heterogénea del concreto hace difícil caracterizar su microestructura, siendo complicado determinar los tipos, cantidades y distribución de todos los componentes presentes, más aun cuando se tienen distintas adiciones en diferentes proporciones, por lo cual no se han podido crear modelos capaces de relacionar sus propiedades y estos sean capaces de predecir su comportamiento de manera precisa.



Figura 1 *Concreto reforzado*

1.1.1 Cemento

Es un material inorgánico finamente pulverizado que al combinarse con agua adquiere propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de fraguar, endurecer y conservar su estabilidad.

Existen diferentes tipos de cementos en el mercado, cada país tiene una forma diferente de clasificarlos según su normatividad, pero los componentes son esencialmente los mismos.



Figura 2 *Cemento*

La norma ASTM C 150 “Standard Specification for Portland Cement”, clasifica el cemento Portland en 5 tipos (Tabla 1).

Tabla 1*Clasificación de cementos ASTM - Uso*

Clasificación de cementos ASTM C 150	
Cemento	Uso
Tipo I	Cemento uso general
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque de los sulfatos
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado
Tipo IV	Presenta calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo
Tipo V	Cemento de alta resistencia a los sulfatos, se utiliza en suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en concretos que estén expuestos a aguas negras

En la ASTM C 595 “Standard Specification for Blended Hydraulic Cements”, observamos las especificaciones para los cementos adicionados hidráulicos (Tabla 2).

Tabla 2*Clasificación de cementos ASTM - Denominación*

Clasificación de cementos ASTM C 595	
Tipo	Denominación
I (SM)	Cemento Portland modificado con escoria
I (PM)	Puzolana modificado con cemento Portland
IP	Cemento puzolánico Portland
P	Cemento puzolánico Portland cuando no se requieran mayores resistencias a edades tempranas
S	Cemento con escoria para la combinación con cemento Portland en la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada en la fabricación de mortero de albañilería
IS	Cemento Portland de escoria de alto horno

En la ASTM C 1157 “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement”, tenemos las especificaciones de desempeño para cemento hidráulico y en ellas se establecen requerimientos solo para los ensayos físicos y se hace referencia a los ensayos químicos sin hacer mención de los requerimientos. (Tabla 3).

Tabla 3

Clasificación cementos ASTM - Desempeño

Clasificación de cementos ASTM C 1157	
Tipo	Denominación
GU	Cemento de uso general
HE	Cemento de alta resistencia rápida
MS	Cemento con resistencia moderada a los sulfatos
HS	Cemento con alta resistencia a los sulfatos
MH	Cemento con moderado calor de hidratación
LH	Cemento con bajo calor de hidratación

En la norma ASTM C 845 “Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement”, encontramos las especificaciones para los cementos hidráulicos expansivos con sus requerimientos físicos y químicos.

En México, la NMX-C-414 “Cementos Hidráulicos. Especificaciones y Métodos de Ensayo”, clasifica a los cementos de acuerdo a tres aspectos; tipo de cemento (Tabla 4), características especiales (Tabla 5) y clase resistente (Tabla 6).

Tabla 4*Tipo de cemento NMX*

Tipo de cemento	
Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Tabla 5*Características especiales NMX*

Características especiales	
Característica	Descripción
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alkali agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

Tabla 6*Clase resistente NMX*

Clase resistente			
Clase resistente	Resistencia a la compresión [N/mm ²]		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	-	40	-

Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tiene la propiedad de fraguar y endurecer gracias a la reacción química que experimentan con el agua. La cantidad necesaria para que se lleve a cabo completamente esta reacción química es alrededor de un 40% del peso del cemento. Un aproximando del 23% de esta agua se combina químicamente y desarrollar productos de hidratación y el resto se absorbe en la superficie del gel que se forma en los poros. El exceso en la cantidad de agua de la mezcla, generara una mayor cantidad de poros siendo la responsable de la permeabilidad del concreto endurecido.

1.1.2 Agregados

Los agregados o materiales pétreos, son las piedras naturales que pueden presentarse en forma de bloques, losetas y gránulos, pizarra, mármol o arena. Estos pueden ser pétreos naturales extraídos directamente de la naturaleza en los lechos y terrazas de los ríos, de minas de arena y grava volcánica o pétreos artificiales procesados que se producen a partir de la fragmentación de rocas mediante medios mecánicos o uso de explosivos, estos se consideraban inertes en el concreto y se empleaban por razones económicas, sin embargo no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en gran medida tanto en la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto.



Figura 3 *Agregados pétreos*

La norma NMX-C-305 “Descripción de sus Componentes Minerales Naturales”, nos da una descripción breve de los componentes minerales que se pueden encontrar en los agregados para concreto, esto para reconocer algunas de sus propiedades, sin embargo, la identificación exacta de estos minerales debe llevarse a cabo por un geólogo, petrógrafo o mineralogo calificado, para poder reconocer si alguna roca o mineral se presenta como contaminante y sea perjudicial para la calidad del agregado afectando su durabilidad, algunas de estas propiedades son:

- Litología (ASTM C 295 “Standard Guide for Petrographic Examination of Aggregates for Concrete”, ASTM C 856 “Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete” y NMX-C-265 “Agregados para Concreto Hidráulico. Examen Petrográfico - Método de Ensayo)
- Contenido de agua por secado (NMX-C-166 “Contenido de Agua por Secado”)
- Densidad (ASTM C 127 “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate”, ASTM C 128 “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate”, NMX-C-164 “Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Grueso – Método de Ensayo” y NMX-C-165 “Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino”)
- Absorción (NMX-C-164 Y NMX-C-165)

- Sanidad de la roca / intemperismo acelerado (ASTM C 88 “Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate” y NMX-C-075 “Agregados. Determinación de la Sanidad por Medio del Sulfato de Sodio o el Sulfato de Magnesio”)
- Abrasión e impacto (ASTM C 131 “Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine” y NMX-C-196 “Agregados. Determinación de la Resistencia a la Degradación por Abrasión e Impacto de Agregados Gruesos Usando la Máquina de los Ángeles”)
- Factor de forma grava (ASTM D 4791 “Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate” y NMX-C-436 “Coeficiente Volumétrico (de forma) en Agregado Grueso”)
- Contenido de materia orgánica (ASTM C 40 “Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete” y NMX-C-088 “Agregados. Efectos de las Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino”)
- Terrones de arcilla y partículas deleznales (NMX-C-071 “Determinación de Terrones de Arcilla y Partículas Deleznales”)
- Granulometría (ASTM C 136 “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates” y NMX-C-077 “Análisis Granulométrico – Método de Ensayo”)

- Perdida por lavado (ASTM C 117 “Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing” y NMX-C-084 “Partículas más Finas que la Criba 0,075mm (#200) por Medio de Lavado – Método de Ensayo”)
- Coeficiente volumétrico (ASTM D 4791 y NMX-C-436)
- Masa Volumetrica (ASTM C 29 “Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate” y NMX-C-073 “Masa Volumétrica”)

El agregado para concreto hidráulico se clasifica en agregado fino y grueso y este debe cumplir con las especificaciones de la norma ASTM C 33 “Standard Specification for Concrete Aggregates” y NMX-C-111 “Agregados para Concreto Hidráulico. Especificaciones y Métodos de Ensayo”, en el caso de los agregados para concreto ligero deberán satisfacer los requerimientos del ASTM C 330 “Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete” y NMX-C-299 “Agregados Ligeros – Especificaciones y Métodos de ensayo”.

1.1.2.1 Agregado fino

Conocido generalmente como arena, esta es obtenida y seleccionada de bancos u obtenida mediante trituración, con partículas que comprenden los 75 μ (malla No. 200) y 4.75mm (malla No.4), pudiendo contener partículas más finas siendo posible determinarlas mediante los procedimientos especificados en las normas ASTM C 117 y NMX-C-084.

Las normas ASTM C 40 y NMX-C-088 describen los procedimientos para una determinación aproximada de la presencia de impurezas orgánicas perjudiciales en agregados finos que serán utilizados en cemento hidráulico o concreto, mientras que la ASTM C 87 “Standard Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on

Strength of Mortar” y NMX-C-076 “Efectos de las Impurezas Orgánicas en los Agregados Finos Sobre la Resistencia de los Morteros” nos hablan de sus efectos en la matriz de cemento endurecida.

1.1.2.2 Agregado grueso

Conocido generalmente como grava, esta puede ser natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas que comprenden tamaños entre 4.75mm (malla No.4) y 76mm (3”), pudiendo contener fragmentos de roca y arena siempre y cuando se encuentren dentro de los límites establecidos.

La forma de las partículas de los agregados tiene influencia sobre algunas de sus propiedades, pudiendo modificar la forma en que se coloca y consolida el concreto por lo que la ASTM D 4791 y la NMX-C-436, definen el método para determinar la cantidad y forma de partículas deseables del agregado, mientras la ASTM C 136 y la NMX-C-077 definen el método de prueba para determinar la distribución de agregado fino y grueso mediante cribado.

1.1.3 Agua de mezclado

El agua es un ingrediente sumamente importante ya que es la responsable de que se presenten las interacciones necesarias con los componentes del concreto, esta debe estar libre de contaminantes y agentes nocivos para el concreto. Los tipos de agua que contienen agentes que pueden afectar el desempeño del concreto son las aguas puras, aguas duras, acidas, tratadas, industriales, negras y con fuertes cantidades de sales.

No siempre se puede contar con agua potable en las obras o agua en buenas condiciones por lo que la norma ASTM C 1602 “Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete”, ASTM C 1603 “Standard Test Method for Measurement of Solids in Water”, ASTM D 1193 “Estándar Specification for

Reagent Water”, NMX-C-283 “Agua para Concreto - Métodos de Prueba” y la NMX-C-122 “Agua para Concreto - Especificaciones”, establecen los límites permisibles en el contenido de impurezas que puede contener el agua de mezclado.

1.1.4 Adiciones

Las adiciones a diferencia del cemento, los agregados y el agua, no son componentes esenciales de la mezcla del concreto, sin embargo estos son capaces de ayudar a modificar propiedades específicas del concreto en estado fresco, fraguado o en su estado endurecido, para hacerlo más adecuado según el trabajo o la exigencia dada y para que cumpla los requisitos y especificaciones particulares de cada estructura.

1.1.4.1 Adiciones minerales

Los aditivos minerales como la escoria de alto horno, vapor de sílice, ceniza volante y puzolanas, sirven para que al reaccionar junto con el cemento y los demás componentes del concreto, se mejore una propiedad en particular, como puede ser la trabajabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia a los sulfatos o reducir la permeabilidad del concreto.

La escoria molida de alto horno es un subproducto no metálico producido en un alto horno cuando el mineral de hierro es fundido. La escoria líquida es enfriada rápidamente para después ser molidos hasta tener una finura similar a la del cemento portland. Para utilizar la escoria molida de alto horno como cementante, debe cumplir los requerimientos establecidos en la norma ASTM C 989 “Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars”. En esta especificación se definen en tres grados de escorias: 80, 100, 120, donde el grado más alto contribuye más a la resistencia potencial. Las escorias molidas de alto horno tienen propiedades cementantes, pero estas se ven mejoradas cuando se usan con cemento portland. Las escorias se utilizan entre el 20 y 70% en peso de los materiales cementantes.

El humo de sílice es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo y ferro silíceo. Se recolecta de las chimeneas de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas que llegan a ser hasta 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. Este material está disponible como un polvo densificado o en forma líquida. Los requerimientos necesarios para utilizar el humo de sílice están establecidos en la norma ASTM C 1240 “Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures”. Generalmente se utiliza entre el 5 y 12% en peso de los materiales cementantes para las estructuras de concreto que necesitan alta resistencia o una permeabilidad muy baja. Debido a su extrema finura se requieren cuidados especiales para la manipulación, mezclado, vaciado y curado del concreto con este material.

Las puzolanas son materiales que pueden ser de origen natural o artificial que contienen sílice en forma reactiva. La norma ASTM C 618 “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete” y la NMX-C-146 “Aditivos para Concreto Pozzolana Natural Cruda o Calcinada y Ceniza Volante para Usarse como Aditivo Mineral en Concreto de Cemento Portland”, contiene los requerimientos necesarios para su uso, en esta se describe a la puzolana como un material silíceo o silíceo aluminoso el cual en realidad no posee un valor cementante, pero que en presencia de humedad reacciona químicamente con el hidróxido de calcio que produce el cemento en su fase de hidratación para formar compuestos con propiedades cementantes, como los silicatos de calcio estables. Los materiales puzolánicos naturales encontrados más comúnmente son: ceniza volcánica, ceniza de cascara de arroz, tierras diatomáceas, arcilla calcinadas, pizarras y pedernales opalinos. La norma ASTM C 618 clasifica estos materiales como clase N.

Las cenizas volantes son puzolanas artificiales que son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como un combustible para la generación de energía y constituyen en si las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. Sus características pueden variar significativamente según la fuente de carbón mineral que se quema. Las cenizas de clase F son normalmente producidas de la quema de antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio, mientras que las cenizas clase C son producidas cuando se queman carbones sub bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas. Sus características y requerimientos para su uso, se encuentran en las normas ASTM C 618 y la NMX-C-146.

1.1.4.2 Adiciones químicas

Los aditivos químicos se utilizan para modificar el comportamiento del concreto en estado fresco o endurecido y así mejorar alguna o varias propiedades, por ejemplo, mayor o menor tiempo de fraguado, inhibidores de corrosión, resistencias iniciales altas, controlar reacciones químicas con los agregados, reducir la segregación, mejorar la trabajabilidad, por mencionar algunos.

La eficiencia de los aditivos depende de diversos factores como la proporción de agua en la mezcla, el tipo y cantidad de cemento, tipo y cantidad de agregado, granulometría, tiempo de mezclado, y la más importante es la temperatura, ya que ella puede propiciar comportamientos deseables o indeseables en el concreto.

Los aditivos para concreto deben cumplir las especificaciones de la norma ACI 212.3R “Report on Chemical Admixtures for Concrete”, ASTM C 494 “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”, ASTM C 1017 “Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete” y en el caso de México la NMX-C-255 “Aditivos Químicos para Concreto”.

1.1.4.3 Adición de fibras

El uso de las fibras como un componente en materiales de relleno o aglomerantes, no es nuevo y su uso se remonta varios siglos atrás, un ejemplo de ello es el adobe. Estas fibras ayudan a los materiales a asumir esfuerzos de tensión y le confieren así un mayor monolitismo a los elementos.

Probablemente el uso más extendido de las fibras como un componente más en materiales aglomerantes haya sido su uso en elementos como tejas y prefabricados de asbesto-cemento, sin embargo por consideraciones de salud estas últimas fueron sustituidas por fibras de distintos materiales que no tienen efectos adversos en la salud humana.

Las fibras como refuerzo secundario, hoy en día son mayormente utilizadas en adición con el concreto, ya que estas actúan como pequeñas barras de refuerzo, permitiendo que el concreto reforzado con fibras sea capaz de absorber mayores esfuerzos e incrementar su tenacidad. Entre sus principales usos destacan el refuerzo de pisos industriales, comerciales, pistas de aeropuertos, autopistas, estabilización de taludes, por mencionar algunos.



Figura 4 *Fibras metálicas en el concreto*

Los requisitos mínimos que deben cumplir las fibras destinadas para su uso en la elaboración concreto reforzado con fibras, en general pueden clasificarse según diferentes consideraciones, las normas ASTM C 1116 “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete”, ASTM A 820 “Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete”, NMX-488 “Fibras de Acero para Refuerzo de Concreto”, NMX-C-537 “Fibras Poliméricas para Concreto”, contienen las especificaciones y recomendaciones para su uso, mientras la ASTM C 1018 “Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)”, ASTM C 1399 “Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete”, ASTM C 1550 “Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)”, ASTM C 1609 “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)”, NMX-C-535 “Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación del Desempeño por Flexión Utilizando la Viga con Carga en el Tercio Medio”, NMX-C- 538 “Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación de la Resistencia al Agrietamiento, Tenacidad y Resistencia Residual a Tensión”, NMX-C-539 “Concreto Reforzado con Macrofibras – Determinación de la Tenacidad a la Flexión Utilizando el Panel Circular con Carga Central”, establecen las especificaciones y métodos de ensaye para concretos elaborados con fibras, algunos de los beneficios de incorporar fibras metálicas en el concreto son:

- Resistencia al cortante
- Ductilidad
- Disminuir los efectos de contracción plástica y por secado

- Resistencia al impacto
- Resistencia a la fatiga
- Resistencia a la abrasión

Las fibras pueden clasificarse de manera simple en dos tipos:

- Material.
 - Fibras metálicas: Secciones discretas de metal, en general de acero con un bajo contenido de carbono que tienen una relación aspecto que va desde 20 hasta 100.
 - Fibras sintéticas: Secciones discretas que se distribuyen aleatoriamente dentro del concreto que pueden estar compuestas de acrílico, aramida, carbón, polipropileno, poliestileno, nylon, poliéster, etc.
 - Fibras de vidrio: Secciones discretas de fibra de vidrio resistentes al álcali.
 - Fibras naturales: Secciones discretas de origen como coco, sisal, azúcar, madera, caña de azúcar, yute, bambú, etc. Y sus diámetros varían entre 0.5 y 0.2mm, con valores de absorción superiores al 12%.
- Por funcionalidad, geometría y dosificación.

- Microfibras

Las microfibras son una excelente y muy económica forma de prevenir la fisuración del concreto en estado plástico. La función principal de estas fibras se desarrolla dentro de las primeras 24 horas a la colocación del concreto, ayudando a evitar la fisuración por retracción plástica del concreto. Estas fibras tienen, diámetros que van desde 0.023mm hasta 0.050mm, pudiendo ser de monofilamento y dosificándose en el concreto

para volúmenes entre 0.03% a 0.15% del mismo; teniendo un uso muy extendido en pisos, pavimentos, prefabricados y en general a todos los materiales cementicios con tasas de superficie expuesta/volumen altas.

- Macrofibras

A diferencia de las microfibras que ayudan a prevenir las fisuraciones en estado plástico, las macrofibras previenen la fisuración del concreto en estado endurecido, ayudando a reducir el ancho de una fisura si esta se llegase a presentar permitiendo así el adecuado funcionamiento de la estructura aunque está este fisurada.

Las macrofibras se incluyen y mezclan en el concreto como si fuesen un agregado más, estas fibras pueden ser metálicas, sintéticas o naturales y su dosificación, en términos de peso, varía de acuerdo con la densidad del material. Las fibras de acero usualmente requieren de 20 a 50 kg/m³ de concreto, las fibras sintéticas entre 2 a 9 kg/m³, por lo que normalmente se exige un tiempo mayor de mezclado que va de entre 3 a 5 minutos para garantizar su completa dispersión dentro de la masa de concreto.

Estas fibras no influyen en la resistencia a compresión o tensión del concreto, su principal función es aumentar la tenacidad del concreto, esta propiedad es altamente apreciada en estructuras como pisos, pavimentos, recubrimientos de concretos lanzados en taludes y túneles, elementos expuestos a vibraciones o a cargas altas en tiempos cortos.

La tenacidad es una propiedad que describe de una manera más completa la capacidad de un material para soportar cargas antes de colapsar, en el caso

de las estructuras de concreto, permitir que sigan siendo cargadas incluso después del agrietamiento.



Figura 5 *Fibras para la construcción*

Nota. Tipos de macrofibras. Reproducida de “Concreto Reforzado con Fibras”, Sika Colombia, 2014.

1.1.4.4 Acero

El acero de refuerzo generalmente se utiliza en forma de barras o varillas que se fabrican tanto de acero laminado en caliente, como de acero trabajado en frío.

La norma ASTM A 615 “Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement”, ASTM A 706 “Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Steel Bars for Concrete Reinforcement”, NMX-B-072-CANACERO “Varilla Corrugada de Acero, Grado 60, Laminada en Frío para Refuerzo de Concreto”, NMX-B-457-CANACERO “Varilla Corrugada de Acero de Baja Aleación para Refuerzo de Concreto” y NMX-B-506-CANACERO “Varilla Corrugada de Acero para Refuerzo de Concreto”, establecen las especificaciones y métodos de prueba de las varillas para refuerzo en el concreto. Es muy común que construcciones de todo tipo, se elaboren de concreto por

su alta resistencia a la compresión y durabilidad, pero el comportamiento del concreto es frágil, por lo que la adición de acero en el concreto como fibras o refuerzo, mejora notablemente sus propiedades a la tensión.



Figura 6 *Concreto reforzado en obra*

El uso del concreto reforzado se ha vuelto bastante común en todo tipo de construcciones, algunos de los beneficios del acero de refuerzo en el concreto son:

- Resistir esfuerzos de tensión y compresión
- Reducir deformaciones a largo plazo
- Restringir la aparición de grietas y fisuras
- Resistir esfuerzos cortantes
- Resistir esfuerzos de torsión
- Aumento de la resistencia a la tracción
- Confinamiento del concreto
- Aumento de la ductilidad de las estructuras

1.2 Propiedades del concreto

Las propiedades del concreto son características o cualidades básicas que nos permiten conocer ciertos comportamientos deseables, que necesiten ser corregidos o que nos ayudaran a descartar ese material. Sus cuatro propiedades principales son:

- Trabajabilidad
- Cohesividad
- Resistencia
- Durabilidad

Estas propiedades se presentan en diferentes fases de la maduración del concreto, pasando por el estado fresco, fraguado y endurecido, las cuales se describirán por separado.

1.2.1 Propiedades en estado fresco

Al entrar en contacto el cemento y el agua, en la mezcla de los componentes principales del concreto, se inicia la reacción de hidratación de la pasta. En esta fase el concreto se encuentra formando una masa blanda que puede ser trabajada y moldeada de diferentes formas, antes de adquirir su resistencia final.

Las propiedades más importantes en estado fresco son:

- **Trabajabilidad:** La manejabilidad es una propiedad del concreto que permite al mismo, ser mezclado, transportado, vaciado, consolidado y terminado. Esta es afectada por la cantidad de cemento y la granulometría de los agregados; la manejabilidad no debe alterar la homogeneidad del concreto.
- **Cohesión:** Es importante que los componentes del concreto se mantengan adheridos ya que en caso contrario, se puede presentar segregación y no sería

una mezcla homogénea, presentando aéreas de menor resistencia, mayor cantidad de vacíos, etcétera.

- Permanencia: Tiempo que transcurre a partir de que entra en contacto el agua con el cemento y hasta el inicio del fraguado.

1.2.1.1 Pruebas en el concreto fresco

Las pruebas que se realizan en el concreto en estado fresco son:

- Revenimiento (ASTM C 143 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete” y NMX-C-156 “Determinación del Revenimiento en el Concreto Fresco”)
- Masa Unitaria (ASTM C 138 “Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete” y NMX-C-162 “Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico”)
- Temperatura (ASTM C 1064 “Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete” y NMX-C-435 “Determinación de la Temperatura del Concreto Fresco”)
- Tiempo de Fraguado (ASTM C 403 “Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance” y NMX-C-177 “Determinación del Tiempo de Fraguado de Mezclas de Concreto, Mediante la Resistencia a la Penetración”)



Figura 7 Muestreo en Obra (Revenimiento)

1.2.2 Propiedades en estado endurecido

Cuando el concreto llega a su etapa final de fraguado, este comienza a ganar resistencia y se endurece. Las propiedades más importantes del concreto en este estado son:

- Estabilidad dimensional: Deformaciones en el concreto que en general se reflejan en agrietamientos; ocurren como respuesta a condiciones externas y al medio ambiente. Esta se encuentra íntimamente ligada al módulo de elasticidad, relación de Poisson, contracción por secado, contracción térmica y contracción autógena.
- Resistencia: Una de las propiedades más importantes del concreto, es su resistencia, ya que nos suele dar una imagen general de la calidad del concreto por estar directamente ligada a la estructura de la pasta de cemento hidratada y casi invariablemente es un elemento vital del diseño estructural y se especifica con fines de cumplimiento en el proyecto.

- Durabilidad: puede definirse como su capacidad para resistir la acción del medio ambiente circundante, los ataques químicos, biológicos, la abrasión y cualquier otro proceso de deterioro.

1.2.2.1 Pruebas en el concreto endurecido

Las pruebas que se aplican en el concreto en estado endurecido son:

- Modulo de elasticidad (ASTM C 469 “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression” y NMX-C-128 “Modulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson”)
- Contracción por secado (ASTM C 157 “Standard Test Method for Length Change Of Hardened Cement Mortar And Concrete”)
- Resistencia a la compresión (ASTM C 39 “Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens” y ASTM C 495 “Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete” y NMX-C- 083 “Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes”, NMX-C-219 “Resistencia a la Compresión a Edades Tempranas y Predicción de la misma a Edades Posteriores”)
- Resistencia a la tensión (ASTM C 496 “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, ASTM C 293 “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)” y ASTM C 78 “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading”, NMX-C-163 “Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto”, NMX-C-303 “Determinación de la

Resistencia a la Flexión Usando una Viga Simple con Carga en el Centro del Claro”, NMX-C-191 “Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando Una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro”)

- Resistencia a la abrasión (ASTM C 779 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces”)



Figura 8 Prueba Resistencia a la Compresión



Figura 9 Prueba de Resistencia a la Flexión de Viga Simple

2. DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO

El comité ACI 201.2R “Guide to Durable Concrete” la define como, “La durabilidad del concreto se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier proceso de deterioro”.

El diseño de una estructura de concreto reforzado, debe contemplar no solo los análisis por cargas gravitacionales y dinámicas, que son los necesarios para evaluar el Estado Limite de Servicio y el Estado Limite Ultimo de dicha estructura, el proyecto también deberá tener en cuenta los criterios de Durabilidad, donde las condiciones ambientales, climatológicas y todos los agentes agresivos a los que la construcción estará expuesta, ya sean físicos o químicos, y estos no sean capaces de producir una degradación de los materiales, tal que se vean afectadas sus propiedades mecánicas y estas afecten los Estados Limite de la estructura. La práctica ha observado que de ser tomadas todas esas consideraciones, se reducen los gastos posteriores por mantenimiento, reparaciones en las estructuras de concreto reforzado y sustitución parcial o total de elementos estructurales.

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, debe ser considerada como prioridad en la estimación de la vida útil de las edificaciones, para que estas sean capaces de satisfacer un conjunto de requisitos arquitectónicos, funcionales, estructurales, de comportamiento, de estabilidad y de seguridad durante un cierto periodo de tiempo, así como conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas, sin que se generen costos inesperados o excesivos de mantenimiento o reparación.

La vida útil se define como, “El periodo de tiempo, a partir de la finalización de la ejecución de la estructura, y durante el cual y bajo las condiciones ambientales previstas, mantendrá su seguridad, funcionalidad y buen aspecto, sin que se requieran costes elevados de mantenimiento y reparación”.

Es importante definir la vida útil que tendrá la estructura al momento de diseñar el proyecto, está en ningún momento será menor a lo que se especifique en la normativa vigente en la ubicación donde se vaya a realizar dicho proyecto. Para edificaciones en la Ciudad de México las normas establecen una vida útil de mínimo 50 años.

2.1 Clases de exposición

Para que las construcciones de concreto reforzado tengan una expectativa de durabilidad de por lo menos 50 años como lo especifica la norma mexicana, se deberá definir el grado de agresividad ambiental al que se encontrara expuesta la estructura, definiendo una clase de exposición y en caso de existir, hacer referencia a procesos de corrosión del acero de refuerzo.

La normatividad y la manera en como clasifica los grados y clases de exposición cambian en cada país, por lo que se deberán seguir las normas locales vigentes de la ubicación donde se construirá la estructura, sin embargo los valores permisibles son similares, en el caso de la normatividad mexicana, las clases de exposición según la normatividad varían, las NTC-CDMX tienen una tabla más sencilla que las que contienen las normas NMX-C-155 “Concreto Hidráulico – Dosificado en Masa, Especificaciones y Métodos de Ensayo” (Tabla 7) y NMX-C-530 “Industria de la Construcción – Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones” (Tabla 8).

Tabla 7 Clasificación de exposición NMX-C-155

Clasificación de exposición ambiental (NMX-C-155)	
Clase	Condiciones ambientales
1	<p>Ambiente seco:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interior de edificaciones habitables • Componentes interiores que no se encuentran expuestos en forma directa al viento ni a suelos o agua

	<ul style="list-style-type: none"> • Regiones con humedad relativa mayor al 60% por un lapso no mayor a tres meses al año 										
2a	<p>Ambiente húmedo sin congelamiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Interior de edificaciones con humedad relativa mayor al 60% por más de tres meses al año • Elementos exteriores expuestos al viento pero no al congelamiento • Elementos en suelos no reactivos o no agresivos, y/o en agua sin posibilidad de congelamiento 										
2b	<p>Ambiente húmedo con congelamiento:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elementos exteriores expuestos al viento y al congelamiento • Elementos en suelos no reactivos o no agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento 										
3	<p>Ambiente húmedo con congelamiento y agentes descongelantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elementos exteriores expuestos al viento, con posibilidad de congelamiento y/o exposición a agentes descongelantes • Elementos en suelos no reactivos o no agresivos y/o en agua con posibilidad de congelamiento y agentes químicos descongelantes 										
4a	<p>Ambiente marino totalmente sumergido:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estructuras totalmente sumergidas sin exposición parcial o total al aire 										
4b	<p>Ambiente marino grado moderado:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua • Estructuras con influencia del aire marino en grado moderado, colocadas entre 3 km y 300 m de la línea costera 										
4c	<p>Ambiente marino grado severo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Área rica en sales o costera, sin contacto con el agua • Estructuras con influencia del aire marino en grado severo, colocadas entre la línea costera y 300 m de la línea costera 										
4d	<p>Ambiente marino Zona de salpicadura:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Área rica en sales en contacto con agua • Estructuras en contacto con aire y agua marina, ciclos de humedecimiento y secado 										
5a	<p>Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos):</p> <ul style="list-style-type: none"> • En contacto con agua <table border="1"> <tr> <td>pH</td> <td>6.5 – 5.5</td> </tr> <tr> <td>CO₂ agresivo [mg/l como CO₂]</td> <td>15 – 30</td> </tr> <tr> <td>Amonio [mg/l como NH⁴⁺]</td> <td>15 – 30</td> </tr> <tr> <td>Magnesio [mg/l como Mg²⁺]</td> <td>100 – 300</td> </tr> <tr> <td>Sulfato [mg/l como SO₄²⁻]</td> <td>200 – 600</td> </tr> </table>	pH	6.5 – 5.5	CO ₂ agresivo [mg/l como CO ₂]	15 – 30	Amonio [mg/l como NH ⁴⁺]	15 – 30	Magnesio [mg/l como Mg ²⁺]	100 – 300	Sulfato [mg/l como SO ₄ ²⁻]	200 – 600
	pH	6.5 – 5.5									
CO ₂ agresivo [mg/l como CO ₂]	15 – 30										
Amonio [mg/l como NH ⁴⁺]	15 – 30										
Magnesio [mg/l como Mg ²⁺]	100 – 300										
Sulfato [mg/l como SO ₄ ²⁻]	200 – 600										
<ul style="list-style-type: none"> • En contacto con suelo <p>Grado de acidez según Baumann-Gully</p> <table border="1"> <tr> <td>Grado de acidez según Baumann-Gully</td> <td>Mayor a 20</td> </tr> </table>	Grado de acidez según Baumann-Gully	Mayor a 20									
Grado de acidez según Baumann-Gully	Mayor a 20										

	Sulfatos [mg de SO_4^{2-} /kg de suelo secado al aire]	2000 – 6000
5b	Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidos o sólidos):	
	<ul style="list-style-type: none"> En contacto con agua <p>pH CO_2 agresivo [mg/l como CO_2] Amonio [mg/l como NH_4^+] Magnesio [mg/l como Mg^{2+}] Sulfato [mg/l como SO_4^{2-}]</p>	5.5 – 4.5 31 – 60 31 – 60 301 – 1500 601 – 3000
	<ul style="list-style-type: none"> En contacto con suelo <p>Sulfatos [mg de SO_4^{2-}/kg de suelo secado al aire]</p>	6000 - 12000
5c	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos):	
	<ul style="list-style-type: none"> En contacto con agua <p>pH CO_2 agresivo [mg/l como CO_2] Amonio [mg/l como NH_4^+] Magnesio [mg/l como Mg^{2+}] Sulfato [mg/l como SO_4^{2-}]</p>	4.5 – 4.0 61 – 100 61 – 100 1501 – 3000 3001 – 6000
	<ul style="list-style-type: none"> En contacto con suelo <p>Sulfatos [mg de SO_4^{2-}/kg de suelo secado al aire]</p>	>12000
5d	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, líquidos o sólidos):	
	pH CO_2 agresivo [mg/l como CO_2] Amonio [mg/l como NH_4^+] Magnesio [mg/l como Mg^{2+}] Sulfato [mg/l como SO_4^{2-}]	< 4.0 > 100 > 100 > 3000 > 6000
6	Acciones de erosión o cavitación	
6a	Grado ligero:	
	<ul style="list-style-type: none"> Vialidad con escasa circulación Vehículos ligeros y tráfico peatonal Sin riesgo de congelamiento 	
6b	Grado moderado:	
	<ul style="list-style-type: none"> Carreteras y caminos de red secundaria Pisos industriales con circulación de montacargas con ruedas de hule 	

	<p>con menos de 12 ton de carga</p> <ul style="list-style-type: none"> • Superficies con maniobras de carga ligera en interiores
6c	<p>Grado alto:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carreteras de carga intensa • Montacargas provistos de ruedas de hule o metálicas con cargas mayores a 12 ton • Flujo hidráulico menor a 12 m/s
6d	<p>Grado severo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carreteras con carga muy intensa • Montacargas provistos de ruedas de hule, metálicas y tipo oruga • Patios de maniobra con trafico alto y arrastre de objetos pesados • Flujo hidráulico mayor a 12 m/s con riesgo de cavitación

Tabla 8 Clasificación de exposición NMX-C-530

Tabla 1 - Clasificación de exposición ambiental NMX-C-530				
Clase (Ambiente de exposición)	Subclase (Condición de exposición)	Tipo de proceso	Designación (Clasificación)	Descripción
No agresivo	Seco	Ninguno	C0	Concreto en ambiente seco o protegido de la humedad y no sometido a condensaciones. Con una Humedad relativa <40%
Rural/ Urbana	Concreto en contacto con humedad alta	Corrosión por carbonatación	C1	Concreto en ambiente con alta humedad relativa >80%, independiente de la contaminación por CO2 y SO2
	Concreto en contacto con humedad baja		C2	Concreto en ambiente con baja humedad relativa entre 40% y 50%, independiente de la contaminación por CO2 y SO2
	Concreto en contacto con humedad moderada		C3	Concreto en ambiente con moderada humedad relativa entre 50% y 80%, con contaminación por CO2 y SO2

Marina	Sumergida	Corrosión por cloruros	M1	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar	
	Zonas aéreas con distancias de 50m a 500m a la línea de costa		M2	Elementos exteriores de estructuras en las proximidades de la línea de costa (50 a 500m)	
	Zonas aéreas con distancias de 0m a 50m		M3	Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar (salpique) de 0m a 50m de la línea de costa	
	Zona de mareas		M4	Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de mareas y salpique	
Concreto con cloruros de origen diferente al medio marino	Concreto reforzado o presforzado expuesto a la incorporación de ión cloruro desde su fabricación		C11	Concreto producido con materiales que contengan contaminación de ión cloruro soluble en el agua <0.06%, respecto al consumo de material cementante	
	Concreto reforzado o presforzado expuesto a una fuente externa de cloruros		C12	Concreto expuesto a humedad u una fuente externa de cloruros	
Industrial/ Agresividad Química	Baja		Degradación del concreto	Q1	Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la degradación del concreto con velocidad lenta
	Moderada			Q2	Elementos en contacto con el agua de mar y/o situados en ambiente moderado con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la degradación del concreto con velocidad media

	Severa		Q3	Elementos expuestos a degradación alta del concreto. Instalaciones industriales con sustancias de alta agresividad
	Muy severa		Q4	Concreto expuesto a agresividad química muy alta se sólidos, líquidos y gases
Congelamiento y deshielo	Limitada exposición al agua	Congelamiento y deshielo	F1	Elementos situados en contacto limitado al agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno menores al 50% y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar temperaturas por debajo de -5°C
	Exposición frecuente al agua y sustancias desongelantes		F2	Elementos situados en contacto frecuente al agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno mayores al 50% y que tengas una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar temperaturas por debajo de -5°C y en contacto con sustancias desongelantes
Desgaste	Moderado a Severo	Daño Mecánico	D	Abrasión, cavitación. Elementos sometidos a desgaste superficial. Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua
Q1	Ambiente de agresividad química ligera (por gases, líquidos o sólidos):			
	• En contacto con agua			
	pH		6.9 – 5.6	
	CO ₂ agresivo [mg/l como CO ₂]		15 – 30	
	Amonio [mg/l como NH ⁴⁺]		15 – 30	
	Magnesio [mg/l como Mg ²⁺]		100 – 300	
	Sulfato [mg/l como SO ₄ ²⁻]		200 – 600	
	• En contacto con suelo			
	Grado de acidez según Baumann-Gully		Mayor a 20	
Sulfatos [mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo		2000 – 6000		

	secado al aire]	
Q2	Ambiente de agresividad química moderada (por gases, líquidos o sólidos):	
	• En contacto con agua	
	pH	5.5 – 4.6
	CO ₂ agresivo [mg/l como CO ₂]	31 – 60
	Amonio [mg/l como NH ⁴⁺]	31 – 60
	Magnesio [mg/l como Mg ²⁺]	301 – 1500
	Sulfato [mg/l como SO ₄ ²⁻]	601 – 3000
	• En contacto con suelo	
Sulfatos [mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire]	6000 - 12000	
Q3	Ambiente de agresividad química alta (por gases, líquidos o sólidos):	
	• En contacto con agua	
	pH	4.5 – 4.0
	CO ₂ agresivo [mg/l como CO ₂]	61 – 100
	Amonio [mg/l como NH ⁴⁺]	61 – 100
	Magnesio [mg/l como Mg ²⁺]	1501 – 3000
	Sulfato [mg/l como SO ₄ ²⁻]	3001 – 6000
	• En contacto con suelo	
Sulfatos [mg de SO ₄ ²⁻ /kg de suelo secado al aire]	>12000	
Q4	Ambiente de agresividad química muy alta (por gases, líquidos o sólidos):	
	pH	< 4.0
	CO ₂ agresivo [mg/l como CO ₂]	> 100
	Amonio [mg/l como NH ⁴⁺]	> 100
	Magnesio [mg/l como Mg ²⁺]	> 3000
	Sulfato [mg/l como SO ₄ ²⁻]	> 6000

2.2 Patología del concreto

La patología del concreto se define como el estudio sistemático de los procesos y características del daño que puede sufrir el concreto, sus causas, consecuencias y probables soluciones. Por lo tanto se entenderá por patología a la parte de la durabilidad que se enfoca a identificar los signos, causas y diagnósticos para los diversos daños que ese pueden manifestar en las estructuras de concreto.

Las estructuras de concreto pueden sufrir defectos o daños que alteran su estructura interna y su comportamiento. Algunos pueden estar presentes desde su concepción o construcción, otras pueden haberse contraído durante alguna etapa de su vida útil, y otras pueden ser consecuencia de factores ambientales. Estos defectos se manifiestan mediante fenómenos que exhibe el concreto tales como manchas, cambios de color, hinchamientos, fisuras, pérdidas de masa u otros.

Por esto, se adelanta una investigación de la estructura, que incluye una investigación preliminar y una investigación profunda, las cuales comprenden un conocimiento previo, antecedentes o historial sobre aspectos como las cargas de diseño, el microclima que rodea la estructura, el diseño, la vida útil, el proceso constructivo, las condiciones actuales, el uso, procesos de medición y ensayo y cronología de datos, entre otros; una inspección visual; una auscultación de los elementos afectados mediante mediciones de campo, pruebas destructivas y no destructivas; una evaluación o análisis estructural donde se revise la capacidad estructural y se determine la resistencia residual o actual de la estructura mediante métodos empíricos, analíticos o pruebas de carga; y una extracción, análisis y ensayo de muestras mediante ensayos de evaluación física, mecánica, química, biológica y/o microscópica que permitan establecer los mecanismos de deterioro.

Con base en los resultados obtenidos, se evalúa la condición de servicio y se genera un pronóstico sobre el comportamiento futuro de los elementos afectados y de la estructura en general. Según el esquema previo, en caso de que el pronóstico sea optimista, se puede realizar una intervención adecuada, según el ACI 364.1R “Guide for Assessment of Concrete Structures Before Rehabilitation” y se procederá a realizar una evaluación económica de cada una de las posibles soluciones.

- **Preservación:** Es un proceso en la cual se mantiene la estructura en su condición presente, para contrarrestar posteriores deterioros.

- **Restauración:** Proceso para restablecer los materiales, la forma o la apariencia que tenía una estructura en una época determinada.

- **Reparación:** Es el proceso de remplazo o corrección de materiales, componentes o elementos de una estructura, los cuales se encuentran deteriorados, dañados o defectuosos.

- **Rehabilitación:** Proceso de reparar o modificar una estructura hasta llevarla a una condición deseada.

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

Existe el caso de que el pronóstico sea pesimista, entonces es posible que la estructura deba demolerse parcial o totalmente, ya que por su estado no aporta capacidad resistente a la estructura.

2.2.1 Agentes que afectan la durabilidad en el concreto

Los principales agentes que influyen de manera adversa en la durabilidad del concreto y algunos de los cuales hablaremos de manera detallada más adelante, pueden clasificarse como:

- **Agentes físicos**
 - Cristalización de sales
 - Congelación y deshielo
 - Fuego
- **Agentes mecánicos**
 - Abrasión
 - Erosión

- Impacto
- Vibraciones
- Cargas y sobrecargas
- Agentes químicos
 - Acción de los sulfatos
 - Ataque físico por sales
 - Exposición marina
 - Ataque por ácidos
 - Carbonatación
 - Lixiviación por aguas puras o blandas
 - Corrosión
 - Reacción álcali-sílice
 - Reacción álcali-carbonato
- Agentes biológicos
 - Algas
 - Líquenes
 - Musgos
 - Bacterias
 - Hongos

3. PATOLOGÍAS DEL CONCRETO Y MEDIDAS PARA SU PREVENCIÓN.

El deterioro de las estructuras de concreto es causado principalmente por un medio ambiente agresivo, en el cual están presentes agentes que atacan física y químicamente al concreto, y que se intensifican en magnitud en presencia por variaciones de temperatura y humedad. Los procesos de deterioro en el concreto se manifiestan generalmente por la corrosión del acero de refuerzo y aparición de fisuras, pérdida de recubrimiento y otros factores.

Es frecuente que en las obras se aplican normas y especificaciones importadas de otros lados del mundo, sin adecuarlas apropiadamente a las condiciones ambientales locales, ya que esas normas están realizadas para los climas y microclimas de sus países, utilizando materiales disponibles solo en ellos, por lo cual al utilizarlas sin las debidas consideraciones se llegan a presentar problemas al especificar materiales no apropiados y las practicas constructivas no siempre resultan ser las más eficientes.

3.1 Abrasión, erosión e impacto

Las superficies de concreto están expuestas a la abrasión, producto del desgaste por la rodadura de transito; en las obras hidráulicas están sometidas a la erosión, efecto del transporte de sedimentos en el agua y a la cavitación, fenómeno que se origina donde se generan presiones negativas.

3.1.1 Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión se define como, la capacidad de una superficie para resistir el desgaste por frotamiento o fricción. Esta resistencia es proporcional a la resistencia a la compresión de la zona expuesta a la abrasión.

Existen diferentes tipos de abrasión y algunos se presentan en situaciones donde tenemos efectos combinados, como la abrasión en climas donde se presenta el

congelamiento y deshielo, en donde existen sulfatos o en un ambiente marino, por lo cual no se encontrado ningún método de ensayo que sea adecuado para todas las condiciones posibles.

La norma ASTM C 779 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces” describe tres procedimientos para evaluar la resistencia a la abrasión de superficies de concreto, estos son:

- Discos Giratorios

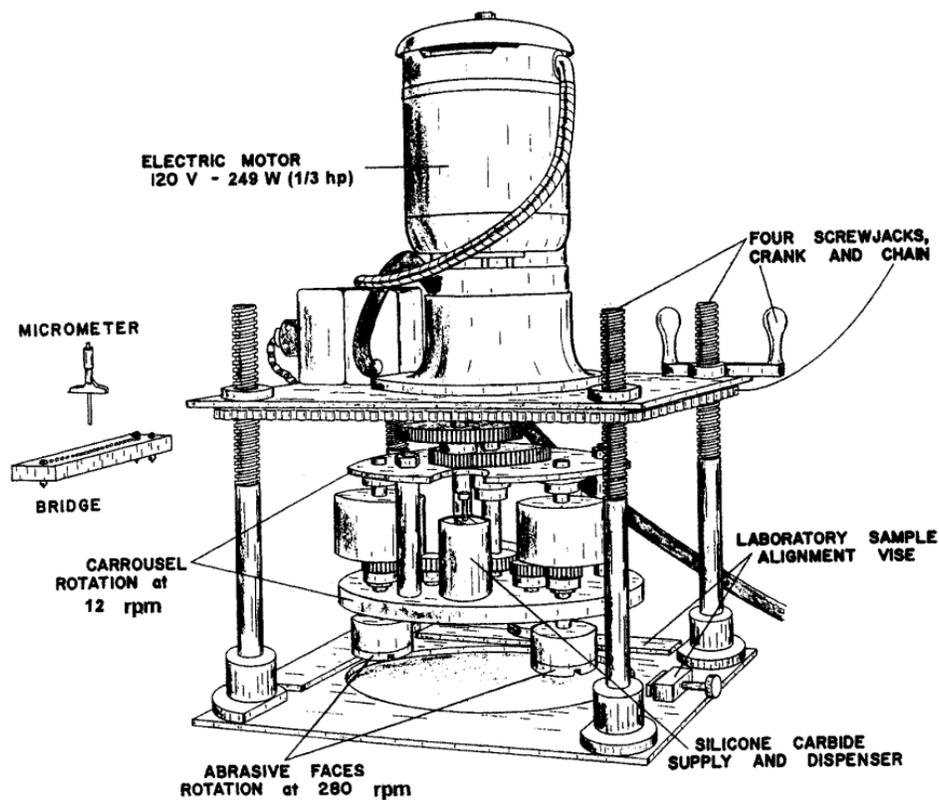


FIG. 1 Revolving Disks Abrasion Test Machine

Figura 10 Prueba de abrasión con discos giratorios

- Ruedas abrasivas

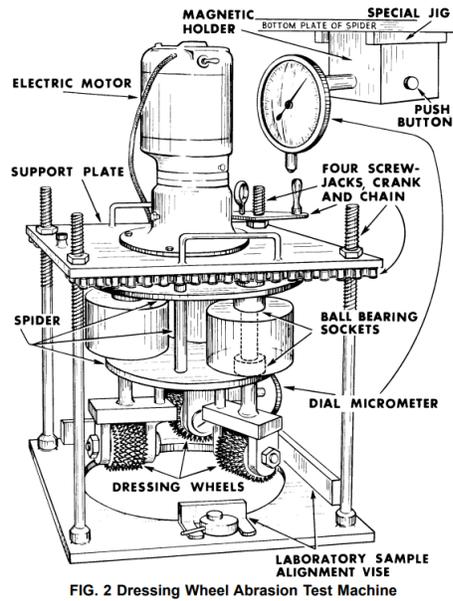


Figura 11 Prueba de abrasión con ruedas abrasivas

- Rodamiento de bolas

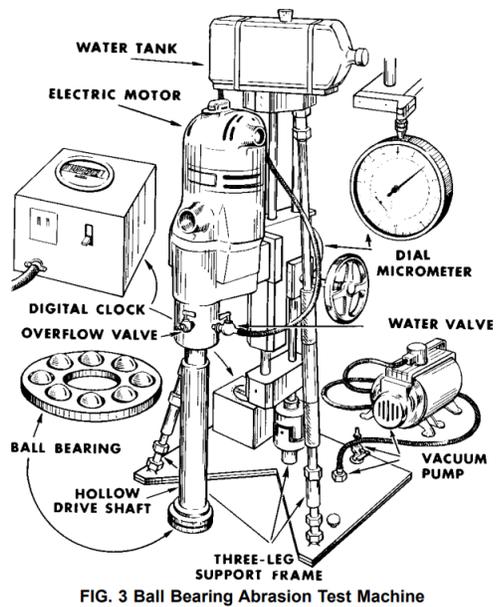


Figura 12 Prueba de abrasión por medio de rodamiento de bolas

Para establecer los límites de resistencia a la abrasión del concreto, es necesario poder reproducir los ensayos y confiar en los valores relativos basados en los resultados, que permitirán predecir el comportamiento del concreto en condiciones de servicio.

Un caso muy particular es la abrasión submarina, que demanda un procedimiento especial para poder determinar su resistencia a la abrasión. La norma ASTM C 1138 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)” utiliza un procedimiento basado en la agitación de bolas de acero en agua.

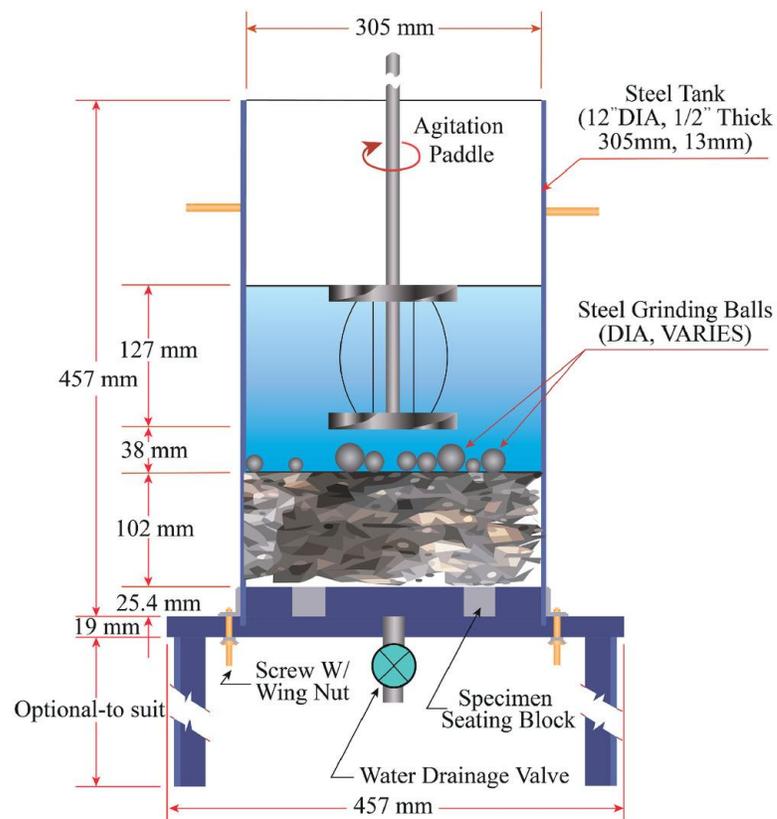


Figura 13 Prueba de abrasión bajo el agua

Al presentarse el efecto de abrasión es necesario clasificar el tipo de estructura que estará sometida a esta acción, para poder determinar los factores necesarios y prevenir el desgaste de esa superficie. Aún no se ha encontrado ningún método de ensayo que sea adecuado para todas las condiciones posibles, por lo cual el ACI 201.2R considera cuatro áreas generales:

- Desgaste en pisos y losas

El ACI 302.1R “Guide to Concrete Floor and Slab Construction” define las clases de desgaste y exige consideraciones especiales para lograr una buena resistencia a la abrasión (Tabla 9).

Tabla 9

Clasificación de Pisos ACI 302.1R

Clasificación de pisos y sugerencias de acabado				
Clase	Trafico	Uso	Consideraciones	Técnicas de acabado
1. Una capa	Superficie expuesta - peatonal	Oficinas, iglesias, comercial, institucional, hospitales, residencial. Decorativo.	Acabado uniforme, agregado antideslizante en áreas específicas, curado. Color en pigmento o agregado mineral, agregado expuesto, texturizado o patrones incrustados y juntas decorativas.	Acabado con llana metálica. Acabado antideslizante.
2. Una capa	Superficie cubierta - peatonal	Oficinas, iglesias, comercial, institucional, hospitales y residencial con superficies cubiertas.	Pisos planos y nivelados adecuados para aplicar revestimiento. Juntas coordinadas con revestimientos aplicados. Curado.	Acabado con llana metálica ligera.

<p>3. Dos capas</p>	<p>Superficie cubierta o expuesta - Peatonal</p>	<p>Capas de acabado adheridas y no adheridas sobre pisos para construcciones comerciales y no industriales donde el tipo de construcción predomine.</p>	<p>Superficie de la base con nivel uniforme y buena tolerancia. Acabado no adherido con barrera de vapor en la base, mínimo 75 mm de espesor, reforzado y curado. Acabado adherido, con tamaños de agregado adecuado, mínimo 19 mm de espesor, curado.</p>	<p>Losa base con acabado con llana metálica para acabado no adherido o superficie texturizada y limpia para acabado adherido. Capa de acabado con superficie expuesta, alisado normal con llana y para superficies cubiertas se hará un alisado ligero con llana.</p>
<p>4. Una capa</p>	<p>Superficie cubierta o expuesta - Peatonal y tráfico vehicular ligero</p>	<p>Institucional o comercial.</p>	<p>Pisos planos y nivelados adecuados para la aplicación de revestimiento, agregado antideslizante para áreas específicas, curado. Juntas coordinadas con revestimientos aplicados.</p>	<p>Acabado con llana metálica.</p>
<p>5. Una capa</p>	<p>Superficie expuesta - tráfico vehicular industrial con ruedas neumáticas solidas moderadamente suaves</p>	<p>Pisos industriales para fabricación, procesados y almacenaje.</p>	<p>Excelente uniformidad de la subrasante, diseño de juntas, resistencia a la abrasión y curado.</p>	<p>Acabado con llana metálica dura</p>
<p>6. Una capa</p>	<p>Superficie expuesta - tráfico vehicular pesado de neumáticos duros</p>	<p>Pisos industriales sujetos a tráfico pesado y posiblemente impactos.</p>	<p>Excelente uniformidad de la subrasante, diseño de juntas, transferencia de carga, resistencia a la abrasión y curado.</p>	<p>Endurecedor de superficie de agregado especial, mineral o metálico.</p>

7. Dos capas	Superficie expuesta - tráfico pesado industrial de neumáticos duros	Pisos adheridos en dos capas sujetos a tráfico pesado e impacto.	Excelente uniformidad de la subrasante, reforzado, diseño de juntas, nivel de superficie y curado. Acabado compuesto de agregados minerales o metálicos bien graduados. Espesor mínimo de 19 mm. Endurecedor de superficie de agregado mineral o metálico para endurecer acabados planos de alta resistencia.	Losa base con superficie texturizada y limpia, adecuada para la subsecuente capa de acabado adherida. Flotado especial para acabado es opcional.
8. Dos capas	Clases 4, 5 o 6	Capa de acabado no adherida - pisos nuevos o viejos donde la secuencia o itinerario predomine.	Barrera de vapor en la base del piso con espesor mínimo de 100 mm, resistencia a la abrasión, curado.	Clases 4, 5 o 6
9. Una capa o capa de acabado	Superficie expuesta - pisos ultra planos con una tolerancia crítica requerida para vehículos controlados que requieren tolerancias específicas.	Pasillos estrechos, almacenaje de gran altura, estudios de televisión, pistas de hielo o gimnasios. Consultar ACI 360 como guía de diseño.	Concretos con requerimientos de calidad variados. Se recomienda una estricta atención a los detalles y a los procedimientos de aplicación cuando se esparzan endurecedores. FF 50 hasta FF 125 (pisos ultra planos).	Seguir estrictamente las técnicas indicadas en la sección 8.9 de el ACI 302.1R

- Desgaste en superficies viales

Se debe a la circulación de camiones pesados y automóviles con neumáticos con clavos o cadenas (desgaste e impacto).

La ASTM C 944 “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method”, describe un método de prueba

comúnmente usado para el control de calidad de carreteras y puentes de concreto sujetos al tráfico.

La CCANZ en su informe IB 75, nos ofrece una guía donde se puede observar los valores típicos de resistencia del concreto para un determinado tipo de tránsito.

Tabla 10

Resistencia a compresión para resistir la abrasión

Requisitos de resistencia a compresión para abrasión	
Tipo de tránsito	Resistencia a compresión [kg/cm ²]
Pisos comerciales e industriales sujetos a tránsito vehicular	250
Pavimentos sujetos a:	
a) Tránsito de poca frecuencia, con llantas neumáticas (vehículos hasta 3 Ton.)	250
b) Tránsito con frecuencia media, con llantas neumáticas (vehículos de más de 3 Ton.)	300
c) Tránsito con llantas no neumáticas	400
d) Tránsito con llantas de acero	Por determinarse pero no menor a 400 kg/cm ²

- Erosión de estructuras hidráulicas

El ACI 210R “Erosion of Concrete in Hydraulic Structures” y ACI 207.6R “Report on the Erosion of Concrete in Hydraulic Structures” define las causas de desgaste y describe los procedimientos para mitigar la erosión en estructuras hidráulicas.

- Acción de la cavitación en estructuras hidráulicas

El ACI 210 y ACI 207.6R define el mecanismo de la cavitación, el tipo de daños que produce y las medidas para controlar el daño que produce.

Si se anticipa una condición de desgaste importante, se puede considerar el uso de mezclas para espolvorear en seco o utilizar una capa adicional de acabados especiales, para proveer una mayor resistencia a la abrasión.

3.1.2 Mejoramiento de la resistencia a la abrasión

Para mejorar la resistencia de pisos ya existentes, se utilizan líquidos para tratamiento superficial, comúnmente conocidos como endurecedores. Los más usuales son los que contienen silicatos de magnesio y sodio.

En general estos son utilizados cuando el piso ya presenta desgaste y comienza a desprender polvo. Los pisos de concreto nuevos y correctamente acabados y curados deberían ser de una calidad tal que el uso de cualquier otro tratamiento sea innecesario, salvo aquellos casos donde no se tolere el más mínimo desprendimiento de polvo, por ejemplo en algunas industrias o en las centrales eléctricas.

3.1.3 Medidas para prevenir el daño por abrasión

Las siguientes medidas permitirán lograr una resistencia a la compresión adecuada, con lo cual se obtendrán superficies de concreto resistentes a la abrasión:

- **Cemento:** El empleo de cementos ricos en aluminato tricálcico o de cenizas volantes tiene un buen comportamiento al reducir el sangrado o exudación del concreto.
- **Agregados:** Una correcta graduación del agregado fino y el agregado grueso, ayudan a optimizar la trabajabilidad y minimizar el contenido de agua. Si se anticipa que el desgaste será importante, se seleccionara a los agregados de manera que se mejore la resistencia a la abrasión.
- **Segregación:** Se debe evitar ya que favorece la aparición de poros afectando la permeabilidad y tiene repercusiones graves en la durabilidad del concreto.

- Exudación o sangrado: El agua al migrar desde el interior crea conductos capilares que disminuyen la impermeabilidad del concreto, haciéndolo poco durable.
- Contenido mínimo de cemento: Los concretos con un contenido alto de cemento presentan una menor exudación.
- Baja relación a/c: Utilizar aditivos reductores de agua, una mezcla dosificada a manera de eliminar la exudación o sangrado y favorecer una baja permeabilidad del concreto.
- Contenido de aire: Este deberá ser consistente con las condiciones de exposición, generalmente en condiciones de congelamiento y deshielo. Para los pisos en interiores o en condiciones donde no esté sujeto al congelamiento, el contenido de aire deberá ser menor al 3%. Si se tiene un contenido alto de aire, además de tener un efecto adverso en la resistencia, puede provocar la aparición de huecos y ampollas si el acabado no se realiza en el momento preciso.
- Colocación y vibrado: El concreto se deberá ser correctamente colocado y vibrado a manera de eliminar los vacíos y favorecer una baja permeabilidad.
- Acabado: Demorar el aplanado y terminado, hasta que el concreto haya perdido el brillo que provoca el agua superficial y terminarlo antes que el concreto haya endurecido.
- Curado: Se recomienda utilizar un curado húmedo para los concretos con baja relación a/c para proveer agua adicional para la hidratación durante al menos 7 días, el ACI 308 describe detalladamente los diferentes métodos de curado. A modo de alternativo se pueden utilizar compuestos de curado, los cuales sellan la humedad dentro del concreto.

3.2 Ataque físico por sales

El ataque físico por sales está asociado a la cristalización de sales en los poros cercanos a la superficie del concreto, ya que suelen reaccionar con los compuestos de hidróxido de calcio del concreto, formando compuestos expansivos, lo que puede llevar a la expansión y fisuración del concreto. Entre las sales responsables de este fenómeno en el concreto, en orden decreciente de agresividad tenemos al sulfato de sodio, carbonato de sodio y cloruro de sodio. Se ha encontrado que el sulfato de magnesio, sulfato de calcio, cloruro de magnesio, cloruro de calcio y el nitrato de sodio, también pueden ser causantes del ataque físico por sales.

El daño se presenta en las superficies expuestas del concreto que estén en contacto con suelos o suelos saturados, que contengan las sales ya mencionadas, estas se concentran y precipitan, provocando que se deterioren las capas expuestas y ocurra una descamación como el daño producido por ciclos de congelamiento y deshielo, por lo tanto el daño es progresivo y si este se ve sometido a varios ciclos de deshidratación y rehidratación, sumando el efecto de los cambios de temperatura, estos daños pueden ser bastante graves.

El sulfato de sodio y el carbonato de sodio pueden sufrir transformaciones en la fase de hidratación por cambios de humedad, temperatura ambiente o de ambos. La conversión de una fase menos hidratada a una mas hidratada viene acompañada de un aumento considerable de volumen, algunas veces de más del 300%.

3.2.1 Resistencia al ataque físico por sales

El deterioro del concreto se puede mitigar limitando el movimiento de agua dentro del mismo, se puede incorporar aire como una medida para limitar ese movimiento, pero la más beneficiosa es usar un concreto con una relación agua – cemento adecuadamente baja, se deberá utilizar una relación de 0.45 o menor, junto con una puzolana, además de un curado adecuado y un drenaje bien diseñado para mantener alejada el agua del concreto, estas consideraciones que se mencionan tienen un resultado más efectivo que utilizar algunos tipos específicos de concreto o aditivos.



Figura 14 *Daños por sales*

3.2.2 Medidas para prevenir el daño por ataque físico de sales

Aun no hay medidas para mitigar el daño provocado por el ataque físico por sales ni criterios para establecer los límites permisibles de contenido de sales para atenuar este fenómeno, pero se pueden hacer algunas recomendaciones de carácter general.

Elaborar un concreto con una relación a/c menor o igual a 0.45 o con una resistencia mayor a 410 kg/cm^2 mejora su desempeño; sin embargo el potencial de daño lo definen las condiciones ambientales, por lo que bajo condiciones severas aun no hay una metodología que nos permita evitar un deterioro significativo.

3.3 Congelamiento y deshielo

En las regiones templadas, los ciclos de congelación y deshielo, ocasionan severos daños al concreto, estos daños se han estudiado exhaustivamente y son fenómenos bastante bien comprendidos. Para evitar este tipo de daños en las regiones frías, basta con utilizar concretos preparados con agregados de buena calidad, relaciones de agua-cemento bajas (a/c), un buen acabado y curado, además de una adecuada dosificación con un agente o aditivo para incorporar aire, estos concretos se vuelven altamente resistentes a los daños por congelación.

Este tipo de daños muchas veces se agravan cuando se utilizan sales descongelantes, principalmente utilizadas en los pavimentos, lo cual genera la descamación de la superficie, provocando que el agua se pueda adentrar más en la pasta de concreto y se agraven los daños por congelación y descongelamiento repetitivos.

3.3.1 Resistencia del concreto a ciclos de congelación y deshielo

El primer riesgo de daño por este fenómeno en el concreto se presenta cuando el concreto aun se encuentra en estado plástico, y tiene más probabilidades de congelarse, por lo que se deberán tomar las precauciones necesarias para evitar que esto suceda desde el momento de su elaboración, hasta su puesta en obra. En el ACI 306R “Guide to Cold Weather Concreting” se establecen las recomendaciones para el cuidado en la colocación de concreto en climas fríos.

El caso del concreto endurecido, si este se encuentra saturado y a medida que baja su temperatura, el agua que se encuentra alojada en los poros capilares de la pasta de cemento endurecido comienza a congelarse y expandirse, provocando daños severos en las caras expuestas, estos ciclos de congelación y deshielo provocan daños

acumulativos, por lo que se deberán tener en cuenta en regiones donde estos se presenten.

3.3.2 Medidas para prevenir los daños por ciclos de congelación y deshielo

Siempre y cuando no exista una fuente de humedad externa, el concreto deberá ser correctamente manejado, colocado ACI 306R “Guide to Cold Weather Concreting”, compactado ACI 309R “Guide for Consolidation of Concrete”, curado ACI 308R “Guide to External Curing of Concrete”, y también se tendrá que prestar mucha atención a los acabados, estos se harán con el suficiente cuidado, ya que el trabajar excesivamente el concreto por vibración, o trabajar su superficie para darle un acabado, origina que se elimine parte del aire incorporado, en el caso de los acabados el ACI proporciona una serie de requerimientos para que se realice de manera correcta, ACI 302.1R.

Se tendrá que prestar mucha atención a la temperatura del concreto durante su colocación ya que en temperaturas por debajo de los -10°C los procesos químicos del cemento se detienen, por lo cual siempre hay que tener una temperatura arriba de los 10°C , por esta situación se debe cubrir con algún material aislante para mantener la temperatura adecuada y proteger al concreto de la lluvia y las heladas durante el fraguado del concreto.

A continuación presentamos algunas de las consideraciones que deben tenerse para lograr un concreto resistente a los ciclos de congelación y deshielo:

3.3.2.1 Incorporación de aire

Al incorporar aire, se generan pequeñas micro esferas durante el proceso de mezcla en la fase más fina de la pasta del concreto. El objetivo es asegurar que el hormigón endurecido sea resistente a heladas y al congelamiento/deshielo por la formación de espacios disponibles para la expansión del agua bajo estas condiciones.

El contenido de aire deberá ser moderado con un adecuado diseño de la mezcla de concreto, ya que una cantidad excesiva de aire no protegerá a la pasta de la acción de congelamiento y deshielo a la cual será sometida, provocando una reducción considerable en la resistencia del concreto y será un concreto sumamente permeable.

El concreto con aire incorporado se elabora agregando un aditivo inclusor de aire justo después de incorporar el agua a los agregados para elaborar el concreto, aunque varios factores influyen en la cantidad de aire en la mezcla, como son:

- 1- Origen de los agregados
- 2- Cemento
- 3- Tipo de aditivo
- 4- Tipo y tiempo de mezclado
- 5- Temperatura
- 6- Compactación

El ACI 211.1 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”, recomienda contenidos de aire para una exposición severa del 9% y del 7% en condiciones moderadas en la fracción de la pasta, estas recomendaciones se pueden observar en la Tabla 11.

Tabla 11*Contenido de aire en concretos*

Contenidos de aire recomendados para los concretos resistentes a las heladas			
Tamaño máximo nominal de los agregados		Contenido de aire promedio, %	
In	mm	Exp. Severa	Exp. Moderada
3/8	9.5	7.5	6
1/2	12.5	7	5.5
3/4	19	6	5
1	25	6	4.5
1 1/2	37.5	5.5	4.5
3	75	5	4
6	150	4.5	3.5
La tolerancia en el contenido del aire incorporado debe ser de \pm 1.5%.			

El contenido de aire en la mezcla deberá ser determinado en base a la normatividad, utilizando las siguientes normas:

Concreto fresco

- 1- Frecuencia de muestreo: ASTM C 94 “Standard Specification for Ready-Mixed Concrete” y NMX-C-161 “Concreto Fresco - Muestreo”.
- 2- Contenido de Aire de Concreto Recién Mezclado por el Método Volumétrico: ASTM C 173 “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method” y NMX-C-158 “Determinación del Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Volumétrico”.
- 3- Contenido de Aire de Concreto Recién Mezclado por el Método presiométrico: ASTM C 231 “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method” y NMX-C-157 “Determinación del Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método de Presión”.

- 4- Contenido de Aire de Concreto Recién Mezclado por el Método de Peso Unitario: ASTM C 138 “Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete” y NMX-C-162 “Determinación de la Masa Unitaria, Cálculo del Rendimiento y Contenido de Aire del Concreto Fresco por el Método Gravimétrico”.

Concreto endurecido

- 1- ASTM C 457 “Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete”.

Por último el ACI 212.3R “Report on Chemical Admixtures for Concrete”, proporciona las características relacionadas con el sistema de vacíos que debe contener el concreto, para lograr la durabilidad óptima.

3.3.2.2 Relación agua-cemento (a/c)

El concreto resistente a los ciclos de congelación deberá tener una relación agua-cemento no mayor a 0.45 para las estructuras importantes y para la que este expuesta a químicos anticongelantes; para todas las demás estructuras se recomienda relaciones menores o iguales a 0.50.

Debido a que muchas veces no se conoce con mucha precisión algunas características de los agregados, por ejemplo el grado de absorción de los agregados livianos, no es posible elaborar un diseño de mezcla confiable por no poder calcular correctamente la relación agua – cemento, en estos casos lo mejor es especificar una resistencia mínima de 30MPa.

El concreto que va a estar expuesto a las condiciones establecidas en la Tabla 12 debe cumplir con las correspondientes relaciones agua – cemento máximas y con el $f'c$ mínimo de la misma.

Tabla 12*Requisitos del concreto para condiciones de exposición especiales*

Requisitos para condiciones de exposición especiales		
Condición de exposición	Concreto de peso normal; relación máxima a/c	Concreto con agregado normal y ligero, f'c [kg/cm ²] mínima
Concreto de baja permeabilidad en exposición al agua.	0.50	290
Concreto expuesto a congelación y deshielo en condición húmeda o a productos químicos descongelantes.	0.45	310
Para proteger el acero de refuerzo de la corrosión cuando está expuesto a cloruros de sales descongelantes, sal, agua salobre o salpicaduras del mismo origen.	0.40	350

3.3.2.3 Materiales

El Cemento utilizado deberá satisfacer los requerimientos de las normas de la ASTM C 150, ASTM C 595 y NMX-C-414, los agregados naturales deberán cumplir los requerimientos de la ASTM C 33 y NMX-C-111, los agregados livianos ASTM C 330 y NMX-C-299, a pesar de que estas especificaciones contienen numerosos requisitos, esto no necesariamente asegurará su durabilidad y su uso quedará a criterio del Ingeniero.

Los agregados pueden influir considerablemente en la cantidad de aire final en una mezcla al igual que otros factores como temperatura, vibración, etc, por lo cual es mejor realizar estudios petrográficos tanto de los agregados, como del concreto.

Se pueden realizar varios ensayos en laboratorio sobre el concreto para determinar su resistencia al congelamiento y deshielo rápido, uno de ellos es el proporcionado por la ASTM C 666 “Standard Test Method for Resistance of

Concrete to Rapid Freezing and Thawing” y NMX-C-205 “Determinación de la Resistencia del Concreto a la Congelación y Deshielo Acelerados” en la cual mide esta capacidad a través de la reducción del modulo de elasticidad dinámico del concreto. Esta norma me permite utilizar dos métodos, ya sea por congelamiento y deshielo en agua ó congelamiento en aire y deshielo en agua.

La norma ASTM C 671 “Standard Test Method for Critical Dilation of Concrete Specimens Subjected to Freezing” exige probetas de concreto con aire incorporado inicialmente y en estas se trate de reproducir las condiciones de humedad a las cuales puede estar sujeta, posteriormente las probetas se sumergirán en agua y se congelarán periódicamente utilizando la tasa de enfriamiento que se estimo en el lugar donde se realizara la obra y con ayuda de la norma ASTM C 682 “Standard Practice for Evaluation of Frost Resistance of Coarse Aggregates in Air-Entrained Concrete by Critical Dilation Procedures (Withdrawn 2003)”, se determinara el resultado de dicha prueba.

Investigaciones han demostrado que el uso de ceniza volante, otras puzolanas (las cenizas o puzolanas deberán satisfacer los requisitos de ASTM C 618), escoria, y humo de sílice producen concretos con una estructura de poros más fina y, por lo tanto con una menor permeabilidad; las limitaciones en las cantidades de estos compuestos se establecen en la Tabla 13.

Tabla 13*Requisitos para concreto expuesto a químicos descongelantes*

Requisitos para concreto expuesto a productos químicos descongelantes	
Materiales cementantes	Porcentaje máximo sobre el total de materiales en peso*.
Cenizas volantes u otras puzolanas ASTM C 618	25
Escoria ASTM C 989	50
Humo de sílice ASTM C 1240	10
Total de cenizas volantes, puzolanas, escoria y humo de sílice	50 ⁺
Total de cenizas volantes, puzolanas y humo de sílice	35 ⁺
* El total de materiales cementantes también incluye cementos ASTM C 150, 595, 845 y 1157. Cenizas volantes, puzolanas y escoria, ASTM C 595 o ASTM C 1157. Humo de sílice ASTM C 1240. + Las cenizas volantes, puzolanas y el humo de sílice no deben constituir ms del 25 y 10 por ciento, respectivamente, del peso total de materiales cementantes.	

3.3.2.4 Aditivos

Los aditivos incorporadores de aire deberán satisfacer las normas ASTM C 260 “Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete” y ASTM C 494, en caso de que se incorpore un aditivo fluidificante este deberá cumplir la norma ASTM C 1017.

La norma ACI 212.3R y NMX-C-255 contiene los requerimientos para el uso correcto de los aditivos.

3.4 Ataque químico por sulfatos

El concreto puede ser atacado por contaminantes existentes en el agua, suelo o aire, generalmente se comporta satisfactoriamente a la mayoría de ellos. Sin embargo, existen algunos ambientes químicos en los cuales, a menos que se tomen medidas preventivas muy específicas para cada tipo de exposición, la vida útil del concreto será muy breve.

Los sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio se encuentran en la naturaleza de forma mineral en los suelos y otras veces de manera disuelta en el agua, estos atacan el concreto endurecido, ya que se combinan con el aluminato tricálcico (C_3A) aportado por el cemento para formar etringita (que lleva a aumentos de volumen y altas presiones internas en la estructura del concreto, por lo que se hacen evidentes las fisuras o las descamaciones) y yeso (que puede provocar ablandamiento y pérdida de resistencia en el concreto). La presencia de cualquiera de los dos compuestos en el concreto no constituye evidencia de un ataque por sulfatos, este debería verificarse por medio de análisis químicos y petrográficos.



Figura 15 *Daños por sulfatos*

3.4.1 Resistencia a los sulfatos

La resistencia del concreto al ataque por sulfatos está determinada por la resistencia a sulfatos de la matriz del cemento, así como por su capacidad de soportar la difusión de los iones de sulfato a través de matriz. El concreto elaborado para soportar este tipo de exposición debe tener una alta impermeabilidad así como una alta resistencia a la

compresión y una relación agua cemento baja, según sea la agresividad de la exposición a la que se encuentre.

La resistencia a los sulfatos que tiene el cemento portland radica en su contenido de Tricalcio-aluminato (C_3A), la norma ASTM C 150 incluye al cemento resistente a los sulfatos Tipo V, para el cual el contenido máximo de C_3A permitido es de 5%, y el cemento moderadamente resistente a los sulfatos Tipo II, el cual su contenido máximo permitido de C_3A está limitado a 8%, mientras la norma mexicana NMX-C-414, identifica a los tipos de cemento de una manera diferente, pero con valores similares en los límites de C_3A , para los cementos con resistencia a los sulfatos.

Los agregados deberán cumplir la norma ASTM C 33 o NMX-C-111, teniendo en cuenta el medio al que serán expuestos y por lo cual deberán ser resistentes a las acciones de los sulfatos.

Las normas ASTM C 452 “Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate”, ASTM C 1012 “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution”, NMX-C-185 “Determinación de la Expansión de Barras de Mortero de Cemento Sumergidas en Agua” y NMX-C-418 “Determinación del Cambio de Longitud de Morteros con Cemento Hidráulico Expuestos a Una Solución de Sulfato de Sodio”, especifican los ensayos que se realizan al cemento y al concreto respectivamente para evaluar su resistencia a los sulfatos.

3.4.2 Medidas para prevenir el daño por sulfatos.

La protección contra el ataque por sulfatos se logra utilizando concretos que retrasen o no permitan el ingreso y movimiento del agua, es decir con una baja relación a/c, para reducir su permeabilidad, además de que todos los materiales con los que se elabore sean los adecuados para poder crear un concreto con la resistencia suficiente a los sulfatos.

El ingreso y movimiento del agua se reducen disminuyendo no solo la relación agua – cemento (a/c), también es fundamental una correcta colocación, vibrado, acabado y curado del concreto, los procedimientos para lograrlo se encuentran en las normas del ACI 304R “Standard Recommended Practice for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete”, ACI 302.1R “Guide to Concrete Floor and Slab Construction”, ACI 308R “Guide to External Curing of Concrete”, ACI 305R “Guide to Hot Weather Concreting” y ACI 306R-16 “Guide to Cold Weather Concreting”.

La agresividad del ataque por sulfatos depende en gran medida de las condiciones de saturación del suelo, temperatura, humedad, concentración y tipo de sulfatos, por lo cual se presenta una tabla con las recomendaciones acerca de la máxima relación a/c para los concretos que estarán expuestos al ataque de sulfatos.

El reglamento ACI 318 “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary” y las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México, establecen parámetros similares para la correcta relación a/c que se debe emplear según el grado de exposición a los sulfatos, en el caso de México, la norma en donde se pueden encontrar estos requisitos es la NMX-C-155 y las NTC CDMX. En la Tabla 14 se muestran los valores recomendados.

Tabla 14*Requisitos para protección del concreto a fuentes externas de sulfatos*

Requisitos para concretos expuestos a soluciones que contengan sulfatos					
Exposición a sulfatos	Sulfatos (SO ₄) solubles en agua presentes en suelos, % por peso	Sulfatos (SO ₄) en agua, ppm	Relación a/c por peso, concreto de peso normal	Tipo de cemento	f'c mínima, concreto de peso normal y ligero Mpa (kg/cm ²)
Despreciable	$0.00 \leq (SO_4) < 0.10$	$0 \leq (SO_4) < 150$	-	-	-
Moderada	$0.10 \leq (SO_4) < 0.20$	$150 \leq (SO_4) < 1,500$	0.5	CPP, CPEG, CPC (C ₃ A<8%)	29 (300)
Severa	$0.2 \leq (SO_4) < 2.00$	$1,500 \leq (SO_4) < 10,000$	0.45	RS (C ₃ A<5%)	34 (350)
Muy severa	Mayor a 2.00	Mayor a 10,000	0.45	RS con adiciones de puzolanas	34 (350)

El uso de puzolanas y escorias de alto horno han demostrado reducir significativamente la permeabilidad del concreto, por lo cual ayudan a aumentar considerablemente la expectativa de vida útil del concreto expuesto al ataque por sulfatos.

En climas fríos generalmente se utiliza cloruro de calcio como un acelerador de fraguado, sin embargo en concretos elaborados con cementos no resistentes a los sulfatos, el cloruro de calcio reduce la resistencia a los sulfatos, por lo que no es recomendable utilizarlo.

3.5 Exposición al agua de mar

La concentración de total de sales del agua de mar varia en todo el mundo, en las regiones más frías la concentración es menor que en las regiones cálidas, y en las regiones costeras puede ser elevada por las tasas de evaporación en el día, sin embargo los componentes del agua de mar son constantes.

Si las estructuras se encuentran debajo del nivel del agua salobre, la succión capilar y la evaporación pueden provocar una saturación excesiva y una cristalización por encima del nivel del terreno, lo cual provocaría un ataque químico sobre el concreto (sulfato) como el agravamiento por corrosión en el acero (cloruros). En la zona de mareas la exposición puede ser más grave, no solo porque la concentración de estos iones puede ser mayor debido a la evaporación y acumulación en la superficie del concreto, también por los efectos de abrasión a los que está sometida y en casos donde se presenten temperaturas bajo cero la abrasión será mayor por la acción del hielo, por lo cual se deberá analizar con mucho detalle la ubicación y el medio ambiente al que será expuesta la estructura y se tomen todas las medidas pertinentes para asegurar la seguridad y durabilidad de la estructura.

3.5.1 Resistencia del concreto en ambientes marinos

Existen muchos tipos de estructuras marinas que pueden estar sometidas a distintos tipos de exposición marina, ya sean estructuras para vivienda, estructuras de gravedad (diversos tipos de muelles), diques, estructuras flotantes y plataformas pilotadas, ya sea que se construyan cerca de las zonas costeras o estén totalmente expuestas al agua de mar, en cuyo caso se presentaran diferentes tipos de exposición. Las recomendaciones generales, son mantener relaciones agua – cemento bajas, seleccionar el tipo adecuado de materiales para la elaboración de concreto, con cementos con contenidos bajos de C_3A , agregados apropiados, y la inclusión de aditivos en la mezcla, siendo siempre opcional, pero no menos importante la utilización de recubrimientos especiales para la protección de los elementos de concreto.

3.5.2 Zonas de exposición marina y causas de deterioro

Existen diferentes zonas de exposición (Figura 16), cada una con sus propias características e incidencias, estas pueden ser tanto físicas, como químicas. Los mismos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Zona de atmósfera marina
- Zona de salpicaduras
- Zona de mareas
- Zona sumergida
- Zona enterrada (Fondo marino)

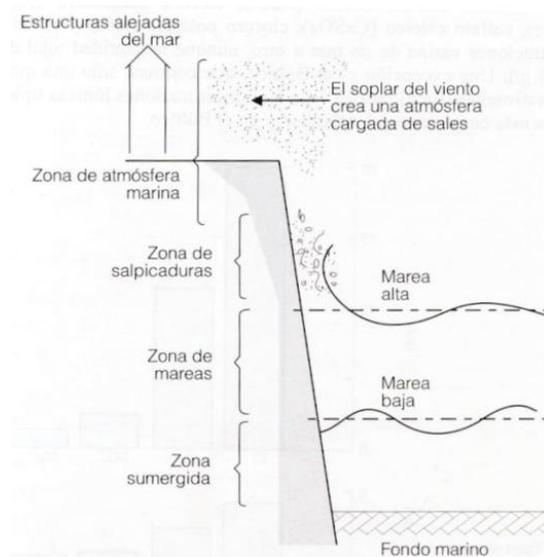


Figura 16 Zonas de exposición marina

Nota. Hormigón en ambiente marino (p. 5), Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2013.

3.5.2.1 Zona de atmósfera marina

En esta zona el concreto no está en contacto con el agua de mar. Sin embargo, recibe las sales procedentes de la brisa marina y de la niebla salina. Esta puede comprender muchos kilómetros al interior de a costa, el nivel de cloruros decrecerá al aumentar la

distancia al mar si bien, dependiendo de la naturaleza de la costa y de los vientos dominantes, la sal podrá ser transportada muchos kilómetros al interior.

Las estructuras de concreto en esta zona son vulnerables a la corrosión por cloruros en suspensión, la concentración de estos puede llegar a ser mayor que en el agua de mar debido a la evaporación parcial de agua en situaciones de temperaturas altas y humedad relativa baja, sin embargo en regiones frías se deberá poner especial cuidado no solo a la corrosión, sino también a la acción de las heladas.

3.5.2.2 Zona de salpicaduras

Esta zona está por encima de la zona de marea alta, sujeta a la humectación directa con agua de mar procedente de las olas y la espuma, pero debido a esta acción, cuando ocurre la humectación se produce el ingreso de los iones cloruro y en la evaporación, donde se elimina el agua en exceso, el concreto retiene los iones cloruro, por lo cual al repetirse este ciclo los cloruros llegan a presentarse en concentraciones elevadas, y debido a la presencia de oxígeno puede llegar a darse conjuntamente la corrosión por cloro y carbonatación. Esta zona es susceptible a la abrasión debido a la acción del oleaje y en casos donde existen bajas temperaturas, también a la acción de la congelación y el deshielo.

3.5.2.3 Zona de mareas

Esta zona está comprendida entre los niveles de marea alta y marea baja. El concreto estará sumergido cíclicamente cada día, con lo cual disminuye el peligro por corrosión, pues el concreto tiene la capacidad de absorber más agua de la que pierde, sin embargo no está exento de que sustancias disueltas ingresen en él debido a la succión capilar.

Dependiendo del tipo y ubicación de la estructura, esta estará expuesta no solo a corrosión por cloruros y otros ataques químicos, también lo estará a daño por las heladas, crecimiento biológico, y abrasión debida al oleaje, hielo flotante e incluso a la colisión con navíos.

Sin embargo entre la zona sumergida y la zona de mareas se ha observado que se presenta corrosión del acero por un fenómeno llamado de “macro celdas” o “macro pilas”. Para que se forme una celda de corrosión (Figura 17), es necesaria la presencia de un Ánodo (zona sumergida o de marea), Cátodo (Zona de marea o salpicadura) y un electrolito, el cual es capaz de conducir una corriente eléctrica por medio de un flujo de iones. Cualquier concreto húmedo con los suficientes iones disueltos en el es capaz de conducir el flujo de electrones necesarios para causar corrosión en el. La velocidad de corrosión se ve afectada por el tamaño del ánodo y del cátodo, la concentración de oxígeno, la temperatura, y la resistividad eléctrica del electrolito, esta ultima tendrá un resultado diferente en relación a la concentración de sustancias disueltas en el.

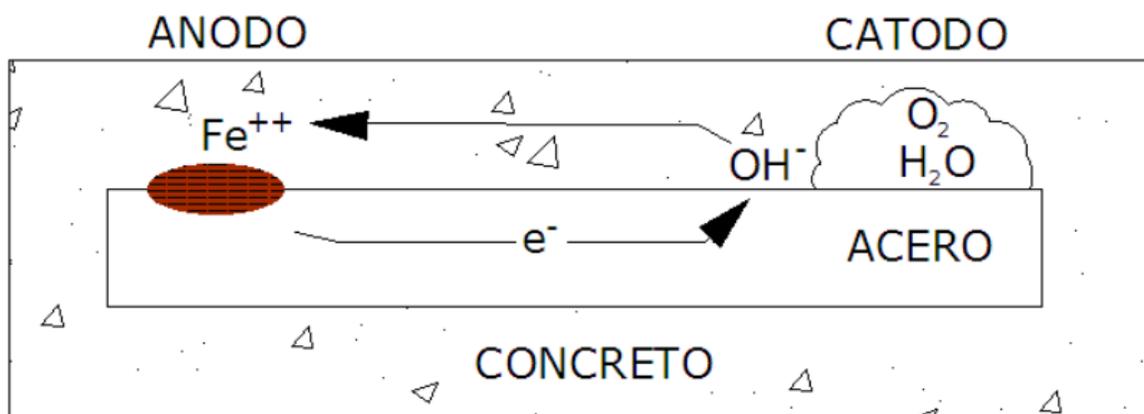


Figura 17 Celda de corrosión

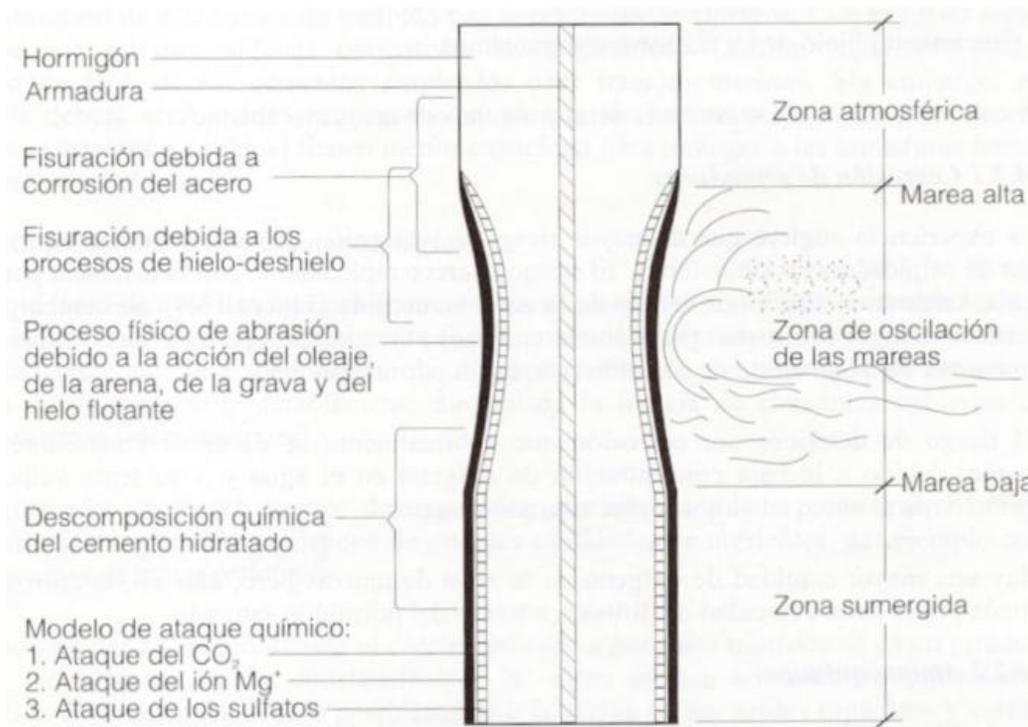


Figura 18 Deterioro de estructuras de concreto debido al agua de mar

Nota. Hormigón en ambiente marino (p. 5), Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2013.

El mayor riesgo de corrosión del acero de refuerzo ocurre en la zona de salpicaduras y atmosférica. Este fenómeno decrece por encima del nivel de marea alta, debido a falta de humedad y por debajo de la zona sumergida, debido a la baja concentración de oxígeno para favorecer esta reacción (Figura 18).

3.5.2.4 Zona sumergida y enterrada

Es la zona por debajo del nivel de marea baja (Figura 16), en la cual el concreto está permanentemente sumergido y la zona enterrada corresponde al fondo marino.

Al encontrarse permanentemente sumergido, el concreto es capaz de proteger el acero de refuerzo, ya que la débil concentración de oxígeno presente en el agua, impide la

actividad corrosiva por parte de los cloruros y en las zonas más profundas la permeabilidad del concreto disminuye ya que el concreto se satura y cierra los poros superficiales.

El crecimiento de colonias marinas (Figura 19) puede ser significativo en algunos tipos de estructuras debido a que aumenta el arrastre e incrementa las fuerzas inducidas por la acción de las mareas de manera bastante importante.

La presencia de estos organismos, como en el caso de algunas algas, aumentan la velocidad de degradación del concreto, debido a la acción de los ácidos orgánicos y sulfatos que producen en la descomposición de la vegetación; sin embargo, algunas algas en la zona sumergida pueden mejorar la durabilidad sellando la superficie del concreto.

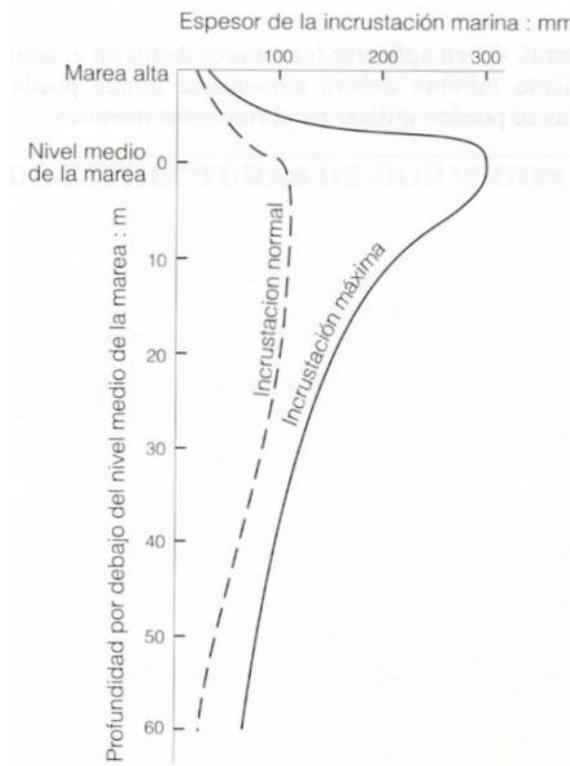


Figura 19 *Espesor de incrustación marina*

Nota. Hormigón en ambiente marino (p. 7), Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), 2013.

3.5.3 Medidas para prevenir el daño por la exposición a ambientes marinos

La Portland Cement Association recomienda, hasta un 8% de C_3A calculado para los cementos que se utilicen para la elaboración de concretos que han de estar sumergidos totalmente en agua de mar, estos serán elaborados con una relación agua - cemento de no más de 0.45, asegurando una baja permeabilidad y retrasar los ataques por sulfatos y garantizar la protección de las armaduras con un mínimo recubrimiento no menor de 6 cm, este último, recomendado por el ACI 357 “Guide for the Design and Construction of Fixed Offshore Concrete Structures” y ACI 357.3R “Guide for Design and Construction of Waterfront and Coastal Concrete Marine Structures” (Tabla 15).

Tabla 15

Recomendación de relaciones a/c para ambientes marinos

Máxima relación a/c y mínimo contenido de cemento para ambiente marino						
Reglamento	ACI 357		EHE-08		NMX-155	
Zona	a/c	Mínimo contenido de cemento [kg/m ³]	a/c	Mínimo contenido de cemento [kg/m ³]	a/c	Mínimo contenido de cemento [kg/m ³]
Sumergida	0.45	356	≤ 0.50	350	≤ 0.40	350
Salpicadura	0.40	356	≤ 0.50	300	≤ 0.40	350
Atmosférica	0.40	356	≤ 0.50	300	≤ 0.40	350

La impermeabilidad de los concretos se puede mejorar si se elaboran con cantidades adecuadas de puzolanas o escoria de alto horno, se debe añadir un correcto diseño para minimizar los anchos de fisuras para limitar el acceso del agua salobre, y si se quiere dar una mayor protección, pueden utilizarse recubrimientos conductores como parte de un sistema de protección catódica o un recubrimiento de silano, los cuales han demostrado ser muy eficientes al repeler el agua, sin embargo se deben escoger los métodos con precaución

ya que los recubrimientos que restringen la evaporación del agua libre dentro del concreto llegan a reducir su resistencia al congelamiento y deshielo.

Muchas estructuras marinas conllevan elementos robustos y de gran espesor con factores de cemento elevados, esto hace que se tenga que tratar como un concreto masivo haciendo que además de las consideraciones antes descritas también se tenga que tener particular cuidado con los efectos de calor de hidratación, en este caso se deberán seguir las consideraciones del ACI 207.1R “Mass Concrete”, ACI 207.2R “Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete”.

3.6 Ataque por ácidos

En general el concreto no tiene una buena resistencia a los ácidos, ya que el pH del concreto nuevo tiene un valor de 12 a 13 y los ácidos un pH menor a 7.

De acuerdo con la NMX-C-155, el pH de la disolución se puede considerar como ligeramente agresiva si está comprendido entre 6.5 - 5.5; moderadamente agresiva si lo está entre 5.5 – 4.5; altamente agresiva si se encuentra entre 4.5 – 4.0 y con una agresividad muy alta si es menor a 4.0.

Dependiendo de la localización de la estructura los principales responsables de los ataque por ácidos pueden encontrarse en la atmosfera, en el suelo, originarse en silos para almacenar productos agrícolas, plantas de tratamiento de aguas residuales, ser residuos de ciertas minas o industrias y que al combinarse con la humedad del ambiente se vuelven disoluciones bastante agresivas, algunas como en el caso del ácido sulfúrico, que mediante reacciones adicionales pueden producir sales de sulfato, y generar un ataque por sulfatos.

La Tabla 16 muestra algunos de los agentes químicos habituales y la velocidad con la que atacan al concreto.

Tabla 16

Agentes químicos que degradan al concreto

Agentes químicos que afectan al concreto					
Velocidad de ataque	Ácidos inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Otros
Rápida	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	-	Cloruro de aluminio	-
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio > 20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de Magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gaseoso) Licor de sulfato
Lenta	Carbónico	-	Hidróxido de sodio 10% al 20%	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloro (gaseoso) Agua de mar Agua blanda
Despreciable	-	Oxálico Tartárico	Hidróxido de sodio < 10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de cinc Cromato de sodio	Amoniaco (líquido)

Los daños que provocan los ácidos que atacan al concreto, principalmente al hidróxido de calcio del cemento hidratado, producen la formación de sales o compuestos de calcio que son solubles en agua y si a través de las fisuras o poros generados en el concreto pueden ingresar ácidos y cloruros, es posible que se produzca la corrosión del acero de refuerzo, lo cual producirá daños adicionales como fisuración; la agresividad de estos ataques químicos dependerá de su concentración, su naturaleza y la temperatura del medio.

3.6.1 Medidas para prevenir el daño por exposición a ambientes ácidos

Un concreto bien elaborado, denso, con una relación a/c baja (Tabla 17), proporciona cierto grado de protección contra los ácidos, sin embargo, si se añade al diseño de la mezcla la inclusión de puzolanas o vapores de sílice, puede aumentar la resistencia del concreto a los ácidos, siendo también que las puzolanas aumentan la resistividad eléctrica del concreto y se disminuye el riesgo de corrosión.

Tabla 17

Recomendaciones para elaborar concretos expuestos a ataque químico

Especificaciones contra el ataque químico NMX-C-530					
Exposición	Ligera		Moderada	Alta	Muy alta
Ph	6.9 - 5.6		5.5 - 4.6	4.5 - 4.0	< 4.0
Cemento	CPO	RS	RS	RS	RS
Máxima relación a/c	0.50	0.55	0.50	0.45	0.45
Mínimo contenido de cemento [kg/m ³]	330	300	330	370	370

Aun con un diseño correcto, el concreto no puede soportar de manera indefinida en un ambiente con agua fuertemente ácida, por lo que se optara por utilizar barreras protectoras (Tabla 18) o tratamientos para proteger al concreto contra los diferentes compuestos químicos. Estas deberán ser resistentes al deterioro o degradación de los agentes químicos y a las temperaturas que serán expuestas, también deberá evitar que los agentes químicos se infiltren a través de la barrera, teniendo como consecuencia la falla entre la adherencia del concreto y la barrera protectora; La norma ACI 515.2R “Guide to Selecting Protective Treatments for Concrete” describe los procedimientos y tipos de barreras que se pueden utilizar.

Tabla 18

Barreras protectoras

Barreras protectoras - Categorías generales			
Agresividad	Espesor nominal total	Barreras protectoras típicas	Usos típicos pero no excluyentes de los sistemas protectores en orden de severidad
Moderado	Menos de 40 mil (1mm)	Polivinil burital, poliuretano, epoxi, acrílico, asfalto de copolímero acrílico-estireno, alquitrán de carbón, goma clorada, vinilo, neopreno, epoxi de alquitrán de carbón, uretano de alquitrán de carbón.	<ul style="list-style-type: none"> • Protección contra sales anticongelantes • Mejorar la resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo • Evitar que el concreto se manche • Aplicación en servicios de agua de alta pureza • Proteger al concreto en contacto con soluciones químicas con pH tan bajos como 4
Alto	125 a 375 mil (3 a 9 mm)	Epoxi con filler de arena, poliéster con filler de arena, poliuretano con filler de arena, materiales bituminosos.	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger al concreto contra la abrasión y la exposición intermitente a ácidos diluidos en plantas químicas, tambos y establecimientos procesadores de alimentos
Severo	20 a 250 mil (1/2 a 6 mm)	Epoxi reforzado con vidrio, poliéster reforzado con vidrio, láminas de neopreno, láminas de cloruro de polivinilo plastificado.	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger tanques y pisos de concreto continuamente expuestos a materiales diluidos (pH menor que 3), ácidos orgánicos, soluciones salinas, álcalis fuertes
Severo	20 a 250 mil (1/2 a 6 mm) Más de 250 mil (6mm)	<p>Sistemas compuestos:</p> <p>a) Sistema de epoxi con filler de arena con sobrecapa de epoxi pigmentado pero sin filler</p> <p>b) Membrana asfáltica cubierta por ladrillos a prueba de ácidos utilizando mortero resistente a los agentes químicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proteger tanques y pisos de concreto continua o intermitentemente sumergidos, expuestos al agua, ácido diluidos, álcalis fuertes y soluciones salinas • Proteger el concreto contra ácidos concentrados o combinaciones de ácidos y solventes

3.7 Carbonatación

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre todos los días. Es un proceso que ha sido bien estudiado y documentado. En el concreto reforzado, este proceso químico avanza lenta y progresivamente hacia adentro por la superficie expuesta del concreto y ataca al acero de refuerzo causando corrosión, si bien no es un factor tan importante de corrosión como los cloruros, los daños que provoca son igual de graves.

La causa principal de este fenómeno es la presencia de dióxido de carbono y puede encontrarse en la atmósfera o en el agua en forma de disolución. El Dióxido de Carbono CO_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y produce una reacción que convierte el Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en Carbonato de Calcio CaCO_3 .

El concreto, con su ambiente altamente alcalino (pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo, gracias a que se forma una capa pasiva de Hidróxido de Hierro $\text{Fe}(\text{OH})_2$ sobre su superficie, y lo protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante la presencia de Dióxido de Carbono en el concreto y la disminución del pH del concreto por el proceso de carbonatación, el acero pierde su capa pasiva, se considera un pH menor a 11 para que se inicie este efecto (Figura 20).

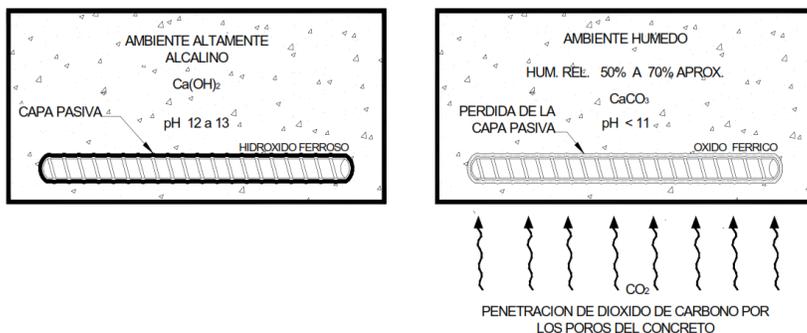


Figura 20 Proceso de carbonatación

Es muy importante identificar la presencia de la carbonatación cuando también hay cloruros en el concreto. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero ahogado. Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruro para la corrosión es significativamente menor ya que se requieren 100 ppm o menos. Por esta razón, una investigación de la condición para la mayoría de las estructuras de concreto en proceso de corrosión debe siempre incluir un análisis de la profundidad de carbonatación.

Sin embargo, se pueden tener resultados beneficiosos de la carbonatación, cuando esta se favorece de manera intencional durante la producción del concreto, puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad dimensional.

3.7.1 Factores que afectan la carbonatación

El proceso de carbonatación es completamente natural, se ve afectado por variables que se encuentran en la naturaleza del concreto, y sus efectos dependen en gran medida al contenido de humedad y porosidad del concreto.

Las mayores tasas de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50% y 75%. Para la humedad relativa menor que 25%, no hay suficiente humedad en los poros para que se disuelvan cantidades significativas de Hidróxido de Calcio y por encima del 75% de humedad relativa, la situación se revierte y los poros se saturan y bloquean progresivamente con agua, impidiendo el ingreso del Dióxido de carbono.

3.7.2 Medidas para prevenir el deterioro por carbonatación

Un concreto permeable se carbonatara rápidamente, por lo que es un factor a cuidar, un concreto con una relación a/c baja y una buena compactación, reducen la permeabilidad y la limitan a la superficie, sumando así, muchos años de protección contra la carbonatación.

La estructura deberá tener un recubrimiento adecuado y cuidarse la correcta colocación del concreto, ya que la presencia de fisuras, grietas y hoyos, proporcionan una ruta directa al acero de refuerzo y no pasara mucho tiempo antes de que el acero empiece a corroerse debido a la pérdida de la capa pasiva que lo protege.

Para detener efectivamente el avance de la carbonatación en el concreto, pueden utilizarse recubrimientos anticarbonatación, estos están especialmente diseñados para detener el ingreso del Dióxido de Carbono.

3.8 Reacción álcali – agregado

La reacción álcali – agregado es una de las causas de deterioro del concreto que se produce cuando los agregados reaccionan con los álcalis del cemento. La reacción provoca expansiones internas anormales que producen fisuración, grietas, perdida de resistencia y desplazamiento de elementos que forman parte de estructuras mayores.

3.8.1 Reacción álcali - sílice

La reacción álcali – sílice es bien conocida, esta involucra una reacción compleja entre los iones OH^- asociados a los álcalis (Na_2O y K_2O) de la pasta de cemento y otras fuentes, con ciertos componentes silíceos que pueden estar presentes en los agregados. Algunas estructuras pueden tener ingreso adicional de álcalis cuando se encuentran en un ambiente marino o por la aplicación de sales descongelantes.

La influencia de la humedad y la temperatura afectan de manera importante ya que al aumentar, las reacciones químicas se aceleran y al disminuir, estas reacciones entran en un

estado de latencia. En México los minerales agresivos más importantes con sílice reactivo que pueden contener las rocas son: horsteno, opalina, calcedonia y cuarzo. Entre las rocas con potencial reactivo se encuentran la toba, pizarra, silicosa, filitas y calizas. En el caso de agregados provenientes de fuentes nuevas o cuando los registros de servicio indican que los agregados pueden ser potencialmente reactivos, estos deberán ser ensayados. Los ensayos de mayor utilidad son los siguientes:

- a) Examen petrográfico para determinar los minerales reactivos de los agregados, norma ASTM C 295, ASTM C 856 y NMX-C-265.
- b) Ensayo químico para determinar la reactividad potencial, los resultados de esta prueba a 24 horas no son concluyentes y hay que tener mucho cuidado al interpretar los resultados, por lo que se deben hacer pruebas suplementarias. Norma ASTM C 289 “Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)”, NMX-C-271 “Determinación de la Reactividad Potencial (Método Químico)”.
- c) Ensayo de la barra de mortero para determinar la reactividad potencial según ASTM C 227 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)” y NMX-C-180 “Determinación de la Reactividad Potencial de los Agregados con los Álcalis de Cementantes Hidráulicos por medio de Barras de Mortero”, esta prueba es la más utilizada para indicar el potencial de reactividad frente a los álcalis, en especial donde la reacción es lenta.
- d) Ensayo de expansión en prismas de concreto ASTM C 1293 “Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction”.

e) Cuando la expansión a 14 días es menor de 0.1%, la expansión por el agregado se considera inocua. Si es mayor, la reacción es lenta y necesitan realizarse otras pruebas que sean concluyentes. El resultado de esta prueba será concluyente, sí la expansión después de un año es mayor de 0.04%, el agregado será reactivo. Este procedimiento es útil ya que no solo nos permite evaluar los agregados, sino también para evaluar combinaciones particulares de cementos y agregados.

Si los agregados son potencialmente reactivos no deben usarse en concretos expuestos al agua de mar o en otros ambientes donde los álcalis estén disponibles para ingresar en el concreto en forma de solución.

Si no hay presencia de álcalis de fuentes externas y no hay ningún material no reactivo económico disponible, se pueden utilizar agregados reactivos siempre que se apliquen las siguientes precauciones:

- Especificar un cemento con bajo contenido de álcalis, máximo 0.60% expresado como Na_2O .
- Prohibir el uso de agua marina o agua proveniente de suelos alcalinos como agua de mezclado.
- Evitar la adición de cloruro de sodio o potasio.
- Alternativamente utilizar material puzolánico ASTM C 618 o escoria de alto horno ASTM C 989.
- Siempre que se considere utilizar materiales puzolánicos se debe tener cuidado ya que estos materiales aumentan la demanda de agua y pueden provocar fisuración por secado. En general una puzolana o escoria de alto horno mejorara la trabajabilidad del concreto y su resistencia puede igualar o superar la de los cementos portland.

3.8.2 Reacción álcali - carbonato

Ciertas rocas con carbonatos (especialmente las dolomíticas), reaccionan con los álcalis originando expansión, conocida como reacción álcali – carbonato. Los factores presentes en esta reacción son variados como la heterogeneidad de los agregados, el tamaño del agregado grueso, la permeabilidad del concreto, los cambios en las condiciones ambientales en servicio y los más importantes son la presencia de humedad y los cambios de temperatura. Una característica de la reacción álcali – carbonato que la diferencia de la reacción álcali- sílice es la ausencia general del gel de sílice exudando de las fisuras.

Para identificar la reactividad de los agregados, los ensayos de mayor utilidad son los siguientes:

- a) Examen petrográfico del agregado para identificar rombos dolomíticos de 1 a 200 μm . ASTM C 586 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Carbonate Rocks as Concrete Aggregates (Rock-Cylinder Method)”, y NMX-C-265.
- b) Reactividad potencial de rocas ricas en carbonato en agregados para concreto con los álcalis. Si la expansión es mayor de 0.1%, indica reacción química y debe realizarse una prueba concluyente. NMX-C-272 “Reactividad Potencial de Rocas de Carbonatos en Agregados para Concreto con los Álcalis (Método del Cilindro de Roca)”.
- c) Reacción álcali – roca carbonatada en prismas de concreto ASTM C 1105 “Standard Test Method for Length Change of Concrete Due to Alkali-Carbonate Rock Reaction”.
- d) Examen microscópico, permite confirmar los tipos de componentes presentes en los agregados y sus características.
- e) Examen visual, Las reacciones álcali – carbonato se pueden detectar inspeccionando visualmente superficies de concreto aserradas o trituradas. Pueden utilizarse rayos X.

f) Prueba de expansión en prismas de concreto. Si la expansión después de un año es mayor a 0.04%, el agregado es reactivo.

Los procedimientos que se pueden realizar para minimizar los efectos de la reacción álcali – carbonato son:

- Evitar el uso de agregados reactivos
- Diluir con agregados no reactivos
- Especificar un cemento con bajo contenido de álcalis, máximo 0.60% expresado como Na_2O

3.9 Ataque biológico

Durante las últimas décadas, los estudios sobre el deterioro del concreto reforzado se habían centrado en problemas como el ataque por cloruros, sulfatos y otros agentes que degradan la matriz del cemento generando grietas y fisuras, lo que facilita el ingreso de estos, provocando así que se den las condiciones necesarias para que se inicie la corrosión del acero de refuerzo, sin embargo, no son los únicos mecanismos que provocan deterioro en el concreto, recientemente se ha empezado a estudiar otro mecanismo conocido como biodeterioro.

El biodeterioro ha demostrado ser crítico en estructuras ubicadas en ambientes agresivos, generalmente en estructuras hidráulicas donde se presenta una humedad alta y un exceso de nutrientes, como el agua residual, las aguas profundas, lixiviados en rellenos sanitarios o el drenaje de las minas que conduce aguas ácidas. La presencia de organismos y microorganismos de origen vegetal o animal sobre las estructuras de concreto, no solamente afectan la apariencia, también pueden producir daños y defectos de carácter físico, mecánico, químico y biológico.

Los tipos de daño por acciones biológicas que se presentan en el concreto son de carácter biofísico, biomecánico, bioquímico y biológico. Los dos primeros, afectan a la permeabilidad y resistencia del concreto; los dos últimos provocan daños a la matriz del concreto al transformar los compuestos del cemento endurecido, afectando la permeabilidad además de reducir el pH por las excreciones acidas de los organismos y en el caso de incrustaciones como en el caso del ambiente marino podrán aumentar de manera significativa los empujes generados por el oleaje.

3.9.1 Biorreceptividad

La biorreceptividad del concreto hace referencia a las propiedades del concreto que contribuyen o favorecen a la colonización, establecimiento y desarrollo de microorganismos de origen animal o vegetal, y esta llegue a afectar de manera importante la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

Para que en el concreto se presente la biorreceptividad, influyen 4 factores muy importantes que son la presencia de agua, disponibilidad de nutrientes, condiciones ambientales y superficies de colonización.

3.9.1.1 Presencia de agua

Prácticamente todas las formas de vida necesitan del agua para poder desarrollarse, de manera que, para que exista la posibilidad de que se presente un deterioro en el concreto de carácter biológico se requiere la presencia de agua; esta puede proceder de fuentes externas o estar presente en los poros del concreto.

3.9.1.2 Disponibilidad de nutrientes

Los nutrientes necesarios para formar colonias de microorganismos son muy variados, y el medio ambiente contiene muchos gases y partículas que sirven de alimento para estos. Algunas bacterias se alimentan de CO₂ atmosférico, mientras los hongos y bacterias

heterotróficas se alimentan de la materia orgánica y en muchos casos la descomposición de algunos microorganismos sirve de alimento para otros.

El concreto también puede ser una fuente de nutrientes para ciertos microorganismos, los cuales se alimentan de los minerales formados en la matriz del concreto.

Las estructuras que se encuentran relacionadas con la industria de la alimentación, sistemas de tratamiento de aguas residuales, procesamiento de materiales de origen orgánico, transporte de hidrocarburos, favorecen la presencia de agua, nutrientes y condiciones favorables para el desarrollo de colonias de microorganismos.

3.9.1.3 Condiciones ambientales

Aunque la presencia de agua o la disponibilidad de nutrientes es determinante para el desarrollo de colonias de microorganismos, existen ciertos géneros de microorganismos que pueden sobrevivir a condiciones muy extremas por largos periodos de tiempo.

En muchos casos la presencia de oxígeno no siempre es determinante, pues las bacterias anaeróbicas viven con concentraciones inferiores a 0.1 mg/l, mientras que las bacterias aeróbicas sobreviven con concentraciones superiores a 1 g/l.

Ambientes con valores de pH cercanos a 7, temperaturas entre 20°C a 35°C y una humedad relativa superior al 80%, favorecen enormemente el crecimiento de colonias de microorganismos. Sin embargo los microorganismos también pueden alterar el microclima en donde se encuentran alterando el pH, la concentración de oxígeno, el nivel de humedad y temperatura, con el objeto de posibilitar el desarrollo de microorganismos en ambientes no favorables para ellos trayendo como consecuencia ciclos de colonización y deterioro.

3.9.1.4 Superficie de colonización

El concreto usualmente posee una estructura rugosa y porosa que ofrece la condición ideal para que se asienten colonias de microorganismos ya que estos establecen

mecanismos de fijación y estos se dan en virtud de la textura que ofrece la superficie de anclaje. Estas texturas favorecen la retención de agua y el crecimiento de las colonias, sin embargo aun las superficies densas y lisas pueden servir como superficies de invasión.

3.9.2 Biodeterioro

El biodeterioro, consiste en el ataque de microorganismos a la pasta de cemento y los agregados, causando la disolución de sus componentes como consecuencia de la acción de los ácidos que producen cuando estos microorganismos asimilan los compuestos del concreto o nutrientes que hay en el ambiente y los excretan.

El proceso de biodeterioro se puede dividir en dos fases:

- Fase de iniciación: En esta se produce el acondicionamiento del sustrato o superficie de colonización donde aumenta o disminuye el pH, aumentan los niveles de humedad y se comienzan a formar y formar biopelículas.
- Fase de desarrollo: Durante esta fase crecen las colonias de microorganismos, ocasionando reacciones químicas que generan fisuraciones, lo cual permite el ingreso de agentes agresivos al concreto reduciendo la resistencia y aumentando la permeabilidad, acelerando el fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo.

En los organismos que fomentan el biodeterioro se pueden distinguir géneros y especies principalmente de origen vegetal, como lo son las bacterias, los hongos, líquenes y el musgo.

3.9.2.1 Bacterias

Las bacterias son microorganismos cuyo tamaño es tan pequeño que se mide en micras, según su forma se clasifican en cocos, bacilos y espirilos. Estos están constituidos por una única célula y a pesar de su diminuto tamaño son los microorganismos más agresivos en los elementos de concreto reforzado.

En un ambiente adecuado las bacterias metabolizan compuestos que conducen a reacciones químicas sumamente nocivas para el concreto, de las cuales se distinguen las siguientes:

3.9.2.1.1 Bacterias heterotróficas

Son bacterias que necesitan compuestos de carbono complejos para su metabolismo. Entre ellas se encuentran las sulfobacterias y las nitrobacterias. Las primeras, son bacterias que oxidan el azufre a sulfatos, que al estar en contacto con el concreto producen sulfato de calcio iniciando el deterioro por ataque de sulfatos. Las segundas, son bacterias que transforman el amoníaco presente en la atmósfera en nitritos y nitratos que al estar en contacto con el concreto producen nitrato de calcio dando inicio al deterioro por ataque de sales.

3.9.2.1.2 Bacterias sulfooxidantes

Algunas bacterias producen la oxidación de uno o más compuestos de azufre como el sulfuro, azufre elemental, tiosulfato, politionato y tiocinato, las cuales dan lugar a la formación de sulfatos. Estas bacterias al necesitar oxígeno para sus procesos vitales causan la oxidación del ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno H_2S , transformándolo en ácido sulfúrico H_2SO_4 que reacciona con el hidróxido de calcio formando yeso, que posteriormente reacciona con el aluminato tricálcico formando etringita.

Para concentraciones de sulfuro de hidrogeno entre 30 y 400 ppm las bacterias sulfooxidantes pueden causar reducciones de espesor en el concreto reforzado a tasas de 1.4 hasta 7.6 mm/año. La temperatura optima para su desarrollo está entre los 20 y 43°C y un pH que puede variar entre 2 y 8, siendo una de las bacterias más eficientes en la oxidación de compuestos de azufre el *Tiobacillus tioxydans* que resiste ambientes extremadamente ácidos.

3.9.2.1.3 Bacterias sulforeductoras

Estas bacterias viven en la biocapa que se forma en las paredes de las tuberías que transportan aguas residuales, transformando anaerómicamente los sulfatos existentes en las aguas y los reducen hasta transformarlos en sulfuros de hidrogeno y gas sulfúrico, que posteriormente usan las bacterias sulfooxidantes para su provecho.

3.9.2.2 Hongos

El crecimiento de hongos se ha observado en diversas estructuras, desde edificios y monumentos históricos hasta estructuras subterráneas como túneles y conducciones de agua residual, estimándose que hay aproximadamente unas 80 000 especies diferentes de hongos siendo los más comunes *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* y *Penicillium*.

Los hongos requieren que exista presencia de agua y disponibilidad de nutrientes, ya sea de naturaleza orgánica o inorgánica, su cuerpo puede ser unicelular o estar formado por filamentos microscópicos llamados hifas, que absorben los nutrientes.

Referente a los nutrientes de naturaleza inorgánica. Los hongos, requieren fosforo, nitrógeno, cloro, magnesio y calcio, utilizando además fuentes de carbono como aceites e hidrocarburos como fuente de alimento.

Durante el crecimiento de los hongos se pueden producir daños en el concreto debido al crecimiento de las hifas que penetran al concreto, causando daños mecánicos y químicos debido al desecho de ácidos orgánicos e inorgánicos.

3.9.2.3 Algas, líquenes y musgo

Las algas son plantas acuáticas provistas de clorofila, utilizan el calcio y magnesio de la pasta de cemento y al metabolizarlos generan grietas y fisuras que facilitan el desplazamiento de sustancias agresivas al interior de los elementos estructurales. Las algas más comunes halladas y usadas en pruebas relacionadas a los materiales de construcción son la *Stichococcus*, *Chlorella*, y *Cyanobacterium Gleocapsa*.

Los líquenes se forman por asociación de un alga y un hongo. La relación que establecen estos individuos es una simbiosis, es decir, una relación donde los dos obtienen un beneficio con esa asociación. En ésta asociación los hongos, denominados micobiontes, son los encargados de conformar generalmente la estructura talina o cuerpo vegetativo del líquen, y las algas o fotobiontes, los constituyentes fotosintetizadores, por lo que proporciona materia orgánica al hongo.

Los Cocoides, las colonias de Cianobacterias, Endolitos, *Trentepohlia*, *Thyrea*, *Aspicilla*, *Verrucaria* y *Caloplaca* son los líquenes más comunes asociados al biodeterioro en los materiales de construcción.

Los musgos (Briofitas) son plantas pequeñas que carecen de tejido vascular. Requieren de un ambiente temporalmente saturado de agua para completar su ciclo de vida. Son el segundo grupo más importante dentro de las plantas verdes. Se les divide en tres grandes grupos: antocerotes (*Anthocerotopsida*), hepáticas (*Hepaticopsida*) y musgos (*Bryopsida*).

3.9.3 Medidas para prevenir el biodeterioro

El empleo de cementos mezclados que incluyan escoria de alto horno, puzolanas y en especial el uso de humo de sílice es benéfico para reducir el ingreso de sustancias agresivas. La acción de las puzolanas ayuda a fijar el hidróxido de calcio, el cual es usualmente el producto de la hidratación del cemento más vulnerable al ataque de ácidos.

Existen cada vez mas métodos de tratamientos de superficie donde se pueden utilizar sales de amonio, fenoles, compuestos de mercurio, estaño y selladores penetrantes a base de silano y siloxano.

Sin embargo el comportamiento satisfactorio del concreto depende más de su calidad que del tipo de cemento utilizado, por lo cual se debe fabricar un concreto con una baja relación a/c, un adecuado proceso de compactación, curado, un excelente acabado que sea capaz de evitar la acumulación de humedad y materia orgánica y que pueda llegar a propiciar la aparición de biocapas.

3.10 Corrosión del acero de refuerzo

La ASTM G15 “Standard Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing”, define a la corrosión como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”. Para el acero embebido en el concreto, la corrosión da como resultado la formación de óxido el cual genera de 2 a 4 veces el aumento de volumen del acero original y la pérdida de sus propiedades mecánicas. La corrosión produce una disminución de su sección transversal con lo cual pierde su capacidad mecánica, al generarse el aumento de volumen por la formación de oxido en la interface acero-concreto, se producen fisuras, desprendimientos y se pierde la adherencia del acero con el concreto, evitando que las

estructuras de concreto puedan desarrollar un comportamiento favorable cuando se someten a esfuerzos de tensión y flexión.

El ACI 222R “Guide to Protection of Metals in Concrete Against Corrosión”, describe detalladamente los mecanismos de corrosión, la protección contra la corrosión, métodos para identificar ambientes corrosivos y medidas correctivas junto con sus limitaciones.

3.10.1 Resistencia a la corrosión

El acero que se encuentra en el concreto está protegido contra la corrosión gracias al elevado pH de la pasta del cemento (pH 12-13), que crea una capa de óxido pasivo que lo protege de la corrosión. Sin embargo la presencia de agentes agresivos en el medio ambiente, puede alterar estas condiciones, como son los sulfatos, dióxido de carbono y cloruros.

El Dióxido de Carbono, al depositarse en la superficie del concreto, y en la presencia de humedad, genera un fenómeno llamado “carbonatación”, el cual disminuye el pH del concreto y esto hace que la película pasiva que protege al acero de la corrosión desaparezca, lo que crea las condiciones propicias para el inicio de la corrosión.

En el caso de los sulfatos estos en combinación con el aluminato tricálcico del concreto forman etringita, la cual produce aumento de volumen en el concreto generando grandes presiones, dando lugar a fisuras en el concreto lo que permite el ingreso de humedad, oxígeno y diversos factores que detonan la corrosión.

Los iones cloruro son los principales agentes de corrosión del acero de refuerzo en estructuras expuestas a ambientes marinos, sales descongelandantes y en estructuras construidas con concretos contaminados. En los dos primeros casos los iones ingresan a través de la red de poros del concreto y se le conocen como cloruros externos. En el caso de concretos contaminados, los cloruros se presentan como contaminante de alguno de los

componentes de la mezcla como los agregados, agua, aditivos o cemento, a estos se les conoce como cloruros locales.

El ACI 222 y la NMX-C-530 nos mencionan que para prevenir la corrosión del acero de refuerzo propiciada por los cloruros locales, la concentración máxima de iones cloruro solubles en agua en el concreto endurecido, considerando la participación de todos los componentes de la mezcla, no deberán exceder los valores indicados en la Tabla 19.

Tabla 19

Límites de iones cloruro provenientes de los constituyentes del concreto

Contenido máximo permitido de iones cloro en el concreto	
Tipo de construcción	Contenido de iones cloro (Cl) solubles en agua. % en peso del cemento
Concreto presforzado	0.06
Concreto reforzado expuesto al cloro en condiciones húmedas	0.15
Concreto reforzado expuesto al cloro en condiciones secas o protegida contra la humedad	1.00
Otras construcciones de concreto reforzado	0.30

Para determinar el contenido de iones cloro, la norma NMX-AA-073 “Determinación de Cloruros Totales en Aguas Naturales, Residuales y Tratadas” describe el método de prueba en agua o aditivos, NMX-C-131 “Determinación del Análisis Químico” para los cementos, ASTM-C-1218 “Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete” y ASTM-C-1524 “Standard Test Method for Water-Extractable Chloride in Aggregate (Soxhlet Method)” para los agregados, morteros y concretos.

La resistencia a la corrosión dependerá entonces de un concreto de calidad, suficientemente denso para disminuir la permeabilidad y restringir la penetración de los sulfatos y las sales, además de reducir el desarrollo de la carbonatación. Una relación a/c menor a 0.5 reducirá el ritmo de la carbonatación y menor a 0.4 para minimizar la penetración por cloruros.

Se puede lograr una mayor resistencia a la corrosión si el concreto se elabora con aditivos como el humo de sílice, cenizas volantes y escorias de alto horno, ya que reducen la permeabilidad del concreto. También existen los aditivos inhibidores de corrosión, como el nitrito de calcio, que actúa para prevenir la corrosión en presencia de los iones cloruro.

3.10.2 Medidas para prevenir el daño por corrosión

Se han propuesto numerosos sistemas de protección, sin embargo los más usados y que han presentado buenos comportamientos frente a la corrosión son los siguientes:

- Acero recubierto con epoxi
- Membranas impermeables
- Barreras protectoras desarrolladas a partir de silanos, epoxis, poliuretanos, etc.
- Protección catódica
- Impregnación con polímeros
- Sobrecapas de concreto de muy baja relación a/c
- Reemplazo de concreto existente por concreto con inhibidor de corrosión

Existen diversos factores que provocan la corrosión del acero de refuerzo; sin embargo, también existen prácticas recomendables que permiten que las estructuras de concreto reforzado tengan un mejor desempeño frente a medios agresivos, algunas de estas medidas son:

- **Materiales:** La selección de los materiales deberá ser la adecuada para fabricar un concreto que sea capaz de soportar las condiciones ambientales a las que será expuesto.
- **Relación a/c:** Una relación a/c baja permite lograr concretos más densos y menos permeables, evitando el ingreso de agentes agresivos o ayudando a retrasar sus efectos.
- **Diseño geométrico de la estructura:** La geometría de la estructura debería proveer un buen drenaje, ya que la vulnerabilidad del concreto es fuertemente afectada por el grado de saturación del concreto, durante el diseño inicial de la estructura deberán tomarse en cuenta todas las precauciones necesarias para minimizar el ingreso de agua.

Aún cuando es prácticamente imposible mantener la humedad alejada de las losas en contacto directo con el terreno, las consideraciones que aparecen en la norma ACI 325.9R “Guide for Construction of Concrete Pavements”, estas ayudarán a minimizar la acumulación de humedad, se deberán tomar precauciones para minimizar las fisuras (ACI 224R “Control of Cracking in Concrete Structures”) y descamaciones (ASTM C 672 “Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals”), ya que en ellas se puede almacenar o transmitir agua.

- **Colocación del concreto:** La correcta ejecución en la colocación y el vibrado del concreto, permitirá elaborar un concreto de calidad y presentara menos problemas de fisuración.
- **Curado:** Una buena técnica de curado permite aumentar la hidratación del cemento, reduciendo la permeabilidad, por lo que se debería especificar un mínimo un curado de 14 días. También es importante evitar el desarrollo de tensiones térmicas tempranas a manera de evitar la aparición de fisuras.

4 FACTORES QUE CAUSAN DEFECTOS EN EL CONCRETO

En las estructuras de concreto reforzado, aun desarrollando un concreto correctamente dosificado para todas las probables condiciones a las que será sometida una estructura y esta conserve las características del proyecto en términos de seguridad (resistencia mecánica, estabilidad, seguridad en caso de fuego, seguridad en uso), funcionalidad (higiene, salud y medio ambiente, protección contra el ruido, ahorro energético y confort térmico) y estética (deformaciones, agrietamientos, desprendimientos, manchas), con un mínimo de mantenimiento que le permita soportar los efectos ambientales y naturales en su entorno durante su uso, existen otros factores que influyen considerablemente en la durabilidad del proyecto y pueden clasificarse según el momento en que ocurren. Para esto la norma NMX-C-530 nos proporciona un modelo conceptual que consta de 7 etapas, presentando una división de acuerdo con la planificación de proyectos y predicciones de durabilidad durante su uso (figura 21).

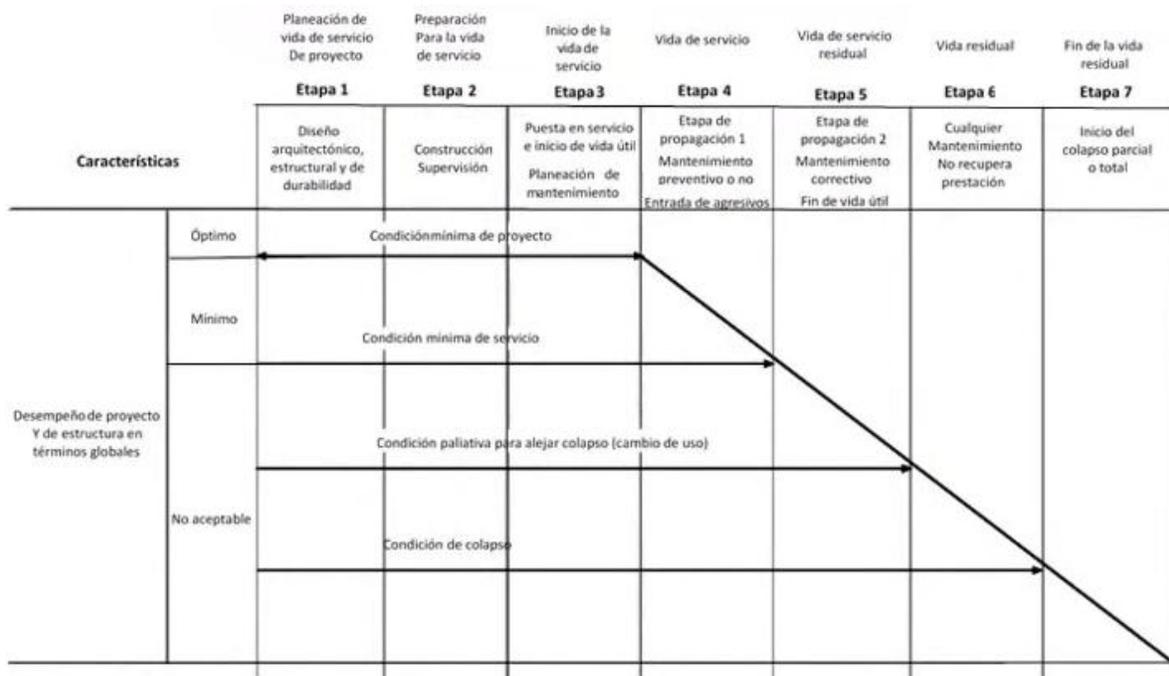


Figura 21 Modelo conceptual de 7 etapas

4.1 Relacionados a la fase de proyecto

Durante la fase de proyecto se establecen todos los criterios y especificaciones para que la estructura se encuentre en condiciones óptimas al inicio de su vida de servicio. En el diseño arquitectónico, diseño estructural, diseño por durabilidad y el diseño del plan de mantenimiento de la estructura se deberán tomar en cuenta todos los factores que puedan afectar la durabilidad de la estructura al incluir medidas que en base a la experiencia de los proyectistas ayuden a alcanzar la vida útil esperada.

Durante esta etapa se deberán tomar en cuenta la adición o sustitución (en caso de mantenimiento a futuro) de algunos elementos como apoyos, juntas de dilatación, juntas de contracción, juntas sísmicas, juntas por temperatura o drenajes. Estos deberán estar correctamente señalados ya que cualquier diferencia, cambio o error en la estructuración y diseño de la estructura influirán directamente en la durabilidad del proyecto.

De acuerdo a lo anterior deberán tomarse en cuenta al menos los siguientes aspectos:

- Correcto uso de normas y estándares
- Control de calidad
- Selección de formas estructurales adecuadas
- Seleccionar los recubrimientos adecuados para la protección del acero
- Proponer un diseño de concreto de acuerdo al medio que será expuesto
- Diseño de drenajes adecuados para mantener los niveles de humedad bajos
- Selección de barreras protectoras si los ambientes son muy agresivos
- Programas de mantenimiento y reparación futura

La NMX-C-530 nos presenta en su Tabla 3 (Figura 22) a manera de resumen, los requisitos de durabilidad mínimos según la clase de exposición.

Tabla 3 - Requisitos de durabilidad según la clase de exposición (NMX-C-530)																		
Requisitos	Sin riesgo de corrosión	Corrosión inducida por cloruros								Congelamiento y deshielo				Desgaste				
		Corrosión inducida por carbonatación				Provenientes de agua de mar				Origen distinto del agua de mar		Industria / Agresividad química				Limitada exposición al agua	Exposición frecuente al agua y sustancias descongelantes	
		C0	C1	C2	C3	M1	M2	M3	M4	C11	C12	Q1	Q2		Q3	Q4	F1	F2
Máxima relación a/c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	0.45	0.45	0.4	-	-	0.5	
	0.6	0.6	0.55	0.5	0.4	0.45	0.42	0.4	0.5	0.4	0.5	0.45	0.4	0.4	0.55	0.45	0.45	
	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4	0.42	0.38	0.35	0.4	0.35	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.45	
Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	230	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	300	350	380	250	250	275	
	250	250	280	300	300	380	400	450	300	450	250	300	350	380	300	450	300	
	250	280	300	350	380	400	450	480	380	480	300	350	380	400	325	480	350	
Resistividad húmeda mínima a 90 días (kΩ-cm)	10	10	20	15	20	20	20	20	20	20	20	20	30	40	20	40	30	
	10	15	25	20	30	40	50	60	30	60	20	30	40	50	20	50	40	
	20	20	30	25	40	50	60	70	40	70	20	40	50	60	30	60	50	
Recubrimiento mínimo (mm)	25	30	35	45	50	55	60	70	50	70	40	45	55	60	40	50	40	
	30	35	40	50	55	60	70	80	60	80	45	50	60	70	45	60	50	
Contenido de aire por TMA (%)	40 mm														4.5	5.5		
	20 mm														5	6		
	10 mm														6	7.5		
Requisitos adicionales para agregado					Desgaste máximo por prueba de los ángeles ≤40%; Densidad ≥2.4; Bajo contenido de materia orgánica										Resistentes a congelamiento		Desgaste máximo por prueba de los ángeles ≤40% densidad ≥2.4	
Otros requerimientos	Todo tipo de cemento	Cementos con contenido total de álcalis inferior a 0.6%				Cementos con 5% < C ₃ A < 8%					Cementos con C ₃ A < 5%				Cementos con 5% < C ₃ A < 8%		Todo tipo de cemento	

Figura 22 *Requisitos de durabilidad*

4.2 Relacionados con los materiales

Durante toda su vida útil, los materiales están expuestos a diferentes factores que van modificando su estructura interna, por lo cual una inadecuada selección de los mismos afectara su desempeño. En el concreto, todos los materiales utilizados para su producción (cemento, agregados, agua y aditivos) deben pasar por un adecuado control de calidad, esto para evitar reacciones no deseadas como las reacciones álcali-agregado.

En el caso del acero se podrán utilizar barras sin protección o recubiertas (galvanizadas, recubiertas con epoxi o con revestimiento inoxidable) para proporcionarles protección contra la corrosión en ambientes agresivos.

En el capítulo 1 se mencionaron las normativas aplicables a los materiales constituyentes del concreto reforzado y sus adiciones, en las cuales se establecen las condiciones mínimas para su control de calidad, manipulación, compatibilidad y cualidades específicas de cada componente.

4.3 Relacionados a los procesos constructivos

Las estructuras de concreto, aún con un excelente diseño por durabilidad, arquitectónico y estructural, pueden ver adversamente afectadas sus características más deseables, ya que es durante su construcción donde pueden presentarse deficiencias que pueden poner en riesgo la durabilidad de la estructura. Esto puede deberse a que no se tengan entendidas las recomendaciones y especificaciones del proyecto, la calidad de los materiales no sea la adecuada, exista una falta de supervisión, el laboratorio no cuente con certificaciones o sea inexistente, por lo que la estructura de concreto seguirá siendo vulnerable al daño.

La experiencia de la mano de obra, sumada a una buena supervisión en cada una de las etapas constructivas, mejorará el desempeño de la estructura. Se deberá tener especial cuidado en los procedimientos de transporte, colocación, cuidado de recubrimientos,

vibrado, acabado y curado del concreto. La importancia de estos cuidados nos ofrecerá concretos más densos, menos permeables, lo que protegerá al acero de refuerzo y el correcto curado evitara fisuraciones y contracciones excesivas.

El control e inspección en obra tienen como finalidad asegurar que se logren fielmente los requisitos, propósitos de los planos y especificaciones del proyecto, esto incluye no solo observaciones visuales y mediciones de campo sino también ensayos de laboratorio, los cuales se recolectaran y evaluarán, para verificar la calidad de los materiales, procedimientos, y operaciones en la obra.

4.3.1 Diseño de mezcla de concreto

Al solicitar la dosificación de la mezcla es necesario considerar la durabilidad y la resistencia a compresión o tensión que se requiere en las especificaciones de proyecto. Los requisitos por durabilidad deberán especificar lo siguiente:

- Tipo de cementantes
- Tipo de concreto
- Densidad del concreto
- Tamaño máximo de agregado
- Contenido de aire
- Resistencia mínima a compresión o tensión
- Permeabilidad
- Relación agua cemento
- Contenido mínimo de cementantes por metro cúbico
- Tipos de aditivos químicos y minerales
- Revenimiento
- Condiciones de colocación
- Apariencia, en caso de que el concreto sea decorativo

Muchas veces una obra en particular puede requerir algún tipo especial de concreto que incluya agregados especiales como es el caso de concretos con agregados livianos o concretos de alta densidad, también podrían requerir ser entregados con una temperatura

dada, como sucede con los concretos para elementos de gran volumen y estos deberán especificarlo desde la etapa de diseño.

4.3.2 Procedimientos de medición y mezclado

Los procedimientos de medición y mezclado tienen como fin producir un concreto uniforme que contenga las proporciones requeridas. Estos procedimientos deben garantizar que los materiales se mantengan homogéneos y no se segreguen antes y durante la medición de cada uno de los componentes para la elaboración de concreto, el equipo para realizar estas mediciones deberá medir adecuadamente las cantidades requeridas de material, tener la facilidad de modificar las cantidades cuando así se requiera, ser capaz de mantener las proporciones requeridas entre tandas y ser capaz de introducir los materiales en la secuencia adecuada en la planta donde se va a elaborar el concreto.

Las especificaciones y tolerancias para la medición de cada uno de los componentes del concreto, así como los tiempos y tipos de mezclado, transportación y colocación, se encuentran en las normas ASTM C 94 “Especificación normalizada para concreto premezclado” y ACI 304 “Recommended practice for measuring, mixing, transporting and placing concrete”, en el caso de adición de aditivos el ACI 212.3 “Report on Chemical Admixtures for Concrete”, proporciona una guía para la dosificación correcta en la mezcla de concreto. En el caso de concreto elaborado en obra el ACI 301 “Specifications for structural concrete for buildings”, especifica las tolerancias en la medición de los componentes para la elaboración de concreto en sitio.

Los métodos de mezclado son de gran importancia, ya que tienen un impacto significativo en propiedades importantes del concreto, como son el contenido de aire, revenimiento y relación agua-cemento. Se deberá tener especial cuidado para asegurarse

que el concreto cumple con las condiciones necesarias para proveer la durabilidad requerida para el uso y tipo de exposición anticipada para el concreto.

Los tiempos extensos de mezclado tienen un fuerte impacto en el contenido de aire, cuyo efecto incrementa las cantidades de aire atrapado en el concreto, e incluso podría eliminar la cantidad de aire incorporado por medio de aditivos, lo cual impacta en la resistencia del concreto. Estos tiempos de mezclado extensos generan también un incremento a la temperatura, lo que ocasiona una pérdida de revenimiento, especialmente en un clima cálido. Agregar agua adicional para restaurar el revenimiento es una mala práctica ya que puede incrementar la porosidad ya que esto impacta en el tamaño de la distribución de poros, permitiendo que exista un aumento en la contracción por secado y se vea reducida la resistencia del concreto.

4.3.3 Transporte y colocación del concreto

El método seleccionado para transportar el concreto debe ser capaz de entregar el concreto en el sitio donde se va a colocar y este debe conservar las mismas condiciones de consistencia, homogeneidad y temperatura que cuando se elaboro en la mezcladora. Para lograr esto, los procedimientos y equipos idóneos para el manejo, conducción y descarga del concreto deben seguir como mínimo las prácticas recomendadas por los organismos reguladores.

Estas recomendaciones se encuentran en las normas ACI 304, ACI 304.2R “Placing Concrete by Pumping Methods”, ACI 304.4R “Placing Concrete with Belt Conveyors” y en el caso de México la NMX-C-155, donde se habla de los métodos de transporte más comunes, como camiones mezcladores, bandas transportadoras, bombas de concreto, botes transportados con malacate o grúa, canalones y tubería Tremie para colocación bajo agua. Algunos de estos medios se utilizan simultáneamente para la colocación del concreto, de

cualquier modo estos medios pueden combinarse dependiendo la accesibilidad y otras condiciones del sitio de colocación.

Antes de la colocación del concreto se deberá revisar con anterioridad la correcta ubicación de las cimbras y el acero de refuerzo, ya que al vaciar el concreto estos podrían moverse y provocar retrasos en la ejecución de los trabajos y estas pérdidas de tiempo pueden ocasionar que el concreto pierda trabajabilidad y esto se volverá más grave en con temperaturas altas, con mucho viento o ambas.

4.3.3.1 Colocación del concreto en clima frío

Debido a que la reacción química del cemento con el agua es un proceso exotérmico, las condiciones climáticas de los ambientes fríos retardan el tiempo de fraguado del concreto, así como su endurecimiento y su desarrollo de resistencia, por lo que habrá demoras en las operaciones de acabados y descimbrados de los elementos estructurales. Si bien una temperatura baja permite una mayor resistencia final del concreto, debido a una mejor y más eficiente hidratación del cemento, las temperaturas extremas pueden tener efectos adversos como se vio en el capítulo 3.3.

El ACI 306, define el clima frío como un periodo donde, por más de tres días consecutivos se mantenga una temperatura diaria promedio menor a 5°C (la temperatura promedio diaria será el promedio de las temperaturas mayor y menor que ocurran durante un periodo comprendido entre dos medias noches) y la temperatura del aire no sea mayor a 10°C durante más de la mitad de un periodo cualquiera de 24 horas.

4.3.3.2 Colocación del concreto en clima cálido

En lugares con clima cálido, se presentan diversos factores que pueden afectar de manera adversa al concreto, la temperatura alta en el ambiente, humedad relativa baja y

velocidad de viento alta, afectan el desarrollo de propiedades importantes en el concreto fresco y endurecido.

Si los componentes con los que se elabora el concreto tienen una temperatura alta, aumentará la temperatura del concreto y a su vez aumentará la rapidez con la que se hidrata y endurece, provocando una pérdida en el revenimiento que hará necesario el retemplar la mezcla, añadiendo más agua de mezclado. El agua añadir agua adicional al concreto provocará pérdida en su resistencia, aumentando la contracción plástica, por secado y el agrietamiento térmico diferencial, incrementando así su permeabilidad, trayendo consigo una pérdida importante en su durabilidad.

El ACI 305 nos recomienda en lugares cálidos, que los agregados y el agua deben mantenerse fríos, incluso pudiendo utilizar hielo como parte del agua de mezclado, humedecer las cimbras, instalar rompe vientos, aplicar humedad mediante rociadores y reducir el tiempo entre la colocación del concreto y el inicio de curado, estas simples consideraciones han sido bastante efectivas para reducir la temperatura del concreto.

Existe una gran variedad de aditivos retardadores de fraguado y reductores de agua de alto rango, que tienen efectos benéficos y compensan algunas de las características indeseables que el concreto puede presentar durante su colocación en lugares con clima caluroso. La evaluación del uso de un aditivo determinado o combinación de aditivos, responde a los resultados que se obtengan del concreto específico que se elaborará, incluyendo las condiciones en obra, ya que estos resultados estarán fuertemente influenciados por las características del cemento, agregados y sus proporciones respectivas, al igual que por las prácticas de construcción y las condiciones ambientales.

Los requisitos para obtener buenos resultados durante la colocación y curado del concreto en climas calurosos no difieren de los necesarios para otros climas, sin embargo se debe

tener especial cuidado en determinados momentos, saber reconocerlos y tener listas las preparaciones necesarias para prevenir las condiciones adversas que pudieran llegar a presentarse. Algunos de ellos son:

- Restringir en medida de lo posible que la colocación del concreto sea a última hora de la tarde o al anochecer
- Zona de entrega lista para evitar demoras en el inicio del vaciado
- Revisar la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento en intervalos frecuentes
- Equipo de colocación con la capacidad adecuada
- Suficiente equipo de vibración y mano de obra para la compactación
- Provisión de agua suficiente para boquillas de niebla o rocío
- Darle preferencia al curado húmedo como lo indica la ACI 308
- Proteger con rapidez las superficies expuestas (yute, mantas, lonas)
- Curado continuo por 7 a 10 días, con un periodo de secado posterior de 4 días
- El agua de curado no deberá ser más fría que el concreto, esto para evitar que se presenten esfuerzos por cambios de temperatura y el consiguiente agrietamiento
- Se podrá utilizar compuestos de curado con pigmento blanco siempre que cumplan con la ASTM C 309
- Localización y preparación de juntas de construcción
- Aplicar películas mono moleculares si así se establece en el proyecto, a los 28 días después de descimbrar

4.3.4 Compactación

La función de vibrar el concreto que comúnmente se le conoce como compactación, trata de lograr la densidad más alta posible del concreto, forzándolo a llenar y tomar la forma del espacio confinado por las cimbras y lograr un contacto pleno con el acero de refuerzo.

El procedimiento más utilizado para compactar el concreto se realiza con vibradores de inmersión, recomendando que tengas una frecuencia mínimo de 5000 ciclos de vibración por minuto y una aceleración mínima de 4g.

Otro equipo para compactar es el vibrador externo, este se fija de manera rígida a la cimbra, es comúnmente usado para secciones prefabricadas o en sitio para secciones delgadas o de espesor tal que no se pueden utilizar vibradores de inmersión. Para someter a vibración a la cimbra y el concreto, es necesaria una cantidad considerable de energía, por lo que esta debe ser fuerte y lo suficientemente firme para impedir movimientos, deformaciones y pueda llegar a escapar lechada o material a través de algún espacio generado por el movimiento de la cimbra. Los vibradores externos usualmente se utilizan con frecuencias de 6000 y hasta 9000 ciclos de vibración por minuto.

Es preciso contar con el equipo de compactación adecuado y personal en número suficiente para manejar el rango normal de producción de concreto, ya que de lo contrario se producirán demoras, congestión en el punto de entrega y colocación, pérdida de la manejabilidad de la mezcla, favoreciendo el endurecimiento en el camión mezclador, tolva, tubería Tremie u otra parte del sistema de transporte.

La inadecuada compactación del concreto es fuente de defectos constructivos indeseables que afectan fuertemente la durabilidad de las estructuras, por lo que esta

actividad deberá ser cuidadosamente planeada y ejecutada con personal capacitado y vigilada mediante un servicio calificado de inspección y supervisión.

Las normativas con las condiciones para elaborar una compactación adecuada son: ACI 309 “Guide of consolidation of concrete”, ACI 309.1 “Report on Behavior of Fresh Concrete During Vibration”, ACI 309.2 “Identification and Control of Visible Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces”, ACI 309.3 “Guide to Consolidation of Concrete in Congested Areas”

4.3.5 Curado

El curado de los elementos de concreto es una de las etapas más importantes en el proceso constructivo, este consiste en mantener un contenido satisfactorio de humedad y temperatura en el concreto recién colado, para que se puedan desarrollar propiedades deseadas, obteniendo así concretos durables. A diferencia de otras etapas constructivas, el curado es una etapa que rara vez se ejecuta, siendo una de las principales razones por la que se tienen concretos con resistencias bajas, superficies débiles, porosas y agrietadas, causando problemas de permeabilidad, lo que facilita el ingreso de agentes nocivos para el concreto y el acero. La resistencia y la durabilidad del concreto se desarrollarán plenamente sólo si se cura de manera adecuada.

El curado en el concreto contribuye a mejorar la calidad y durabilidad de las estructuras, mínimo deberá realizarse por 7 días y sus principales beneficios son:

- Reducción de fisuras
- Desarrollo máximo de resistencia
- Disminuye la permeabilidad
- Concretos más durables

- Más resistencia al desgaste superficial y a la abrasión
- Reducción de resquebrajamiento, pulverización y descascaramiento
- Hidratación óptima del cemento
- Mayor vida útil
- Reducción de costos de mantenimiento

El curado de concreto se ve afectado por varios factores como lo son, la temperatura ambiente, la temperatura del concreto, velocidad del viento y humedad relativa (Figura 23). Por lo que el concreto deberá ser protegido para evitar la evaporación rápida de agua en el concreto y esto provoque que se produzcan agrietamientos y contracción por secado. Las formas de proteger al concreto de esta pérdida de humedad van desde protecciones plásticas, con mantas, papel, mantas, yute, membranas líquidas, hasta métodos para mantener los niveles de humedad como curado por rociado o curado por vapor.

El ACI 308 nos menciona que el curado debe mantenerse mínimo 7 días en concretos de resistencia rápida y 14 días en concretos normales, en elementos verticales se tendrá que curar de inmediato después de descimbrar y en horizontales después de que la superficie pierda el brillo, para mantener las condiciones ideales para aplicar los acabados.

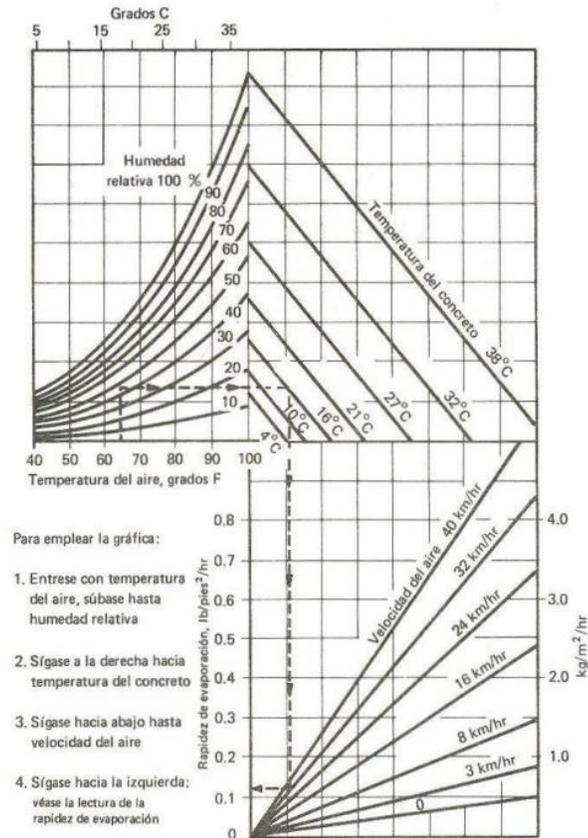


Figura 23 *Nomograma*

4.3.6 Acabado

La calidad de una superficie de concreto se evalúa por la condición y apariencia de su terminado, generalmente estas superficies están expuestas y estas pueden o no estar sometidas a condiciones agresivas donde hay cambios de humedad, temperatura y desgaste mecánico, por lo que el acabado influye notablemente en la durabilidad del concreto.

Para mejorar o atenuar algunas condiciones que beneficien al concreto, este debe estar correctamente dosificado, colocado, compactado, además de tener un excelente acabado que no permita la acumulación de humedad o sustancias nocivas para el concreto y proporcionar un curado adecuado.

En las superficies de concreto se distinguen dos tipos de acabado: el de las superficies formadas o que su geometría ya está dada por la compactación del concreto en las cimbras o moldes que lo contienen y el de las superficies no formadas o libres que se obtiene mediante el tratamiento de las superficies coladas libremente al término de su compactación y emparejamiento.

4.4 Relacionados con la operación y mantenimiento

El comportamiento y desempeño de una estructura durante su vida útil, dependerá entonces de los procesos de diseño, selección de materiales y de los cuidados que se tengan durante su construcción. Este periodo de tiempo puede verse afectado por las condiciones de operación de la estructura, algunos de los factores que intervienen son:

- Incremento cargas de servicio en la estructura
- Cambio de uso de la estructura
- Cambios de configuración estructural por remodelaciones
- Desastres naturales que provocan deterioros a la estructura
- Falta de mantenimiento preventivo

El plan de mantenimiento preventivo y correctivo para las etapas subsecuentes, en función de la agresividad del medio ambiente e importancia de la estructura, deberá considerar que los elementos primarios de la estructura pueden tener una vida de servicio diferente a los elementos secundarios (Juntas de dilatación, neoprenos, aisladores, etc.), por lo que deben existir guías técnicas de cada uno de esos elementos para su restitución de tal manera que la vida de servicio de la estructura se alcance.

El plan de mantenimiento debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Verificación y corrección por defectos de construcción.
- Verificación del impacto de la agresividad del ambiente sobre la estructura a través de mediciones electroquímicas (Resistividad del concreto, velocidad de corrosión y potencial de corrosión).
- Verificación del impacto de la agresividad del ambiente sobre la estructura a través de mediciones de carbonatación, contenido de cloruros, reacciones a los sulfatos y reacciones adversas de los álcalis.
- Verificar la cantidad y diámetro de las barras de acero de refuerzo utilizadas.
- Verificación de anclajes y dobleces (Pachómetro).
- Verificar el recubrimiento del concreto.
- Verificar la resistencia a la compresión del concreto.
- Verificar la resistencia a la tensión por compresión diametral.
- Número de rebote por medio de esclerómetro.
- Absorción por capilaridad.
- Velocidad de pulso ultrasónico.
- Verificación de impermeabilización y barreras protectoras.
- Verificar deflexiones y deformaciones.

Los resultados obtenidos ayudarán a conocer el estado general de la estructura, en caso de no ser lo esperado, corregir las predicciones y actualizar el plan de mantenimiento para ejercer acciones preventivas o correctivas cuando sea necesario.

CONCLUSIONES

En México se tienen zonas montañosas, ríos, lagos, grandes franjas costeras, regiones áridas, templadas, tropicales y diferentes tipos de industrias. Esto hace que las estructuras de concreto reforzado estén sometidas a gran variedad de factores climáticos, que pueden hacer presentes una o más patologías y estas afecten la durabilidad de las estructuras. Es por ello que en cualquier tipo de estructura se debe incluir el diseño con criterios de durabilidad.

El objetivo central de la durabilidad del concreto es garantizar que las estructuras construidas con este material mantengan su funcionalidad, integridad estructural y seguridad a lo largo del tiempo. Para cumplirlo se deben tratar todos los factores que influyan ocasionando efectos adversos en las estructuras de concreto reforzado, como lo son los factores inherentes al concreto, factores ambientales y el factor humano.

Por mucho tiempo las normativas y ensayos se centraban únicamente en la resistencia a compresión del concreto, llevando a la creencia de que concretos más resistentes nos darían estructuras más durables. Sin embargo, los avances en la ciencia y tecnología, han ayudado a que los métodos de investigación y desarrollo de los diferentes organismos nacionales e internacionales, comprendan mejor las patologías que se pueden llegar a presentar en las estructuras de concreto reforzado, conociendo así sus principales mecanismos de daño y sus características, llevándonos a poder desarrollar recomendaciones, normativas y especificaciones para mitigarlas.

La durabilidad en México se enfrenta a un desafío, ya que aun con las constantes actualizaciones, el desconocimiento de su relevancia en la vida útil de las estructuras ha llevado a su falta de aplicación y a que se sigan realizando malas prácticas en la ejecución de una o varias etapas del proceso constructivo, llevando a que la durabilidad de una estructura se vea fuertemente afectada.

La solución a estos problemas es la constante colaboración entre la investigación, la industria, la implementación efectiva de prácticas sostenibles y principalmente, buscar que se tenga una constante actualización por parte de todos los responsables de cada una de las etapas involucradas en el desarrollo de proyectos durables, estos son pasos clave que nos llevaran a la construcción de un futuro más resiliente y duradero.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Neville A. M. Tecnología del Concreto, 1ª Edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 1999.
- 2) Comité ACI 201. Informe 201.2R. “Guide to Durable Concrete”. American Concrete Institute. Michigan, 2016.
- 3) Ministerio de Fomento y Otros. Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.
- 4) M. Mena Ferrer, 2005. Durabilidad de estructuras de concreto en México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- 5) ASTM C 845. “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2018.
- 6) NMX-C-414-ONNCCE. “Cementos Hidráulicos. Especificaciones y Métodos de Ensayo”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2017.
- 7) NMX-C-122-ONNCCE. “Agua para Concreto. Especificaciones”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2019.
- 8) ASTM C 989. “Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2022.
- 9) ASTM C 1240. “Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2020.
- 10) ASTM C 618. “Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2023.
- 11) NMX-C-146-ONNCCE. “Aditivos para Concreto Puzolana Natural Cruda o Calcinada y Ceniza Volante para Usarse como Aditivo Mineral en Concreto de Cemento Portland. Especificaciones”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2019.
- 12) Comité ACI 212. Informe 212.3R. “Report on Chemical Admixtures for Concrete”. American Concrete Institute. Michigan, 2016.
- 13) ASTM C 494. “Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2022.
- 14) NMX-C-255-ONNCCE. “Aditivos químicos para concreto – Especificaciones y métodos de ensayo”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2013.
- 15) ASTM C 1116. “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2023.
- 16) ASTM A 820. “Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2022.

- 17) NMX-C-488-ONNCCE. “Fibras de Acero para Refuerzo de Concreto – Especificaciones y métodos de ensayo”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2019.
- 18) NMX-C-537-ONNCCE. “Fibras Poliméricas para Concreto – Especificaciones y métodos de ensayo”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2018.
- 19) ASTM A 615. “Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement”. American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 2022.
- 20) NMX-B-506-ONNCCE. “Industria Siderúrgica – Varilla Corrugada De Acero Para Refuerzo de Concreto – Especificaciones y Métodos de Prueba”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2019.
- 21) NMX-C-155-ONNCCE. “Concreto Hidráulico – Dosificado en Masa – Especificaciones y Métodos de Ensayo”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2019.
- 22) NMX-C-530-ONNCCE. “Durabilidad – Norma General de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado – Criterios y Especificaciones”. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. Ciudad de México, 2018.
- 23) Comité ACI 364.1. Informe 364.1R. “Guide for Assessment of Concrete Structures Before Rehabilitation”. American Concrete Institute. Michigan, 2019.
- 24) Comité ACI 302.1. Informe 302.1R. “Guide to Concrete Floor and Slab Construction”. American Concrete Institute. Michigan, 2015.
- 25) IB-75. “Abrasion Resistance”. Cement & Concrete Association of New Zealand. Wellington. 2004.
- 26) Comité ACI 207.6. Informe 207.6R. “Report on the Erosion of Concrete in Hydraulic Structures”. American Concrete Institute. Michigan, 2017.
- 27) Comité ACI 304. Informe 304R. “Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete”. American Concrete Institute. Michigan, 2009.
- 28) Comité ACI 318. Informe 318R. “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”. American Concrete Institute. Michigan, 2022.
- 29) Comité ACI 224. Informe 224R. “Control of Cracking in Concrete Structures”. American Concrete Institute. Michigan, 2008.