



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

INTRODUCCIÓN A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA

Edwin Giovanni González García

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Ecuté Bantes.

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

INTRODUCCIÓN A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

EDWIN GIOVANNI GONZÁLEZ GARCÍA

ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER ECUTÉ BANTES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL PRIMERO:	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL SEGUNDO:	Inga. Alba Maritza Guerrero Spinola
VOCAL TERCERO:	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL CUARTO:	Br. José Milton De León Bran
VOCAL QUINTO:	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR:	Ing. José Fernando Samayoa Roldan
EXAMINADOR:	Ing. Mario René De León García
EXAMINADOR:	Ing. Francisco Guillermo Melini Salguero
SECRETARIA:	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

INTRODUCCIÓN A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA,

tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 19 de marzo de 2006.


Edwin Giovanni González García

Guatemala 29 de octubre 2008

Ingeniero
Francisco Javier Quiñónez
Coordinador del Área de Materiales
Escuela de ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Respetado Ingeniero:

Por este medio me complace informar a usted que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado INTRODUCCION A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA, efectuado por el estudiante de ingeniería civil Edwin Giovanni González García.

Sobre el particular, me permito informarle que encuentro el trabajo enteramente satisfactorio y que llena los requisitos académicos para ser aprobado como trabajo de graduación.

Atentamente,



Ing. Francisco Javier Ecuté Bantes.
Colegiado No. 6442
Asesor.



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala,
25 de noviembre de 2008

Ingeniero
Sydney Alexander Samuels Milson
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

Estimado Ing. Samuels.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **INTRODUCCIÓN A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Edwin Giovanni González García, quien contó con la asesoría del Ing. Francisco Javier Ecuté Bantes.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante González García, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

Francisco Javier Quirón
Ing. Francisco Javier Quirón de la Cruz
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

/bbdeb.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala,
25 de noviembre de 2008

Ingeniero
Sydney Alexander Samuels Milson
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

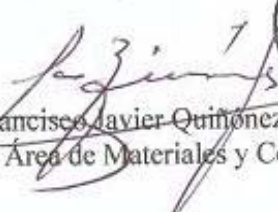
Estimado Ing. Samuels.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **INTRODUCCIÓN A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Edwin Giovanni González García, quien contó con la asesoría del Ing. Francisco Javier Ecuté Bantes.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante González García, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Francisco Javier Quirón de la Cruz
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.137.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **INTRODUCCIÓN A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Edwin Giovanni González García**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, mayo de 2009



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS TODOPODEROSO	Por darme la vida, la oportunidad de cumplir un sueño, y brindarme fuerza y perseverancia.
MIS PADRES	Por su esfuerzo, consejos y apoyo, lo cual me permitió alcanzar esta meta.
MIS HERMANAS	Por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera.
MI ESPOSA	Por su apoyo incondicional.
ING. FRANCISCO ECUTÉ BANTES	Por su valiosa asesoría.

ACTO QUE DEDICO A:

LA MEMORIA DE MI PADRE Guillermo Arturo González Moreno MI

MADRE María del Carmen Vda. de González

MI ESPOSA Zulema Esperanza de González

MIS HIJAS Diana Lucia
María Alejandra

MIS HERMANAS

LA FACULTAD DE INGENIERÍA

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO	V
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA LOGRAR UN CONCRETO DURABLE	1
1.1 Transporte de fluidos en el concreto.....	3
1.1.1 Influencia del sistema de poros.....	3
1.1.2 Flujo, Difusión y Absorción.....	4
1.1.3 Coeficiente de permeabilidad.....	5
1.2 Difusión en el concreto.....	6
1.2.1 Coeficiente de difusión.....	6
1.2.2 Difusión través del aire y agua.....	7
1.3 Absorción	8
1.4 Permeabilidad en el concreto.....	9
1.4.1 Pruebas de permeabilidad.....	15
2. CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO	17
2.1 Proceso de carbonatación.....	19
2.2 Efectos de la carbonatación.....	21
2.2.1 Rapidez de carbonatación.....	22
2.2.2 Factores que tienen influencia en la carbonatación.....	26
2.2.3 Carbonatación del concreto que contiene cementos mezclados.....	28
2.3 Medición de la carbonatación.....	30
3. SULFATOS EN EL CONCRETO	33
3.1 Proceso de ataque de sulfatos	33
3.2 Efectos de sulfatos en el concreto.....	35
3.3 Factores que reducen el ataque.....	37
3.3 Pruebas sobre resistencia a sulfatos.....	39
4. CLORUROS EN EL CONCRETO	41
4.1 Proceso de ataque de cloruros	41
4.1.1 Cloruro en la mezcla.....	45
4.2 Efectos de cloruros en el concreto.....	46

5. PARTE EXPERIMENTAL	51
5.1 Ensayos para determinar profundidad de carbinatación	51
5.2 Ensayos para determinar la resistencia a sulfatos.....	54
5.3 Ensayos para determinar la resistencia a cloruros.....	59
5.4 Discusión de resultados.....	62
5.4.1 Discusión de resultados carbonatación.....	62
5.4.2 Discusión de resultados sulfatos.....	63
5.4.3 Discusión de resultados cloruros.....	65
CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
BIBLIOGRAFÍA	73
APÉNDICES	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Relación entre permeabilidad y porosidad capilar de la pasta de cemento	11
2	Relación entre permeabilidad y relación agua/cemento para pastas de cemento	13
3	Corrección por edad en la prueba para permeabilidad del concreto	16
4	Vida útil proyectada de 50 años del concreto	21
5	Progreso de la carbonatación con el tiempo de exposición en condiciones diferentes: (A) 20C y 65 por ciento de humedad relativa, (B) a la intemperie protegido por techo, (C) a la intemperie en superficie horizontal	24
6	Relación entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a la compresión del concreto después de exposición de dos años, en aire a una humedad relativa de 65 por ciento	27
7	Testigo de concreto donde se detecta la zona carbonatada por ausencia de color fucsia	32
8	Mecanismo de corrosión por picaduras debido a cloruros	44
9	Inicio del frente de carbonatación en columna del sótano del edificio Cofiño Stahl zona 5	54
10	Elaboración de las barras en el laboratorio	58
11	Almacenamiento de barras de mortero de cemento	59
12	Equipo utilizado para realizar los morteros de cemento	75
13	Testigo de concreto donde se detecta la zona carbonatada	76

TABLAS

I	Valores de absorción de concreto determinado de varias formas	9
II	Comparación entre permeabilidades de rocas y pastas de cemento	10
III	Clasificación de la severidad de ambiente de sulfatos de acuerdo con el ACI 201.2R-92	36
IV	Edificios en la zona 1 de la ciudad de Guatemala	52
V	Edificios en diferentes zonas de la ciudad de Guatemala	52
VI	Puentes de la ciudad capital de Guatemala	53
VII	Cambio de longitud de morteros expuestos a una solución	56
VIII	Expansión potencial de morteros de Cemento Pórtland	57
IX	Lectura de barras para la expansión de Cemento Pórtland	58
X	Cloruro soluble en agua para concreto en lugares cerca del mar	61
XI	Cloruro soluble en agua para concreto en la ciudad	61

GLOSARIO:

Acero	Aleaciones hierro-carbono, con un contenido máximo de carbono del 2%, aproximadamente. El carbono dota al hierro de destacadas propiedades mecánicas, necesarias para sus aplicaciones industriales.
Activo	Término que se refiere a un estado de los materiales metálicos en el que estos tienden a corroerse, o a metales o aleaciones que se sitúan en el extremo de potenciales más negativos de las series electroquímicas o galvánicas y son muy corrosibles.
Actividad	Función termodinámica que expresa la capacidad de reaccionar de una sustancia, $a_i = \exp(-\Delta G/RT)$, donde G es el aumento de energía libre de un mol de i en la reacción, T la temperatura absoluta y R la constante de los gases perfectos.
Adherencia	Fuerza de unión entre un recubrimiento cualquiera y el sustrato, metálico o no.
Aditivo	Sustancia que se añade en pequeñas proporciones a un medio para provocar un cambio ventajoso en algunas de sus propiedades.

Agente Agresivo Componente del medio ambiente al que es atribuible la acción corrosiva sobre el material metálico

Ánodo Electrodo de las pilas electroquímicas o electrolíticas en el que se produce la oxidación de alguna sustancia. En los fenómenos de corrosión, que suelen desarrollarse sobre electrodos mixtos, las zonas de mayor tendencia a disolverse, en las que átomos metálicos se oxidan a cationes: $M \rightarrow M^{n+} + ne$. En los ánodos fluye corriente eléctrica positiva hacia el medio electrolítico (transferencia de cationes a la solución, o de aniones de la solución al electrodo).

Capa pasivante Película invisible, de unas decenas de ángstrom, de óxidos, oxígeno adsorbido o muchas veces, de naturaleza desconocida, que al formarse reducen la velocidad de corrosión varios órdenes de magnitud, al impedir el contacto directo del material metálico con el medio agresivo.

Cascarilla de laminación Gruesa capa de óxido que se desarrolla sobre los productos durante su fabricación, en la operación de laminación en caliente. En los aceros está constituida en su mayor parte por magnetita.

Cátodo	El electrodo de una pila de corrosión en el que tiene el proceso de reproducción. Procesos catódicos típicos de corrosión son la reducción de oxígeno en medios neutros o alcalinos ($O_2+2H_2O+4e-4OH$) y la de protones en medios ácidos ($2H^++2e-H_2$)
Corrosión	La transformación de un metal del estado elemental al combinado (estado iónico) por reacción con el medio ambiente.
Corrosión por picadura	Ataque muy localizado que produce una penetración apreciable en el metal en forma de cavidades de pequeña sección, a veces inapreciables a simple vista. Este tipo de corrosión suele deberse a heterogeneidades del medio.
Corrosión uniforme generalizada	Ataque que, aproximadamente, afecta por igual a toda la superficie o metálica. A pesar que su cuantía puede resultar importante, es el tipo de corrosión más fácilmente controlable.
Corrosividad	Agresividad a potencial corrosivo de un medio.
Concreto	Material de construcción resultante del fraguado de mezclas de cemento, agregados inertes de tamaño controlado (denominados áridos, generalmente grava) y agua.

Fatiga	Proceso en que un material está sometido a ciclos de tensiones alternantes. Los fallos por fatiga comienzan en micro grietas preexistentes, que luego se propagan por efecto de los ciclos de tensiones hasta producir una fractura frágil. La concurrencia de fatiga y corrosión acelera el fallo.
Herrumbre	Producto de corrosión del hierro y aleaciones de base hierro, de color parado rojizo, compuesto principalmente por óxido férrico hidratado.
Ion	Un átomo o grupo de átomos con carga eléctrica.
Mortero	Mezclas de un conglomerante, arena y agua, que se emplean en construcción por su capacidad de fraguar.
Oxidación	Pérdida de electrones en una reacción química o electroquímica, por ejemplo, en los procesos anódicos, cuando un metal pasa del estado metálico al de catión (estado óxido, combinado o corroído).
Pasivo	Estado que aplica una reactividad muy pequeña, es decir, velocidades insignificantes de corrosión, en condiciones con fuerte tendencia termodinámica a la corrosión del electrodo.

pH	Medida de acidez o alcalinidad de una solución. En sentido estricto, es el logaritmo del inverso de la actividad de iones hidrógenos en la solución: $\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+}$. El valor 7 de pH corresponde a una solución neutra; los valores inferiores a 7 son medios ácidos y los superiores a 7 son medios alcalinos.
Porosidad	Canales, muchas veces microscópicos, en un recubrimiento, metálico o no, que se extienden hasta el sustrato. Porcentaje de huecos, formados por canales visibles o invisibles, en un medio sólido discontinuo, como el hormigón.
Velocidad de corrosión	Cantidad de metal o aleación deteriorada (oxidada) por unidad de tiempo. Puede expresarse en función de la penetración (mm/año, m/año...); de la variación de peso por unidad de superficie ($\text{g/m}^2\text{d}$, $\text{mg/dm}^2\text{d}$, es decir, gramos por metro cuadrado y día por miligramos por decímetro cuadrado y día) etc.

RESUMEN

Las condiciones de servicio que generan los daños más comunes que afectan al concreto en relación a la durabilidad están dadas por el ataque de sulfatos, ataque de cloruros, abrasión, carbonatación y reacciones químicas; también se debe de tomar en cuenta las prácticas constructivas; previas, durante y posteriores a las fundiciones de concreto. El ataque de sulfatos, el ataque de cloruros y la carbonatación son presentados en este trabajo además de aspectos fundamentales para elaborar concreto como absorción, difusión, flujo, permeabilidad.

Los aspectos fundamentales sirven para comprender como pueden ingresar al concreto el agua, dióxido de carbono y oxígeno, los cuales pueden circular a través del concreto de varias formas, provocando deterioros cuando el agua está contaminada con sustancias químicas como cloruros y sulfatos, además la reacción del aire que contiene dióxido de carbono con el cemento hidratado provocando carbonatación.

Los efectos que estos ataques producen en el concreto son la reducción del pH de la pasta de concreto, lo que provoca la disminución de la protección al acero de refuerzo, la expansión y agrietamiento destructivos y pérdida de resistencia del concreto y la corrosión del acero de refuerzo, estos efectos destructivos son provocados por la carbonatación, el ataque de sulfatos y el ataque de cloruros respectivamente.

Para investigar cada uno de estos ataques, se realizaron pruebas en diferentes estructuras de concreto, donde se extrajeron testigos de concreto y se realizaron mezclas de morteros para la evaluación adecuada de los procesos de ataque al concreto en estudio.

OBJETIVOS

General

- Dar a conocer las principales causas por las que el concreto se deteriora debido al ataque químico.

Específicos:

1. Conocer específicamente conceptos fundamentales para lograr una durabilidad eficiente en el concreto.
2. Evaluar adecuadamente el proceso de deterioro del concreto, debido a la carbonatación.
3. Evaluar adecuadamente el proceso de deterioro del concreto, debido al ataque de sulfatos al concreto.
4. Evaluar adecuadamente el proceso de deterioro del concreto, debido al ataque de cloruros al concreto.

INTRODUCCIÓN

Debido a que el concreto es un material que puede ser deteriorado por diversos factores, como por ejemplo, el clima, el ataque químico, la abrasión u otro, se debe mejorar la calidad del mismo para obtener una vida útil más larga en las estructuras de concreto armado,.

La vida útil en las estructuras está dada por las condiciones de servicio y las prácticas adecuadas en la construcción.

Las condiciones de servicio generan los daños más graves en el concreto y afectan su durabilidad, estas condiciones están expresadas por el ataque de sulfatos, ataque de cloruros, exposición al agua de mar, ataque ácido, carbonatación y la abrasión.

En este trabajo de graduación se realiza un estudio donde se enfocan conceptos fundamentales que se deben de tomar en cuenta para elaborar un concreto que sea durable a las condiciones de servicio a las que estará expuesto. Los ataques que se investigaron y que están directamente relacionadas con la exposición son, el ataque de sulfatos, el ataque de cloruros y la carbonatación.

Se describe en que forma es atacado el concreto y como se lleva a cabo el proceso de deterioro, que es una expresión que está en función de la corrosión, que puede ocurrir en procesos físicos, mecánicos y químicos.

Para las tres condiciones se realizaron ensayos de laboratorio, donde se obtuvieron parámetros fundamentales respecto a la durabilidad.

1. ASPECTOS FUNDAMENTALES PARA LOGRAR UN CONCRETO DURABLE

Es de gran importancia que toda estructura de concreto deba continuar ejecutando sus funciones para la cual fue diseñada, durante el tiempo de servicio especificado. El concreto debe de tener capacidad para resistir el deterioro al que estará expuesto.

Se debe de tener en cuenta que la durabilidad no significa para toda la vida, ni quiere decir soportar cualquier acción. En estos días se comprende aunque no fue así en el pasado, que en muchas situaciones, se requiere mantenimiento de rutina del concreto.

El mantenimiento de acuerdo con Simone (2007,2) incluye, como primer paso, una inspección periódica de la estructura. El supervisor debe de estar familiarizado no solo con el concreto como material, sino también con la acción estructural. Por ejemplo, si se observa agrietamiento, el supervisor debe ser capaz de distinguir entre grietas debidas a sobrecarga en una estructura apropiadamente diseñada o causadas porque la estructura es inadecuadamente resistente, por un lado, y grietas inducidas por la corrosión del refuerzo o por la acción química, o por la formación retardada de estregita o por efectos térmicos.

El mantenimiento que siga a la inspección debe comprender pequeños trabajos de reparación. Reparar significa hacerlo bien, pero antes de efectuar cualquier trabajo de reparación, para distinguirlo de lo cosmético, es esencial establecer plenamente la extensión y las causas del problema. De otro modo, el problema puede ser recurrente, y requerir trabajos repetidos de reparación.

El tema de la durabilidad es de suma importancia, no obstante, hasta hace muy poco, los desarrollos en tecnología del concreto se enfocaban en alcanzar resistencias altas. Ahora se sabe que, para muchas condiciones de exposición de las estructuras de concreto, ambas propiedades, resistencia y durabilidad se han de considerar cuando se este diseñando.

La durabilidad inadecuada se puede presentar debido a factores externos o por causas internas dentro del concreto. Las acciones pueden ser físicas, químicas o mecánicas. El daño mecánico es causado por impacto. Las causas químicas del deterioro incluyen las reacciones álcali-silice y álcali-carbonato. El ataque externo ocurre principalmente a través de la acción de iones agresivos tales como cloruros, sulfatos, o de dióxido de carbono, además de muchos líquidos y gases naturales o industriales.

Las causas físicas del deterioro incluyen los efectos de la alta temperatura o de las diferencias de expansión térmica del agregado o de la pasta de cemento endurecida.

El concreto es con frecuencia satisfactorio a pesar de algunas características inconvenientes pero, con el elemento adicional adverso, puede ocurrir el daño. Por esta razón, a veces es difícil asignar el deterioro a algún elemento particular, pero la calidad del concreto, con una referencia especial a la permeabilidad, casi siempre entra en el cuadro. A excepción del daño mecánico, todas las influencias adversas sobre la durabilidad comprenden el transporte de fluidos a través del concreto. Por esta razón, la consideración de la durabilidad requiere una comprensión de los fenómenos involucrados.

1.1 Transporte de fluidos en el concreto

Existen tres fluidos importantes que pueden ingresar al concreto: agua, pura que lleva iones agresivos, dióxido de carbono y oxígeno. Estos fluidos se pueden mover a través del concreto de varias formas, pero el transporte depende de la pasta de cemento hidratado. La durabilidad del concreto depende de la facilidad con la cual los fluidos, pueden entrar en el concreto y moverse a través de él, a esto se le conoce como permeabilidad del concreto. La permeabilidad se refiere al flujo a través de un medio poroso, el movimiento de los fluidos se puede presentar también por difusión y por absorción, así que nuestro interés se enfoca en la penetrabilidad del concreto.

1.1.1 Influencia del sistema de poros

La estructura de la pasta de cemento endurecido que tiene importancia para la permeabilidad, es la naturaleza de los poros dentro del volumen de la pasta de cemento endurecido y también en la zona cerca de la interface entre la pasta de cemento endurecido y el agregado. La interfase es también el lugar de microagrietamiento temprano. Por estas razones, se espera que la zona de interfase contribuya significativamente a la permeabilidad del concreto.

Según Neville (2000,338), los poros importantes para la permeabilidad son aquellos con un diámetro de al menos 120 ó 160 nm. Estos poros deben de ser continuos. Los poros que no son efectivos con respecto a flujo, respecto a permeabilidad, incluyen, además de los poros discontinuos, aquellos que contienen agua absorbida y aquellos que tienen una entrada angosta, aún si los poros mismos son grandes.

El agregado también puede contener poros, pero éstos suelen ser discontinuos. Además, las partículas de agregado son envueltas por la pasta de cemento, de tal manera que los poros del agregado no contribuyen a la permeabilidad del concreto.

1.1.2 Flujo, difusión y absorción

En el concreto existen diferentes clases de poros, de los cuales algunos contribuyen a la permeabilidad y otros no, por lo tanto, es de suma importancia saber distinguir entre porosidad y permeabilidad. La porosidad es una medida de la proporción del volumen total del concreto ocupado por poros, y se acostumbra expresarla en porcentaje. Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, éstos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad es también alta. De otra forma, si los poros son discontinuos, entonces la permeabilidad del concreto es baja, aún si su porosidad es alta.

Una indicación de la porosidad se puede obtener por la medición de la absorción del concreto. En lo que corresponde a la facilidad de movimiento de los fluidos a través del concreto, se deberán distinguir tres mecanismos. La permeabilidad se refiere al flujo sujeto a un diferencial de presión. Difusión es el proceso en el cual el fluido se mueve sujeto a un diferencial en concentración, la propiedad importante del concreto es la difusividad. La absorción es el resultado del movimiento capilar en los poros del concreto que están abiertos al medio ambiente. Neville (2000,339) indica que puede ocurrir acción capilar sólo en concreto parcialmente seco, no hay absorción de agua en concreto completamente seco o en concreto saturado.

A continuación se presentan las expresiones matemáticas pertinentes que establecen las unidades de medición para determinar el coeficiente de permeabilidad.

1.1.3 Coeficiente de permeabilidad

El flujo en poros capilares del concreto saturado sigue la ley de Darcy en cuanto a flujo laminar a través de un medio poroso:

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{K' \rho g}{n} \frac{\Delta h}{L}$$

En donde

$$\frac{dq}{dt} = \text{rapidez de flujo de agua en m}^3/\text{s}$$

A = área de sección transversal de la muestra en m²

Δh = caída en la altura hidráulica a través de la muestra, medida en m,

L = espesor de la muestra en m,

n = viscosidad dinámica del fluido en N s/r²

ρ = densidad del fluido en kg/m³, y

g = aceleración debida a la gravedad

El coeficiente K' se expresa en metros a la potencia 2 y representa la permeabilidad intrínseca del material, independientemente del fluido involucrado.

Puesto que el fluido involucrado es generalmente agua, podemos poner:

$$K = \frac{K' \rho g}{n}$$

El coeficiente K' se expresa entonces en metros por segundo y se conoce como el coeficiente de permeabilidad del concreto, entendiéndose que se refiere a agua a temperatura ambiente. La última calificación surge del hecho de que la viscosidad del agua cambia con la temperatura.

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = K \frac{\Delta h}{L}$$

Y cuando se ha alcanzado un estado estacionario de flujo dq/dt' K se determina directamente.

1.2 Difusión en el concreto

La difusión en el concreto se da cuando existe concentración de gas y no se da un diferencial de presión.

En relación a la difusión de gases, el dióxido de carbono y el oxígeno son de interés para esta investigación: el dióxido de carbono conduce a carbonatación de pasta de cemento hidratado, y el oxígeno hace que sea posible el progreso de corrosión del acero

1.2.1 Coeficiente de difusión

La ecuación de difusión aplicable al vapor de agua y al aire se puede expresar por la primera ley de Fick como:

$$J = -D \frac{dc}{dL}$$

en donde:

$\frac{dc}{dL}$

= gradiente de concentración en kg/m^4 o moles/m^4 ,

D = coeficiente de difusión en m^2/s ,

J = rapidez de transporte de masa en $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ (o $\text{moles/m}^2\text{s}$) y

L = espesor del espécimen en metros.

Aún cuando la difusión ocurre sólo a través de los poros, los valores del J y D se refieren a la sección transversal del espécimen de concreto: así, D es, en realidad, el coeficiente efectivo de difusión. El coeficiente sujeto a un sistema de estado estacionario, como dos lados de un espécimen de concreto siendo expuestos, cada uno a un gas puro diferente: se determina entonces la masa de los gases sobre el lado opuesto a aquél donde ellos estaban originalmente presentes. La presión sobre cada lado del espécimen deberá ser la misma, pues la fuerza impulsora en difusión es la diferencia en concentración molar y no un diferencial de presión.

1.2.2 Difusión a través de aire y agua

Las expresiones para el coeficiente efectivo de difusión del dióxido de carbono como una función de la humedad relativa del aire y de la porosidad de la pasta de cemento endurecido o de la resistencia a la compresión del concreto. Neville (2000,340) indica que la difusión a través del agua es cuatro veces de magnitud más lenta que a través del aire. Se debe de observar que el coeficiente de difusión cambia con la edad, porque el sistema de poros del concreto cambia con el tiempo, especialmente cuando la hidratación del cemento continúa.

La difusión de oxígeno a través del concreto es afectada significativamente por el curado de humedad, el curado prolongado reduce el coeficiente de difusión en un factor de alrededor de 6.

Además de la difusión de gases, los iones de carácter agresivo, notablemente cloruros y sulfatos, se mueven por difusión en el agua de poros. Es en el agua de los poros en donde ocurren las reacciones con la pasta de cemento hidratado de manera que la difusión iónica es importante con respecto al ataque de sulfatos contra el concreto y al ataque de cloruros contra el acero ahogado.

Igual que la permeabilidad, la difusión es menor a relaciones agua/cemento pequeñas, pero la influencia de la relación agua/cemento sobre la difusión es menor que sobre la permeabilidad.

1.3 Absorción

El volumen de espacio de poros en el concreto se mide por la absorción. Se acostumbra medir la absorción secando una muestra hasta una masa constante, sumergiéndolo en el agua midiendo el aumento de masa como un porcentaje de la masa seca. Se pueden emplear varios procedimientos, y se obtienen resultados muy diferentes, como se muestra en la tabla I. Una razón para esta variación en los valores de absorción es que, un extremo, el secado a temperatura ordinaria puede ser ineficaz para remover toda el agua. Por el otro lado, el secado a altas temperaturas puede remover algo de agua combinada. Por lo tanto, la absorción no se puede utilizar como una medida de la calidad del concreto, pero casi todos los concretos buenos tienen una absorción muy debajo de 10 por ciento por masa.

Las pruebas de absorción no se utilizan frecuentemente, excepto para control de calidad de rutina de productos prefabricados tales como adoquines para pavimentación.

Tabla I Valores de absorción de concreto determinados de varias formas

Condición de secado	Condición de inmersión	Absorción (%) para mezcla de concreto					
		A	B	C	D	E	F
100°C (212°F)	Agua por 30 minutos	4.7	3.2	8.9	12.3		
100°C (212°F)	Agua por 24 horas	7.4	6.9	9.1	12.9		
100°C (212°F)	Agua por 48 horas	7.5	7.0	9.2	13.1		
100°C (212°F)	Agua por más de 48 horas	8.1	7.3	14.1	18.2		
65°C (149°F)	Ebullición de 5 horas	6.4	6.4	13.2	17.2		
105°C (221°F)	Ebullición de 5 horas						
105°C (221°F)	1 hora					3.0	7.4
A masa	24 horas					3.4	7.7
Constante	7 días					3.5	7.8
20°C (68°F)	1 hora					1.9	5.9
Sobre cal por	24 horas					2.2	6.3
30 días en vacío	7 días					2.3	6.4

Fuente: Adam M Neville. **Tecnología del concreto**. Pág. 341

1.4 Permeabilidad en el concreto

La pasta de cemento endurecido se compone de partículas conectadas por sólo una fracción de pequeña de la superficie total de ellas. Debido a esto, una parte del agua está absorbida. Esta agua tiene una viscosidad alta y toma

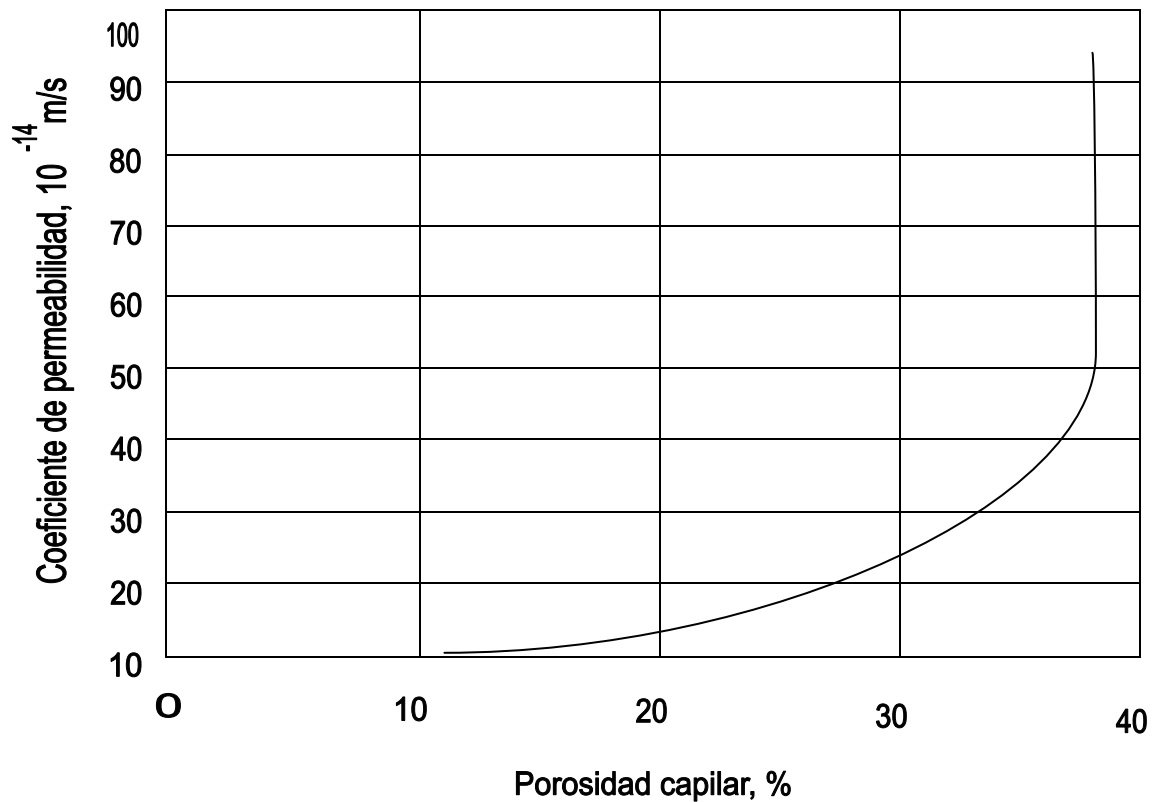
parte en el flujo. La permeabilidad del concreto no es función de la porosidad del concreto, sino que depende del tamaño, distribución, forma y continuidad de los poros. Esto se debe a la textura extremadamente fina de la pasta de cemento endurecido: los poros y las partículas sólidas son muy pequeños y numerosos, mientras que, en las piedras, los poros, aunque menos en número, son mucho más grandes y conducen a una permeabilidad más alta. Por la misma razón, el agua puede fluir más fácilmente a través de los poros capilares que a través de los muchos y más pequeños poros del gel: la pasta de cemento como un todo es de 20 a 100 veces más permeable que el gel mismo. La permeabilidad de la pasta de cemento endurecido está controlada por su porosidad capilar. La relación entre estas dos cantidades se muestra en la figura 1. Por comparación, la tabla II presenta una lista de la relación agua/cemento de pastas que tienen la misma permeabilidad que algunas rocas comunes.

Tabla II Comparación entre permeabilidades de rocas y pastas de cemento

Tipo de roca	Coefficiente de permeabilidad (m/s)	Relación agua/cemento de pasta madura de la misma permeabilidad
Roca Trapeana	2.47×10^{-14}	1.38
Diorita de cuarzo	8.24×10^{-14}	0.42
Mármol	2.39×10^{-13}	0.48
Mármol	5.77×10^{-12}	0.66
Granito	5.35×10^{-11}	0.70
Arenisca	1.23×10^{-10}	0.71
Granito	1.56×10^{-10}	0.71

Fuente: Adam M Neville. **Tecnología del concreto**. Pág. 343

Figura 1 **Relación entre permeabilidad y porosidad capilar de la pasta de cemento**



Fuente: Adam M Neville. **Tecnología del concreto**. Pág. 343

La permeabilidad de la pasta de cemento varía con el progreso de la hidratación. En una pasta fresca, el flujo de agua está controlado por el tamaño, forma y concentración de las partículas originales de cemento.

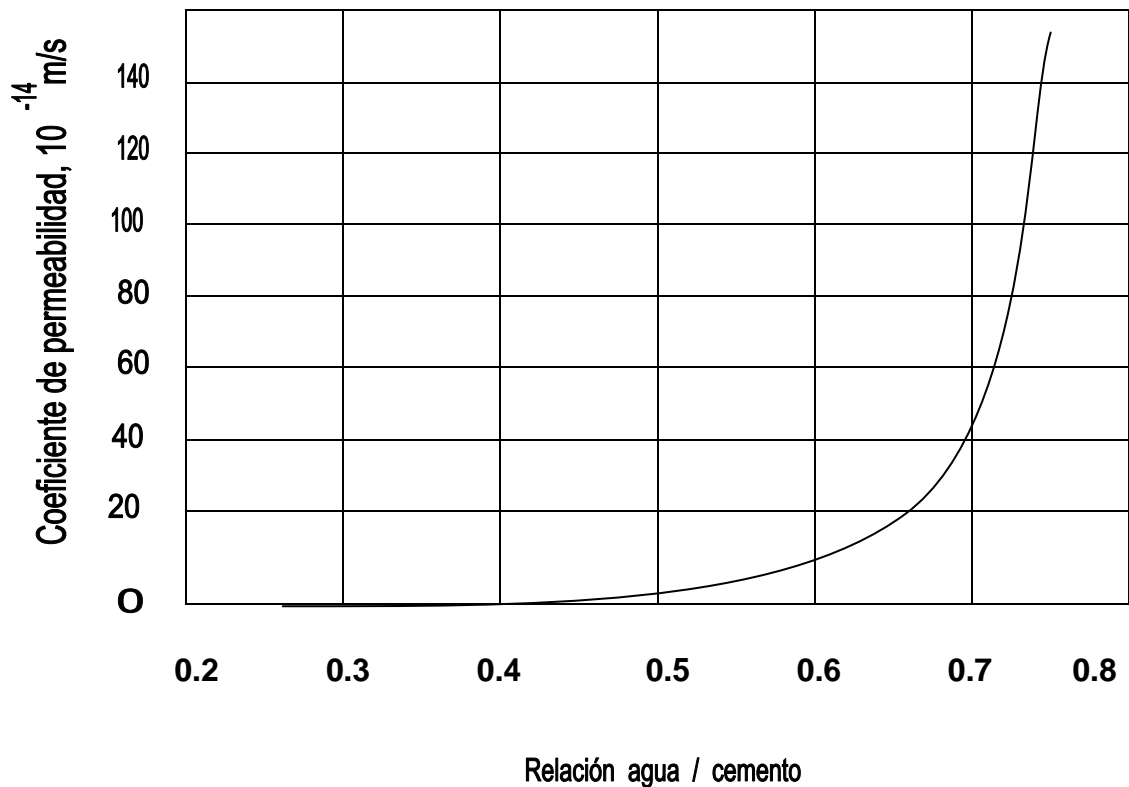
Con el progreso de la hidratación, la permeabilidad decrece rápidamente porque el volumen total del gel es aproximadamente 2.1 veces el volumen del cemento sin hidratar, de manera que el gel llena gradualmente algo del espacio original ocupado por el agua. En una pasta madura, la permeabilidad depende del tamaño, forma y concentración de las partículas de gel y de si los poros capilares se han vuelto o no discontinuos.

Para pastas de cemento hidratadas al mismo grado, la permeabilidad es tanto menor cuanto más alto es el contenido de cemento de la pasta, es decir, cuanto más baja es la relación agua/cemento. La figura 2 muestra valores obtenidos para pastas en las cuales 93 por ciento del cemento se ha hidratado

La pendiente de la línea es considerablemente inferior para pastas con relación agua/cemento debajo de aproximadamente 0.6, es decir, pastas en las cuales algunos poros capilares se han vuelto segmentados. En la figura 2 se puede ver que una reducción en la relación agua/cemento desde, 0.7, hasta 0.3 reduce el coeficiente de permeabilidad en 3 órdenes de magnitud. La misma reducción ocurre con una relación agua/cemento de 0.7 entre las edades de 7 días y un año.

Para Powers (1999, 48) en el concreto, el valor del coeficiente de permeabilidad decrece en forma muy considerable con una disminución en la relación agua/cemento: por encima del rango de relaciones agua/cemento de 0.75 a 0.26, el coeficiente decrece hasta 4 órdenes de magnitud, y por encima del rango de 0.75 a 0.45, en dos órdenes de magnitud. A una relación agua/cemento de 0.45 el coeficiente es comúnmente 10^{-11} ó 10^{-12} m/s, las permeabilidades de un orden de magnitud más bajo que el último valor son consideradas representativas de concretos con una permeabilidad muy baja.

Figura 2 **Relación entre permeabilidad y relación agua/cemento para pastas de cemento**



Fuente: C. Powers. *Permeability of Portland cement paste*. Pág. 123

Es útil referirse otra vez a la figura 2, la cual se aplica a pastas de cemento maduro. Hay un aumento que sobrepasan de aproximadamente 0.4. En la cercanía de esta relación de agua/cemento, los poros capilares se vuelven segmentados de manera que existe una diferencia considerable de permeabilidad entre pastas de cemento maduro con una relación agua/cemento menor de 0.4 y aquellas con relaciones agua/cemento mayores.

Esta diferencia tiene implicaciones para el ingreso de iones agresivos dentro del concreto. La permeabilidad del concreto es de interés también con relación a la impermeabilidad al agua de estructuras que tienen líquidos y otras estructuras, y también con referencia al problema de presión hidrostática en el interior de presas. Además, el ingreso de humedad dentro del concreto afecta sus propiedades de aislamiento térmico.

Para Powers (1999,48), la permeabilidad del concreto también es afectada por las propiedades del cemento. Para la misma relación agua/cemento, el cemento grueso tiende a producir pasta de cemento endurecido con una porosidad más alta que con un cemento más fino. La composición de compuestos del cemento afecta a la permeabilidad hasta el grado de que tiene influencia en la rapidez de hidratación, pero no se ven afectadas la porosidad y la permeabilidad últimas. En términos generales, es posible decir que cuanto más alta es la resistencia de la pasta de cemento endurecido, tanto menor es su permeabilidad, un estado de cosas que es de esperarse porque la resistencia es una función del volumen relativo del gel en el espacio disponible para ello. Hay una excepción para esta aseveración: el secado de la pasta de cemento aumenta su permeabilidad, probablemente porque la contracción puede romper algo del gel entre los capilares y así abrir pasos nuevos para el agua.

La diferencia entre la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido y del concreto que contiene una pasta de la misma relación agua/cemento deberá ser apreciada puesto que la permeabilidad del agregado mismo afecta al comportamiento del concreto. Si el agregado tiene una permeabilidad muy baja, su presencia reduce el área afectiva a través de la cual puede ocurrir el flujo.

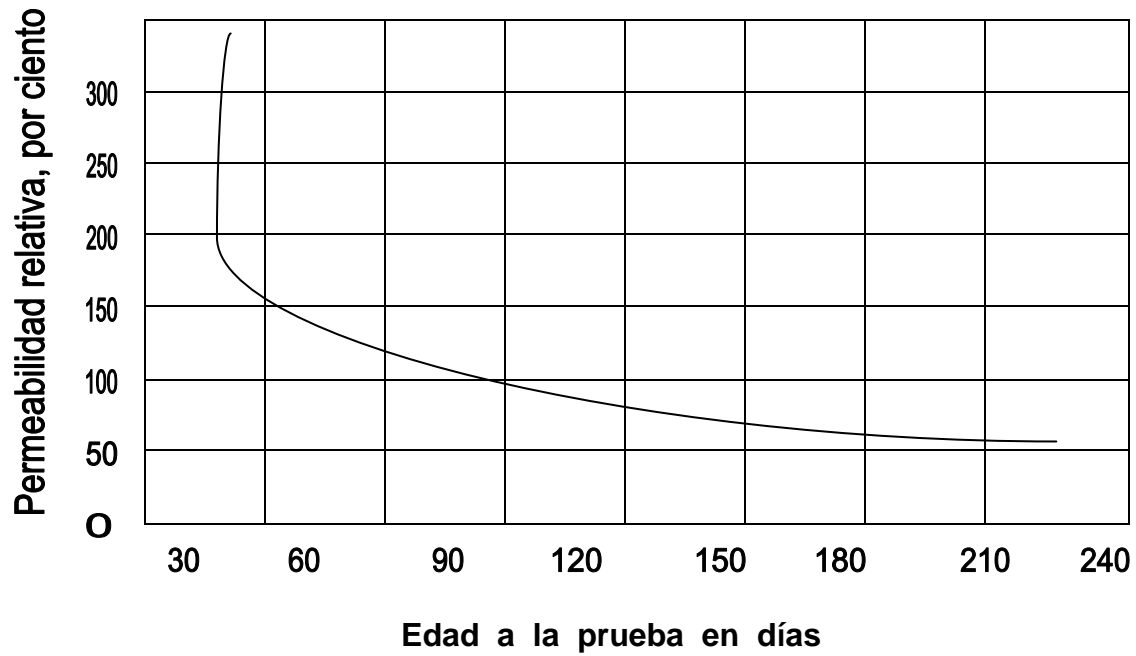
Además puesto que el flujo ha de circular alrededor de las partículas de agregado, la trayectoria efectiva se vuelve considerablemente más larga de manera que el efecto del agregado en la reducción de la permeabilidad puede ser considerable. Generalmente, la influencia del contenido de agregado en la mezcla es pequeña y, como las partículas de agregado están envueltas con la pasta de cemento, en el concreto compactado plenamente es la permeabilidad de la pasta de cemento endurecido la que tiene el efecto más grande sobre la permeabilidad del concreto.

1.4.1 Pruebas de permeabilidad

Las pruebas en el concreto en cuanto a permeabilidad no se han normalizado en forma general, de manera que el coeficiente de permeabilidad citado en diferentes publicaciones puede no ser comparable. En estas pruebas, tal como se utilizan, se mide el flujo en estado estacionario del agua a través del concreto causado por un diferencial de presión, y se usa la ecuación de Darcy para calcular el coeficiente de permeabilidad, K .

El procedimiento 4913-92 de *U.S. Bureau of Reclamation* tiene en cuenta una corrección para la edad del espécimen en prueba, como se muestra en la figura 3. La prueba del *Bureau of Reclamation* es importante para el comportamiento del concreto en grandes presas. Por el otro lado, para las estructuras de concreto usuales, el flujo de agua sujeto a una presión alta no es representativo de las condiciones de servicio.

Figura 3 **Corrección por edad en la prueba para permeabilidad del concreto**



Fuente: *U.S. Bureau of Reclamation 4913-92. Concrete manual. Pág. 15*

Es importante observar que la dispersión de los resultados de la prueba de permeabilidad hecho en concreto similar a la misma edad, y utilizando el mismo equipo, es grande.

2. CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO

Los estudios del comportamiento del concreto se basan en la suposición de que el medio ambiente existe aire que no reacciona con la pasta de cemento hidratado. Pero, en realidad, el aire contiene dióxido de carbono (CO_2) el cual, en presencia de humedad, reacciona con el cemento hidratado; el agente presente es ácido carbónico, pues el CO_2 gaseoso no es reactivo.

Para citar un ejemplo muy claro, en el interior de los túneles vehiculares, cuando su estructura es de concreto, este está expuesto a una concentración muy alta de dióxido de carbono (CO_2). La rapidez de carbonatación, especialmente a relaciones agua/cemento altas del concreto, se incrementa con un aumento en la concentración de dióxido de carbono (CO_2); el transporte de CO_2 tiene lugar a través del sistema de poros de la pasta de cemento endurecido.

Fernández (2005,1) indica que en la pasta de cemento, los hidratos reaccionan con el dióxido de carbono (CO_2), el que más reacciona es el hidróxido de calcio ($\text{CA}(\text{OH})_2$) siendo el producto de la reacción el carbonato de calcio (CaCO_3). En el concreto que sólo contiene cemento portland, solamente importa la carbonatación del hidróxido de calcio ($\text{CA}(\text{OH})_2$). Sin embargo, cuando el hidróxido de calcio ($\text{CA}(\text{OH})_2$) llega a terminarse, por ejemplo por reacción secundaria con sílice puzolánico, la carbonatación del hidrato de silicato de calcio (C-S-H), es también posible. Cuando ocurre esto, no sólo se forma más carbonato de calcio (CaCO_3), sino también el gel de sílice que se forma concurrentemente tiene poros grandes, más grandes, lo cual facilita la carbonatación adicional.

Se sabe que el acero y el concreto forman el concreto armado porque presentan buena adherencia pero es de suma importancia tener en cuenta que el concreto protege a las armaduras contra corrosión.

El concreto forma una capa protectora en las armaduras de acero, en estas condiciones, se dice que el acero está pasivado; esto es, aun en presencia de oxígeno y humedad, en estas condiciones el acero no se oxida.

La capa protectora asegura una vida útil larga a las estructuras, la que dependerá de cuándo se inician los procesos de corrosión y con qué velocidad avanzan luego de iniciarse. Al período de tiempo hasta que las armaduras empiezan a corroerse se le denomina período de incubación y el correspondiente al avance de la corrosión, período de propagación.

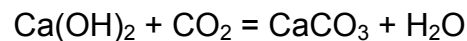
La corrosión de la armadura en las estructuras de concreto es el problema más frecuente que se da, pero se tiene que estudiar cuáles son los factores más comunes que alteran la protección que brinda el concreto al acero.

Las causas externas con mayor incidencia tienen sobre la corrosión de las armaduras son el ingreso de iones de cloruro y la carbonatación. En este capítulo se analiza esta última, dejando el estudio de la influencia de los iones de cloruro para el capítulo 4 de este trabajo de graduación.

2.1 Proceso de carbonatación

Cuando el cemento se está hidratando se producen silicatos de calcio, un compuesto alcalino, hidróxido de calcio que provee el pH básico del concreto.

El hidróxido de calcio se combina con el dióxido de carbono cuando están en contacto con en el aire y forman una sal, el carbonato de calcio, con esto se reduce el pH del concreto. Zia (1984,41) lo representa químicamente de la siguiente forma:



La carbonatación es un proceso lento pero progresa hacia el interior del concreto. Hacia el exterior, el pH es aproximadamente 9 y hacia el interior, se mantiene en 12.5.

Para pH inferiores a 11, se pierde la condición de pasiva para las armaduras y, si las condiciones del medio son favorables para la corrosión, el acero se oxida, provocando un aumento localizado de volumen, fisuras y hasta descascaramiento del concreto que lo cubre. Paralelamente, se va reduciendo la sección resistente de las armaduras, pudiendo llegarse a situaciones de riesgo y hasta el colapso.

El período de incubación que corresponde al proceso de penetración del frente de carbonatación está caracterizado por un tiempo t_1 que es el necesario para que el mismo alcance la posición de la armadura y ésta se desactive. Este período depende básicamente del espesor y de la calidad del recubrimiento.

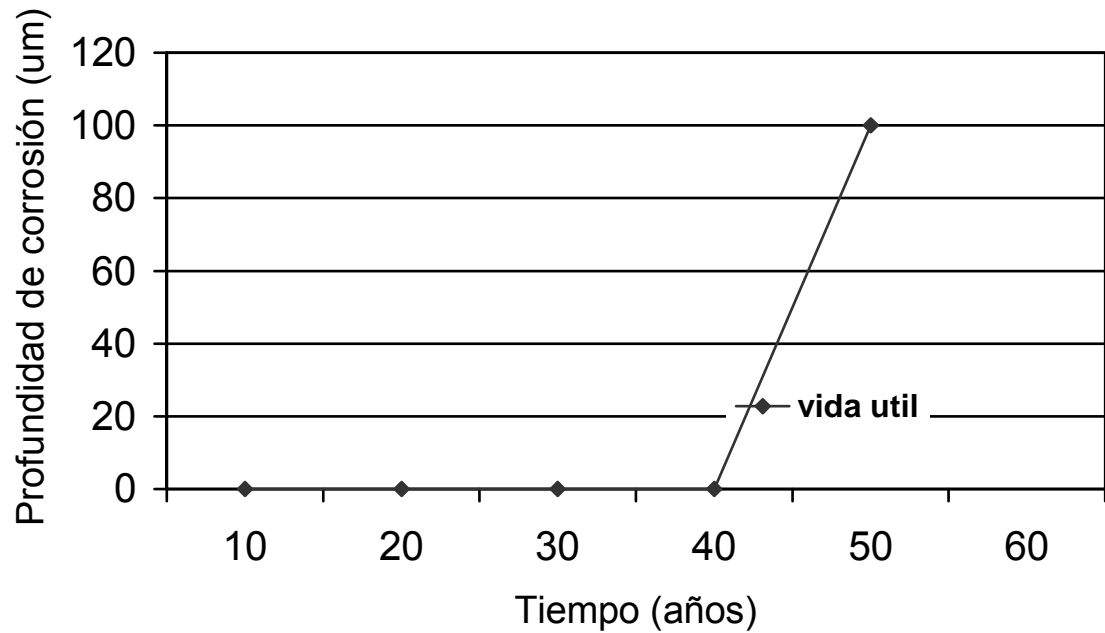
El período de propagación corresponde al proceso de corrosión la armadura, una vez desactivada por la carbonatación, Este periodo está caracterizado por un tiempo t_p que es el necesario para que el fenómeno de corrosión de la armadura haya alcanzado los 100μ m de profundidad en el acero y que comiencen a manifestarse fisuras visibles sin desprendimiento del recubrimiento ya carbonatado.

La vida útil en servicio será igual a la suma del tiempo de incubación más el de propagación :

$$t_1 + t_p$$

La figura 4 ilustra esquemáticamente estos conceptos, supuesta una vida útil proyectada de 50 años.

Figura 4 Vida útil proyectada de 50 años del concreto



Adoptado: Luís Fernández Luco. Corrosión por carbonatación. Pág. 2

2.2 Efectos de la carbonatación

La importancia de la carbonatación radica fundamentalmente en la reducción del pH del agua en los poros en la pasta de Cemento Pórtland endurecido desde valores situados entre 12.6 y 13.5 hasta un valor de casi 9. Cuando todo el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) se ha vuelto carbonato, el valor de pH se reduce a 8.3. La importancia de la disminución del pH se describe a continuación.

El acero ahogado en la pasta de cemento en hidratación forma rápidamente una capa de pasividad delgada de óxido que se adhiere fuertemente al acero y le da protección completa contra la reacción con oxígeno y agua, esto es contra la formación de corrosión. Este estado del acero se conoce como pasivación. El mantenimiento de la pasivación depende de un pH adecuadamente alto del agua de poros que está en contacto con la capa de pasivación. Así, cuando el frente de bajo pH alcanza la cercanía de la superficie del acero de refuerzo, la película de óxido protectora es removida y puede tener lugar la corrosión, siempre que estén presentes el oxígeno y la humedad necesaria para las reacciones de corrosión. Por esta razón, es importante conocer la profundidad de la carbonatación y, específicamente, si el frente de carbonatación ha alcanzado la superficie del acero ahogado. En efecto, la causa de la presencia de agregado grueso, el frente no avanza como una línea perfectamente recta.

Si las grietas están presentes, el dióxido de carbono (CO_2) puede ingresar a través de ellas de modo que la carbonatación progrese localmente a partir de las grietas penetradas.

2.2.1 Rapidez de carbonatación

La carbonatación ocurre progresivamente desde el exterior del concreto expuesto al dióxido de carbono (CO_2), pero lo hace a una rapidez decreciente pues el dióxido de carbono (CO_2) se ha de difundir a través del sistema de poros. La difusión es un proceso lento si los poros de la pasta de cemento hidratado están llenos de agua. Si hay suficiente agua en los poros, el dióxido de carbono (CO_2) permanece en forma gaseosa y no accionada con el cemento hidratado. La rapidez de carbonatación depende del contenido de humedad en el concreto, el cual varía con la distancia desde su superficie.

La rapidez de carbonatación más alta ocurre a una humedad relativa cuyo valor se ubica entre 50 y 70 por ciento. Esta situación se debe considerar contra el antecedente de una humedad relativa común de 65 por ciento en un laboratorio.

Según Neville (2000,349) en condiciones higrométricas constantes, la profundidad de la carbonatación aumenta en proporción con la raíz cuadrada del tiempo, lo cual es característico de la absorción más bien que de la difusión, pero la carbonatación comprende la acción recíproca entre el CO₂ y el sistema de poros. Es posible expresar la profundidad de la carbonatación, D, en milímetros, como:

$$D = Kt^{0.5}$$

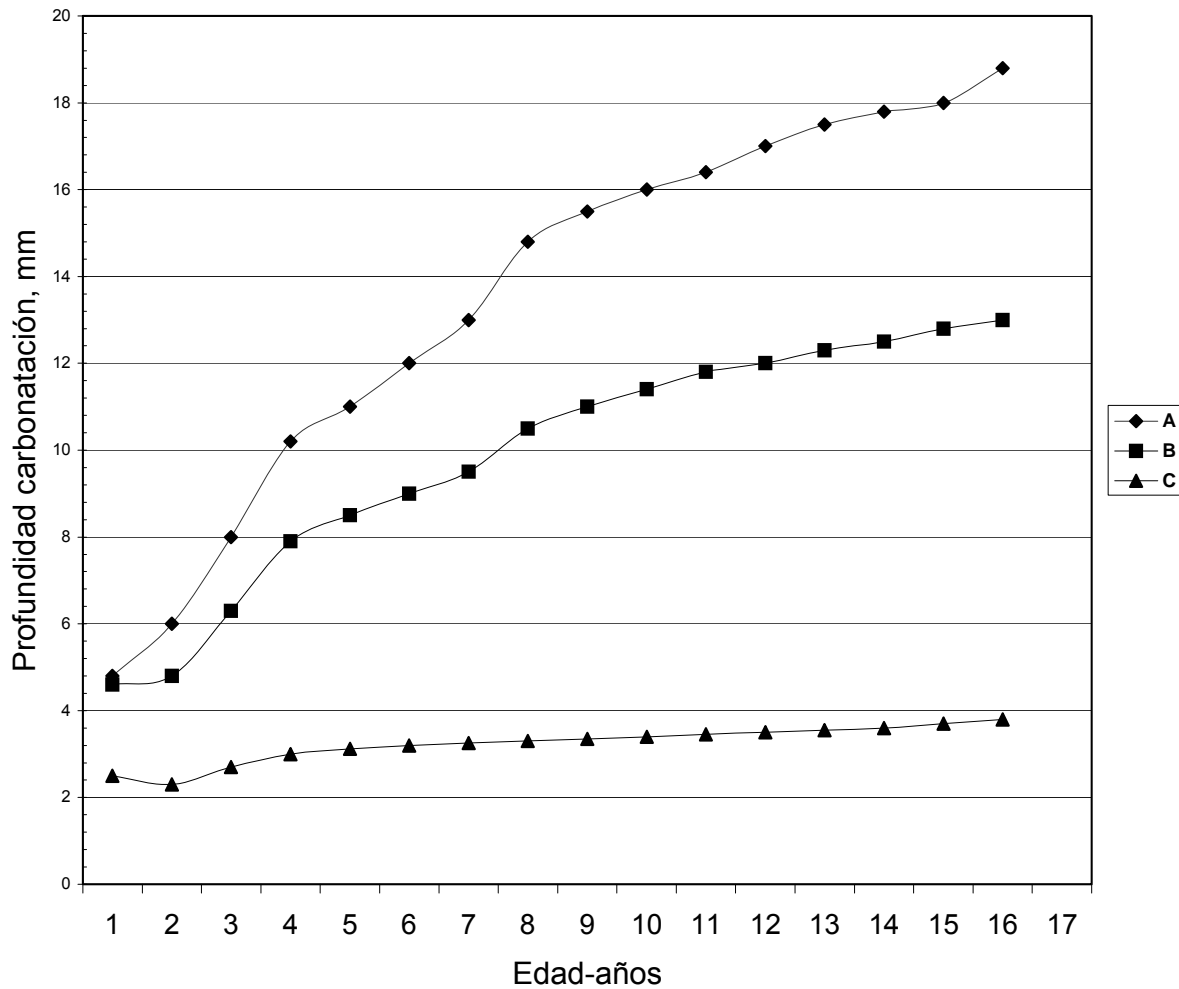
Donde:

K = coeficiente de carbonatación en mm/año^{0.5}, y

t = tiempo de exposición en años.

Los valores de K son con frecuencia más de 3 ó 4 mm/año^{0.5} para concreto de baja resistencia. Otra manera de dar una idea amplia es decir que, en el concreto con una relación agua/cemento de 0.60, una profundidad de carbonatación de 15 mm se alcanzaría después de 15 años, pero con una relación agua/cemento de 0.45, sólo después de 100 años. Un ejemplo del progreso de la carbonatación después de un período de 16 años se muestra en la figura 5.

Figura 5 Progreso de la carbonatación con el tiempo de exposición en condiciones diferentes: (A) 20C y 65 por ciento de humedad relativa, (B) a la intemperie protegido por techo, (C) a la intemperie en superficie horizontal.



Adaptado: Luís Fernández Luco, **Corrosión por carbonatación**. Pág 15

Si la superficie del concreto está expuesta a una humedad variable, con mojado periódico, la rapidez de carbonatación se reduce por causa del retardo de la difusión del dióxido de carbono (CO_2) a través de los poros saturados de la pasta de cemento endurecido. Inversamente, las partes resguardadas de una estructura sufren carbonatación con una rapidez mayor que las que están expuestas a la lluvia, lo cual retrasa significativamente el progreso de la carbonatación.

En el interior de los edificios, la rapidez de carbonatación puede ser alta, pero esto no tiene malas consecuencias en lo que concierne a la corrosión del acero ahogado, a menos que el concreto con carbonatación se moje posteriormente. Esto puede ocurrir cuando el agua ingresa a través del revestimiento de una edificación lo suficientemente lejos para alcanzar la zona con carbonatación a partir del interior.

La influencia muy considerable del contenido de humedad del concreto sobre la carbonatación significa que, hasta en una edificación sencilla, hecha toda del mismo concreto, puede hacer una variación considerable en la profundidad de carbonatación a una edad dada: los muros expuestos a la lluvia tendrán una menor profundidad de carbonatación; lo mismo ocurrirá con las superficies inclinadas que pueden ser llevadas por la lluvia; y esto también es válido para los muros que pueden secar perfectamente por tener un alto aislamiento. Sobre todo, la profundidad mayor de la carbonatación puede ser 50 por ciento más alta que la profundidad menor. Las variaciones pequeñas de temperatura tienen poco efecto sobre la carbonatación, pero una temperatura aumenta la rapidez de carbonatación a menos que el secado sobrepase el efecto de la temperatura.

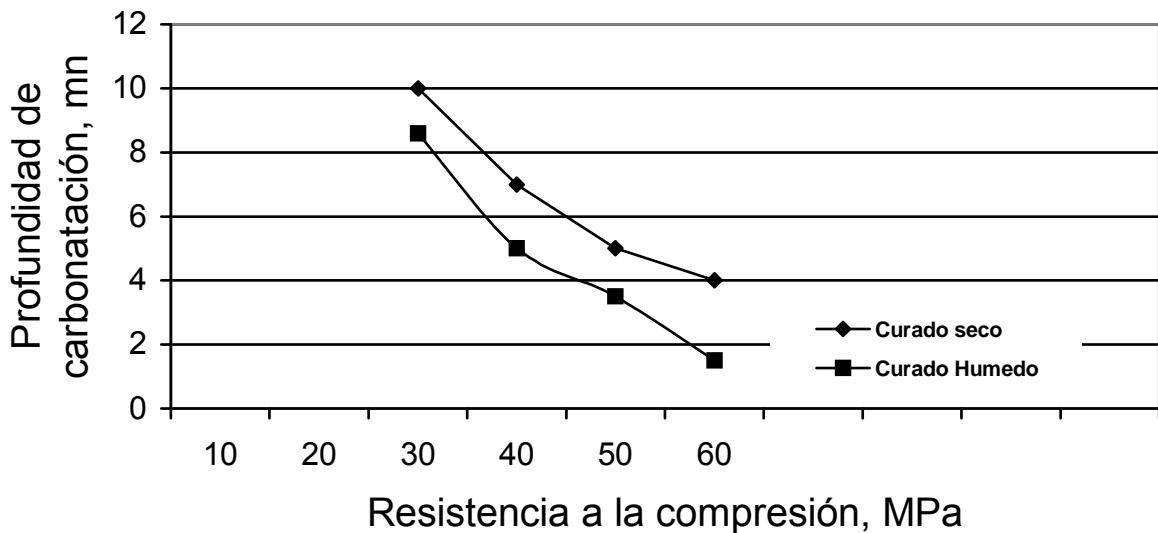
2.2.2 Factores que tiene influencia en la carbonatación

El factor fundamental que controla la carbonatación es la difusividad de la pasta de cemento endurecido. La difusividad es una función del sistema de poros de la pasta de cemento endurecido durante el periodo en que ocurre la difusión del dióxido de carbono (CO_2). El tipo de cemento, la relación agua/cemento y el grado de hidratación tiene importancia, éstos influyen en la resistencia del concreto que contiene cualquier pasta dada de cemento endurecido. Por esta razón, se dice con frecuencia que la rapidez de carbonatación es simplemente una función de la resistencia del concreto. Esto, aunque generalmente cierto, es una simplificación inadecuada. Lo que empeora el uso de este enfoque es que el valor de resistencia citado no es el aplicable en concreto in situ cuando llega a estar expuesto al dióxido de carbono (CO_2) sino, usualmente, el valor de resistencia de especímenes de prueba curados de una manera normal, el cual es invariablemente superior al curado in situ.

Las opciones respecto al uso de la resistencia como un parámetro incluyen la expresión de la carbonatación como una función de la relación agua/cemento, o del contenido de cemento, o ambos. No hay ninguna base física para considerar el contenido de cemento; en lo que toca a la relación agua/cemento, tal enfoque no es superior al empleo de la resistencia como parámetro. En realidad, ni la resistencia ni la relación agua/cemento informan acerca de la microestructura de la pasta de cemento endurecido en la zona superficial del concreto mientras está ocurriendo la difusión del dióxido de carbono (CO_2). Un factor que tiene una gran influencia sobre la zona exterior en el historial del curado del concreto.

El efecto del curado sobre la carbonatación del concreto es considerable. La figura 6 muestra la profundidad de carbonatación de concretos con resistencia a la compresión de 28 días (medida en cubos de prueba normales) entre 30 y 60 Mpa: (a) curados en agua durante 28 días, (b) curados en aire a humedad relativa de 65 por ciento; de allí en adelante, todos los especímenes fueron almacenados durante dos años a 20 C y una humedad relativa de 65 por ciento. Es manifiesto el efecto perjudicial de la ausencia de curado húmedo, lo que da por resultado alta porosidad.

Figura 6 **Relación entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a la compresión del concreto después de exposición de dos años en aire a una humedad relativa de 65 por ciento.**



Adoptado: Adam M. Neville, **Tecnología del concreto**. Pág. 350

Se deberá observar que la exposición a la intemperie incluye en muchas partes períodos frecuentes o prolongados de alta humedad atmosférica, de manera que la hidratación del cemento continúa. Sin embargo, por lo regular, los efectos de la ausencia de curado inicial sobre la carbonatación persisten durante muchos años hasta el grado de dar por resultado una microestructura de la pasta de cemento endurecido en la zona exterior del concreto que facilita la difusión del dióxido de carbono (CO_2).

2.2.3 Carbonatación del concreto que contiene cementos mezclados

Actualmente los cementos mezclados se utilizan ampliamente, es importante conocer el comportamiento de carbonatación de concretos que contienen ceniza volante y escoria de alto horno granulada y molida. Se han publicado numerosos artículos técnicos que informan, de pruebas de carbonatación comparativas en concretos con y sin estos materiales cementantes, pero las comparaciones fueron hechas sobre bases variables. Tales datos no se prestan a generalizaciones útiles, y aun así, lo que es importante al seleccionar una mezcla de concreto es valorar las características de carbonatación de la mezcla específica propuesta.

El punto de partida en esta valoración es el conocimiento de la microestructura y otras propiedades de la pasta de cemento endurecido que resultan con el uso de los varios materiales cementantes hasta el grado que estas propiedades físicas o químicas tienen influencia en la carbonatación. Primero que todo, la sílice de la ceniza volante reacciona con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que resulta de la hidratación del cemento Pórtland.

En consecuencia, Neville (2000,35i) indica que el cemento mezclado conduce a un contenido más bajo hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) en la pasta de cemento endurecido de manera que se requiere una cantidad más pequeña de dióxido de carbono (CO_2) para remover todo el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) para reducir el carbonato de calcio (CaCO_3).

El buen curado es necesario para que ocurran las reacciones puzolánicas, y sin embargo se han hecho pruebas que comprenden curado de un día solamente cuando el concreto contiene ceniza volante; tales pruebas están destinadas a demostrar alta carbonatación del concreto con ceniza volante, pero ellas se basan en una mala práctica en la elaboración del concreto. Los efectos del curado inadecuado sobre la carbonatación del concreto que contiene ceniza volante persisten aun en el largo plazo. Por otro lado, los concretos hechos con cemento que contiene ceniza volante hasta 30 por ciento y con resistencias reales de alrededor de 35 Mpa no han mostrado ningún aumento, o sólo un aumento marginal de carbonatación cuando se incluye ceniza volante en la mezcla.

El uso de escoria de alto horno granulada y molida en la mezcla de concreto ocasiona una necesidad aún mayor de buen curado. En consecuencia, el concreto curado pobremente que contiene escoria de alto horno exhibe carbonatación muy alta. Los altos contenidos de escoria conducen a una mayor profundidad de carbonatación.

El cemento resistente a sulfatos conduce a una profundidad de carbonatación 50 por ciento mayor que el Cemento Pórtland. Por esta razón, se puede requerir un aumento en el recubrimiento para el acero de refuerzo cuando se emplea cemento resistente a sulfatos.

La carbonatación ocurre también en concreto de cemento de alta alúmina, pero, como la hidratación de ese cemento no produce hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) son los hidratos de aluminio de calcio CAH_{10} y (C_3AH_6) lo que reacciona con el dióxido de carbono (CO_2). Los productos finales son carbonato de calcio (CaCO_3) y gel de lúmina, los cuales tienen una resistencia más baja que los hidratos. A la misma resistencia que el concreto de cemento pórtland, el concreto de cemento de alta alúmina exhibe el doble de carbonatación.

La carbonatación de la pasta de cemento de alta alúmina endurecido puede conducir a la despasivación del acero de refuerzo, el cual en cualquier caso está en contacto con el agua de poros a un pH más bajo que en el caso de Cemento Pórtland, puede ser, entre 11.4 y 11.8.

2.3 Medición de la carbonatación

Las técnicas de laboratorio que se pueden utilizar para determinar la profundidad de la carbonatación incluyen análisis químico, difracción de rayos (X), espectroscopia de infrarrojos y análisis termogravimétrico. Una forma común para establecer la extensión de la carbonatación es mediante el tratamiento de una superficie acabada de romper o sacar testigos de concreto con una solución de fenolftaleína en alcohol diluido. El hidróxido de ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libre se colorea rosado mientras que la porción carbonatada no se colorea; con el progreso de la carbonatación de la superficie nuevamente expuesta, la coloración rosada desaparece gradualmente. La prueba es fácil de ejecutar y es rápida, pero se deberá recordar que el color rosado indica la presencia de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) más no indica, necesariamente, una ausencia total de carbonatación.

Fernández (2005,4) indica que la prueba con fenolftaleína da una medida del pH, pero no distingue entre un bajo pH causado por carbonatación y por otros gases ácidos. En lo que corresponde al riesgo de corrosión del refuerzo, la causa de un valor bajo de pH puede no ser importante pero se requiere atención en la interpretación del patrón de color observado.

La prueba de fenolftaleína no se puede utilizar con cemento de alta alúmina, porque, a diferencia del cemento Pórtland, este cemento no contiene cal libre.

Si la obtención por rotura de una muestra de concreto no es practicable, se pueden obtener muestras del concreto mediante barrenado hasta profundidades cada vez más mayores; las muestras luego se sujetan a la prueba con fenolftaleína. Se requiere cuidado, pues si la cal está libre del concreto sin carbonato contamina una muestra, la muestra entera se volverá rosada, dando la impresión de una ausencia de carbonatación.

La profundidad del ataque de carbonatación esta en función de la raíz cuadrada del tiempo.

$$X = k \sqrt{t}$$

Donde:

X = Profundidad del ataque en milímetros

t = tiempo, en años

k = Constante que depende de la calidad del concreto

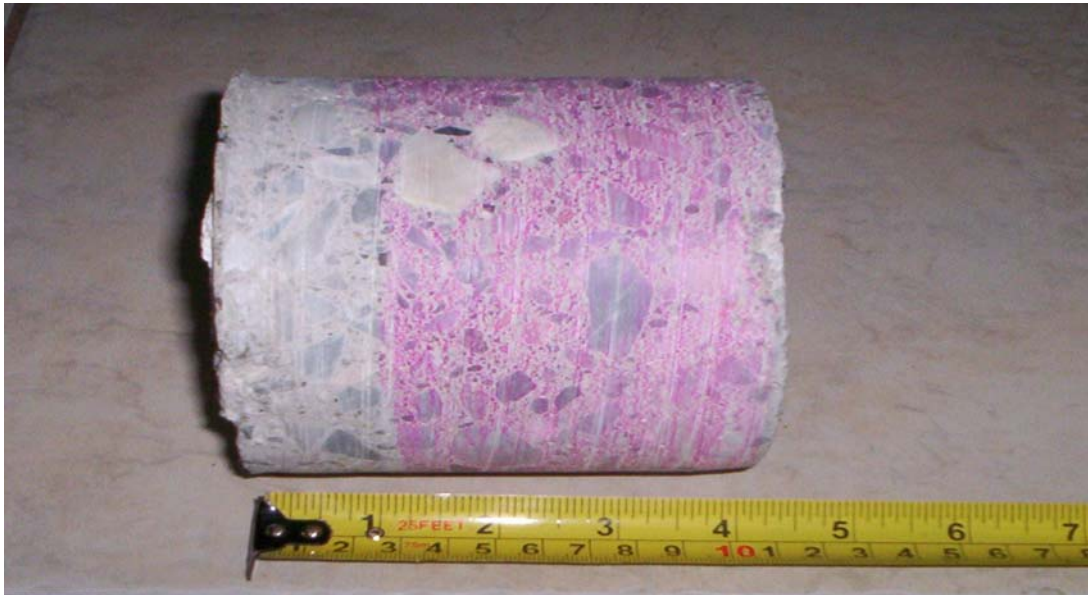
Los valores de la constante de carbonatación k se han detectado en estructuras reales en un intervalo comprendido entre 2 y 15 mm/año, en función de la calidad del concreto. Estos valores se sitúan en:

$2 < k < 6$ para concretos de elevada resistencia (superior a 350 Kg/m³).

$6 < k < 9$ para concretos de resistencia media

$K > 9$ para concretos porosos de baja calidad (inferior a 250 Kg/m³).

Figura 7. Testigo de concreto donde se detecta la zona carbonatada por ausencia de color fucsia.



3. SULFATOS EN EL CONCRETO

3.1 Proceso de ataque de sulfatos

Los medios de contacto agresivos para el concreto están caracterizados por suelos y aguas superficiales o freáticas que contienen sustancias que atacan químicamente al concreto.

Uribe (2000,10) considera que las sales inorgánicas presentes en estos medios son los sulfatos, los cuales se encuentran en diferentes niveles de concentración en la naturaleza. Cuando se estiman en concentraciones pequeñas, se consideran prácticamente inofensivos, pero a medida que incrementan su nivel de concentración, su presencia se vuelve una condición de riesgo para las estructuras de concreto ya que puede producir cambios volumétricos en los elementos, de tal forma que ocurra un deterioro prematuro del concreto. La condición más desfavorable cuando existen sulfatos es cuando éstos se encuentran solubles en agua, o la alternancia frecuente de mojado y secado por las aguas con sulfatos.

Los sulfatos reaccionan químicamente con otros componentes para formar un mineral expansivo que descompone el concreto. Debido a que el hidróxido de calcio es uno de los componentes involucrados en la reacción, la resistencia a sulfatos puede mejorarse convirtiendo este componente en hidrato de silicato de calcio (CSH) químicamente más resistente.

Cuando existen frecuentes ciclos de mojado y secado en un ambiente con sulfatos, la desintegración también puede ser causada por el crecimiento de cristales de sales de sulfato, que es un fenómeno físico.

Ya sea que el mecanismo de desintegración sea químico o físico, la permeabilidad reducida mejora la resistencia a sulfatos no permitiendo la entrada de soluciones de sulfatos.

La formación de estringita que resulta del ataque del sulfato de calcio no difiere de la reacción correspondiente en el cemento expansivo tipo K, pero puesto que ocurre en concreto endurecido, con frecuencia es destructora; de ahí que, algunas veces, la reacción se menciona como expansión retrasada de estringita.

La reacción entre el sulfato de calcio y el aluminato tricálcico (C_3A) es una reacción de estado sólido, que no comprende solución y nueva precipitación, lo cual permitiría movimiento del producto recientemente formado lejos de la localización original. Tal movimiento no daría por resultado el desarrollo de presión. Si el producto de la reacción topoquímica ocupa un volumen más grande que el volumen de los dos compuestos originales, entonces se crean fuerzas expansivas y destructoras. En el caso de la reacción entre el sulfato de calcio y el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), no hay aumento total de volumen, pero, por causa de las diferencias en solubilidad del aluminato tricálcico (C_3A) y el yeso, se forma estringita orientada y al circular en la superficie del C_3A . Así, hay un aumento local de volumen y, al mismo tiempo, un aumento de porosidad en otra parte.

La estrigita se puede formar también por la reacción entre el sulfato y el ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF), pero esta estrigita es cercanamente amorfa y no se ha informado de expansión que dañe. No obstante, la norma ASTM C 150-94 prescribe un límite sobre el contenido combinado de aluminato tricálcico (C_3A) y de el ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) cuando se requiere resistencia a sulfatos.

3.2 Efectos de sulfatos en el concreto

Las consecuencias del ataque de sulfatos incluyen no solo expansión y agrietamiento destructivos, sino también una pérdida de resistencia del concreto debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento hidratado y de adhesión entre esta y las partículas de agregado. El concreto atacado por sulfatos tiene una, apariencia blanquecina característica. El daño comienza usualmente en las orillas y esquinas, y es seguido por agrietamiento y desconchamiento progresivos, los cuales reducen el concreto a un estado frágil.

El ataque ocurre solo cuando la concentración de sulfatos excede cierto límite. Arriba de este, la rapidez del ataque de sulfatos aumenta con un aumento en la resistencia de la solución, pero más allá de una concentración de alrededor de 0.5 por ciento del sulfato de magnesio ($MgSO_4$) o de uno por ciento del sulfato de sodio (Na_2SO_4), la rapidez del aumento en la intensidad del ataque se vuelve menor. Una solución saturada de sulfato de magnesio ($MgSO_4$) conduce a deterioro serio del concreto, aunque con una relación agua/cemento baja esto ocurre solo después de 2 ó 3 años.

La clasificación de la severidad de exposición recomendada por el ACI 201.2R-92 está dada en la tabla III. Donde se puede observar ciertas condiciones, la concentración de sulfatos en el agua se puede aumentar en forma importante por evaporación. Esto es el caso del salpicado de agua de mar sobre superficies horizontales y sobre la superficie de torres de enfriamiento.

Tabla III Clasificación de la severidad de ambiente de sulfatos de acuerdo con el ACI 201.2R-92

Exposición	Concentración de sulfatos solubles Expresados en SO ₄	
	En el suelo (%)	En el agua(ppm)
Suave	<0.1	<150
Moderada	0.1 a 0.2	150 a 1500
Severa	0.2 a 2.0	1500 a 10000
muy severo	>2.0	>10000

Fuente: ACI 201.2R-92. Pág. 356

Además de la concentración del sulfato, la velocidad del ataque contra el concreto depende también de la rapidez a la cual el sulfato removido por la reacción con el cemento se puede recuperar nuevamente. Así, en la estimación del peligro de ataque del sulfato, se debe conocer el movimiento de agua freática. Cuando un lado del concreto se expone a la presión del agua que lleva sulfato, la rapidez del ataque será la mayor.

Del mismo modo, la saturación y el secado alternados conducen a deterioro rápido. Por otro lado, cuando el concreto está completamente enterrado, sin un canal para el agua freática, las condiciones serán mucho menos severas.

3.3 Factores que reducen el ataque

El propósito de la clasificación de la severidad de exposición a sulfatos mostrada en la tabla III es para sugerir medidas de prevención. Uribe (2000,16) considera dos soluciones. La primera es reducirlo al mínimo el contenido de aluminato tricálcico (C_3A) del cemento, es decir, utilizar cemento resistente a sulfatos. La segunda solución es reducir la cantidad de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) de la pasta de cemento hidratado mediante el uso de cementos mezclados que contengan escoria de alto horno o puzolana. El efecto de la puzolana es doble. Primero, reacciona con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), de modo que el $Ca(OH)_2$, ya no está disponible para reaccionar con sulfatos. Segundo, comparado con cemento portland únicamente, el mismo contenido de cemento mezclado por metro cúbico de concreto da por resultado menos hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$. Estas medidas son útiles, pero todavía más importante es la prevención del ingreso de sulfatos dentro del concreto: esto se logra haciendo el concreto tan denso como se pueda y con una permeabilidad tan baja como sea posible. Esto nunca se debe olvidar: por ejemplo, el uso de concreto pobre en los apoyos o cimentación de alcantarillas produce partes vulnerables en una construcción que posiblemente sería durable de otro modo.

En lo que concierne a la selección del cemento, el ACI 201.2R-92 recomienda, para exposición moderada, el empleo de cemento tipo II o de cemento mezclado con escoria de alto horno o puzolana.

Para exposición severa, el cemento resistente a sulfatos es la elección preferida; para exposición muy severa, se requiere una mezcla de cemento resistente a sulfatos y puzolana o escoria de alto horno.

Según Neville (2000,357) la razón por la que el cemento resistente a sulfatos solo es inadecuado cuando esta expuesto a condiciones severas es que solo hay presencia de sulfato de calcio sino también de otros sulfatos. Por lo tanto, aunque el cemento resiste a sulfatos no contiene suficiente aluminato tricálcico (C_3A) para la formación de etringita expansiva, el hidróxido de calcio ($CA(OH)_2$) presente, y posiblemente también el silicato de calcio hidratado (CSH), son vulnerables al ataque de tipo ácido de los sulfatos.

Los requisitos del ACI 201.2R-92 reflejan el efecto benéfico que sobre la resistencia a los sulfatos tienen las puzolanas y la escoria de alto horno granulada y molida utilizadas con cemento Pórtland. Las puzolanas también tienen que usarse con cemento de fraguado regulado, que muestra solo una resistencia pobre a los sulfatos.

El humo de sílice incorporado en el concreto es benéfico respecto a la permeabilidad, pero las pruebas en pasta de cemento endurecido indican que el efecto del humo de sílice en varios ambientes con sulfatos no esta claro.

El cemento supersulfatado ofrece resistencia muy alta a los sulfatos, especialmente si su componente de cemento Pórtland es de la variedad resistente a los sulfatos.

El curado con vapor de agua de alta presión mejora la resistencia del concreto al ataque de sulfatos. Esto se aplica a concretos hechos tanto con cementos resistentes a sulfatos como con Pórtland ordinarios.

La baja permeabilidad del concreto, como se mencionó en este capítulo, es la consecuencia de una microestructura apropiada de la pasta de cemento endurecido. Con el objeto de lograr esta, se necesita especificar las proporciones de la mezcla.

Se tiene tres enfoques posibles, siendo empleados uno o más de estos por varios reglamentos: especificando una resistencia mínima, especificando una relación agua/cemento máxima, y especificando un contenido mínimo de cemento. La misma selección se aplica cuando se busca una baja permeabilidad del concreto en los casos de protección de otras formas de ataque.

El uso de la resistencia para propósitos de especificación es conveniente, pero la resistencia solo refleja la relación agua/cemento; esto es lo que tiene importancia para la densidad y la permeabilidad, como se analizó. Sin embargo, especificar la relación agua/cemento sin considerar la naturaleza del cemento utilizado es inadecuado.

3.4 Pruebas sobre resistencia a sulfatos

La resistencia del concreto al ataque de sulfatos se puede determinar en el laboratorio mediante el almacenamiento de especímenes en una solución de sulfato de sodio o de magnesio, o en una mezcla de los dos. El mojado y el secado alternados aceleran el daño a causa de la cristalización de sales en los poros del concreto. Los efectos de la exposición se pueden estimar por la pérdida de resistencia del espécimen, por cambios en su módulo dinámico de elasticidad, por su expansión, por su pérdida de masa, o se pueden valorar incluso visualmente.

El método de la prueba de la norma ASTM C 1012-89 emplea inmersión de mortero bien hidratado en una solución de sulfatos, y considera la expansión excesiva como un criterio de falla bajo ataque de sulfatos. Esta prueba se puede emplear para valorar los efectos de utilizar varios materiales cementantes en la mezcla. Sin embargo, puesto que es mortero y no concreto lo que se prueba, algunos efectos físicos de materiales tales como el humo de sílice o rellenos no se reflejan en la prueba. Una desventaja adicional de la prueba es que es lenta, se requiere a veces varios meses antes de que se pueda registrar la falla o inferir su ausencia.

Como una opción respecto a la inmersión en una solución de sulfato, la norma ASTM C 452-89 prescribe un método en el cual cierta cantidad de yeso se incluye en la mezcla de mortero original. Esto hace más rápida la reacción con C_3A , pero el método no es apropiado para su empleo con cementos mezclados, en los cuales algún material cementante está todavía sin hidratar en la etapa de ponerse en contacto con los sulfatos. Esto es así porque en la prueba de la norma ASTM C452-89, el criterio de resistencia a los sulfatos es la expansión a la edad de 14 días

Otra norma es la ASTM C 1038-89, la cual determina la expansión de mortero hecho con Cemento Pórtland, del cual el sulfato es una parte integral. Así, la prueba identifica el contenido excesivo de sulfato de un cemento Pórtland más bien que el ataque por sulfatos externos.

Todas las pruebas de ASTM se efectúan sobre morteros de proporciones prescritas y, en consecuencia, son más sensibles a la resistencia química del cemento que a la estructura física de la pasta de cemento endurecido de un concreto real.

4. CLORUROS EN EL CONCRETO

4.1 Proceso de ataque de cloruros

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

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

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

Girón (1998,1) indica que los cloruros se vuelven así un elemento activo en el proceso de daño y degradación de las estructuras de concreto. De acuerdo con la concentración con que se presenten en el agua de mar, quedará definido su grado de agresividad, por lo habrá que esperar que algunas zonas tengan un mayor potencial dañino que otras.

Los cloruros pueden penetrar al concreto por succión capilar del agua salada en el concreto más o menos seco a través de la red poros. Por medio de este proceso, el agua salada puede penetrar con gran rapidez produciendo daños severos por corrosión en poco tiempo.

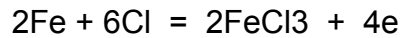
En cambio, en las estructuras sumergidas, los cloruros pueden penetrar principalmente por difusión, debida al gradiente de concentraciones de la solución de poro.

La penetración de cloruros ocurre, por lo general, a través de la combinación de varios mecanismos, por lo que es importante que los modelos para simular los ataques por cloruros tengan en cuenta todos los mecanismos. Por ejemplo, además de un mecanismo de difusión que es relativamente lento, los cloruros pueden penetrar mucho más rápido por fuerzas capilares, mecanismo muy propio de ambientes de aerosol marino existente en climas cálidos marítimos.

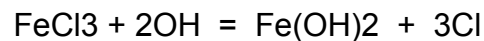
Una vez que han llegado a la barra de refuerzo en cantidades suficientes, los cloruros pueden destruir la pasividad natural del refuerzo provocando su corrosión.

Neville (2000,393) da la indicación que la capa pasiva de protección sobre la superficie del acero ahogado que se autogenera después del comienzo de la hidratación del cemento, se compone de γ - Fe_2O_3 adherido fuertemente del acero. Mientras esta película de oxígeno está presente, el acero permanece intacto. Sin embargo, los iones de cloruro destruyen la película y, en presencia de agua y de oxígeno, ocurre la corrosión.

Según Castro (2001,25) la teoría de la “formación del compuesto” plantea que los cloruros libres forman un compuesto soluble con los iones del hierro:



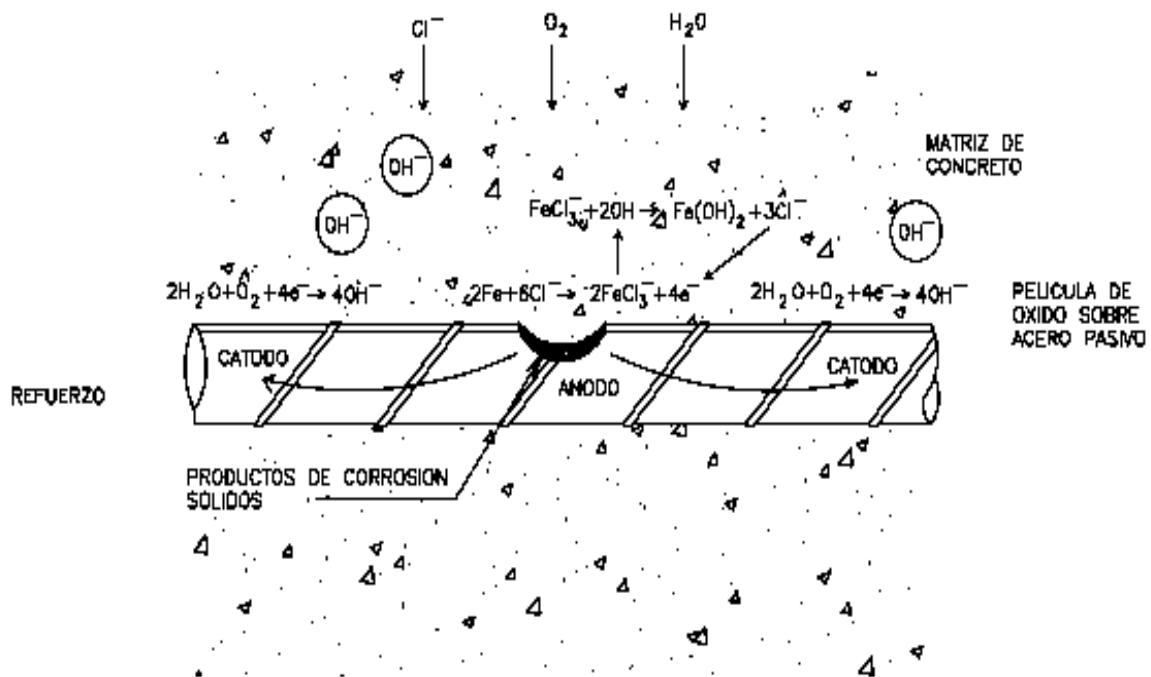
Que difunden hacia otra zona alejada del ánodo, donde pH y la concentración de oxígeno disuelto son altos. Debido a esto, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro liberando los iones de cloruro:



Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro en la vecindad del acero, el proceso puede continuar por si mismo emigrando los iones de hierro desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxidos o hidróxidos. Por lo tanto, en vez de que la corrosión se propague a lo largo del acero de refuerzo, continúa en las zonas anódicas, desarrollándose picaduras profundas en el acero.

En la figura 8 se observa un esquema del mecanismo de corrosión del acero de refuerzo en el concreto debido al rompimiento de la capa pasivante por efecto de los iones cloruro. Esta teoría sugiere que solo los cloruros disueltos en la solución de poro, participan en el proceso de corrosión. Es probable que los cloruros que se han unido a algún compuesto de hidratación del cemento rompan ese enlace y regresen otra vez a la solución.

Figura 8 **Mecanismo de corrosión por picaduras debido a cloruros**



Fuente: Pedro Castro. **Corrosión en estructuras de concreto armado.** Pág. 26

Debido a esto se considera que los cloruros ligados representan un riesgo potencial de corrosión y recomiendan tomar en cuenta el riesgo de corrosión en términos de cloruros totales.

Hay dos consecuencias de la corrosión del acero. La primera es que los productos de corrosión ocupan un volumen varias veces más grande que el acero original de manera que su formación da por resultado el agrietamiento, el descascaramiento o la delaminación del concreto. Esto hace más fácil el ingreso de los agentes agresivos hacia el acero, con un aumento consecuente de la rapidez de corrosión. La segunda es que el progreso de la corrosión en el ánodo reduce el área de sección recta del acero, reduciendo así su capacidad de soportar carga.

Con relación a esto, hay que señalar que la corrosión inducida por cloruros se localizará en un ánodo pequeño, ocurriendo la picadura del acero. Cuando el suministro de oxígeno está severamente limitado. Por ocurrir corrosión lenta. Los productos de corrosión, que son menos voluminosos que en circunstancias normales, pueden moverse dentro de los vacíos del concreto sin un desarrollo progresivo de agrietamiento o descascaramiento.

4.1.1 Cloruros en la mezcla

Los cloruros pueden estar presentes en el concreto porque ellos se han incorporado en la mezcla a través del empleo de agregado contaminado o de agua de mar o de agua salobre, o por aditivos que contienen cloruros. Ninguno de estos materiales se deberá permitir en el concreto reforzado, y las normas prescriben generalmente límites escritos en el contenido de cloruros del concreto procedente de cualquier fuente. Por ejemplo, el enfoque del ACI 318-89 (revisado en 1992) es considerar solo iones de cloruro soluble en agua. Sobre esa base, el contenido de iones de cloruro del concreto se limita a 0.15 por ciento por masa de cemento

Como una fuente posible de cloruros en la mezcla, el mismo Cemento Pórtland contiene una cantidad muy pequeña, no más que el 0.01 por ciento por masa. Sin embargo, la escoria de alto horno granulada y molida puede tener un contenido importante de cloruros si su procesamiento comprende enfriamiento rápido con agua de mar. El agua para beber puede contener 250 ppm de iones de cloruro, a una relación agua/cemento de 0.4, el agua contribuirá con la misma cantidad de iones de cloruros que el cemento Pórtland.

Para concreto reforzado, el contenido de cloruros del agregado no deberá exceder de 0.05 por ciento por masa del agregado total, esto se reduce hasta 0.03 por ciento cuando se emplea cemento resistente a sulfatos. Para concreto reforzado, la cifra correspondiente es 0.01 por ciento.

4.2 Efectos de cloruros en el concreto

El ataque de cloruros se distingue en que la acción principal es la corrosión del acero de refuerzo, y es solo como consecuencia de esta corrosión que se daña el concreto circundante. La corrosión del acero de refuerzo es una de las causas mayores de deterioro de las estructuras de concreto reforzado.

En muchas estructuras de concreto localizadas en ambientes cercanas a costas, en las que el daño se ha iniciado a través de una incipiente penetración de cloruros hacia el acero, la acción de la corrosión y del incremento de diámetro de las varillas causan por si mismas agrietamiento en el recubrimiento del concreto, lo que facilita en gran medida el acceso de humedad, aire y cloruros contenidos en el agua, y acelera así el proceso de ataque, llevando a las estructuras a daños irreparables en periodos notablemente cortos.

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

El problema del ataque de cloruros surge comúnmente cuando los iones ingresan desde el exterior. Otra fuente, particularmente importante de iones de cloruro es el agua de mar en contacto con el concreto. Los cloruros también se pueden depositar sobre la superficie de concreto en forma de gotitas muy finas de agua de mar que lleva el aire (extraídas desde el mar por turbulencia y transportadas por el viento) o de polvo que lleva el aire que subsecuentemente llega a humedecerse con el rocío. Es útil señalar que los cloruros que lleva el aire pueden viajar distancias considerables: se ha informado de 2 km, pero es posible que viajen por distancias todavía mayores, lo que depende del viento y de la topografía. La configuración de las estructuras también afecta el movimiento de sales llevadas por el aire: cuando ocurren remolinos en el aire, las sales pueden alcanzar las superficies de las estructuras, más próximas a tierra.

Neville (2000,395) indica que en el agua freática salobre en contacto con el concreto es también una fuente de cloruros. Aunque este es un caso raro, se puede mencionar que los cloruros pueden ingresar en el concreto por conflagración de materiales orgánicos que contienen cloruros. El ácido clorhídrico se forma y se deposita sobre la superficie del concreto cuando reacciona con iones de calcio en el agua de poros. El ingreso de iones de cloruro puede seguir.

Cualquiera que sea su origen externo, los cloruros penetran en el concreto por transporte de agua que los contiene, así como por difusión de los iones en el agua y por absorción. El ingreso prolongado y repetido, con el tiempo, puede dar por resultado una alta concentración de iones de cloruro en la superficie del acero de refuerzo.

Cuando el concreto está sumergido permanentemente, los cloruros ingresan hasta una profundidad considerable, pero, a menos que el oxígeno este presente en el cátodo, no habrá ninguna corrosión. En el concreto que esta a veces expuesto al agua de mar y a veces seco, el ingreso de cloruros es progresivo.

El concreto seco embebe agua de mar por absorción, y en ciertas condiciones, puede continuar haciéndolo así hasta llegar a saturarse. Si las condiciones externas cambian luego a secas, la dirección del movimiento del agua llega a invertirse y el agua se evapora desde los extremos de los poros capilares abiertos hacia el aire circundante. Sin embargo, es solo el agua pura lo que se evapora, y las sales son dejadas como residuos. Así, la concentración de sales del agua todavía en el concreto aumenta cerca de la superficie de este.

El gradiente de concentración así establecido conduce las sales del agua que este cerca de la superficie del concreto hacia las zonas de concentración mas baja, es decir, hacia adentro; esto es transporte por difusión. Según sea la humedad relativa externa y la duración del periodo de secado, es posible para casi toda el agua de la zona exterior del concreto evaporarse, de manera que el agua que permanece en el interior llegara a saturarse con sal y la sal excedente se precipitara completamente como cristales.

En efecto, el agua se traslada hacia fuera y la sal hacia adentro. El ciclo siguiente de humedecimiento con agua salada traerá más sal presente en solución dentro de los poros capilares. El gradiente de concentración decrece ahora hacia fuera a partir de un valor pico a cierta profundidad a partir de la superficie, y algunas de las sales pueden difundirse hacia la superficie del concreto. Sin embargo, si el período de humedecimiento es corto y el secado se vuelve a reiniciar rápidamente, el ingreso de agua salada llevará las sales a gran profundidad dentro del concreto, el secado posterior eliminará el agua pura, dejando las sales.

Así, es evidente que un ingreso progresivo de sales hacia el acero de refuerzo ocurre con mojado y secado alternado.

Según Neville (2000,396) algunas veces, hay una concentración más baja de cloruros en los 5 mm exteriores del concreto, donde tiene lugar movimiento rápido de agua, de manera que las sales son llevadas rápidamente una corta distancia hacia el interior. El contenido máximo de iones del cloruro en el agua de poros puede exceder la concentración en agua de mar, esto se observó después de 10 años de exposición. El hecho fundamental es que, con el paso del tiempo, una cantidad suficiente de iones de cloruro alcanzará la superficie del acero de refuerzo.

Como se acaba de mencionar, el ingreso de cloruros en el concreto es fuertemente influido por la secuencia exacta de mojado y secado. Esta secuencia varia de una localización a otra, y depende del movimiento del mar y del viento, de la exposición al sol, y del uso de la estructura. Así, aun diferentes partes de la misma estructura pueden experimentar un modelo diferente de mojado y secado, esto explica por que, algunas veces, hay una variación considerable en la del alcance del daño por corrosión en una solo estructura.

No es solo el mojado y secado de la zona superficial del concreto lo que influye en el ingreso de los cloruros, el secado hasta una profundidad mayor deja el mojado subsiguiente lleve los cloruros muy adentro del concreto, acelerando así el ingreso de iones de cloruro. Por esta razón, el concreto de la zona de mareas (donde el periodo de secado es corto) es menos vulnerable a corrosión que el concreto en la zona de salpicadura (donde el mojado puede ocurrir solo cuando el mar esta alto y el viento es fuerte).

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1 Ensayos para determinar la profundidad de carbonatación

La evaluación se realizó en diferentes tipos de estructuras como losas, columnas y muros de sótanos de edificios construidos recientemente, en edificaciones construidas en la zona 1 que datan de los años 70 y en 3 puentes de la ciudad capital de Guatemala.

Para verificar el frente de carbonatación se utilizó un indicador, el cual consistió en una disolución al 1 % de fenolftaleína en alcohol etílico.

Las muestras de concreto se extrajeron con taladro y brocas, en algunos casos las muestras se obtuvieron rompiendo las diferentes estructuras con punta y almádana debido a que en el lugar no se pudo colocar el equipo especificado. En el caso de los edificios evaluados se realizaban reparaciones en tuberías de drenajes, lo cual se aprovechó para obtener las muestras de concreto. Para la evaluación de casas en la zona 1, se eligieron edificaciones en remodelación, para aprovechar el proceso de construcción y así evitar reparaciones de acabados finales, las muestras se obtuvieron taladrando y rompiendo el concreto.

A continuación se presentan tres tablas donde se indican los resultados de las muestras obtenidas en las diferentes edificaciones.

Tabla IV Edificios en la zona 1 de la ciudad capital de Guatemala

Edificio	Lugar	Muestra	Profundidad de Carbonatación
Zona 1	Columna	1	1.8 cm
Zona 1	Columna	2	1.5 cm
Zona 1	Columna	3	1.6 cm
Zona 1	Columna	4	1.3 cm
Zona 1	Columna	5	1.3 cm
Zona 1	Columna	6	1.4 cm

Tabla V Edificios en diferentes zonas de la ciudad de Guatemala

Edificio	Lugar	Muestra	Profundidad de Carbonatación
Tadeus	Losa sótano	1	0.4 cm
Tadeus	Losa sótano	2	0.3 cm
Tadeus	Losa sótano	3	0.3 cm
Cofiño Stahl	Losa sótano	1	0.2 cm
Cofiño Stahl	Losa sótano	2	0.2 cm
Cofiño Stahl	Columna sótano	1	0.4 cm
Cofiño Stahl	Columna sótano	2	0.3 cm
Cofiño Stahl	Columna sótano	3	0.2 cm
Cofiño Stahl	Columna sótano	4	0.2 cm
Miraflores	Losa sótano	1	0.5 cm
Miraflores	Losa sótano	2	0.5 cm

Tabla VI **Puentes de la ciudad capital de Guatemala**

Edificio	Lugar	Muestra	Profundidad de carbonatación
Puente 20 calle El Amate	Muro	1	1.8 cm
Puente 20 calle El Amate	Muro	1	1.7 cm
Puente 20 calle El Amate	Muro	1	1.6 cm
Puente 20 calle El Amate	Muro	1	1.7 cm
Trébol	Columna	1	1.4 cm
Trébol	Columna	1	1.2 cm
Trébol	Columna	1	1.2 cm
Trébol	Columna	1	1.3 cm
Final 8a. Calle zona 1	Muro	1	1.1 cm
Final 8a. Calle zona 1	Muro	1	1.3 cm
Final 8a. Calle zona 1	Muro	1	1.0 cm

Figura 9 **Inicio del frente de carbonatación en columna del sótano del edificio Cofiño Stahl Zona 5.**



5.2 Ensayos para determinar la resistencia a sulfatos

Para esta investigación los ensayos se realizaron en el laboratorio del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, de acuerdo a las normas descritas en el capítulo 3 de este trabajo, para lo cual se realizaron dos tipos de mezclas para cada norma, con el propósito de obtener resultados que reflejen datos confiables para verificar si la mezcla pobre es mas susceptible al ataque de sulfatos.

Las mezclas utilizadas para los ensayos realizados en el laboratorio son las siguientes: 400 g de cemento, 1100 g de arena y 194 ml de agua y la relación agua cemento es de 0.485. La otra mezcla utilizada, es 300 g de cemento, 1100 g de arena y 194 ml de agua y la relación agua cemento es de 0.647.

El mezclado de los materiales se realizó en una mezcladora eléctrica de 4.73 litros de capacidad, de acuerdo a la norma ASTM C-305, la cual consta de siete pasos, siendo estos los siguientes:

1. Verter el agua destilada en el tazón
2. Verter el cemento en el tazón.
3. Mezclar agua y cemento por 30 segundos a velocidad (140 r/min)
4. Pasados 30 segundos verter la arena en un lapso de 30 segundos.
5. Pasados los 30 segundos que se vertió la arena detener la maquina y cambiar la velocidad media (285 r/min), volver a encenderla y mezclar por 30 segundos.
6. Pasados los 30 segundos detener la mezcladora por 1 minuto con 30 segundos y durante los primeros 15 segundos remover el material que esta en la parte superior del tazón y colocarlo en la parte baja del mismo.
7. Al cumplirse el minuto y 30 segundos, proceder a encender nuevamente la mezcladora y mezclar por 1 minuto a velocidad media (285 r/min).

Inmediatamente después de realizar el mezclado se procede a moldear los especímenes, se coloca una capa del mortero de 1 pulgada aproximadamente en los cubos y 0.5 pulgadas en las barras.

Seguidamente se procede a apisonar el mortero, cuando el apisonado de la primera capa finaliza, se procede a llenar los especímenes con el mortero restante y se vuelve a realizar el apisonado de la segunda capa. Finalizado el apisonado se llenan bien los cubos o moldes con el material excedente y con una espátula se raza a manera que la cara superior quede completamente plana.

Después de terminado el moldeo de barras y cubos, se colocaron en una cámara de humedad. Pasadas 24 horas después de su colocación se procedió a retirar a los moldes de la cámara de curado y a desencofrar los especímenes de los moldes para realizar la primera medición de longitud en el caso de las barras, y en el caso de los cubos se colocaron en cal saturada para realizar el ensayo a compresión a los 7, 14 y 28 días.

Para la prueba que describe la norma ASTM C1012-89 que determina el cambio de longitud de morteros de cemento hidráulico expuesto a una solución de sulfato, estos son los resultados obtenidos.

Tabla VII Cambio de longitud de morteros expuestos a una solución de sulfato

Barra	Longitud inicial	Lectura a 1 semana	Lectura a 1 mes	Lectura a 2 meses	Lectura a 3 meses	% a 3 meses
MA-1	12	12	12.0056	12.0064	12.0071	0.05917
MA-2	12	12	12.0056	12.0063	12.0069	0.05750
MB-1	12	12	12.0064	12.0068	12.0074	0.06167
MB-2	12	12	12.0062	12.0069	12.0073	0.06083

De la tabla se puede observar que el cemento UGC tiene un cambio de longitud a 3 meses de 0.06 %, lo que indica que se esta en el rango según la norma. A este tiempo las barras se encuentran en buen estado, no presentan deformaciones debido al sulfato.

Para la prueba que describe la norma ASTM C 452-89, que determina la expansión de cemento Pórtland expuestos a sulfato, estos son los resultados obtenidos.

Tabla VIII Expansión potencial de morteros de Cemento Pórtland

Barra	Longitud inicial	Lectura a 14 días	% De Expansión
MA-3	11.9843	11.9848	0.004
MA-4	11.9843	11.9847	0.003
MB-3	11.9843	11.9849	0.005
MB-4	11.9843	11.9851	0.007

De la tabla se puede observar que el cemento UGC tiene una expansión potencial a 14 días muy buena, ya que el máximo permisible según la norma 0.012 % para la cantidad de barras evaluadas en el laboratorio.

Para la prueba que describe la norma ASTM C-1038-89 la cual determina la expansión de barras de mortero de Cemento Pórtland, los resultados obtenidos son los siguientes.

Tabla IX **Lectura de barras para la expansión de Cemento Pórtland**

Barra	Longitud inicial	Lectura a 14 días	Lectura a 1 mes	% Expansión
MA-5	11.9953	11.9955	11.9956	0.002
MA-6	11.9953	11.9956	11.9956	0.002
MB-5	11.9953	11.9958	11.9958	0.004
MB-6	11.9953	11.9958	11.9959	0.005
MB-7	11.9953	11.9959	11.996	0.006

De acuerdo con la norma el cemento UGC evaluado en este ensayo, como se observa en la tabla, se considera que esta en el rango de lo permisible, lo cual indica que el cemento contiene poco sulfato de fabrica.

Figura 10 **Elaboración de las barras en el laboratorio**



Figura 11 Almacenamiento de barras de mortero de cemento



5.3 Ensayos para determinar el contenido de cloruros

Para evaluar el contenido de cloruros en el concreto se realizaron las pruebas de acuerdo a la norma ASTM C 1218/C 1218M-99, esta norma determina la cantidad de cloruro soluble en el concreto o morteros de Cemento Pórtland.

Esta prueba permite conocer si el concreto ha iniciado con la corrosión del acero, además hay agregados que contienen cloruro, este puede ser encontrado por el uso de esta prueba.

Para este trabajo se realizaron 12 extracciones de muestras de concreto de lugares cercanos al mar y para comparar se ensayaron 6 muestras de concreto obtenidas en la capital de Guatemala.

El procedimiento para determinar si en el concreto existe cloruro soluble es el siguiente:

1. Extracción de la muestra de concreto, por taladro o barrenado.
2. Se pulveriza la muestra para que todo el material pase el cedazo número 20. Se debe mezclar el material transfiriéndolo por lo menos 10 veces.
3. Seleccionar la muestra que tenga una masa de 10 g. se pesa la muestra a los 0.01 g mas cercanos
4. Colocar la muestra en una copa de 250 mL.
5. Agregar 50 mL de reactivo
6. Hervir por 5 minutos, cubriendo la muestra con un vidrio.
7. Esperar 24 horas
8. Filtrar por gravedad a través de una textura fina.
9. Transferir el filtrado a una copa de 250 mL
10. Agregar 3 mL ácido nítrico y 3 ml de peroxido de hidrogeno
11. Cubrir la copa con un vidrio y esperar por 2 minutos
12. Caliente la copa, no debe de hervir por más de unos segundos.
13. Quitar del plato caliente, es importante guardar la copa cubierta para prevenir la pérdida de cloruro por volatilización.
14. Pesar la muestra.

Para las pruebas realizadas estos fueron los resultados obtenidos:

Tabla X Cloruro soluble en agua para concreto en lugares cerca del mar

Muestra	Edificio	Lugar	Peso (g)	Peso de cloruro (g)	Porcentaje de cloruro
1	Muelle	Columna	10.01	0.031	0.3097
2	Muelle	Columna	10.00	0.025	0.2500
3	Puente	Baranda	10.00	0.026	0.2600
4	Puente	Baranda	9.99	0.025	0.2503
5	Puente	Baranda	9.98	0.027	0.2705
6	Puente	Baranda	10.00	0.027	0.2700
7	Edificio	Columna	10.01	0.026	0.2597
8	Edificio	Columna	10.01	0.03	0.2997
9	Casa	Columna	10.01	0.026	0.2597
10	Casa	Columna	10.01	0.027	0.2697
11	Casa	Columna	10.00	0.026	0.2600
12	Casa	Columna	10.00	0.028	0.2800

Tabla XI Cloruro soluble en agua para concreto en la ciudad

Muestra	Edificio	Lugar	Peso (g)	Peso de cloruro (g)	Porcentaje de cloruro
1	Tadeus	Losa	10.01	0.00018	0.001798
2	Tadeus	Losa	10.00	0.00015	0.001500
3	Puente	Muro	10.00	0.00025	0.002500
4	Puente	Muro	9.99	0.00021	0.002102
5	Puente	Muro	9.98	0.00024	0.002405
6	Puente	Muro	10.00	0.00021	0.002100
7	Cofiño	Losa	10.01	0.00019	0.001898
8	Cofiño	Losa	10.01	0.00011	0.001099

5.4 Discusión de resultados

5.4.1 Discusión de resultados carbonatación

En la tabla V se pueden ver los resultados de las muestras obtenidas en edificaciones construidas recientemente, tal son los casos de los edificios de Cofiño Stahl zona 5, Edificio Miraflores zona 11 y edificio Tadeus zona 14, los cuales no tiene 10 años de construcción, pero las estructuras en los sótanos ya presentan una indicación del inicio de la carbonatación, debido al dióxido de carbono que ha reaccionado en el concreto. Pero la profundidad de carbonatación para estos edificios no presenta ningún riesgo para la armadura de acero ya que el proceso está iniciando y el recubrimiento está según las especificaciones requeridas para estas estructuras. También se nota que la carbonatación está atacando con mayor rapidez a las columnas ya que se obtuvieron muestras en losas que no presentan muestras del inicio del proceso.

En la tabla IV se observa que el proceso ha penetrado a más de un centímetro, en estas edificaciones que tienen mas de 25 de años de construcción, se encontró que el concreto no es de la misma calidad que el de las muestras que se presentan en la tabla 5.1, ya que se nota que el concreto está muy poroso, lo que ayuda a que el proceso de carbonatación avance con mas facilidad hacia la armadura de acero estructural, la cual en ningún caso presenta daños.

Los datos que se presentan en la tabla VI se obtuvieron en estructuras de tres puentes de la ciudad capital de Guatemala, los cuales son muy transitados y afectados por el dióxido de carbono de los vehículos que circulan a través de ellos.

En estos casos los resultados obtenidos reflejan que la carbonatación, comparada con los datos de las tablas IV y V, tiene un mayor avance hacia el refuerzo de acero de la estructura, ya que el proceso tiene más de 1.5 centímetros, lo que indica como en los otros casos que el proceso está avanzando lentamente. En este caso por ser estructuras con más de 35 años de existir se puede notar que la carbonatación tiene un mayor avance, lo que comprueba lo que indican los libros, y se mencionó anteriormente, ya que la carbonatación progresa con el tiempo pero lo hace con una rapidez decreciente.

De los resultados obtenidos y mostrados en las tablas IV, V y VI se verifica que la carbonatación progresa hacia el interior del concreto y que los procesos se encuentran en el estado de penetración del frente de carbonatación, que es el necesario para que se alcance la posición del refuerzo estructural y este se despacive. En ningún caso el ataque ha llegado al periodo de propagación que corresponde a la etapa de corrosión del refuerzo estructural y esto será posible hasta que el mecanismo pueda avanzar en todo el recubrimiento y logre despavisar la capa protectora iniciando la corrosión.

5.4.2 Discusión de resultados sulfatos

En la tabla VII se tienen los resultados de dos mezclas utilizadas para determinar el cambio de longitud de morteros de cemento expuestos a una solución de sulfato de sodio. Se realizaron dos mezclas para poder comparar los resultados, la mezcla A es la descrita en la norma ASTM C1012-89 y a la mezcla B se le cambió la cantidad de cemento en 100 g, con el propósito de tener una mezcla pobre y verificar si era más susceptible al ataque de sulfatos.

Las barras se almacenaron por tres meses en un tanque con agua de cal saturada, posteriormente se almacenaron en un tanque con sulfato de magnesio por tres meses, en los últimos tres meses se obtuvieron las lecturas, que se reflejan en la tabla VII y que de acuerdo a la norma el porcentaje del cambio de longitud está dentro del rango permisible para las dos mezclas, lo que quiere decir que el cemento UGC de Cementos Progreso utilizado en este ensayo demuestra que se expande cuando es atacado por sulfatos y cuando la mezcla es baja en cemento la expansión es mayor lo que nos demuestra que este cemento, aunque que el porcentaje está dentro del rango permisible, no es adecuado para los ataques de sulfatos. Aunque las barras no presentan ningún cambio volumétrico con el tiempo esto puede suceder debido a que el cemento no es resistente a sulfatos.

En la tabla VII se muestran los resultados obtenidos de cuatro barras elaboradas para chequear la expansión potencial del cemento UGC de Cementos Progreso, se realizaron dos barras con la mezcla descrita en la norma y las otras dos barras se les redujo el cemento para observar si la expansión era mayor lo cual dio positivo, esto demuestra que el cemento utilizado se expande y esto contribuye en forma perjudicial cuando los cementos son atacados por sulfatos, ya que al expandirse permite que minerales puedan entrar y descomponer el concreto cuando se encuentran en diferentes niveles de concentración.

En la tabla IX se muestran resultados de la expansión de mortero de cemento, al igual que en las tablas VII y VIII, para este ensayo se realizaron dos mezclas para tener una referencia de la expansión del cemento UGC de cementos progreso, al chequear la tabla podemos observar que el cemento se expande en un mínimo porcentaje, pero esto está indicando que el cemento ya contiene sulfatos que pueden afectar al concreto. La mezcla B tiende a expandirse mas que la mezcla A debido a que se bajo la cantidad de cemento, por lo tanto la relación agua/cemento es mayor.

5.4.3 Discusión de resultados cloruros

Los resultados de la tabla X reflejan la cantidad de cloruro soluble en las estructuras ubicadas cerca del mar, donde las cuatro edificaciones están ubicadas a 150 metros del mar. El rocío del mar les llega directamente a sus estructuras, la lluvia puede lavar gran parte de los cloruros que se depositan en las estructuras pero esta a la vez ocasiona la acumulación de éstos en las partes bajas, lo que da la oportunidad de penetrar en el concreto.

En estas estructuras se puede observar que se tiene un porcentaje bastante alto de cloruro, lo que está provocando signos visibles de un ataque fuerte de cloruros a la vez estas presentan signos pequeños de corrosión en las partes bajas de las estructuras, el ataque es más severo en el muelle, el puente y en el edificio que en la casa, ya que esta casa tiene 5 años de construcción y las otras estructuras pasan de los 40 años de construcción, debido a esto el porcentaje de cloruro se ve reflejado en la tabla.

Estos resultados al compararlos con los de la tabla XI podemos observar que en la ciudad el porcentaje de cloruros es bajo, por lo tanto se puede decir que es despreciable, aunque no se tiene que descuidar ya que el ingreso de cloruros pudo estar presente en la mezcla por el empleo de un agregado contaminado o por algún aditivo que contenía cloruro.

Se debe de recordar que en el ataque de cloruros la acción principal es la corrosión del acero de refuerzo, y debido ha esto se daña en concreto que se está alrededor.

CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos en las evaluaciones realizadas para la carbonatación los testigos demuestran que el ataque es mayor en columnas y muros que en losas, además se verifica que la carbonatación deteriora al concreto lentamente y perjudicial en concretos porosos, ya que las muestras obtenidas en las edificaciones donde no se fundió con concreto premezclado la profundidad de carbonatación es mayor en relación a los otros concretos.
2. Con relación a los sulfatos, se demuestra claramente que el cemento utilizado para la elaboración de los morteros, es aceptable para el ataque de sulfatos en cantidades mínimas.
3. Los resultados a largo plazo confirman la importancia de la relación agua cemento y la permeabilidad resultante como factores primordiales en el comportamiento bajo del ataque de sulfatos.
4. El comportamiento del cemento fue mejor con la relación agua cemento alta ya que se obtuvieron resultados dentro del rango permisible de acuerdo a lo indicado en las normas.
5. La inmersión continua en solución de sulfato de sodio de barras y cubos dio como resultado un mejor comportamiento en los cubos, ya que estos no presentan deterioro alguno.

6. Se demuestra que la cantidad de cloruros afecta más en zonas cercanas al mar que en zonas urbanas.

7. Se verifica que el concreto debido a sus componentes pueden contener cloruros debido a un agregado contaminado o por aditivos que contienen cloruros.

RECOMENDACIONES

1. Para evitar la corrosión en estructuras de concreto armado es debido al ataques de carbonatación, cloruros y sulfatos se debe supervisar estrictamente el recubrimiento especificado en planos de construcción.
2. El ingeniero supervisor de proyectos debe de verificar que los agregados y el agua no estén contaminados para lograr un concreto de buena calidad y que sea durable.
3. La relación agua cemento debe de ser la adecuada ya que con esto se logra un concreto de buena durabilidad.
4. El mezclado de los agregados se debe de realizar adecuadamente, esto ayudará a que la penetrabilidad de cualquier agente no sea en forma lineal y tarde más tiempo en llegar al acero de refuerzo estructural.
5. El mantenimiento en estructuras de concreto es fundamental, ya que esto ayudará a evitar que cualquier agente destructor penetre con facilidad en el concreto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Simone Kochevki, Camper. "Deterioro, durabilidad y mantenimiento de estructuras de concreto", **Revista IMCYC**,: 2. 2008.
- 2 Adam M Neville. **Tecnología del concreto**. (4 ta. Ed. México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 2000) pp. 348-356
- 3 C. Powers. L.E. Copeland. J.C. Haves, **Permeability of Portland cement paste**. (*J. Amer. Concrete. INS*, 1994) p 285.
- 1.1.1.1.1.1 4 U.S. Bureau of Reclamation, 4913-92, **Procedure for water permeability of concrete**. (Concrete manual, part. 2, 9th Edn, Denver, Colorado, Michigan, 1994) 24 p.
- 1.1.1.1.1.2
- 5 Luís Fernández Luco, "Corrosión por carbonatación", **Revista IMCYC**,: 1, 2005.
- 6 Zía E. Lee A. **Influencia de los carbonatos sobre la durabilidad en estructuras de concreto**. (1ra ed. México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1984,) 22 p.
- 7 Roberto Uribe Afif, "Concreto durable, el inicio del cambio", **Revista Construcción y Tecnología**, IMCYC, febrero 2000.
- 8 *ACI 201.2R-1992, Guide to durable concrete, ACI Manual of concrete Practice, (Part 1. Materials and General Properties of Concrete, Detroit, 1994) 41p.*
- 9 *Annual Book of ASTM Standard. ASTM, 2002, Vol .04.02.*

- 10 Girón Vargas Humberto Alejandro, "Ataque por cloruros en el concreto", **Revista IMCYC**. Octubre 1998.
- 11 Castro Borges, Pedro. **Corrosión en estructuras de concreto armado**. (2da. Ed. México: Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 2001) 125p.
- 12 ACI comité 318-89. **Reglamento de las construcciones de concreto reforzado (318-89) y comentarios**. (American Concrete Institute 1989).

BIBLIOGRAFÍA

- 1 *Instituto mexicano del cemento y del concreto. **Durabilidad del concreto.** México 1990, 87 p*
- 2 *Dale, Eugene L. **Como evitar problemas en el concreto**, revista IMCYC, México 1992, 20 p.*
- 3 Edward G. Nawy. *Concreto reforzado un enfoque básico*, Prentice Hall, Hispanoamericana, 1988, 763 p.

APÉNDICE

Figura 12 **Equipo utilizado para realizar los morteros de cemento**



Figura 13 Testigo de concreto donde se detecta la zona carbonatada





O.T. No. 23436

Informe No. S.C. - 631

Interesado: Edwin Giovanni González García – Camé No. 198812216
Proyecto: Trabajo de Graduación "INTRODUCCION A LA DURABILIDAD DEL CONCRETO EN GUATEMALA"
Asunto: Diseño de mezclas y resistencia a compresión y tensión a 3, 7 y 28 días.
Fecha: 06 de Agosto de 2008.

- 1. Generalidades** el interesado proporcionó cada uno de los materiales siendo estos arena y cemento, de cada una de las obras muestreadas.
- 2. Procedimiento:** se trabajó de acuerdo a las instrucciones del interesado, en lo que se refiere a la proporción y conforme a la norma ASTM C-109, indicando realizar los ensayos a 7, 14 y 28 días.
- 3. Resultados:**

3.1 Resistencia a la Compresión:

MEZCLA NO. 1								
Proporción			Rel. A/C	Edad (días)	Carga (kg)			**Esfuerzo promedio (ver nota) kg/cm ² (PSI)
Cemento (g)	Arena (g)	Agua (ml)			Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	
400	1100	194	0.485	7	3620	3620	----	140.28 (1995.16)
				14	3980	4160	----	157.71 (2243.18)
				28	5400	5480	----	210.80 (2998.26)



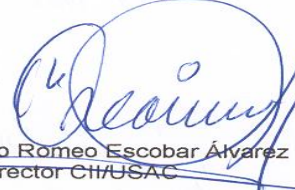
MEZCLA NO. 1								
Proporción			Rel. A/C	Edad (días)	Carga (kg)			**Esfuerzo promedio (ver nota) kg/cm ² (PSI)
Cemento (g)	Arena Lavada (g)	Agua (ml)			Cubo 1	Cubo 2	Cubo 3	
300	1100	194	0.647	7	1820	2160	-----	77.11 (1096.79)
				14	3080	2720	-----	112.38 (1598.34)
				28	4180	4240	-----	163.14 (2320.34)

****NOTA:** calculado sobre cada uno de los valores de carga obtenidos.

Atentamente:


Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección Aglomerantes y Morteros

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCION CONCRETOS
GUATEMALA, C. A.

Vo. Bo. 
Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez
Director CII/USAC

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
DIRECCION
Guatemala, C. A.