



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LA EXTRACCIÓN
ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS A ESPECIMENES DE
CONCRETO CON TRES GRADOS DE CONTAMINACIÓN CON
CLORURO DE SODIO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIA DE MATERIALES

PRESENTA

ROSA ELBA NUÑEZ JAQUEZ



**CENTRO DE
INFORMACIÓN**

Egresada del programa de Maestría en Ciencia de Materiales con acuerdo de
reconocimiento de validez oficial de estudios 964031.

Chihuahua, Chih.

Diciembre del 2000



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LA EXTRACCIÓN
ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS A ESPECIMENES DE
CONCRETO CON TRES GRADOS DE CONTAMINACIÓN CON
CLORURO DE SODIO.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIA DE MATERIALES

PRESENTA

ROSA ELBA NUÑEZ JAQUEZ

DIRECTORA

DRA. CITLALLI GAONA TIBURCIO

Egresada del programa de Maestría en Ciencia de Materiales con acuerdo de reconocimiento de validez oficial de estudios 964031.

Chihuahua, Chih.

Diciembre del 2000

AGRADECIMIENTOS.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados y su director Dr. David Ríos Jara, le agradezco todas las facilidades otorgadas en la realización de mi Tesis de Maestría.

A mi asesora de Tesis Dra. Citlalli Gaona Tiburcio, agradezco sus aportaciones y asesoría además deseo expresarle mi agradecimiento por haberme interesado a trabajar sobre el presente tema, transmitiéndome la importancia de realizarlo.

Al M.C. Carlos P. Barrios Durstewitz, por su gran comprensión y valiosos apoyo en los trabajos relacionados con esta tesis, así como todas sus sugerencias y aportaciones.

A los miembros del Comité de Sinodales por su valioso tiempo brindado a la revisión del presente trabajo, además de sus acertadas opiniones en la mejora de esta tesis.

Dr. Alberto Martínez Villafañe (CIMAV).

Dr. Facundo Almeraya Calderón (CIMAV).

Dr. Enrique Ortega Rivas (UACH).

El presente trabajo se logró desarrollar por la colaboración y sugerencias del M.C. Antonio Ríos y M.C. Adán Borunda.

A la M.C. Genoveva Domínguez Sánchez y Q.B.P. Flor Gabriela Quiñones López por sus sugerencias y apoyo en el presente trabajo.

A mis padres Francisco y Rosa, por su paciencia, cooperación y comprensión en la realización de esta tesis, al igual que mis hermanos Paty y Javier.

Gracias a todos los que de una u otra forma colaboraron para la realización de mi tesis de Maestría.

Dedicada

*A mis padres: Francisco y Rosa,
nuestra tesis terminada.*

*A mi familia: Paty, Javier,
Manuel y Joshua.*

A Carlos.

CONTENIDO.

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| I. EL CONCRETO | 6 |
| 1.1 GENERALIDADES SOBRE EL CONCRETO | 6 |
| 1.1.1 Agregados | 7 |
| 1.1.2 Pasta | 7 |
| 1.1.3 Proporcionamiento | 11 |
| 1.1.4 Dosificación | 12 |
| 1.2 CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO | 12 |
| 1.2.1 Mecanismo de corrosión en estructuras de concreto | 14 |
| 1.2.2 Tipos de corrosión en estructuras de concreto reforzado | 20 |
| 1.2.3 Causas de deterioro en concretos | 21 |
| 1.2.3.1 Deterioro químico | 22 |
| 1.2.3.2 Deterioro físico | 23 |
| 1.2.3.3 Corrosión del refuerzo | 24 |
| 1.3 LOS IONES CLORURO (Cl) | 25 |
| 1.4 METODOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN | 32 |
| 1.4.1 Protección directa del acero | 34 |
| 1.4.2 Protección indirecta a través del concreto | 34 |
| II. EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS | 36 |
| 2.1 MIGRACION IONICA | 39 |
| 2.2 MECANISMO | 43 |
| 2.3 ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA EEC. | 48 |
| 2.2.1 Fuente de poder | 48 |
| 2.2.2 Ánodo | 48 |
| 2.2.3 Electrolito | 49 |
| 2.2.4 Medio electrolítico | 51 |
| 2.4 EFICIENCIA | 52 |
| 2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS | 53 |

| | |
|--|----|
| III. DESARROLLO EXPERIMENTAL | 56 |
| 3.1 ESPECIMENES | 56 |
| 3.1.1 Materiales empleados | 56 |
| 3.1.2 Preparación de especímenes | 57 |
| 3.2 NOMENCLATURA | 59 |
| 3.3 SISTEMA EXPERIMENTAL | 61 |
| 3.3.1 Materiales y reactivos empleados | 61 |
| 3.3.2 Procedimiento | 61 |
| 3.4 DETERMINACIÓN DE CLORUROS | 65 |
| 3.4.1 Equipos empleados | 66 |
| 3.4.2 Reactivos | 66 |
| 3.4.3 Procedimiento | 66 |
| 3.4.4 Cálculo del porcentaje de cloruros | 68 |
| 3.5 DETERMINACIÓN DEL pH | 69 |
| 3.5.1 Materiales y reactivos empleados | 69 |
| 3.5.2 Procedimiento | 69 |
| IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS | 70 |
| 4.1 CONCENTRACION DE CLORUROS | 70 |
| 4.2 pH | 76 |
| 4.3 ANALISIS VISUAL | 77 |
| 4.4 PARÁMETROS ELÉCTRICOS | 81 |
| V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 83 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 83 |
| 5.2 RECOMENDACIONES | 85 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 87 |

INTRODUCCIÓN.

El concreto es uno de los materiales de construcción más empleado a escala mundial. Este junto con la varilla de acero tiene muy buenas propiedades estructurales que permiten su uso en un gran número de estructuras como puentes, estructuras para estacionamientos, pilas marinas, muelles, altos edificios, etc.



Figura 1. Puente de concreto reforzado.

Todas las estructuras de concreto que se construyeron antes de los finales de la década de los 60's presentaban una gran funcionalidad y servicio, pero a partir de esta fecha se empezaron a notar delaminaciones y desprendimientos del concreto, esto que era común en las zonas costeras, llegó a ser también muy común en sitios donde se presentaba la nieve.

A mediados de los 70's se reconoció que el problema era causado por la corrosión del acero de refuerzo en el concreto.

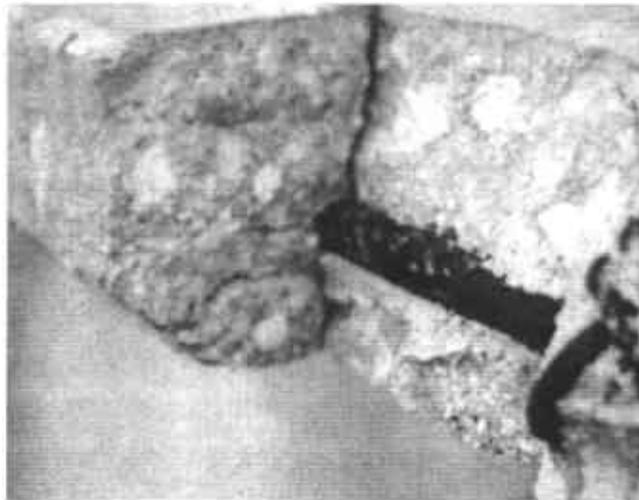


Figura 2. Deterioro inducido por corrosión sobre concreto.

Como anteriormente se mencionó, el deterioro del refuerzo en las estructuras de concreto es el principal problema de corrosión. Se tiene por ejemplo, que de acuerdo a la Strategic Highway Research Program (SHRP) [1] los costos de reparación o reemplazo de estructuras para las agencias de caminos se estiman en más de 20 billones de dólares, y estos se incrementan aproximadamente en 500 millones de dólares por año.

El concreto se obtiene por la hidratación del cemento, al mezclar el cemento con el agua este se endurece formando un sólido pétreo con cierta porosidad o red de poros, que a su vez retienen una solución con un pH altamente alcalino (entre 12.5 y 14), debido a esto el acero embebido en el concreto no se corroe. Sin la presencia de iones como los cloruro o la carbonatación del concreto que disminuye el pH, la varilla se puede mantener pasivada.

Así se tiene que las dos principales causas de corrosión en el refuerzo son:

- Rompimiento localizado de la película pasiva en el acero a causa de los cloruros.
- Rompimiento generalizado de la pasividad por la neutralización del concreto predominantemente por reacciones con el CO_2 .

De las dos causas mencionadas anteriormente, la que interesa en el presente trabajo es la primera.

Los iones cloruros pueden encontrarse en el concreto debido a que: pueden estar en el cemento, algunas veces ir en el agua de mezclado, existir como contaminantes en los agregados, o añadidos intencionalmente como aditivos y constituyentes químicos, y también pueden penetrar desde el exterior como sucede en las atmósferas marinas (agua de mar) y sales de deshielo. Los cloruros juegan un rol importante en la despasivación del acero de refuerzo promoviendo la corrosión cuando la humedad y el oxígeno se encuentran presentes.



Figura 3. Pilar de un muelle con desprendimiento de concreto por corrosión del refuerzo.

Muchos métodos para el control del deterioro de las estructuras de concreto con acero de refuerzo se han desarrollado a partir de conocer la naturaleza del mecanismo de la corrosión y su causa, estos métodos consisten básicamente en desaparecer alguno de los elementos que conforman el sistema corrosivo, ejemplo de lo anterior son los recubrimientos epóxicos sobre la varilla, cubiertas sellantes o membranas (que evitan la entrada de agentes agresivos como los iones cloruro), y la protección catódica. Otros se presentan más drásticos o perjudiciales, además que no eliminan por completo el problema como es el remplazar las zonas dañadas por concreto nuevo o lo que comúnmente se conoce como “parchado”.

La idea de trabajar con técnicas electroquímicas inició en los años 70's al descubrir la causa de la corrosión en estructuras de concreto. La remoción de cloruros o extracción electroquímica de cloruros (EEC), se empezó a aplicar en campo en los años 80's con proyectos que empleaban el que llegaría a ser "Sistema Norcure de remoción de cloruros", y los resultados fueron sobresalientes. Esta técnica es un método de restauración que remueve los cloruros presentes en las estructuras e incrementa la alcalinidad alrededor del refuerzo.

La EEC se basa en el principio de que cargas eléctricas diferentes se atraen y cargas iguales se repelen, el método consiste en colocar un metal en la superficie del concreto, (ambos en contacto con un electrolito), aplicar un campo eléctrico entre el metal y el refuerzo embebido en el concreto por medio del paso de una corriente eléctrica de forma que las varillas se carguen positivamente y la malla metálica se cargue negativamente, así las cargas negativas (como los cloruros) se moverán con sentido hacia afuera, en dirección a la superficie del concreto.

En la actualidad países como Noruega, Suecia, Inglaterra, Alemania, Estados Unidos, Canadá, Japón, Suiza e Italia realizan investigaciones y documentan la técnica. México al igual que estos países tiene problemas de corrosión en su infraestructura que no han sido evaluados y que están produciendo grandes pérdidas económicas y también humanas. Los problemas de corrosión son muy variados y se presentan principalmente en las costas del país, de ahí que resulta interesante el estudio y la aplicación de la EEC en México.

Debido a lo anteriormente mencionado, surge el objetivo del presente trabajo, el cual consiste en aplicar la técnica, sus parámetros, determinar las características, desventajas, así como los resultados que se pueden esperar con diferentes grados de contaminación por sal, sumando a ello factores como el tipo de cemento, agregados y varilla con los que se cuenta en este país.

En el capítulo 1 se presenta una introducción al conocimiento básico del concreto como material de construcción, detallando sus características y propiedades más importantes, así como el efecto que cada uno de ellos tiene en el fenómeno de la corrosión y la manera en que las características del propio concreto pueden aumentarla o disminuirla.

En la parte de extracción electroquímica de cloruros, capítulo 2, se plantean de forma detallada los conocimientos que se tienen sobre el método, mecanismo de reacción que se lleva a cabo, especificaciones de materiales a emplear e instalación y ventajas o desventajas del método.

Dentro del capítulo 3 se exponen detalles sobre el desarrollo experimental del estudio; y en el capítulo 4 se muestran tanto los resultados de las pruebas realizadas, como el análisis de los mismos.

El capítulo 5 es la presentación de las conclusiones finales, y para terminar, se incluyen las referencias bibliográficas.

I. EL CONCRETO.

Actualmente, el uso del concreto en estructuras esta tomando mucho más auge debido a que el concreto es un material muy versátil y por supuesto como cualquier material de construcción, tiene sus características propias y únicas que no pueden ser igualadas por otro material:

1. Alta resistencia a la compresión
2. Facilidad para elaborar estructuras modulares precoladas
3. Soluciones adaptadas a los requerimientos del cliente
4. Durable en el tiempo
5. Resistente al fuego
6. Precio competitivo.

Esta características colocan al concreto en una situación privilegiada capaz de satisfacer los requerimientos necesarios para soportar cargas, cubrir espacios y cumplir con funciones de durabilidad, estética y aislamiento.

1.1 GENERALIDADES SOBRE EL CONCRETO.

La definición del concreto sería la siguiente: *“Es una combinación o mezcla de dos componentes: agregados y pasta”*. La pasta compuesta de cemento portland y agua, une a los agregados (arena y grava ó piedra triturada), la cual endurece formando una piedra artificial semejante a una roca, este endurecimiento se debe a la reacción química entre el agua y el cemento. Lo anterior, junto con la varilla de acero conforma el sistema conocido como concreto reforzado [2].

1.1.1 Agregados.

Los agregados generalmente se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Constituyen del 60 al 75% del volumen total del concreto y del 70 al 85% en peso, e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido, en las proporciones de las mezclas, y en la economía.

Finos. Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas, y con tamaños de partícula que pueden llegar hasta 10 mm, que puede pasar por un tamiz No. 4 con 4.7 mm (3/16") de abertura entre hilos.

Gruesos. Consisten en una grava o combinación de gravas o agregados triturados, cuyas partículas sean mayores que 10 mm ó que se retengan en la malla No. 16, y pueden variar hasta 152 mm. El tamaño máximo de agregado que se emplea comúnmente va de 19 mm a 25 mm, y se localizan en depósitos de corrientes naturales de agua o bien pueden obtenerse de canteras.

Los agregados deben consistir en partículas con resistencia mecánica adecuada así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie, y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto [3].

1.1.2 Pasta.

La pasta esta compuesta de cemento portland, agua y aire atrapado o aire incluido intencionalmente. Ordinariamente constituye del 25 al 40 % del volumen total del concreto.

Cemento. El cemento portland se produce al pulverizar el clínker, que consiste principalmente en silicatos hidráulicos de calcio junto con algunos aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio. Normalmente contiene una o más formas de sulfato de calcio (yeso), como adición de la molienda.

Durante la calcinación en la fabricación del clínker de cemento portland. El óxido de calcio se combina con los componentes ácidos de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales, que constituyen el 90% del peso del cemento:

| | | | |
|-----------------------------|---|---|-----------------------|
| Silicato tricálcico | $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ | = | C_3S |
| Silicato dicálcico | $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ | = | C_2S |
| Aluminato tricálcico | $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ | = | C_3A |
| Aluminoferrito tetracálcico | $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ | = | C_4AF |

En presencia del agua los cuatro compuestos se hidratan (TABLA 1.1) para formar nuevos compuestos, que constituyen la infraestructura de la pasta del cemento endurecido en el concreto [4]:

TABLA 1.1. Transformaciones de los compuestos del cemento portland.

| | | | | | | |
|--|---|----------------------------------|---|---|---|---|
| $2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ (Silicato tricálcico) | + | $6\text{H}_2\text{O}$ (Agua) | = | $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Gel de tabermorita) | + | $3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio) |
| $2(2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ (Silicato dicálcico) | + | $4\text{H}_2\text{O}$ (Agua) | = | $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (Gel de tabermorita) | + | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio) |
| $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcico) | + | $12\text{H}_2\text{O}$ (Agua) | + | $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio) | = | $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{Ca}(\text{OH})_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Hidrato de aluminato tetracálcico) |
| $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (aluminoferrito tetracálcico) | + | $10\text{H}_2\text{O}$ (Agua) | + | $2\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio) | = | $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Hidrato de aluminoferrito de calcio) |
| $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcico) | + | $10\text{H}_2\text{O}$ (Agua) | + | $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Yeso) | = | $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (Hidrato monosulfo aluminato de calcio) |

Se fabrican diversos tipos de cemento portland para satisfacer diferentes necesidades químicas y físicas, para propósitos específicos (TABLA 1.2).

En México se emplean las normas NMX C-1 para el cemento portland, NMX C-2 para el cemento portland puzolana y NMX C-175 para el cemento portland con escoria de alto horno. Esta nueva normatividad recién entró en vigor (el 19 de octubre de 1999), y se denomina NMX-C-414-ONNCCE-1999, la cual se enfoca a los aspectos de comportamiento del producto en obra (resistencia y durabilidad), además de abarcar seis tipos de cementos (TABLA 1.3), cada

uno con subclasificaciones en diferentes clases resistentes y características especiales (TABLAS 1.4-1.5) [5].

TABLA 1.2. Tipos de cementos^x.

| CEMENTO | NOMBRE | CARACTERÍSTICAS |
|------------|--|--|
| Tipo I | Normal | De uso general |
| Tipo IA* | Normal inductor de aire | |
| Tipo II | De resistencia moderada a los sulfatos | Uso como precaución en el ataque moderado de sulfatos |
| Tipo IIA* | De resistencia moderada a los sulfatos, inductor de aire | |
| Tipo III | De alta resistencia a edad temprana | Proporciona resistencias elevadas a edades tempranas. |
| Tipo IIIA* | De alta resistencia a edad temprana, inductor de aire | |
| Tipo IV | De bajo calor de hidratación | Se usa para mantener en un valor mínimo la cantidad y velocidad de generación de calor provocada por la hidratación. Desarrolla resistencia a velocidad muy baja |
| Tipo V | De resistencia elevada a los sulfatos | Se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de sulfatos |

TABLA 1.3. Tipos de cementos subclasificados en clase resistente y características especiales.

| CLASIFICACIÓN | | | |
|---------------|--|--------------------------------|--------------------------------|
| | POR TIPO | POR CLASE RESISTENTE | POR CARACTERÍSTICAS ESPECIALES |
| CPO | Cemento portland ordinario | 20 30 30 R 40 40 R | RS BRA BCH B |
| CPP | Cemento portland puzolánico | | |
| CPEG | Cemento portland con escoria granulada de alto horno | | |
| CPC | Cemento portland compuesto | | |
| CPS | Cemento portland con humo de sílice | | |
| CEG | Cemento con escoria granulada de alto horno | | |

^x Estos cementos corresponden en su composición a los tipos ASTM I, II y III respectivamente, con la salvedad que pequeñas cantidades de material inductor de aire han sido mezcladas junto con el clínker durante su fabricación.

TABLA 1.4. Clasificación de los cementos por su resistencia mecánica a la compresión.

| CLASE RESISTENTE | RESISTENCIA A LA COMPRESION N/mm ² (kg/cm ²) | | |
|------------------|--|----------|----------|
| | 3 DÍAS | 28 DIAS | |
| | Mín. | Mín. | Máx. |
| 20 | -- | 20 (196) | 40 (392) |
| 30 | -- | 30 (294) | 50 (490) |
| 30 R | 20 (196) | 30 (294) | 50 (490) |
| 40 | -- | 40 (392) | -- |
| 40 R | 30 (294) | 40 (392) | -- |

TABLA 1.5. Clasificación de los cementos por su característica especial.

| NOMENCLATURA | CARACTERÍSTICAS ESPECIALES | EXPANSIÓN POR ATAQUE DE SULFATOS (MÁX %) | | EXPANSIÓN POR LA REACCIÓN ÁLCALI AGREGADO (MÁX %) | | CALOR DE HIDRATACIÓN (MAX.) KJ/Kg (kcal/kg) | | BLANCURA (%) |
|--------------|----------------------------------|--|-------|---|---------|---|----------|--------------|
| | | 6 meses | 1 año | 14 días | 56 días | 7 días | 28 días | |
| RS | Resistente a los sulfatos | 0.05 | 0.10 | | | | | |
| BRA | Baja reactividad álcali agregado | | | 0.020 | 0.060 | | | |
| BCH | Bajo calor de hidratación | | | | | 250 (60) | 290 (70) | |
| B | Blanco | | | | | | | Mayor a 70 |

Agua. En el agua se verifican las reacciones de diversos componentes del cemento [6]. Cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto. Los principales contaminantes o agentes que causan algún efecto en el agua son:

- Carbonatos y bicarbonatos alcalinos
- Cloruros
- Sulfatos
- Sales de hierro
- Sales orgánicas
- Aguas de mar, ácidas, alcalinas, de enjuague, de desperdicios industriales y negras
- Impurezas orgánicas
- Azúcar
- Sedimentos o partículas en suspensión
- Aceites
- Algas

Entre menor cantidad de agua se utilice, se tendrá una mejor calidad del concreto, a condición de que se pueda consolidar adecuadamente [7].

1.1.3 Proporcionamiento.

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se seleccionan sus características basándose en el uso que se propone dar al concreto, a las condiciones de exposición, al tamaño y forma de la estructura, y a las propiedades físicas del concreto (tales como resistencia) que se requieran para la estructura. Una vez que estas características se han elegido, la mezcla se debe proporcionar a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayor parte de las propiedades que se busca obtener en el concreto endurecido dependen básicamente de la calidad de la pasta de cemento, el primer paso para proporcionar una mezcla de concreto consiste en seleccionar una relación agua-cemento acorde con la durabilidad y resistencia requeridas.

Las mezclas de concreto se deben mantener lo más sencillas posible, pues un número excesivo de ingredientes a menudo provoca que la mezcla de concreto sea difícil de controlar [8].

1.1.4 Dosificación.

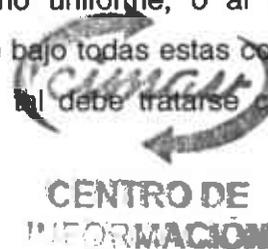
La dosificación es el proceso de pesar o medir volumétricamente e introducir al mezclador los ingredientes para una mezcla de concreto. Para producir concretos de calidad uniforme, los ingredientes deberán medirse con precisión en cada mezcla.

Todos los agregados deben medirse por separado, y de acuerdo a las cantidades establecidas para el tipo de concreto que se va a elaborar. Cuando el concreto es pre-mezclado, este proceso se hace por peso, esta es la forma más exacta para dosificar los materiales. Cuando el concreto es hecho en la obra, los agregados y el agua se pueden medir por volumen en recipientes como los botes alcohólicos, cuidando que no sean golpeados y dañados para no alterar su capacidad. Una forma de conservar los recipientes de medición es que solo se utilicen para ese fin.

La fabricación del concreto en obra no se recomienda para obras pequeñas, pero si para completar los colados y cuando no existe la posibilidad del empleo del concreto pre-mezclado [9].

1.2 CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO.

Idealmente el concreto debe ser un material de construcción consistente y homogéneo, obtenido a partir de una mezcla de cemento, arena y grava; no obstante, en la realidad, el concreto preparado con los mismos materiales y/o el mismo personal, varía grandemente en sus características físicas y químicas; de ahí la enorme variación entre los mismos concretos preparados en diferentes días. Estas variaciones pueden deberse a las que existen en el cemento, la arena y la grava, al mezclado inadecuado o no uniforme, o al grado de intemperismo que predomina durante su colado. Es por esto, que bajo todas estas condiciones se obtiene un material de construcción no homogéneo y como tal debe tratarse cuando se considera su utilización [10].



La mayor parte del concreto que se emplea en los servicios de construcción industrial, se expone en mayor o menor grado a los ambientes corrosivos. Existen numerosos agentes químicos pero no todos atacan al concreto, así que, un medio ambiente corrosivo para el concreto se define como *“aquel medio donde el concreto es susceptible de ser atacado por los agentes químicos que se encuentran presentes”*.

En cualquier ambiente corrosivo, si al concreto se le deja sin proteger, su serviciabilidad se limita.

El concreto confiere al acero una protección de doble naturaleza: por un lado es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del hormigón es un electrolito que puede formar un óxido protector (pasivante), de forma duradera. Esta solución acuosa está constituida principalmente por iones OH^- , a los que se debe la alta alcalinidad.

Las características físicas del concreto como aislante están relacionadas con la estructura de la red de poros que se genera, debido al exceso de agua que es necesario utilizar en el amasado para hacer suficientemente trabajable el material. Todos los poros que están intercomunicados entre sí están relacionados con el concepto de permeabilidad o penetrabilidad, que es la característica fundamental que va a controlar la llegada de agentes agresivos hasta la varilla. La permeabilidad del concreto a una determinada sustancia no depende solo del tamaño y número de poros, como en el caso de los materiales porosos inertes, sino que influyen en ella también fenómenos de adsorción, las reacciones químicas que se pueden producir, el equilibrio de capas eléctricas, etc. Todo ello hace que algunos autores consideren que el concreto se comporta como una membrana semipermeable.

Cuando la humedad ambiental es suficiente, estos poros del concreto están rellenos por un líquido acuoso constituido principalmente por iones OH^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} . Esta composición varía con la edad del concreto, habiéndose demostrado que a partir de los 28 días de edad, el ion Ca^{2+} prácticamente desaparece de la disolución (en un principio se pensó que este era el que ocasionaba la pasividad, debido a su $\text{pH} \approx 12.5$), que pasa a estar constituida casi completamente por NaOH y KOH . A esta elevada alcalinidad (12.5-14), y con el contenido de

O_2 normal en las estructuras enterradas o sumergidas, el acero se recubre de una capa de óxidos muy adherente, compacta e invisible (pasivante) que lo preserva indefinidamente de cualquier signo de corrosión (figura 1.1), mientras el concreto sea de buena calidad, no esté fisurado y no cambie sus características físicas o químicas por agresiones exteriores [11].



Figura 1.1. Acero pasivado en concreto, esta película de óxido protector se rompe en presencia de agentes agresivos como el oxígeno y humedad.

1.2.1 Mecanismo de corrosión en estructuras de concreto reforzado.

Se denomina con el término de corrosión a la reacción química o electroquímica entre un material (generalmente un metal) y su medio ambiente, produciendo un deterioro del metal y sus propiedades; causada por una reacción de óxido-reducción [12].

Así, la corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales (figura 1.2) [13]:

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación.
- Un cátodo, donde ocurre la reducción
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- Un electrolito, en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso.

El grado de protección que puede dar un concreto al acero de refuerzo es, con frecuencia, una función de la calidad, del espesor del recubrimiento y de seguir buenas prácticas constructivas.

La velocidad de corrosión del acero en concreto es generalmente baja. Esto es debido a que el acero está protegido por la pasivación inducida debido a la alta naturaleza alcalina del agua que se encuentra en los poros del concreto. La velocidad de corrosión se ve afectada por el tamaño relativo del cátodo y el ánodo, la concentración de oxígeno, la temperatura y la resistividad eléctrica del electrolito (influenciada por la concentración de sustancias disueltas).

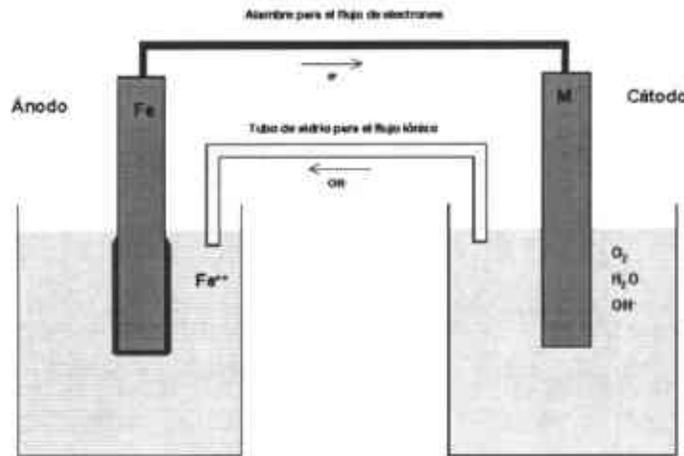


Figura 1.2. Celda electroquímica.

Las reacciones de hidratación que se llevan a cabo en el cemento durante el curado, son de gran interés e importancia ya que uno de los productos de éstas, se encuentra directamente relacionado con la protección que el concreto infiere a los refuerzos de acero.

Los silicatos del cemento, producen con el agua el principal cementante y el hidróxido de calcio, de acuerdo con la siguiente reacción:



o bien:



La cantidad de hidróxido de calcio producido es generalmente suficiente para mantener un pH alrededor de 13 en la solución contenida en los poros del concreto, independientemente del contenido de humedad [14].

Generalmente el concreto no es atacado por sustancias químicas secas y sólidas, para deteriorarlo las sustancias químicas deben estar en solución y sobrepasar una determinada concentración. El concreto es más vulnerable cuando se encuentra bajo el ataque de sustancias agresivas en solución ejerciendo presión sobre alguna de sus superficies, ya que la presión tiende a forzar la solución agresiva dentro del concreto.

La corrosión electroquímica del acero en el concreto resulta de la falta de uniformidad en el acero (diferentes aceros, soldaduras, sitios activos sobre la superficie del acero), contacto con metales menos activos, así como también, de las heterogeneidades en el medio químico o físico (concreto) que rodea al acero. Ahora bien, aunque la potencialidad para la corrosión electroquímica puede existir debido a la falta de uniformidad del acero en concreto, la corrosión normalmente se previene por la formación de esa película de óxido de hierro "pasivante" mencionada con anterioridad. Pero cuando las condiciones de servicio cambian y el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas, se produce el rompimiento de esa película y la corrosión de las armaduras se desencadena con una triple consecuencia:

- El acero disminuye su sección o incluso se convierte completamente en óxido (figura 1.3).
- El concreto puede fisurarse o delaminarse debido a las presiones que ejerce el óxido expansivo al generarse.
- La adherencia armadura-concreto disminuye o desaparece (figura 1.4).

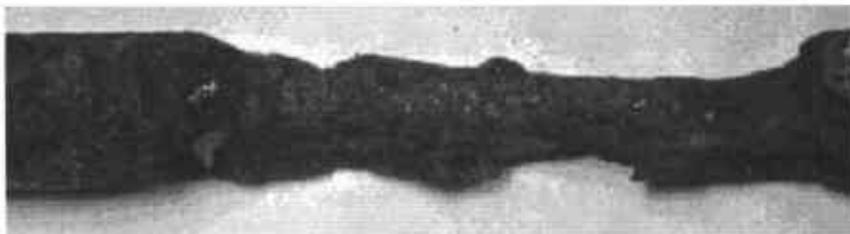


Figura 1.3. Varilla de acero con disminución de su sección debido a la corrosión.



Figura 1.4. Desprendimientos de secciones de concreto debido a la corrosión.

En el acero de refuerzo se pueden distinguir dos tipos de celdas de corrosión: las microceldas, en donde los sitios de actividad anódica y catódica están uniformemente distribuidos sobre el metal, y las macroceldas, en donde los sitios de actividad anódica y catódica están localizados separados entre sí (figura 1.5) [15].

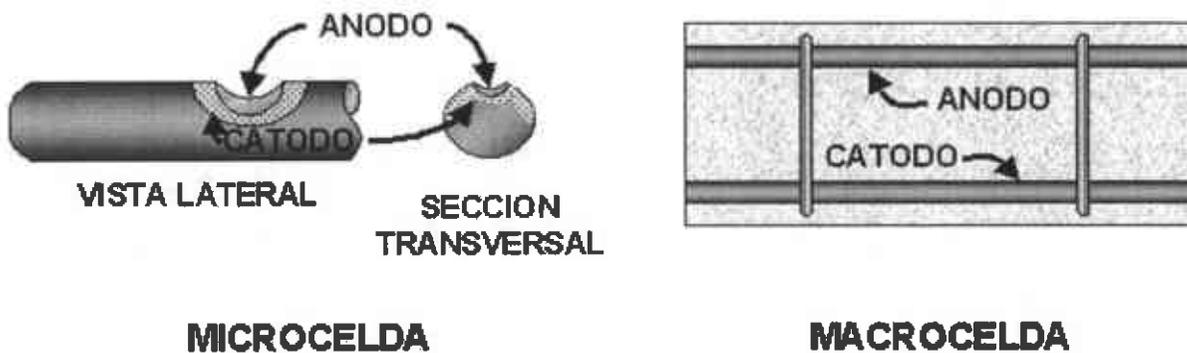


Figura 1.5. Corrosión en microcelda y macrocelda.

Para que la corrosión del acero pueda iniciarse y mantenerse existen dos mecanismos que en general son los más aceptados:

- Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias con agua, o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro material ácido.
- Rompimiento de la película pasiva del acero por la acción electroquímica que involucra al ion cloruro en presencia de oxígeno.

Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y, sin una cantidad mínima crítica, no es posible que se desarrolle con velocidad apreciable. Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las armaduras están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero, cuando las armaduras se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, sin embargo, lo detienen completamente [16].

El concreto es un material poroso, por lo que se puede hablar de la existencia de dos fases: una fase sólida de minerales hidratados y una fase líquida contenida en el interior de los poros (solución del poro).

Actualmente se reconoce que la corrosión del concreto ocurre por un proceso del tipo electroquímico, esto es que la reacción global de corrosión es el resultado de dos o más reacciones electroquímicas parciales, independientes entre sí, que se llevan a cabo en la interfase metal(acero)/electrolito(solución del poro). Dichas reacciones electroquímicas parciales, alejan al metal que se corroe de su estado de equilibrio, dando como resultado su disolución.

En el mecanismo se presenta una reacción anódica, en la cual el hierro se oxida a iones ferrosos (figura 1.6):



Una reacción catódica, en la cual el oxígeno se reduce a iones OH^{-} :

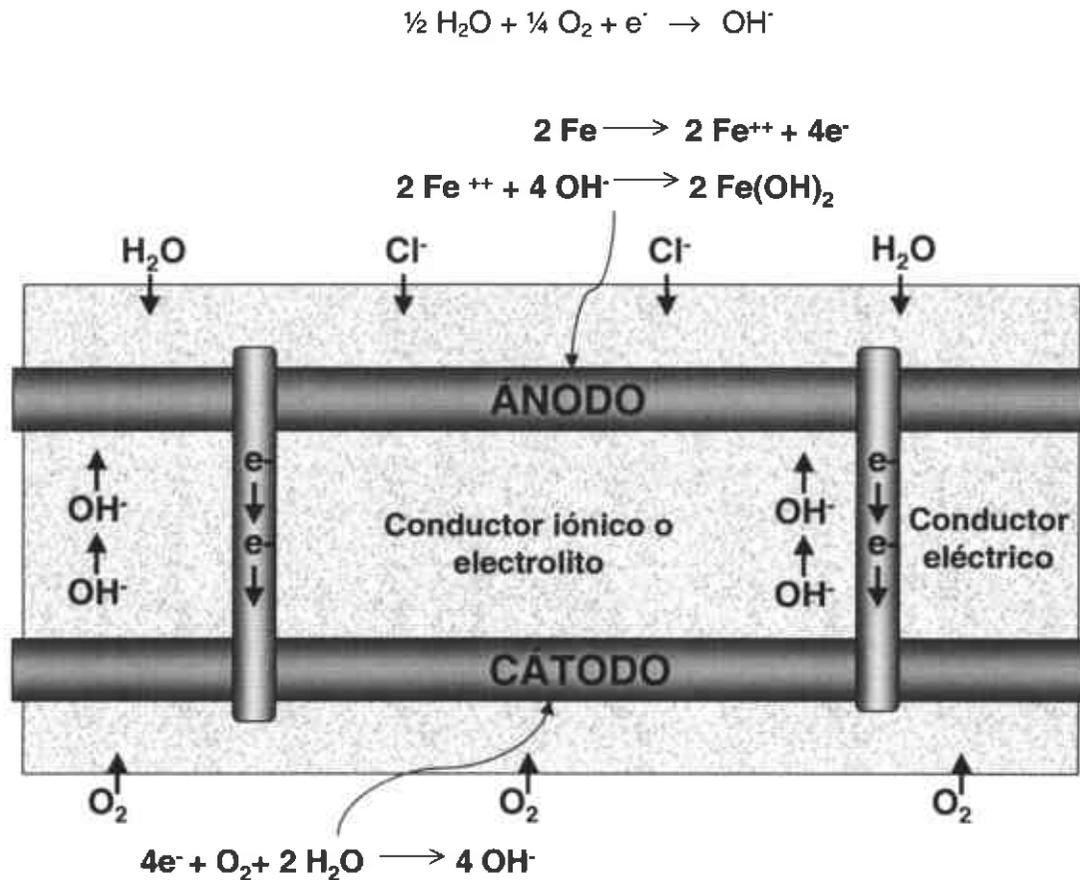
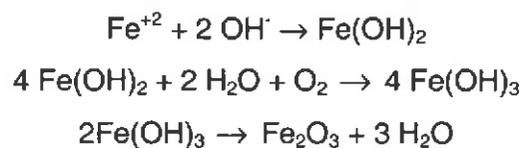


Figura 1.6. Mecanismo de corrosión en estructuras de concreto reforzado.

En una segunda etapa, el ión Fe^{+2} disuelto, reacciona con otros aniones del agua (Cl^- , OH^- , etc.) dependiendo del medio en que se encuentre, y se transforma en otros compuestos por un número de reacciones complejas.

Por ejemplo, en la presencia de oxígeno los iones hierro se combinan con los iones hidróxido. Entonces este último compuesto se oxida en la presencia de humedad para formar óxido férrico:



En el cátodo. Los iones hidrógeno son reducidos o combinados con electrones para formar gas hidrógeno:



Si por cualquier razón la reacción química en el cátodo o en el ánodo no ocurre, la celda es inoperante y la corrosión no se presenta [17].

El mismo efecto que producen los cloruros por ejemplo en una zona costera, se produce fuera de ella con el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso proveniente de industrias que queman gasóleo, o los escapes de los autos, entre otros, originando las mismas consecuencias.

1.2.2 Tipos de corrosión en estructuras de concreto reforzado.

En el concreto armado las formas que puede adoptar la corrosión de la armadura son diversas. Fontana ha clasificado los diferentes tipos o formas de corrosión de acuerdo a la apariencia física del ataque. Según esto, en el caso del acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son los siguientes [18]:

- **Corrosión localizada.** Este ataque tiene lugar solamente en determinadas áreas de la superficie, teniendo lugar en estas una intensificación del proceso corrosivo en comparación con la corrosión generalizada.
 - ***Picaduras.*** Se manifiesta en forma de picaduras estrechas y profundas. Son difíciles de descubrir debido al pequeño diámetro que poseen y porque comúnmente están recubiertas de productos de corrosión.
 - ***Espacios confinados (hendiduras).*** Se presenta en uniones de piezas metálicas, en rendijas, debajo de arandelas, tuercas, remaches, en juntas solapadas o debajo de los depósitos (óxidos o impurezas) u objetos localizados sobre la superficie metálica.
 - ***Bajo esfuerzo.*** Requiere la presencia de un medio corrosivo específico y la presencia de esfuerzos de tensión, ya sea aplicados o residuales en el material.

- **Corrosión fatiga.** Es parecida a la corrosión bajo esfuerzo, con la diferencia de que los esfuerzos que lo provocan son de tipo cíclico y pueden ser introducidos por procesos térmicos o mecánicos.
- **Erosión.** Es el aumento de la velocidad del deterioro que sufre un material debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie del material.
- **Bacteriológica.** Es generado por microorganismos de diferentes variedades.
- **Corrosión uniforme y generalizada.** La uniforme se da cuando el ataque se extiende por igual sobre toda la superficie (el 50% se comporta como zona catódica y el otro 50% como zona anódica). La corrosión generalizada es semejante pero esta se extiende casi por igual en toda la superficie, es decir es aproximada a la uniforme.
- **Corrosión galvánica.** También conocida como bimetalica. Ocurre cuando están en contacto eléctrico dos metales distintos expuestos a soluciones corrosivas o a condiciones atmosféricas húmedas. Uno de ellos se comportara como ánodo y otro como cátodo de acuerdo a la posición que tengan en la serie galvánica. Sufriendo deterioro el que tenga el potencial más negativo.

Sin embargo la corrosión en concreto inicia en forma localizada debido a los agentes agresivos, posteriormente se puede convertir en generalizada.

1.2.3 Causas de deterioro en concretos.

Se denomina así a aquel conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero en el concreto. Ya se mencionó con anterioridad que la corrosión sólo se provoca si el pH baja hasta valores ácidos (aproximadamente de 8), por lo que serán considerados como factores que afectan o desencadenan la despasivación, todos aquellos que den lugar a una neutralización del medio alcalino propio del concreto o bien, como es el caso de las fisuras y coqueas, que supongan la ausencia de contacto entre el acero y el concreto.

En general se puede decir que el concreto presenta los siguientes problemas [19]:

1.2.3.1 Deterioro químico.

Se ocasiona por:

- a) **Ataque por Sulfatos.** Este tipo de ataque tiene como fuentes a lagos, agua de mar, desechos industriales y aguas de riego, cuyos componentes reaccionan con los del concreto formando productos voluminosos, los cuales presionan hasta fisurar la masa del concreto.
- b) **Ácidos.** Se asocian con la reacción de algunos componentes hidratados e hidróxido de calcio, hasta formar laminas asociadas con el ácido.
- c) **Agua Marina.** Esta proporciona sulfatos, cloruros, cristalización de la sal, abrasión, ataque biológico y daños por congelamiento.
- d) **Reacciones Alkali-Agregados.** Se asocia con rocas que contienen sílice en forma activada. Calizas y ciertas rocas volcánicas tienen este ingrediente activo, formando un gel álcali-silicato a una humedad relativa por arriba del 75%, el cual se expande ocasionando agrietamientos. El único remedio real es no utilizar agregados reactivos con cementos altos en álcalis, en ambientes húmedos. Mucho menos en climas de temperaturas altas.
- e) **Desalcalinización.** Como el hidróxido de calcio es soluble en agua, la lixiviación de este producto es posible por la permeabilidad excesiva, y si es sujeto a procesos de humedecimiento y secado.
- f) **Ataque biológico.** Provocado por la acción química de los metabolitos de algunos microorganismos.
- g) **Composición del cemento.** Se conforma básicamente de cuatro elementos, silicato dicálcico (C_2S), silicato tricálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferroatluminato tetracálcico (C_4FA), cuyas variaciones relativas determinan los diferentes tipos de cemento.

1.2.3.2 Deterioro físico.

Se presenta en las formas de:

- a) **Agrietamiento.** El agrietamiento debe y puede ocurrir en el concreto por una amplia variedad de razones. Las grietas por tensiones se presentan en la práctica pero son suficientemente pequeñas y no causan problemas. Grietas plásticas más grandes se pueden causar por el sangrado y segregación durante la construcción, y durante el asentamiento debido a la hidratación y secado. Estos problemas pueden agravarse si el diseño no se abastece de movimiento por la provisión de juntas o un refuerzo adecuado. La expansión del acero corroído puede también conducir a grietas y a la delaminación, que son problemas serios.
- b) **Congelamiento.** El concreto fresco no se puede hidratar si la mezcla se congela, sin embargo se puede rehidratar algunas veces después de subsecuentes calentamientos y revibrados. El esfuerzo puede ser indudablemente afectado. El concreto endurecido puede, como las rocas ser afectado por la acción hielo-deshielo, conduciendo a un rompimiento. Esto es porque el agua de los poros en el concreto húmedo se congela, y se expande. Paradójicamente, el aire que entra en el concreto rompe los tubos capilares a lo largo de los cuales el agua puede entrar en el concreto, y puede también proporcionar un espacio en el cual el agua que se congela se puede expandir.
- c) **Desgaste o Erosión Mecánica.** Los pisos de concreto sujetos a la abrasión, por ejemplo, necesitan tener un diseño propio de mezcla que no ocasione sangrados ni segregaciones. Aparte se debe utilizar un agregado de buena calidad, y aplicar un curado adecuado.
- d) **Fuego.** El principal problema con el concreto es su naturaleza heterogénea, debido a que los componentes tienen distintos coeficientes de expansión. Esto puede que no sea un gran problema a temperaturas por debajo de los 300°C, pero a valores muy altos, pueden resultar rompimientos por agrietamiento y explosiones, lo cual conduce a significativas pérdidas de sección. Agregados ligeros son más resistentes al fuego en general que los más densos.

- e) **Calidad del Recubrimiento.** Si el recubrimiento del concreto sobre las armaduras no se mantiene en buenas condiciones, no se puede esperar un buen desempeño del concreto armado.

1.2.3.3 Corrosión del refuerzo.

Esto es la corrosión significativa del acero como resultado de una acción electroquímica o galvánica. En ausencia de diferentes metales la corrosión se inicia por imperfecciones locales (por ejemplo diferentes estructuras cristalinas del acero), o diferencias locales de la concentración del electrolito. Se ocasiona principalmente por:

- a) **Carbonatación.** Los factores que ocasionan la carbonatación son la humedad entre un 50 y 70%, si se encuentra por debajo el agua no es suficiente y si es muy alta inhibe la difusión del CO_2 . La temperatura, siendo peor el problema a valores muy altos. La concentración del gas CO_2 normal en la atmósfera es de 0.03% y se incrementa anualmente, además las ciudades tienen niveles muy altos por las emanaciones de los vehículos a motor, y el quemado de combustible. Este problema ocurre por el rompimiento de las condiciones de alcalinidad, y se requiere una humedad relativa por arriba del 75%, sin embargo puede presentarse a humedades relativas bajas, y entonces la corrosión puede ser significativa si se alternan ambientes húmedos y secos.
- b) **Cloruros.** Concentraciones muy altas ocasionan el deterioro, y estos iones pueden romper la capa pasiva de la película de óxido en el refuerzo, e iniciar el proceso de corrosión.
- c) **Oxígeno.** En el concreto húmedo, el oxígeno disuelto se difundirá principalmente como solución; mientras que en concreto parcialmente seco el oxígeno gaseoso se difundirá más rápidamente. Para que los iones ferrosos y el oxígeno se combinen, este último debe encontrarse disuelto.
- d) **Pasividad y Transpasividad.** La pasividad de un metal se caracteriza por una delgada película de óxido en su superficie, la cual protege al metal contra una corrosión posterior.

Cuando un potencial eléctrico se aplica a un electrodo y se incrementa progresivamente, tarde o temprano habrá un flujo de corriente, a esto se le llama transpasividad, y cuando esta se presenta disminuye el pH alrededor de la varilla hasta casi cero. También se forman áreas llenas de líquido alrededor de las varillas de refuerzo.

- e) **pH.** A mayor pH, el grado de corrosión es menor, ya que ningún concreto o acero es durable en un ambiente ácido. Como los concretos tienen un pH mayor de 12.5, usualmente le proporcionan al acero una excelente protección. Solo cuando hay presencia de sales o carbonatación el refuerzo se vuelve vulnerable por la disminución de la alcalinidad.

1.3 LOS IONES CLORUROS (Cl⁻).

Ciertos iones como los cloruros, sulfuros, sulfatos, sulfocianuros, formatos, etc., pueden provocar corrosión por picaduras, si se encuentran en la masa del concreto por encima del límite o umbral que los hace agresivos en este medio específico. En el concreto los más peligrosos y conocidos son los cloruros, que pueden aparecer porque:

- Se añaden al concreto como aditivos
- Están presentes en los constituyentes (como el cemento o los áridos)
- Penetran desde el exterior por estar situado el concreto en un medio marino
- Porque provienen de las sales del deshielo.

Los cloruros provocan la disolución de la capa pasiva del acero, dando lugar a ataques puntuales (picaduras), o corrosión parcialmente localizada que puede reducir drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos.

Los tipos de cloruro que se pueden encontrar en estructuras de concreto son [20]:

Cloruros libres: Son los solubles en agua, y estos son los que representan un riesgo para el acero de refuerzo al alcanzar niveles críticos y causar despasivación.

Cloruros enlazados: Es el cloruro combinado a las diferentes fases o compuestos de la pasta del cemento, de los cuales el principal es el aluminato tricálcico.

Cloruros totales: Están representados por la sumatoria del cloruro enlazado y el cloruro libre.

Los cloruros pueden penetrar por succión capilar del agua salada en el concreto a través de los poros; en el caso de estructuras sumergidas, los cloruros pueden penetrar principalmente por difusión, debida al gradiente de concentraciones de la solución de poro. Es posible modelar el fenómeno de difusión en el concreto con la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right)$$

Donde:

c = Concentración de la solución del poro.

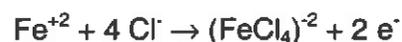
t = Tiempo de difusión.

x = Distancia de difusión.

D = Coeficiente de difusión de la especie a tratar.

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. Por ejemplo, además de un mecanismo de difusión que es relativamente lento, los cloruros pueden penetrar mucho más rápido por fuerzas capilares, mecanismos muy propios de las costas donde se presenta la brisa marina [21].

Actualmente existen varias teorías que intentan explicar los efectos de los iones cloruro en la corrosión, entre ellas la más aceptada es la de la "formación del complejo transitorio o compuesto". De acuerdo con esta teoría, los cloruros compiten con los hidróxidos por los iones ferrosos producto de la corrosión. Se forma entonces un complejo soluble de cloruro de hierro [22].



Este complejo se difunde a partir del ánodo, destruyendo la capa protectora de óxido y permitiendo que la corrosión continúe. A alguna distancia del electrodo, el complejo se deshace, el hidróxido de hierro se precipita y los cloruros quedan libres para transportar más iones ferrosos desde el ánodo.



Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro cerca del acero, el proceso continúa por si mismo emigrando los iones de hierro desde el acero y reaccionando con el oxígeno o los hidróxidos.

En general las teorías sugieren que solo los cloruros libres, es decir los disueltos en la solución del poro, participan en el proceso de corrosión. Sin embargo, 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. Es por eso que algunos investigadores consideran que los cloruros enlazados representan un riesgo potencial de corrosión y recomiendan tomar en cuenta el riesgo de corrosión en términos de cloruros totales [23].

El contenido crítico de cloruros solubles en el concreto, que en un momento dado representa condiciones propicias para que se produzca corrosión en el acero de refuerzo, suele llamarse “*umbral de riesgo de corrosión por cloruros*”, y puede variar de acuerdo con numerosos factores.

El contenido límite de cloruros se expresa comúnmente en porcentaje por peso de cemento (%Cl⁻ ppc), en porcentaje por peso de concreto (%Cl⁻ pp de concreto), o en kg de Cl⁻ por m³ de concreto.

Se ha sugerido, debido al rol que juegan los hidróxidos en la protección del acero contra la corrosión, que es más apropiado expresar el umbral de corrosión en términos de la razón de cloruros contenidos por hidróxidos, [Cl⁻] / [OH⁻].

En el caso de los cloruros que pueden ser adicionados durante el amasado del concreto, los códigos de fabricación y de cálculo de estructuras de concreto de todos los países, limitan su contenido en proporciones variables. En general los límites que se aceptan son distintos en varios países, tal como se muestra en la TABLA 1.6. Por ejemplo, en Europa y en muchos países latinoamericanos se admite para concreto reforzado 0.4 % en base al contenido de cemento, y para pretensado 0.2 % en la misma base [24].

La divergencia de las cantidades máximas de cloruros admitidas por los distintos códigos aparecen debido a la inexistencia de un límite único de aplicación general. Ello se produce tanto por las diferencias en características de los cementos (su contenido de álcalis y velocidad de hidratación), como por los distintos tipos de acero utilizados (composición química, rugosidad superficial y estado de conservación), así como por las distintas materias potencialmente suministradoras de los cloruros.

En cuanto al sistema de refuerzo del concreto, hay que distinguir entre el reforzado y el presforzado, pues en este último los efectos de la corrosión son más drásticos por el reducido diámetro del acero de presfuerzo, por la elevada pérdida de capacidad estructural y porque el acero sometido a altos niveles de esfuerzo resulta más susceptible a la corrosión. Por consiguiente la concentración tolerable de cloruros en el concreto recién mezclado debe ser menor en el caso del concreto presforzado.

Para tomar en cuenta lo anterior, en el informe del Comité ACI 201 [25] se sugieren los siguientes contenidos máximos permisibles de ión cloruro en el concreto antes de ser expuesto a servicio, expresados como porcentaje en peso del cemento:

- Concreto presforzado: 0.06%
- Concreto reforzado: 0.15 %

TABLA 1.6. Valor crítico de cloruros en concreto reforzado.

| PAIS | NORMA | Limite máx. DE Cl | Referido a |
|-------------|---------------------------------------|------------------------------|------------|
| USA | ACI318 | ≤ a 0.15% en ambiente de Cl | Cemento |
| USA | ACI318 | ≤ a 0.3% en ambiente normal | Cemento |
| USA | ACI318 | ≤ a 1% en ambiente seco | Cemento |
| INGLATERRA | CP-110 | ≤ a 0.35% al menos en un 95% | Cemento |
| AUSTRALIA | AS 3600 | ≤ al 0.22% | Cemento |
| NORUEGA | NS 3474 | ≤ al 0.6% | Cemento |
| ESPAÑA | EH 91 | ≤ al 0.40% | Cemento |
| EUROPA | EUROCODIGO 2 | ≤ al 0.22% | Cemento |
| JAPON | JSCE-SP 2 | ≤ al 0.6 kg/m ³ | Concreto |
| BRASIL | NBR 6118 | ≤ al 0.05% | Agua |
| EUROPA | Comité Euro-Internacional du Beton | 0.35 a 1% | Cemento |
| USA | FWHA | 0.3% | Cemento |
| REINO UNIDO | BS-8110-1985 | 0.2 - 0.4% | Cemento |
| ----- | RILEM | 0.4 - 1% | Cemento |
| ESPAÑA | EN-206 | 1.4% | Cemento |

Cuando existe riesgo de que se produzca corrosión en el acero de refuerzo y se requiere limitar el contenido de cloruros en el concreto recién mezclado, lo indicado es determinarlos individualmente en cada uno de los componentes (cementante, agua, agregados y aditivos), y hacer una estimación del total a partir de sus contenidos individuales y de las proporciones en que se pretenden utilizar. Con base en esta estimación y con el conocimiento de las condiciones de corrosividad del medio ambiente, puede hacerse la comparación con los valores de la TABLA 1.6. Si el contenido de cloruros estimado resulta superior al máximo permisible, deben hacerse los cambios necesarios en los componentes, a fin de reducir el riesgo de deterioro prematuro de la estructura. No obstante, si en el medio de contacto hay cantidades significativas de cloruros, la limitación de su contenido en la mezcla no brinda una protección suficiente, pues dichos cloruros pueden ser fácilmente incrementados por encima del umbral de riesgo. En tal caso, la protección que suministran el espesor de recubrimiento, el uso de una baja relación a/c y la ejecución de prácticas constructivas eficaces, son aspectos que adquieren primordial importancia.

En cuanto a los cloruros que penetran desde el exterior, es necesario diferenciar el caso de ambientes marinos, de aquellos donde se hace uso de las sales de deshielo, ya que sus

proporciones relativas en el exterior del concreto pueden ser muy diferentes. Así mientras el agua o ambiente marino contiene una cierta proporción constante de cloruros, en el caso de las sales de deshielo, su proporción exterior será proporcional a la cantidad de sales que emplean al año debido a la frecuencia y duración de las heladas.

Tres son los aspectos relevantes a tener en cuenta en el caso de los cloruros que penetran desde el exterior son:

1. El tiempo en tardan en llegar hasta el acero.
2. La proporción que induce la despasivación
3. La velocidad de corrosión que provoca una vez desencadenada la corrosión.

En cuanto al tiempo que tardan los cloruros en llegar al acero en una estructura ya puesta en servicio, lo importante es averiguar a qué profundidad han penetrado en el momento de hacer una inspección, ya que el recubrimiento del concreto debe ser superior a la profundidad que sean capaces de alcanzar estos iones en el tiempo previsto de vida útil de la estructura.

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo (figura 1.7):

$$X_{Cl^-} = K_{Cl^-} \sqrt{t}$$

X_{Cl^-} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros.

t = Tiempo

K_{Cl^-} = Constante dependiente del concreto y del medio.

Ello es debido a que, tanto los procesos de difusión pura, como los de absorción capilar, siguen una ley proporcional.

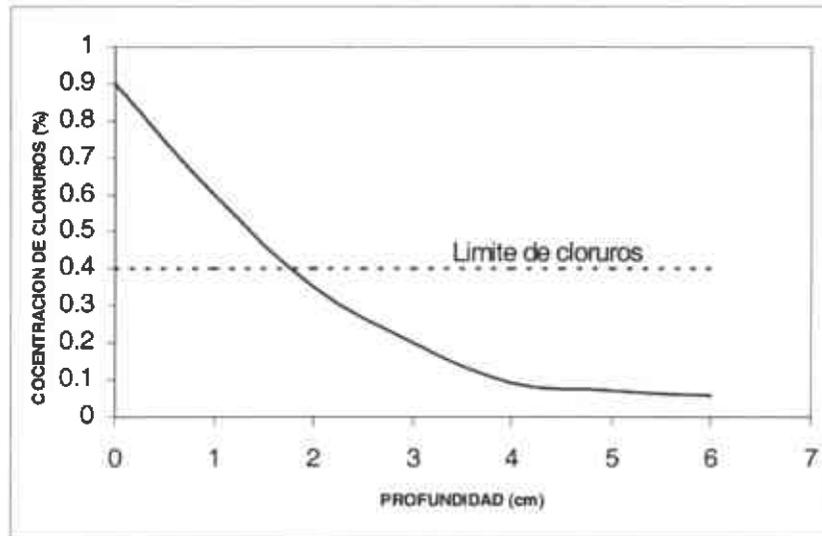


Figura 1.7. Perfil de concentración de cloruros en el concreto.

Con fines prácticos -incluyendo el caso de las sales de deshielo- parece mucho más apropiado el uso de la simple ley de la raíz cuadrada:

$$x_{\text{Cl}^-} = K_{\text{Cl}^-} \sqrt{t}$$

ya que engloba de forma apropiada todos los mecanismos posibles.

En cuanto al límite para la despasivación, puede ser lógicamente diferente en el concreto endurecido que en el fresco, aunque los códigos no abordan este problema y se considera el mismo límite para las dos circunstancias. Sin embargo, se ha detectado que muchos concretos soportan cantidades muy superiores a este límite sin que el acero muestre signo alguno de corrosión. Ello debido a la influencia de factores como el potencial eléctrico del acero (que refleja el contenido en oxígeno entre otras circunstancias), y el pH de la solución de los poros (relación Cl^-/OH^-).

Todo ello lleva la tendencia futura a delimitar una proporción que suponga un riesgo estadístico de corrosión del acero, en lugar de fijar un valor único para este límite [26].

1.4 METODOS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.

Antes de recomendar cualquier tipo de protección y prevención contra la corrosión es necesario [27]:

Conocer los antecedentes de la estructura y del medio.

- a) Datos generales de la estructura (localización, tipo estructura, tipo de obra).
- b) Datos específicos de la estructura (detalles constructivos, características del concreto, planos, croquis, detalles estructurales).
- c) Historial de la vida en servicio de la estructura (edad, mantenimientos y reparaciones previas, edad de inicio de los problemas, niveles de tensiones a las que está sujeto el elemento estructural).
- d) Datos del medio (tipo de atmósfera, agua, naturaleza del terreno o suelo, presencia de agentes químicos, corrientes de interferencia).

Examen visual general de la estructura.

- a) Levantamiento de daños (croquis o planos donde se muestren los daños).
- b) Fotografías.
- c) Utilizar formas para registro.

Ensayos mínimos.

Los estudios que comúnmente se llevan a cabo son de dos tipos, el primero es la evaluación del concreto y el segundo de la estructura.

PARA LA EVALUACIÓN DEL CONCRETO:

1. **Resistividad.** Es una propiedad de cada material y es el recíproco de la conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y de las sales

disueltas en la fase acuosa. Es función de variables como el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura entre otras.

2. **Ultrasonido.** Verifica la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) del concreto, detecta fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante al fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones, monitorea las variaciones de las propiedades del concreto a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.
3. **Esclerometría.** Evalúa la dureza superficial del concreto mediante el uso de esclerometro de reflexión.
4. **Profundidad de Carbonatación.** Determina el avance de la carbonatación en el hormigón por el método de la vía húmeda, con una solución de indicador ácido-base.
5. **Concentración de Cloruros.** Determina la concentración de los cloruros totales libres, presentes en la masa del concreto a diferentes niveles de profundidad, lo a que su vez sirve para determinar el coeficiente de difusión aparente del cloruro hacia el interior y la velocidad de penetración del mismo en el tiempo.
6. **Resistencia a la compresión.** Determina la resistencia a la compresión del concreto. Es una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad, como de la capacidad de resistencia mecánica.
7. **Porosidad.** Determina la absorción capilar y la porosidad de morteros y concretos como una medida de su compacidad.

PARA LA EVALUACIÓN DE LA ARMADURA:

1. **Localización de la armadura y espesor del recubrimiento.** Determinar la ubicación de la armadura embebida en el concreto armado y a qué profundidad se encuentra respecto a la cara exterior del elemento.
2. **La pérdida de diámetro del refuerzo y su límite elástico.** Estimar la disminución del diámetro del refuerzo por la corrosión y la repercusión en el comportamiento elástico del mismo.
3. **La medición de potenciales.** Determinar la diferencia de potencial que existe entre un electrodo de referencia y la armadura del concreto.
4. **La medición de la velocidad de corrosión.** Evaluar la velocidad en que la armadura pierde sección por el deterioro de la misma.

Diversos métodos se han utilizado para proteger el concreto de la corrosión, estos se basan en:

- La selección de mejores materiales, más resistentes a la corrosión
- La existencia de una barrera física entre el metal y el ambiente o el ambiente y el concreto.
- La modificación de las condiciones ambientales.
- Una combinación de las anteriores.

Ninguna de las tres primeras ha dado resultado, por lo que se ha adoptado la cuarta opción.

Los métodos que en la actualidad existen son de protección directa al acero o de protección indirecta a través del concreto [28].

1.4.1 Protección directa del acero.

1. **Recubrimientos.** Los recubrimientos epóxicos o “epoxis” y galvanizados son los más usados en experiencias de campo. El recubrimiento epóxico protege por barrera, por lo que cualquier daño o poro en el revestimiento es perjudicial para la protección del acero; el galvanizado protege fundamentalmente por la formación de una capa compacta de productos de corrosión.
2. **Protección Catódica.** Técnica empleada para que la armadura se comporte como cátodo, se puede aplicar por ánodos de sacrificio o por corriente impresa. La protección por ánodos de sacrificio consiste en la conexión eléctrica entre el refuerzo y un material más activo que el acero, el cual actuaría como ánodo. En el caso de la corriente impresa, el ánodo es casi cualquier material, ya que se emplea una fuente de poder de corriente continua, para que la corriente que entra en la estructura convierta a la armadura en cátodo.

1.4.2 Protección indirecta a través del concreto.

1. **Parchados con morteros de reparación.** Consisten en la remoción del concreto dañado y la limpieza del acero con la posterior reconstitución de la sección de la estructura por medio de la aplicación de un mortero o lechada. Son materiales constituidos por una mezcla de

agregado fino seleccionado y un aglomerante cementante que puede ser de base cemento portland u orgánica (acrílicos, epóxicos, poliuretano u otro polímero orgánico). A estos morteros se les pueden agregar algunos aditivos (microsilica, ceniza volante, fibra sintética, escoria de alto horno, etc.).

2. **Revestimientos.** Son aplicados sobre el concreto y actúan como barrera física. Entre ellos se encuentran:
 - **Revestimientos hidrófugos:** Son materiales a base de silicona que no solo repelen la humedad y resisten el desgaste, sino que permiten al sustrato de concreto respirar naturalmente. Al aplicarlos en la superficie la penetran impregnándose en ella.
 - **Membranas orgánicas prefabricadas:** Son usadas para colocarse sobre la superficie del concreto de manera temporal o permanente.
 - **Polímeros impregnados sobre el concreto:** Son aplicados como una mezcla reaccionante sobre una superficie de concreto previamente deshidratada, la cual penetran considerablemente (aproximadamente 1 a 3 cm), polimerizando y luego sellando los poros.
 - **Otros revestimientos:** Son aplicados sobre el concreto en forma líquida, formando una película protectora. Entre los más importantes se encuentran epóxicos, acrílico, poliuretano, productos emulsionados con agua (látex).
3. **Extracción de los iones cloruros del concreto.** Es una técnica electroquímica actualmente en desarrollo, donde se aplica un concepto similar al de protección catódica por corriente impresa. Se basa en aprovechar la carga negativa del ión cloruro para ser atraído por el cátodo colocado en el exterior de la superficie de la estructura tratada.
4. **Realcalinización.** Este es un proceso que aún se encuentra en desarrollo. Es un tratamiento temporal que incrementa el pH de la solución acuosa en los poros del concreto, debido a la penetración de un electrolito alcalino desde la superficie exterior. Este proceso repasiva la armadura debido a las reacciones electroquímicas que ocurrirían en su superficie. Se utiliza en el caso de concretos carbonatados [29].

II. EXTRACCION ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS.

Desde que se empezaron a reparar las estructuras de concreto en los años cincuenta, miles de edificios han sido reparados una y otra vez, encontrándose en común en todos los casos que la principal causa del daño en las fallas a edades tempranas es la corrosión de la varilla de refuerzo.

El elemento crítico en el proceso de corrosión es el ión cloruro, que como se mencionó en el capítulo anterior, ha penetrado al nivel de las barras de refuerzo. Una técnica para tratar con este problema es la *extracción electroquímica de cloruros* (EEC) también conocida como remoción electroquímica de cloruros o desalinización de las estructuras de concreto.

Varios métodos como recubrimientos epóxicos en las barras de acero, membranas, impregnaciones e inhibidores, son empleados para prevenir la corrosión de estructuras nuevas. Para las estructura viejas, la técnica convencional de reparación consiste en la localización de las zonas corroídas con el mapeo de potenciales, determinación del contenido de cloruros tanto en las zonas corroídas como en las pasivas, y la eliminación de los cloruros contaminantes por métodos alternativos diferentes a la EEC, como lo es el llamado “parcheo” o remoción del concreto contaminado.

Comúnmente la contaminación por cloruros del concreto es usualmente reparada por la remoción del concreto contaminado y su reemplazo por uno nuevo. Esta opción tiene muchas desventajas, por ejemplo posibles problemas como serios cambios en el análisis estructural o daño del refuerzo, también el impacto que puedan ocasionar los trabajadores y el medio (ruido, polvo, etc.) es considerable. Ahora bien, si la reparación se ha hecho solo en zonas dañadas y no se han eliminado por completo los cloruros, esta medida tendrá solo efectos temporales debido a que se corre el riesgo de acelerar el proceso de corrosión debido a las diferencias de potencial entre la zona removida o “parchada” y el

concreto que no fue removido, ocasionando que el acero embebido en el concreto reemplazado se comporte como cátodo y el que se encuentra en el concreto contaminado como ánodo, sumando a esto la presencia de los cloruros restantes

Para los casos en que existe la contaminación de cloruros, pero el deterioro del refuerzo es ligero o no se presenta, el método de extracción electroquímica de cloruros puede ser usado para remover suficientes cantidades de cloruros, permitiendo que el acero se repasive [30].

La extracción electroquímica de cloruros es recomendada para estructuras con una corrosión activa, pero en las cuales el concreto presenta un daño pequeño, el acero no es pre-tensado, y en las que una extensión de la vida de servicio de 5 a 10 años es requerida. Antes del tratamiento, supervisiones de potencial y delaminaciones deben ser llevadas a cabo y el análisis de la concentración de cloruros debe ser establecido para determinar el perfil de contaminación. La continuidad eléctrica del acero debe ser probada, y el análisis petrográfico debe ser efectuado para identificar si hay presencia de agregados álcali-silica reactivos en el concreto [31].

En la mayoría de los casos la técnica no-destructiva de EEC, ofrece una atractiva alternativa para la remoción de todos los cloruros que contaminan el concreto de la estructura.

Recientemente la extracción electroquímica de cloruros ha despertado un nuevo interés e investigación creciente en los Estados Unidos y Europa. Algunos estudios con la técnica NORCURE de EEC se han desarrollado en Canadá y Suiza [32].

EEC es similar en principio a la protección catódica (PC), excepto que la magnitud de la corriente es de 100 a 500 veces la empleada en la PC. El total de carga de la corriente (tiempo de corriente) aplicada en EEC es la misma que la PC en un período de 10 años. La otra diferencia importante es que la extracción de cloruros es un tratamiento temporal (puede tardar de 4 a 8 semanas), mientras que la PC normalmente es por el resto de vida de operación de la estructura.

Con el fin de considerar una estructura para el tratamiento con EEC, se deben conocer ciertas condiciones [33]:

a) CONDICIONES REQUERIDAS:

- **Corrosión activa inducida por cloruros.** Es verificada por una combinación de técnicas de supervisión como potenciales de media celda y análisis químicos, para verificar los niveles de concentración de los iones cloruro cerca del refuerzo.
- **Acero no pre-tensado.** La EEC puede ocasionar la generación de hidrógeno en el acero de refuerzo, lo que puede causar la fragilización de las estructuras de acero pre-tensado.
- **No agregados álcil reactivos.** No deben ser expuestos a esta extracción porque se puede agravar la reacción expansiva asociada con este tipo de agregados.
- **Una continuidad razonable del acero.** Para distribuir la corriente.
- **Una resistencia razonable del concreto.** Para que la corriente en la extracción de cloruros fluya fácilmente.

b) CONDICIONES DESEADAS:

- **Daño mínimo del concreto.** Este es deseado para una efectiva extracción de cloruros. Perdidas y delaminaciones deben ser removidas y “parchadas” antes del tratamiento.
- **No recubrimientos o capas no conductoras.** Estas no deben estar presentes ya que pueden ocasionar una alta resistencia y evitar el flujo de suficiente corriente.
- **Una mínima exposición del acero en la superficie.** Ya que esta exposición puede causar un corto circuito entre el acero y el ánodo.

- **Conflictos mínimos con el tráfico.** Algunas estructuras requieren un control del tráfico (como puentes por ejemplo) durante la instalación del sistema y la extracción ya que esto puede ocasionar perturbaciones.
- **Fuente de poder DC disponible.** Se debe de asegurar que los requerimientos de energía sean cubiertos, si la fuente de poder es insuficiente, un generador puede ser empleado pero se incrementan los costos de combustible y servicio.
- **Excelente continuidad del acero.** La mayoría de las estructuras tienen suficiente continuidad, pero estructuras muy viejas pueden ser problemáticas. Esta se verifica por medio de un voltímetro, si las diferencias de voltajes no son mayores de 0.1 mV, se considera que hay continuidad.
- **Baja resistencia del concreto.** Debido a que grandes resistencias resultan en períodos largos de tratamiento.
- **Geometrías simples.** Debido a que la forma de la estructura es determinante para facilitar la colocación del ánodo sobre la superficie.

2.1 MIGRACION IÓNICA.

El flujo de una corriente eléctrica en un electrolito (como el concreto y la solución del poro) es ocasionada por la presencia de iones en la solución. La naturaleza y concentración de estos iones determina la conductividad de una solución específica.

Bajo la influencia de un campo eléctrico (V/cm), los iones se mueven a una velocidad (cm/s) que es determinada por la naturaleza de las partículas (su tamaño y carga eléctrica), la fuerza del campo, y la viscosidad de la solución. Este desplazamiento de iones en solución constituye un transporte de masa y electricidad.

Al desplazamiento de los iones en solución bajo el efecto de un campo eléctrico se le denomina "*Migración iónica*". La velocidad de un ión bajo un campo eléctrico de 1 V/cm es

llamada "Movilidad". La movilidad es una característica dada de cada ión, esta depende de las dimensiones de la carga y la viscosidad del electrolito [34].

La migración iónica involucra el transporte de aniones y cationes debido al potencial eléctrico de repulsión de las varillas embebidas, y al ánodo externo respectivamente. Aniones como los cloruros (Cl^-), hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{2-}), y sulfatos (SO_4^{2-}), entre otros, son repelidos preferencialmente de la vecindad de las barras debido a la polaridad similar de la carga eléctrica y por lo tanto, migran lejos de la región del cátodo en dirección del ánodo. Lo mismo sucede con los cationes como los iones calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+), y el sodio (Na^+), estos migran a la región catódica del acero en una proporción relativa a sus relativos números de transferencia^α (figura 2.1) [35].

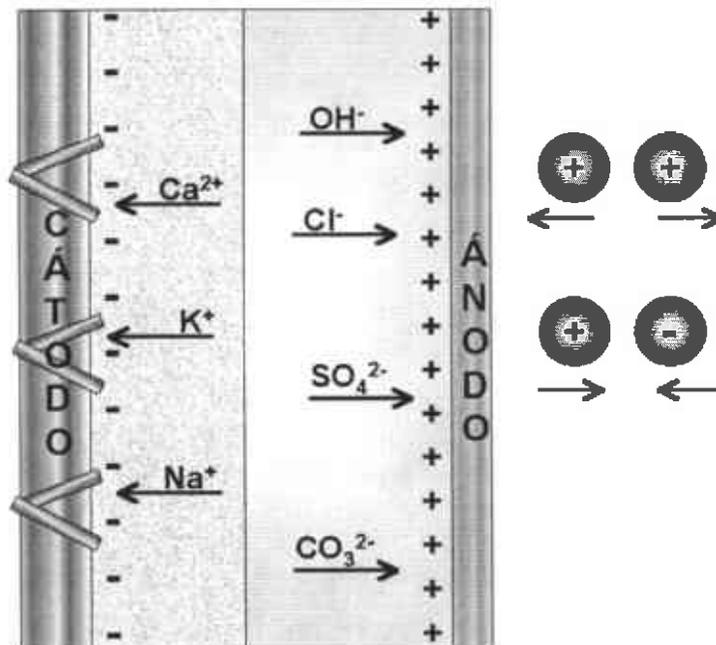


Figura 2.1. La polaridad similar de cargas ocasiona la repulsión de las mismas y su diferencia las atrae, en este principio se basa la EEC.

^α Numero de transporte o de transferencia es definido como la proporción de la corriente total (aplicada) polarizada llevada por un tipo de ión específico durante la electro-migración, y es influenciado por las características resistivas del medio.

La migración de iones en el concreto es un proceso complejo, básicamente está gobernada por las mismas leyes que en soluciones acuosas, es decir por el campo eléctrico y los parámetros fundamentales de movilidad ionic u_i , concentración c_i y carga $|z_i|$ de los iones en la solución de poro. De acuerdo a la ecuación:

$$t_{Cl} = \frac{I_{Cl}}{I_{tot}} = \frac{c_{Cl} u_{Cl} |z_{Cl}|}{\sum c_i u_i |z_i|}$$

Los diferentes iones en la solución de poro contribuyen en proporción a su concentración c_i y su movilidad ionic u_i (TABLA 2.1) a la corriente total. Las movilidades ionicas en el concreto son tres ordenes de magnitud más bajas en comparación a las soluciones acuosas; esto puede ser explicado porque el volumen de poro disminuye (en soluciones acuosas es el 100%, y en el concreto es aproximadamente un 10%), resultando en un camino difícil para la difusión en el sistema de poros.

TABLA 2.1. Movilidades ionicas en soluciones acuosas a 25°C.

| ION | MOVILIDAD u_i ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) |
|------------------|--|
| Cl^- | 7.91×10^{-4} |
| K^+ | 7.62×10^{-4} |
| Na^+ | 5.19×10^{-4} |
| Li^+ | 4.01×10^{-4} |
| H^+ | 36.30×10^{-4} |
| OH^- | 20.50×10^{-4} |
| HCO_3^- | 4.61×10^{-4} |



El número de transferencia de los cloruros, define la cantidad de corriente llevada por los iones cloruros, I_{Cl} , en relación con la corriente total I_{tot} .

El número de transferencia del ion cloruro ha sido establecido bajo variadas condiciones. La composición de la solución de poro expresada para una muestra de concreto de cemento portland ordinario se da en la TABLA 2.2, en la que se aprecia básicamente la

formación de hidróxido de potasio. Los números de transferencia calculados (t) que se reportan en la TABLA 2.2 muestran que la corriente es transportada por los iones hidróxido y potasio, para los iones cloruros $t_{Cl} = 0.10$. Otros estudios de investigadores reportan para concretos con 1% Cl⁻ por peso de cemento, un t_{Cl} de aproximadamente 0.22 y para bajas concentraciones de cloruros de 0.12 [36].

Tabla 2.2. Composición de la solución de poro para concretos contaminados, con sus respectivos números de transferencia.

| ION | OH ⁻ | Na ⁺ | Ca ²⁺ | Cl ⁻ |
|-------------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| $c \text{ mol. L}^{-1}$ | 0.5 | 0.035 | 0.58 | 10^{-4} |
| t | 0.62 | 0.01 | 0.27 | 0.10 |

Se ha demostrado que el número de transferencia de este ion se incrementa con el aumento de la concentración y la temperatura, pero es independiente de la densidad de corriente. Dicho resultado tiene una importancia práctica considerable debido a que significa que pequeñas cantidades de densidad de corriente aplicadas por largo tiempo pueden remover la misma cantidad de cloruros que corrientes altas aplicadas por un corto tiempo, así se deduce que la carga total en los dos casos es la misma.

Como resultado de las reacciones electroquímicas en los electrodos, y la asociación con los procesos de transporte, mayores cambios en la composición de la solución de los poros pueden presentarse durante el tratamiento. Los cambios son benéficos, favorecen la repasivación de los refuerzos, ya que se incrementa la concentración de los iones OH⁻ cerca del cátodo, y disminuye la concentración de los iones cloruro, pronunciándose más en la superficie del concreto [37].

2.2 MECANISMO.

Este método se desarrolla por la aplicación de un campo eléctrico entre el refuerzo en el concreto (polo conectado a la parte negativa de la fuente de poder), y un sistema de anódico que consiste básicamente en un ánodo en forma de malla (conectado al polo positivo), embebido en un contenedor donde se encuentra el electrolito, y este se encuentra temporalmente en contacto con la superficie del concreto (figura 2.2).

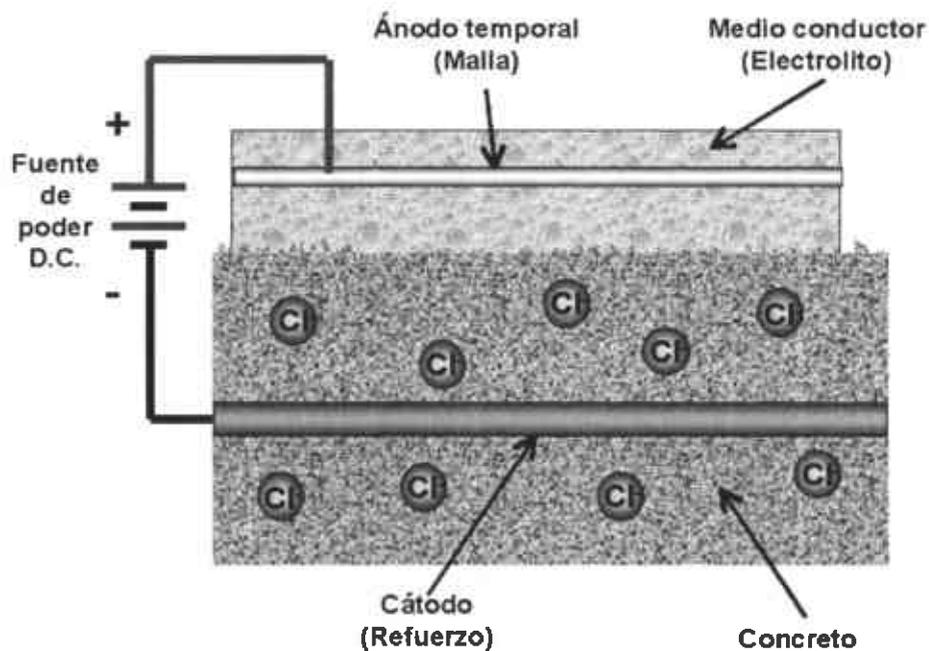


Figura 2.2. Extracción electroquímica de cloruros.

La EEC está basada en la migración de los iones. Dentro del campo de corriente los iones con carga eléctrica negativa se mueven a lo largo de las líneas de flujo que van del refuerzo (que es el cátodo) hacia el ánodo fuera de la superficie del concreto. El movimiento de los cloruros en el concreto es principalmente ocasionado por migración iónica, debido a que el transporte causado por difusión y convección es tan lento a densidades de corriente relativamente altas, como lo son las aplicadas en la EEC, que estas pueden ser despreciadas.

Simultáneamente, la electrólisis en la superficie del refuerzo produce iones hidróxido, los cuales incrementan el nivel del pH en los alrededores del refuerzo (figura 2.3) [38].

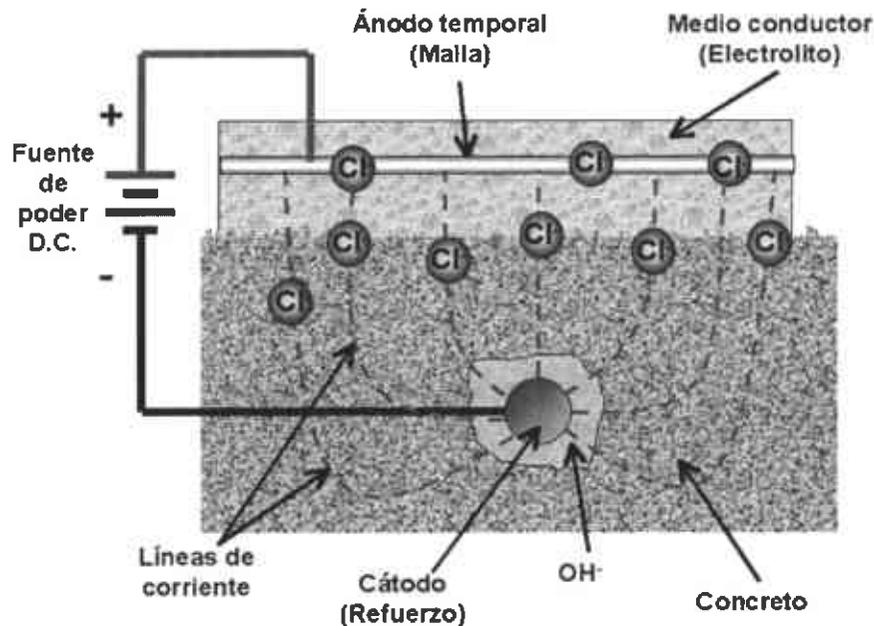


Figura 2.3. Representación esquemática de las líneas de flujo de corriente.

La velocidad a la cual los cloruros son removidos es directamente proporcional al flujo de corriente a través del concreto. Para un voltaje dado, este es alto cuando la resistencia eléctrica del concreto es muy baja, por ejemplo cuando el concreto está saturado de agua. La parte de la corriente que es transportada por los iones cloruro es proporcional a la concentración de los iones.

Como los iones cloruro son transportados a lo largo de líneas de corriente que han sido formadas en el concreto, la distribución espacial de corrientes entre el refuerzo y la malla anódica colocada sobre la superficie es de gran importancia. La figura 2.4 muestra una representación esquemática de las líneas de corriente en un campo no homogéneo con una resistividad igual en cualquier parte entre la barra y la superficie de concreto, por ejemplo en una configuración similar a la de EEC.

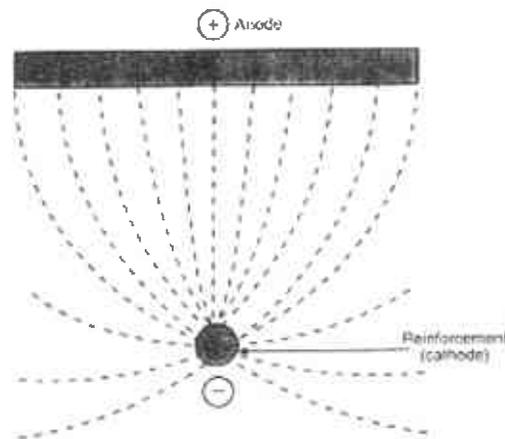


Figura 2.4. Líneas de corrientes en un campo no homogéneo entre las varillas de refuerzo y la superficie del concreto.

Como se puede ver de la figura 2.4, las líneas de corriente son más cortas entre la línea vertical que conecta la barra (cátodo) y la superficie (ánodo), y más largas las líneas saliendo de detrás de la barra. Las líneas de flujo más cortas son las que actúan con mayor fuerza sobre los iones, y por lo tanto donde se presenta la mayor velocidad de migración de los iones (fuerza de la corriente local). Para la remoción de cloruros en los aceros de refuerzo de estructuras de concreto, esto significa que la fuerza de la corriente y la velocidad de migración de los iones, es alta en las zonas directamente arriba del refuerzo, mientras esta llega a ser menor en las distancias laterales que aumentan del refuerzo. Esto significa que dentro de la cubierta los cloruros son extraídos la mayoría lentamente de la zona media entre las dos barras, y comparativamente pequeñas cantidades de cloruros pueden ser removidas por debajo del refuerzo.

De las interacciones previamente mencionadas es obvio que las diferencias en el grosor de la cubierta también juegan un papel muy importante. Dentro del área que va a ser reparada, se pueden esperar altas densidades de corriente en zonas donde el grosor de la cubierta es delgado (la resistencia eléctrica entre el refuerzo y el ánodo es pequeña también). Esto significa que la eficiencia de la EEC en concretos debe ser relativamente pequeña en áreas con cubiertas gruesas y grande en áreas con una cubierta delgada. Asumiendo que se presenta un área sin cubierta (esto quiere decir que el refuerzo está expuesto en a la superficie del concreto), un corto circuito puede resultar y la corriente

entera puede fluir aquí. Entonces cuidados especiales son necesarios para todas las áreas con bajas resistencias. Por lo tanto, grietas u otros defectos deben ser sellados antes de aplicar la EEC [39].

Por otra parte, todos los iones en solución en algún lugar son influenciados por el mismo campo eléctrico, y por lo tanto, migran independiente uno del otro. Esto puede no ser cierto para sistemas bajo una corriente constante aplicada, en los cuales la migración de cada ion puede ser determinada por la proporción de la corriente, la cual es llevada por el ion y su movilidad. Consecuentemente, bajo un control de la corriente, la migración de los cloruros puede ser influenciada significativamente por la presencia de otros aniones, como los hidróxidos, sulfatos, etc., y todos los cationes incluyendo el sodio, potasio y calcio.

Con el propósito de hacer cálculos cualitativos del cambio de distribución de los iones Cl^- y Na^+ con el tiempo, las siguientes suposiciones y simplificaciones generalmente son hechas:

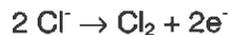
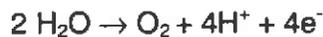
- El concreto inicialmente contiene una distribución homogénea de NaCl con igual número de iones Cl^- y Na^+ en cada lugar.
- Solamente la corriente llevada por el Cl^- y el Na^+ puede ser considerada.
- El Cl^- y el Na^+ tienen movilidades similares; las movilidades actuales pueden ser determinadas experimentalmente y ser empleadas en cálculos posteriores.
- No ocurre "atamiento" o "atrapamiento" de iones (iones que retardan o interrumpen su difusión por combinarse con algún sólido que se encuentra en la solución de poro); es necesario entender el mecanismo de "atrapado" y la relación de equilibrio entre el límite y los cloruros libres antes de ser descritos matemáticamente.
- Ninguna consideración es dada a la reacción de los electrodos debido a que estos no influyen en la redistribución de los iones Cl^- y Na^+ en el concreto.
- No hay límite de solubilidad de los iones debido a que no hay datos disponibles para las solubilidades de Cl^- y Na^+ en la solución de los poros de la pasta de cemento.
- No hay cambios en los valores locales de la resistencia eléctrica y la movilidad iónica debido a la redistribución de los iones; esto debe ser determinado independientemente.

- Solo las fuerzas de migración debidas al campo eléctrico aplicado y no a las fuerzas de difusión, son simuladas.

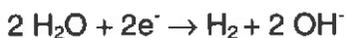
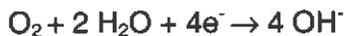
En la práctica, ninguna de las suposiciones arriba mencionadas es completamente válida, sin embargo es razonable aceptar la ultima debido a que la velocidad de difusión es despreciable comparada con la de migración. A pesar de su invalidez, se piensa apropiado tomar en cuenta estas suposiciones [40].

La EEC es un proceso electroquímico, así como lo es la corrosión del refuerzo. La reacción de corrosión consiste de una reacción anódica y una catódica. La reacción anódica causa el deterioro del refuerzo disolviéndose éste, y ocurriendo en lugares donde el concreto ha perdido su naturaleza protectora. Simultáneamente, la reacción del cátodo produce iones hidróxidos en otros sitios a lo largo del refuerzo. Mientras la reacción anódica tiene una naturaleza nociva, la reacción catódica mejora la protección del acero.

Las diferencias de potencial entre el ánodo y el cátodo causan que los electrones sean removidos por la fuente de poder, resultando una o más de las siguientes reacciones.



Los iones cloruro y los hidróxido son repelidos del cátodo (la varilla de refuerzo) y los electrones suministrados por la fuente de poder, al mismo tiempo alrededor del refuerzo iones hidróxido son generados por electrólisis debido a los electrones.



Durante la EEC, la reacción anódica (la parte dañina), es forzada a presentarse en la malla anódica colocada temporalmente sobre la superficie del concreto, ambos inmersos o en contacto con el electrolito, mientras la reacción catódica (la parte protectora), ahora toma lugar sobre la superficie completa del refuerzo. En consecuencia, inmediatamente

toda la corrosión del refuerzo es forzada a detenerse, y la carga negativa del refuerzo repele los iones cloruro en las picaduras, y aquellos que se encuentran en las cercanías.

El incremento de iones hidróxido y la reducción simultánea del contenido de cloruros cerca de las barras, permite la repasivación de la superficie del acero si el contenido de cloruros puede ser reducido por debajo del valor del umbral crítico [41].

2.3 ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA E.E.C.

Los elementos que fundamentalmente conforman esta técnica son [42]:

Ánodo: Malla metálica colocada temporalmente en la superficie del concreto.

Cátodo: El refuerzo presente

Electrolito: Agua fresca (algunas veces hidróxido de calcio y borato de sodio)

Densidad de corriente: Óptima de 1 A/m² de superficie de concreto.

Tiempo de tratamiento: Varía de cuatro a ocho semanas.

Voltaje aplicado: De entre 10 y 40 V DC.

2.3.1 Fuente de poder.

La fuente de poder es un rectificador AC/DC que puede controlar la corriente y el voltaje. Las varillas de acero son conectadas al polo negativo y la malla anódica al polo positivo del rectificador.

2.3.2 Anodo.

Los dos tipos de ánodo más comunes son el de malla de titanio catalizado y el de malla de acero. El de malla de titanio catalizado tiene la ventaja de ser un ánodo inerte, el cual bajo condiciones adecuadas no se corroe. El recubrimiento catalizado sobre la malla es consumido al final del tiempo y después de uno o dos usos, este recubrimiento es generalmente deteriorado significativamente. La malla de titanio requiere el empleo de

una solución de electrolito amortiguadora o el electrolito regularmente es reemplazado cuando los cloruros se concentran en la solución, resultando en una acidificación del electrolito al final del tiempo. El costo de una malla de titanio es aproximadamente seis veces el costo de una malla de acero.

La malla de acero no es inerte, y se consume durante la operación del sistema. Debido a la complejidad del tratamiento, un gran porcentaje de la malla de acero puede ser reducido a herrumbre, esta herrumbre puede manchar la superficie del concreto durante el proceso y dependiendo de la aplicación, esto puede ser una preocupación. Generalmente, sin embargo, algunas manchas pueden ser removidas por medio de un chorro de arena (sandblast). En la mayoría de los casos esto no incrementa el costo del proyecto debido a que el sandblasting puede ser especificado como una preparación para el recubrimiento protector o sellante, el cual es aplicado para prevenir el nuevo ingreso de iones cloruro en el futuro.

2.3.3 Electrolito.

Diferentes soluciones son empleadas como electrolito. Los más comunes empleados son el hidróxido de calcio saturado, borato de sodio, hidróxido de sodio o simplemente agua.

Agua. El agua es el electrolito más eficiente disponible. No es costoso y es fácil de obtener en muchos lugares. No se requiere protección ambiental o de los contaminantes cuando se emplea agua potable. La gran desventaja de usar agua es que es un electrolito que no tiene una capacidad amortiguadora (solución que no presenta fácilmente una variación en el pH). Si el agua se emplea como un electrolito con un ánodo inerte en un sistema cerrado, la acidificación puede ocurrir si el agua no se reemplaza regularmente.

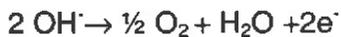
Solución de hidróxido de calcio. Son soluciones que pueden ser utilizadas para proporcionar una limitada capacidad amortiguadora donde se desea. El hidróxido de calcio tiene una baja solubilidad en agua, pero si en un contenedor de hidróxido de calcio sólido se mantiene este material, puede disolverse lentamente al final del tiempo para reemplazar la solución gastada. Las soluciones de hidróxido de calcio son más costosas

que el agua y requieren algún tiempo de preparación y mantenimiento. La eficiencia de este tipo de electrolito es poco menor que la del agua potable.

El borato de litio. No existe en realidad como tal, pero este término es comúnmente utilizado para referirse a un electrolito que contiene una mezcla de hidróxido de litio y ácido bórico. Este electrolito proporciona una muy buena solución amortiguadora, la cual es adecuada para la aplicación de sistemas cerrados. La desventaja de los electrolitos de litio es que son altamente costosos y necesitan sistemas de recirculación, los cuales a menudo son instalados para minimizar la cantidad de electrolito requerido.

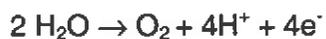
El borato de Sodio. Al igual que el borato de litio no existe en realidad como tal, este es un electrolito que contiene una mezcla de hidróxido de sodio y ácido bórico. Este electrolito proporciona una muy buena capacidad amortiguadora. La ventaja de los electrolitos de sodio es que previenen el ataque ácido sobre el concreto, además de su costo, seguridad e impacto ambiental.

Cuando una solución alcalina es empleada, los iones hidróxido presentes en el ánodo son convertidos a gas oxígeno y en moléculas de agua, de acuerdo a la ecuación siguiente:



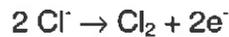
Como resultado, el pH del electrolito disminuye.

Cuando un electrolito no amortiguador que se aproxima a la neutralidad (como el agua por ejemplo), es utilizado, el agua se descompone en el ánodo y gas oxígeno e hidrógeno se forman de acuerdo a la ecuación:



Previniendo que el electrolito no contenga algunas sales, esta es la única reacción que ocurre bajo aniones que se han movido del concreto y han sido descargados. El valor del pH es inverso al rango de acidez, debido a que los iones H^+ que se han formado migran en dirección al campo de voltaje hacia el polo negativo, y se encuentran los iones OH^- y Cl^- moviéndose en la dirección opuesta. Los iones OH^- se neutralizan formando agua y

ácido clorhídrico con los iones Cl^- . De acuerdo con la ecuación siguiente, los iones cloruro que llegan al ánodo son descargados en forma de gas cloro:



La formación del gas cloro y la acidificación del electrolito son indeseables. Un electrolito que se hace ácido puede atacar el concreto, y el gas cloro es muy tóxico y peligroso para la salud. El empleo de un electrolito alcalino, como la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o la solución de borato de sodio previenen el ataque ácido sobre el concreto y el desarrollo del gas cloro. A valores de pH arriba de 7, prácticamente el gas cloro no se forma debido a que la reacción donde los iones hidróxido forman oxígeno, se presenta más fácilmente.

2.3.4 Medio electrolítico.

Son materiales simples usados para mantener o contener la solución electrolítica sobre la superficie del concreto. Existen tres tipos principales que se emplean actualmente: La fibra de celulosa, utilizada en superficies verticales, los fieltros sintéticos empleados en posiciones horizontales y tanques montados en las superficies, los cuales se usan en aplicaciones verticales.

Fibra de celulosa. Tiene la ventaja de amoldarse a cualquier forma de concreto y es muy adherente. El costo de la fibra de celulosa no es muy alto. Las desventajas del empleo de este material incluyen la necesidad de mantenerlo húmedo durante el proceso del tratamiento, y la limpieza o remoción del material al final del proceso. Dependiendo del tipo usado, la fibra de celulosa puede proveer algún amortiguamiento y un gran espacio entre el ánodo y la superficie del concreto.

Fieltros sintéticos. Los materiales de este tipo tienen la ventaja de no ser caros, pero desde un punto de vista práctico solo están limitados a superficies horizontales. Dependiendo de la aplicación, los fieltros pueden ser enrollados y reutilizados en proyectos futuros. Estos materiales también deben de ser mantenidos húmedos durante el proceso de tratamiento.

Tanques montados en la superficie. Consisten en hojas de plástico, contruidos para adaptarse a cierta estructura o en forma de paneles para cubrir grandes áreas. El costo inicial es alto, pero se pueden utilizar muchas veces, y el costo por uso se reduce.

2.4 EFICIENCIA.

La eficiencia de la EEC es la cantidad de cloruros que puede ser removida por una carga conocida que pasa a través del concreto. Polder la describe como sigue [43]:

$$C_{ex} = I * t * CRE * G / F$$

Donde:

C_{ex} = Cantidad de cloruros extraídos por metro cuadrado de superficie de concreto

I = Densidad de corriente

t = Tiempo de flujo de corriente

CRE = Factor de eficiencia de la EEC

G = Factor geométrico (superficie acero / superficie concreto)

F = Constante de Faraday

La ecuación anterior, muestra que la cantidad de cloruros removidos por una cierta cantidad de carga ($I * t$) es directamente proporcional al número de transferencia y al factor geométrico.

El factor geométrico es la razón entre el área de la superficie del concreto y al área de la superficie del acero.

El concepto de numero de transferencia del ion cloruro fue aplicado por primera vez por Bennett [44]. Como se mencionó con anterioridad, este número está relacionado con parámetros químicos como lo son la movilidad ionica, la carga del ión en la solución del poro y la concentración, además que define la cantidad de corriente llevada por el ión cloruro con relación a la corriente total. En consecuencia el número de transferencia y la

eficiencia son grandes si la mayoría de los iones contenidos en la solución del poro son cloruros, y minoría la concentración de otras cargas iónicas.

La eficiencia puede ser calculada a partir de la disminución del contenido de iones cloruro en el concreto o por el aumento de estos en el electrolito, previniendo la evolución del gas cloruro utilizando un electrolito líquido alcalino.

El número de transferencia del ión cloruro y la eficiencia de la remoción de cloruros varían entre la superficie del refuerzo y el concreto debido a las diferencias que existen entre las composiciones de las soluciones de los poros [45].

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

Las ventajas de este método sobre otros de reparación son [46]:

- La causa de la corrosión es determinada y removida.
- Las varillas son completamente pasivadas, no solo en zonas aisladas, debido al aumento de la alcalinidad en los alrededores del refuerzo.
- La naturaleza no destructiva del tratamiento resulta en una reducción del resquebrajamiento del concreto, lo cual significa:
 - Prolongación del tiempo de servicio de la estructura debido al sanado.
 - Menos ruido, polvo y contaminación ambiental.
 - No necesita de un soporte estructural caro.
- El proceso de EEC es silencioso.
- La necesidad de monitoreo electrónico permanente es eliminada.
- La arquitectura y acabos estructurales pueden ser mantenidos.
- Existe una gran variedad de sistemas anódicos para diferentes tipos de estructuras y condiciones.

Las desventajas que presenta la EEC son:

- Debido a que la EEC es un proceso electroquímico, la continuidad en el refuerzo es vital.
- Se presenta la fragilización por hidrógeno en el acero pre-tensado, haciendo que este pierda ductilidad, lo cual tiene una importancia estructural significativa.
- Generación de gas Cloro del ánodo, el cual es dañino para la salud, obligando en consecuencia a mantener un pH básico en el electrolito, para prevenir la generación del gas.
- El pH debe ser controlado también para prevenir el ataque ácido o de agua fuerte en la superficie del concreto.
- Ocasiona el incremento de la concentración de cationes álcalis en la vecindad del refuerzo, por el empleo de agregados que contienen álcalis reactivos en el concreto, resultando en reacciones de álcalis-agregados.

De lo explicado en este capítulo surge la necesidad de realizar más estudios sobre los siguientes puntos:

- Los efectos que pueden tener el empleo de los electrolitos en el concreto, como lo es el hecho de que se pueda presentar algún tipo de reacción entre los elementos que conforman a ambos.
- Efectos que puede producir la EEC en la permeabilidad del concreto.
- Cuál es el comportamiento de la remigración de los iones que quedan presentes en el concreto después del tratamiento con EEC.
- Resultados más concluyentes de los efectos de las reacciones álcali-agregados en el tratamiento de estructuras con EEC.
- Costos y metodología (estandarización) para la aplicación de la técnica.

En esta investigación se pretende obtener las bases para la posible aplicación de la EEC en estructuras de concreto contaminadas con cloruros en México, como lo son por

ejemplo puentes en las zonas costeras, debido a que es una técnica nueva que aún no ha sido aplicada en el país.

En los siguientes capítulos, como anteriormente se menciona se establecen los parámetros a aplicar en el tratamiento de concretos contaminados con cloruros, así como los resultados que se pueden esperar en la aplicación de la EEC. Esto es necesario efectuarlo en laboratorio para tener una idea de las características de la técnica o las complicaciones que se pueden presentar y las soluciones que se pueden aportar en el caso de llevarse a la práctica en campo, que datos se deben medir y tomar en cuenta para hacer una estimación de la funcionalidad de la técnica, además de verificar si es el mismo comportamiento que presenta la aplicación del EEC con los materiales con que se cuenta en México.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

El desarrollo de actividades de esta tesis se efectuó en laboratorio, con especímenes de concreto, preparados de acuerdo a las características que se desea analizar y la posterior instalación del sistema experimental.

El presente trabajo consiste básicamente en realizar mediciones de la concentración de cloruros en especímenes de concreto con varios grados de contaminación de cloruros, estas mediciones se efectuaron a dos diferentes radios del cilindro, tomando como punto de partida la varilla de refuerzo hacia el exterior del espécimen de concreto, para evaluar cual es el comportamiento de las concentraciones del ión al ser sometidos dichos especímenes a la EEC. Adicionalmente se realiza la medición del pH para verificar la realcalinización de las zonas cercanas al acero de refuerzo.

3.1 ESPECIMENES.

3.1.1 Materiales empleados.

- Agua
- Cemento
- Arena
- Grava
- Varilla de acero 1018
- NaCl (sal)

3.1.2 Preparación de Especímenes.

Se fabricaron especímenes de concreto de 15 cm de altura y 7.5 cm de diámetro de acuerdo a las normas ASTM C-407 [47] y C-192 [48] (figura 3.1).

En la fabricación de los especímenes de concreto se empleó la relación agua/cemento de 0.4, ésta se eligió por ser una de las más comúnmente empleada en la construcción de edificios y puentes.

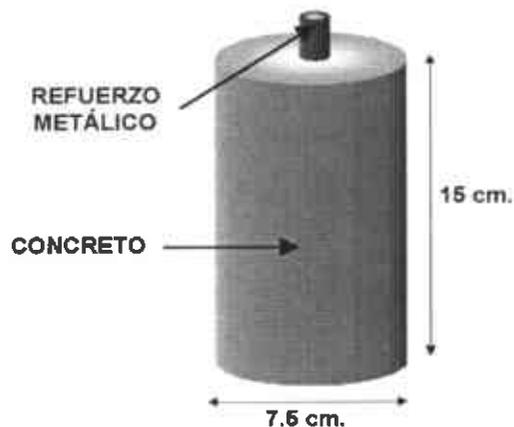


Figura 3.1. Especímenes de concreto reforzado.

Se utilizó varilla corrugada comercial de 0.95 cm (3/8 de pulgada), acero 1018. La longitud de la varilla fue de aproximadamente 18 cm y se embebió en el centro del espécimen.

En la elaboración de los especímenes de concreto se usaron tres tipos o grados de contaminación de cloruros, los porcentajes fueron de 1.5%, 3.5% y 5% por peso de cemento, con el fin de tener varias muestras representativas de los diferentes grados de contaminación. La manera como se consiguió la contaminación fue agregando NaCl (sal) al agua de mezclado (figura 3.2).

Previamente a todo lo anteriormente mencionado se debieron estimar las cantidades necesarias de cemento, arena, agua, grava y sal, esta última de acuerdo al porcentaje de contaminación establecido previamente, para finalizar se mezcló y se hizo el colado de los especímenes.

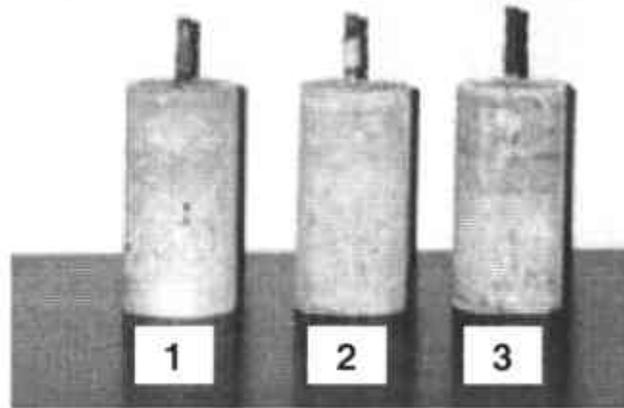


Figura 3.2. Especímenes preparados con tres grados de contaminación 1=1.5%, 2=3.5% y 3=5%

El número total de muestras de concreto elaboradas fue de 33, distribuyéndose de la siguiente forma:

- 11 muestras con una contaminación de 1.5% de Cl⁻ por peso de cemento.
- 11 muestras con una contaminación de 3.5% de Cl⁻ por peso de cemento.
- 11 muestras con una contaminación de 5.0% de Cl⁻ por peso de cemento.

De cada lote se seleccionó un espécimen para hacer la determinación del porcentaje de cloruros inicial o de referencia, de acuerdo a la norma ASTM D-1411.

3.2 NOMENCLATURA.

Al terminar de preparar todos los especímenes se les asignó la nomenclatura de la TABLA 3.1, para poder identificarlos como se muestra a continuación:

Tabla 3.1. Nomenclatura empleada.

| DIAS DE APLICACIÓN DE LA TÉCNICA | GRADO DE CONTAMINACIÓN | ZONA DE EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA. |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| S = 0 | | |
| A = 1 | | |
| B = 2 | | |
| C = 3 | | |
| D = 4 | 1 = 1.5% | C = Centro |
| E = 5 | 2 = 3.5% | E = Exterior |
| F = 6 | 3 = 5.0% | |
| G = 7 | | |
| H = 14 | | |
| I = 21 | | |
| J = 28 | | |

Quedando ordenados como se mencionó en la TABLA 3.1, de acuerdo como se muestra en la TABLA 3.2. Así, por ejemplo si se tiene un espécimen con nomenclatura D1E, significa que el número de días de aplicación de la EEC fue de cuatro, el grado de contaminación con sal es de 1.5% y la muestra se tomó en la zona denominada exterior.

TABLA 3.2. Nomenclatura asignada a cada muestra.

| MUESTRA | TIEMPO (DIAS) | % DE SAL | ZONA DE EXTRACCIÓN | MUESTRA | TIEMPO (DIAS) | % DE SAL | ZONA DE EXTRACCIÓN |
|---------|---------------|----------|--------------------|---------|---------------|----------|--------------------|
| S1C | 0 | 1.5 | Centro | E2E | 5 | 3.5 | Exterior |
| S1E | 0 | 1.5 | Exterior | E3C | 5 | 5.0 | Centro |
| S2C | 0 | 3.5 | Centro | E3E | 5 | 5.0 | Exterior |
| S2E | 0 | 3.5 | Exterior | F1C | 6 | 1.5 | Centro |
| S3C | 0 | 5.0 | Centro | F1E | 6 | 1.5 | Exterior |
| S3E | 0 | 5.0 | Exterior | F2C | 6 | 3.5 | Centro |
| A1C | 1 | 1.5 | Centro | F2E | 6 | 3.5 | Exterior |
| A1E | 1 | 1.5 | Exterior | F3C | 6 | 5.0 | Centro |
| A2C | 1 | 3.5 | Centro | F3E | 6 | 5.0 | Exterior |
| A2E | 1 | 3.5 | Exterior | G1C | 7 | 1.5 | Centro |
| A3C | 1 | 5.0 | Centro | G1E | 7 | 1.5 | Exterior |
| A3E | 1 | 5.0 | Exterior | G2C | 7 | 3.5 | Centro |
| B1C | 2 | 1.5 | Centro | G2E | 7 | 3.5 | Exterior |
| B1E | 2 | 1.5 | Exterior | G3C | 7 | 5.0 | Centro |
| B2C | 2 | 3.5 | Centro | G3E | 7 | 5.0 | Exterior |
| B2E | 2 | 3.5 | Exterior | H1C | 14 | 1.5 | Centro |
| B3C | 2 | 5.0 | Centro | H1E | 14 | 1.5 | Exterior |
| B3E | 2 | 5.0 | Exterior | H2C | 14 | 3.5 | Centro |
| C1C | 3 | 1.5 | Centro | H2E | 14 | 3.5 | Exterior |
| C1E | 3 | 1.5 | Exterior | H3C | 14 | 5.0 | Centro |
| C2C | 3 | 3.5 | Centro | H3E | 14 | 5.0 | Exterior |
| C2E | 3 | 3.5 | Exterior | I1C | 21 | 1.5 | Centro |
| C3C | 3 | 5.0 | Centro | I1E | 21 | 1.5 | Exterior |
| C3E | 3 | 5.0 | Exterior | I2C | 21 | 3.5 | Centro |
| D1C | 4 | 1.5 | Centro | I2E | 21 | 3.5 | Exterior |
| D1E | 4 | 1.5 | Exterior | I3C | 21 | 5.0 | Centro |
| D2C | 4 | 3.5 | Centro | I3E | 21 | 5.0 | Exterior |
| D2E | 4 | 3.5 | Exterior | J1C | 28 | 1.5 | Centro |
| D3C | 4 | 5.0 | Centro | J1E | 28 | 1.5 | Exterior |
| D3E | 4 | 5.0 | Exterior | J2C | 28 | 3.5 | Centro |
| E1C | 5 | 1.5 | Centro | J2E | 28 | 3.5 | Exterior |
| E1E | 5 | 1.5 | Exterior | J3C | 28 | 5.0 | Centro |
| E2C | 5 | 3.5 | Centro | J3E | 28 | 5.0 | Exterior |

3.3 SISTEMA EXPERIMENTAL.

3.3.1 Materiales y reactivos empleados.

- Malla de acero
- Alambre de cobre
- Fuente de poder
- Ácido Bórico
- Hidróxido de Sodio
- Multímetro
- Agua
- Caimanes
- Contenedor

3.3.2 Procedimiento.

Los especímenes de concreto preparados fueron un total de 33, después del tiempo de curado se instaló el sistema de EEC, de acuerdo a las siguientes características:

Anodo. Comprendido por una malla de acero, se armó de forma cilíndrica, para colocarse alrededor de cada espécimen, las dimensiones fueron de 15 cm de longitud y un diámetro de 11.5 cm. Para sujetar las mallas se emplearon abrazaderas plásticas o sujetadores para cables (figura 3.3).

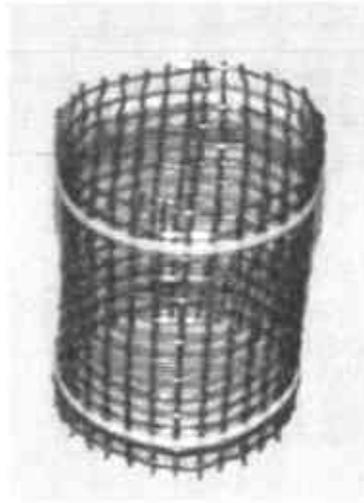


Figura 3.3. Malla de acero empleada en la extracción electroquímica de cloruros.

Electrolito. La solución que en este caso se empleo fue el borato de sodio (Na_3CO_3) con una concentración de 0.1M, ésta se preparó mezclando 12 gramos de Hidróxido de sodio (NaOH) con 6.2 gramos de ácido bórico (H_3BO_3) por litro de solución.

Los especímenes junto con la malla anódica fueron inmersos en la solución electrolito dentro de un contenedor. Todos los días se reviso que el nivel de la solución se mantuviera de forma que cubriera a los especímenes y la malla (figura 3.4).



Figura 3.4. Sistema Experimental

El sistema eléctrico se armó de la siguiente forma: La malla de acero del primer espécimen, se conecta eléctricamente por medio de un alambre a la terminal positiva de una fuente de poder, el refuerzo se conecta a la malla del siguiente espécimen y así consecutivamente con el resto de los especímenes hasta que él último completo el circuito, conectando la varilla de refuerzo con la terminal negativa de la fuente de poder (figura 3.5).

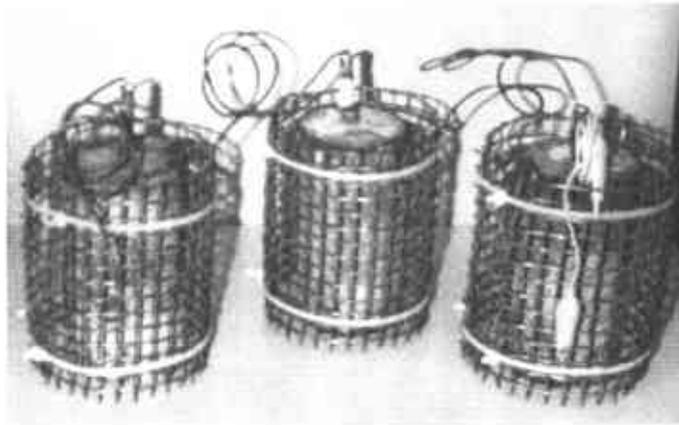


Figura 3.5. Forma en que fueron conectados los especímenes dentro del electrolito

La densidad de corriente aplicada fue de 1 A/m^2 de superficie de concreto en contacto con el acero, totalizando una corriente de 0.035 A . La corriente se reguló y monitoreó por medio de un multímetro conectado en serie al sistema.

Durante los primeros siete días se retiró un espécimen diario de cada grado de contaminación con sal, para determinar la concentración de iones cloruro a los dos diferentes radios del cilindro de acuerdo a como se indica en el esquema (figura 3.6), posteriormente el análisis se realizó cada semana hasta completar 28 días, lo anterior de acuerdo a la literatura la cuál dice que en los casos con una baja concentración de cloruros la EEC se realiza en pocos días y en los de altas concentraciones va de 4 a 8 semanas, así para realizar el análisis de la técnica se optó por efectuar una medición de la concentración de cloruros diariamente (debido a que son concentraciones bajas de sal) y para obtener la máxima extracción, cada semana hasta completar las cuatro (28 días).

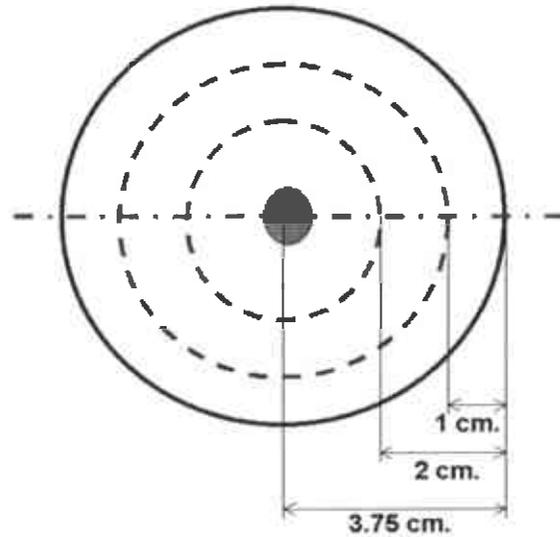


Figura 3.6. Esquema de las zonas de extracción del polvo para la determinación de cloruros donde Centro = 2 cm y Exterior = 1 cm.

La extracción de la muestra se realizó por medio de un taladro, haciendo orificios al mismo nivel de profundidad pero alrededor de la circunferencia (figura 3.7), el polvo se recuperó con la ayuda de una charola colocada debajo del espécimen (figura 3.8).

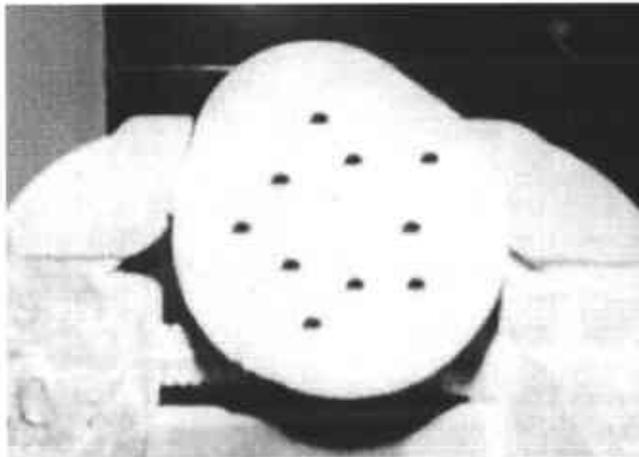


Figura 3.7. Vista de los puntos donde se extrajo la muestra de concreto pulverizada.



Figura 3.8. Extracción del polvo para la determinación de cloruros.

3.4 DETERMINACION DE CLORUROS.

El objetivo de este ensayo es la determinación de la concentración de los cloruros solubles en agua, presentes en la masa de concreto a diferentes niveles de profundidad, resultados que también pueden permitir el cálculo del coeficiente de difusión aparente del cloruro hacia el interior y con ello la velocidad de penetración del mismo en el tiempo. Esta información, interrelacionada con otras variables, permite analizar el estado actual de la estructura y también permite estimar el tiempo que tardará este ion en alcanzar el refuerzo.

3.4.1 Equipos empleados.

- Balanza analítica de precisión
- Plancha calefactora y agitador
- Probeta graduada de 100 ml.
- Bureta de 25 ml.
- Embudo de filtración
- Vasos de 50 ml. y de 250 ml.
- Matraz aforado de 250 ml. y 125 ml.
- Pipetas volumétricas de 5, 10, 20 ml. (opcionales)
- Pipetas graduadas de 10 ml.
- Papel filtro de porosidad media o rápida.

3.4.2 Reactivos.

- Agua destilada
- Sulfato férrico amónico, $(\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$
- Hidróxido de amonio (NH_4OH)
- Solución estándar de tiocianato de amonio (NH_4SCN) 0.1N [49]
- Alcohol bencílico ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{OH}$), libre de cloro
- Acido nítrico (HNO_3)
- Solución estándar de nitrato de plata (AgNO_3) 0.1N
- Solución indicadora Volhard

3.4.3 Procedimiento.

La determinación de los cloruros solubles puede ser efectuada de acuerdo con el método ASTM C-1411 [50].

La determinación se realizó de la siguiente forma:

- La muestra se obtiene pulverizada o se tritura antes de someterlas al análisis (figura 3.9).

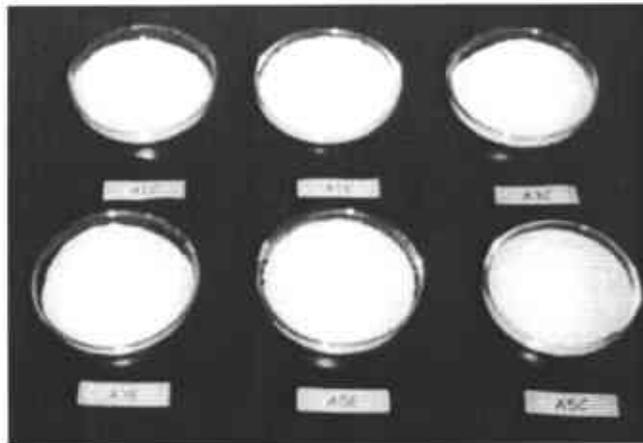


Figura 3.9. Muestras pulverizadas.

- Posteriormente se pesan 20 gr del polvo y se transfieren a un matraz
- Se añaden 31.93 ml de agua, 1.33 ml de sulfato férrico amónico (100 gr/lto) y 0.067 ml de hidróxido de amonio.
- Se agita por toda la noche o de 12 a 15 horas aproximadamente.
- Se filtra todo descartando el primer mililitro, determinando los cloruros en el filtrado limpio.
- Se acidifica una alícuota de 5 ml con 1.5 a 2.5 ml de HNO_3 concentrado.
- Se añade un volumen conocido (10 ml) de solución de AgNO_3 0.1 N que esté en exceso de la cantidad requerida para precipitar los cloruros.
- Se calienta hasta ebullición, para coagular el cloruro de plata (AgCl).
- Se enfría a temperatura ambiente, añadiendo 1.5 a 2.5 ml de alcohol bencílico y agitando vigorosamente.
- Por último se añade solución indicadora Volhard (0.5 ml) a la solución y se titula el exceso de AgNO_3 con solución NH_4SCN 0.1 N hasta que aparezca un color rojizo (figura 3.10).

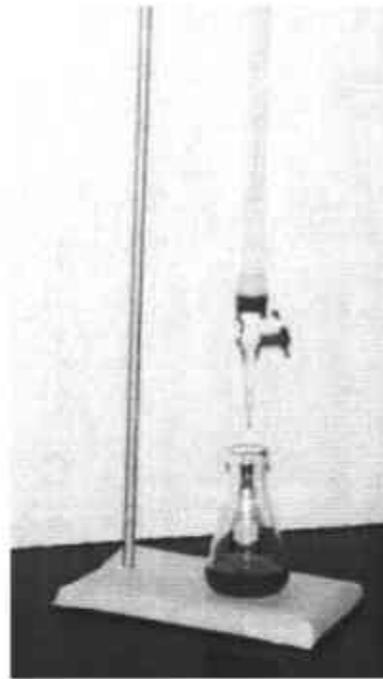


Figura 3.10. Titulación de la muestra donde se aprecia el café-rojizo debido al exceso del ion tiocianato.

3.4.4 Cálculo del porcentaje de cloruros.

El contenido de cloruros obtenido del ensayo puede expresarse referido al peso de la muestra o al peso de cemento en el concreto, para lo cual deberá conocerse la composición del mismo.

Se determinó el porcentaje de cloruros de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Cloruros} = \frac{[(aN - a'N') * 0.0355]}{bw} * 100$$

Donde:

a = Mililitros de solución de AgNO_3 añadidos.

a' = Mililitros de solución de NH_4SCN requeridos para la titulación.

N = Normalidad de la solución de AgNO_3 .

N' = Normalidad de la solución de NH_4SCN .

b = Mililitros de la alícuota de la solución, dividido por 500.

w = Gramos de la muestra usada.

3.5 DETERMINACIÓN DEL pH.

Adicionalmente, se realizó la determinación del pH en los puntos más cercanos a la varilla para verificar la realcalinización de los lugares próximos al refuerzo.

3.5.1 Materiales y reactivos empleados.

- potenciómetro
- Vasos de precipitado de 25 ml
- Agitadores
- Agua destilada



CENTRO DE
INFORMACIÓN

3.5.2 Procedimiento.

- Se tomaron 2 gr de la muestra pulverizada (de la zona denominada centro) y se transfirieron a un vaso de precipitado de 25 ml.
- Se añadieron 10 ml de agua y se agito vigorosamente hasta incorporar perfectamente la solución.
- Previamente calibrado el pH-metro se introduce en la solución de la muestra de concreto, se espera a que se estabilice y se registra la lectura del aparato.

IV. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en la determinación de la concentración de cloruros en cada uno de los tres tipos de muestras, así como una breve descripción visual de los especímenes después de aplicar la técnica.

4.1 CONCENTRACION DE CLORUROS.

TABLA 4.1. Resultados generales.

| MUESTRA | % CLORUROS | MUESTRA | % CLORUROS |
|---------|------------|---------|------------|
| S1C | 0.2139 | E2E | 0.2592 |
| S1E | 0.1112 | E3C | 0.2930 |
| S2C | 0.4306 | E3E | 0.2817 |
| S2E | 0.3165 | F1C | 0.0884 |
| S3C | 0.7784 | F1E | 0.0998 |
| S3E | 0.5674 | F2C | 0.1511 |
| A1C | 0.1112 | F2E | 0.1568 |
| A1E | 0.1055 | F3C | 0.2481 |
| A2C | 0.2538 | F3E | 0.3393 |
| A2E | 0.2309 | G1C | 0.0769 |
| A3C | 0.4306 | G1E | 0.0769 |
| A3E | 0.3564 | G2C | 0.1454 |
| B1C | 0.0998 | G2E | 0.2082 |
| B1E | 0.0941 | G3C | 0.1796 |
| B2C | 0.2481 | G3E | 0.3279 |
| B2E | 0.2024 | H1C | 0.0656 |
| B3C | 0.2709 | H1E | 0.0656 |
| B3E | 0.2709 | H2C | 0.0827 |
| C1C | 0.1226 | H2E | 0.1169 |
| C1E | 0.1055 | H3C | 0.2538 |
| C2C | 0.2024 | H3E | 0.1454 |
| C2E | 0.2595 | I1C | 0.0169 |
| C3C | 0.2367 | I1E | 0.0451 |
| C3E | 0.3222 | I2C | 0.0451 |
| D1C | 0.0941 | I2E | 0.0676 |
| D1E | 0.1226 | I3C | 0.0451 |
| D2C | 0.2141 | I3E | 0.0619 |
| D2E | 0.2141 | J1C | 0.0169 |
| D3C | 0.2817 | J1E | 0.0451 |
| D3E | 0.3043 | J2C | 0.0169 |
| E1C | 0.0789 | J2E | 0.0563 |
| E1E | 0.0563 | J3C | 0.0338 |
| E2C | 0.1859 | J3E | 0.0676 |

En la tabla anterior se concentran los resultados obtenidos en todas las muestras, haciendo una análisis más específico, de acuerdo a los grados de contaminación se obtienen los resultados mostrados en la TABLA 4.2 (porcentaje de cloruros por peso de cemento):

TABLA 4.2. Resultados de la muestra con 1.5% de contaminación en la parte central y externa.

| DIAS DE TRATAMIENTO CON EEC | CONTENIDO DE CLORUROS (% ppc) | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | CENTRO | EXTERIOR | PROMEDIO |
| 0 | 0.2139 | 0.1112 | 0.1626 |
| 1 | 0.1112 | 0.1055 | 0.1084 |
| 2 | 0.0998 | 0.0941 | 0.0969 |
| 3 | 0.1226 | 0.1055 | 0.1141 |
| 4 | 0.0941 | 0.1226 | 0.1084 |
| 5 | 0.0789 | 0.0563 | 0.0676 |
| 6 | 0.0884 | 0.0998 | 0.0941 |
| 7 | 0.0769 | 0.0769 | 0.0769 |
| 14 | 0.0656 | 0.0656 | 0.0656 |
| 21 | 0.0169 | 0.0451 | 0.0310 |
| 28 | 0.0169 | 0.0451 | 0.0310 |

Este comportamiento se puede analizar mejor en forma gráfica, tal como se muestra en la figura 4.1.

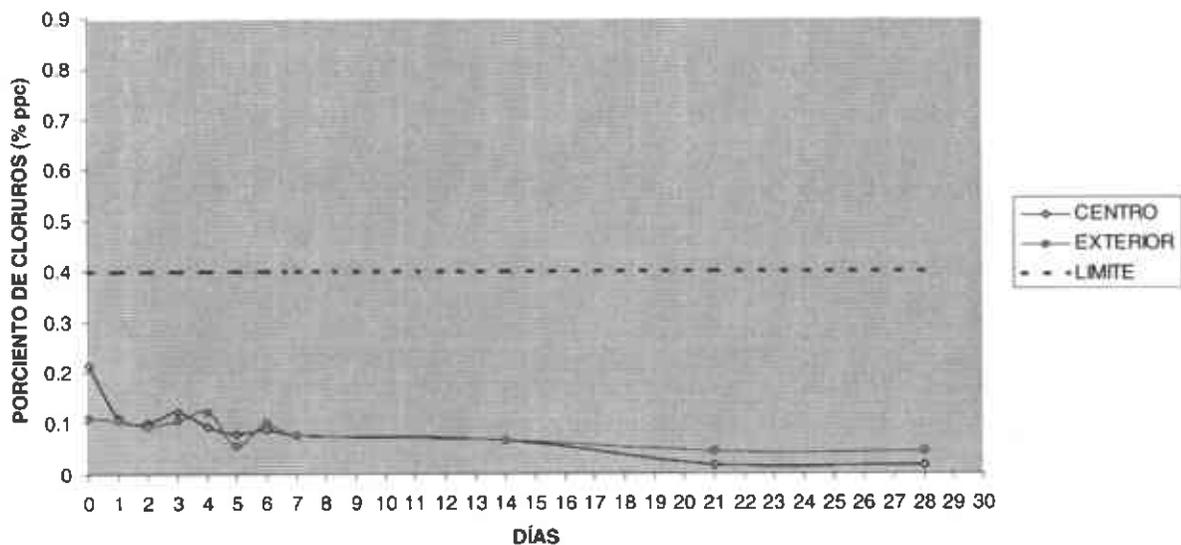


Figura 4.1. Gráfica del comportamiento en la concentración de cloruros con respecto al tiempo, de la muestra con 1.5% de NaCl durante la aplicación de la EEC.

Para el caso de los especímenes con 3.5% de cloruros, los resultados se muestran en la TABLA 4.3 y en la figura 4.2.

TABLA 4.3. Resultados de la muestra con 3.5% de contaminación en la parte central y externa.

| DIAS DE TRATAMIENTO CON EEC | CONTENIDO DE CLORUROS (% ppc) | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | CENTRO | EXTERIOR | PROMEDIO |
| 0 | 0.4305 | 0.3165 | 0.3735 |
| 1 | 0.2538 | 0.2309 | 0.2424 |
| 2 | 0.2481 | 0.2024 | 0.2253 |
| 3 | 0.2024 | 0.2595 | 0.2310 |
| 4 | 0.2141 | 0.2141 | 0.2141 |
| 5 | 0.1859 | 0.2592 | 0.2226 |
| 6 | 0.1511 | 0.1568 | 0.1539 |
| 7 | 0.1454 | 0.2082 | 0.1768 |
| 14 | 0.0827 | 0.1169 | 0.0998 |
| 21 | 0.0451 | 0.0676 | 0.0564 |
| 28 | 0.0169 | 0.0563 | 0.0366 |

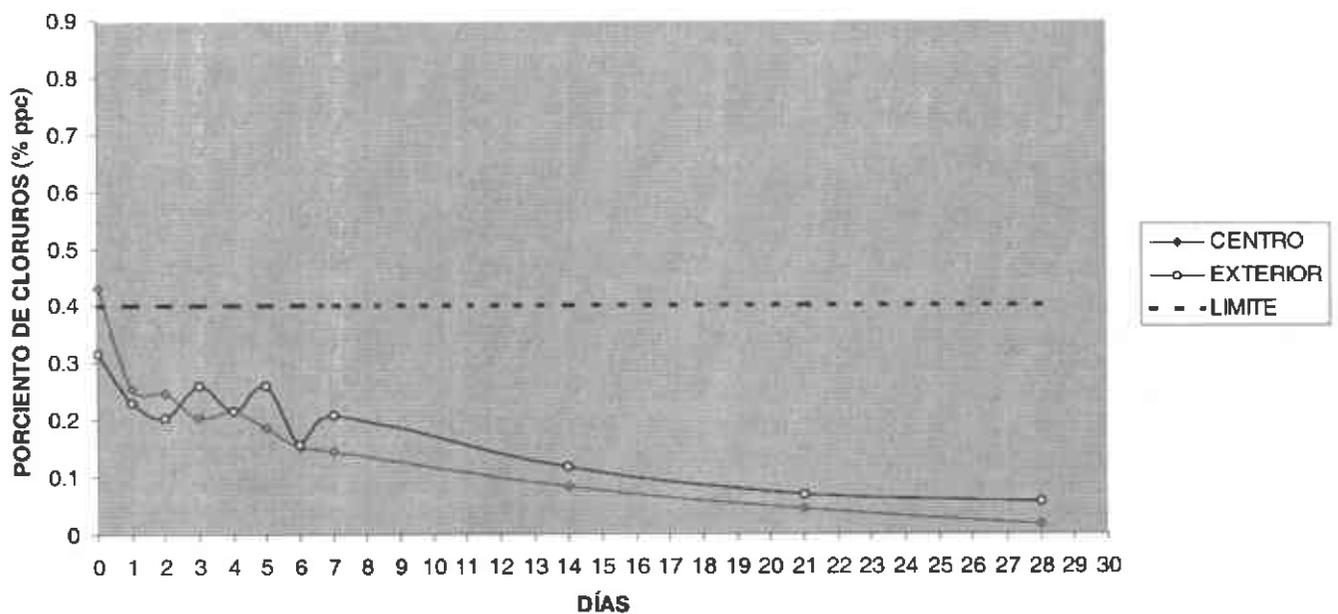


Figura 4.2. Gráfica del comportamiento en la concentración de cloruros con respecto al tiempo, de la muestra con 3.5% de NaCl durante la aplicación de la EEC.

Por último, en el caso de los especímenes con 5% de cloruros, los resultados se muestran en la TABLA 4.4 y en la figura 4.3.

TABLA 4.4. Resultados de la muestra con 5% de contaminación en la parte central y externa.

| DIAS DE TRATAMIENTO CON EEC | CONTENIDO DE CLORUROS (% ppc) | | |
|--------------------------------|-------------------------------|----------|----------|
| | CENTRO | EXTERIOR | PROMEDIO |
| 0 | 0.7784 | 0.5674 | 0.6729 |
| 1 | 0.4306 | 0.3564 | 0.3935 |
| 2 | 0.2709 | 0.2709 | 0.2709 |
| 3 | 0.2367 | 0.3222 | 0.2795 |
| 4 | 0.2817 | 0.3043 | 0.2930 |
| 5 | 0.2930 | 0.2817 | 0.2874 |
| 6 | 0.2481 | 0.3393 | 0.2937 |
| 7 | 0.1796 | 0.3279 | 0.2538 |
| 14 | 0.2538 | 0.1454 | 0.1996 |
| 21 | 0.0451 | 0.0619 | 0.0535 |
| 28 | 0.0338 | 0.0676 | 0.0507 |

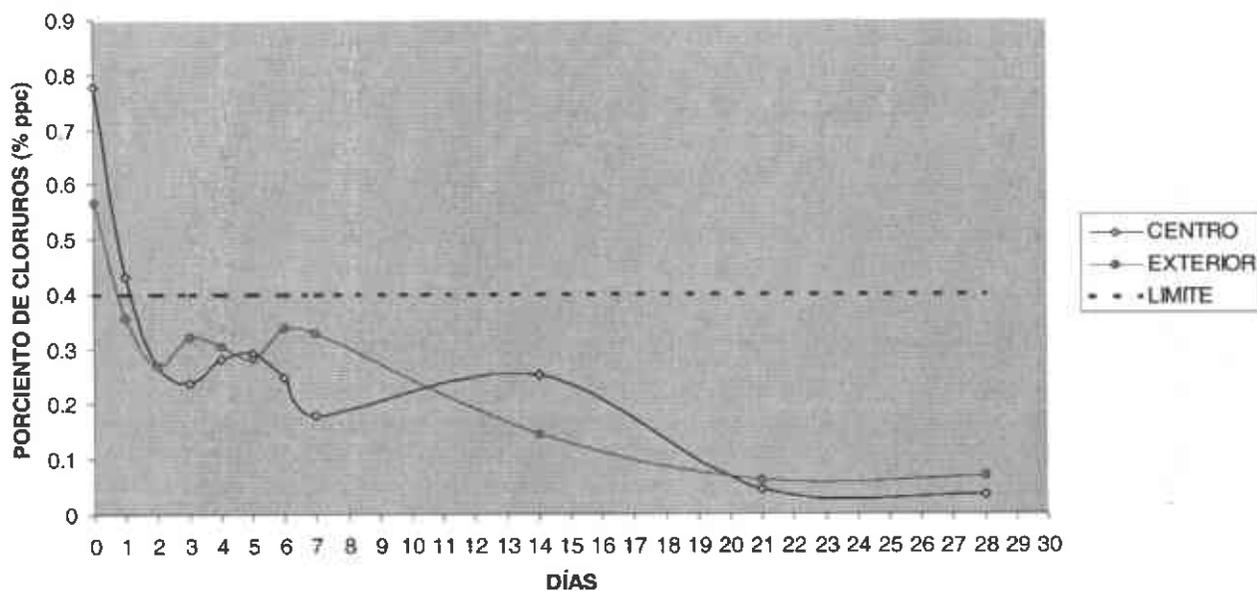


Figura 4.3. Gráfica del comportamiento en la concentración de cloruros con respecto al tiempo, de la muestra con 5% de NaCl durante la aplicación de la E.EC.

En todos los casos se aprecia que realmente hay una disminución en la concentración de la sal contenida en los especímenes promediando como valor mínimo en la concentración de aproximadamente 0.0225% en el centro, 0.0563% en el exterior y en general de 0.0394%.

En la figura 4.4 se muestra la comparación de los resultados del porcentaje de cloruro promedio obtenido de las muestras analizadas.

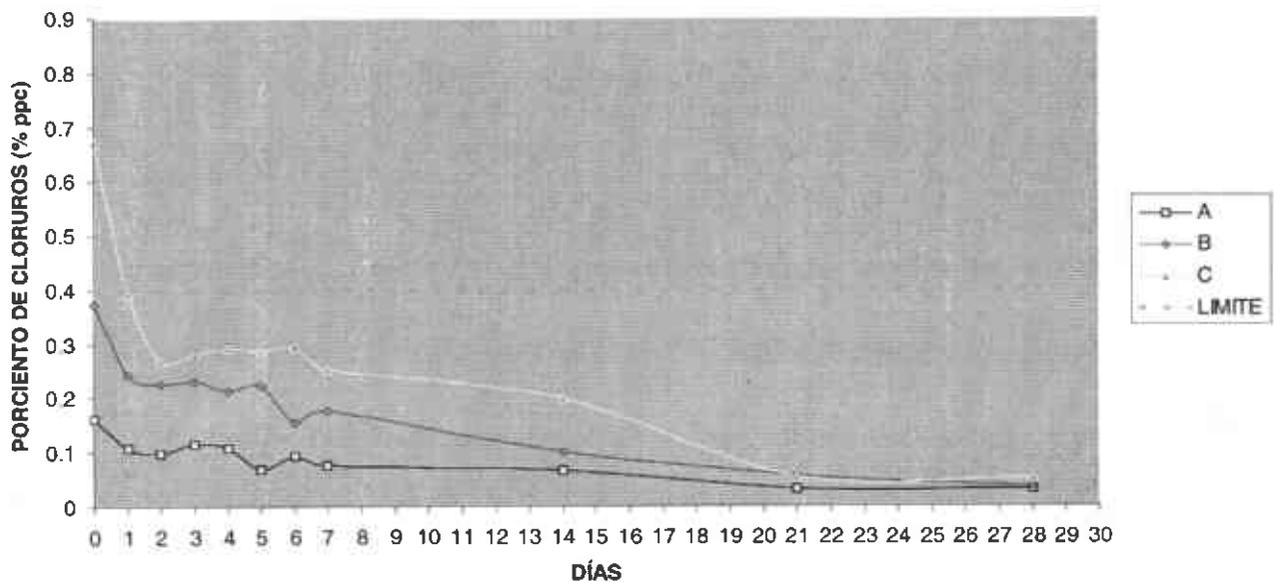


Figura 4.4. Gráfica de los porcentajes promedio de la concentración de cloruros con respecto al tiempo, donde A= 1.5%, B=3.5% y C=5% de NaCl durante la aplicación de la EEC.

En el resultado base (cero días de tratamiento) de los tres tipos de especímenes, la concentración es muy baja lo que pudo haber sido ocasionado porque al existir cloruros durante el mezclado estos pueden reaccionar con los componentes del concreto, por otra parte el porcentaje de cloruros es mayor en el centro comparado con el valor del exterior, esto tal vez se debe a que los cloruros que se encuentran cerca de la superficie del concreto se perdieron por difusión hacia el exterior durante el tiempo de curado, siendo

más fácil en comparación con los que se encuentran en el centro por su cercanía con la superficie.

De acuerdo con la figura 4.4, al final en todos los casos se aprecia que realmente hay una disminución en la concentración de la sal contenida en los especímenes, promediando como valor mínimo en la concentración de aproximadamente 0.0225% en el centro, 0.0563% en el exterior y en general de 0.0394%. lo cual podría indicar que la eficiencia de la técnica aumenta con la concentración del contaminante en la muestra.

En la figura 4.5 se esquematiza gráficamente el comportamiento de la variación de la concentración en los especímenes.

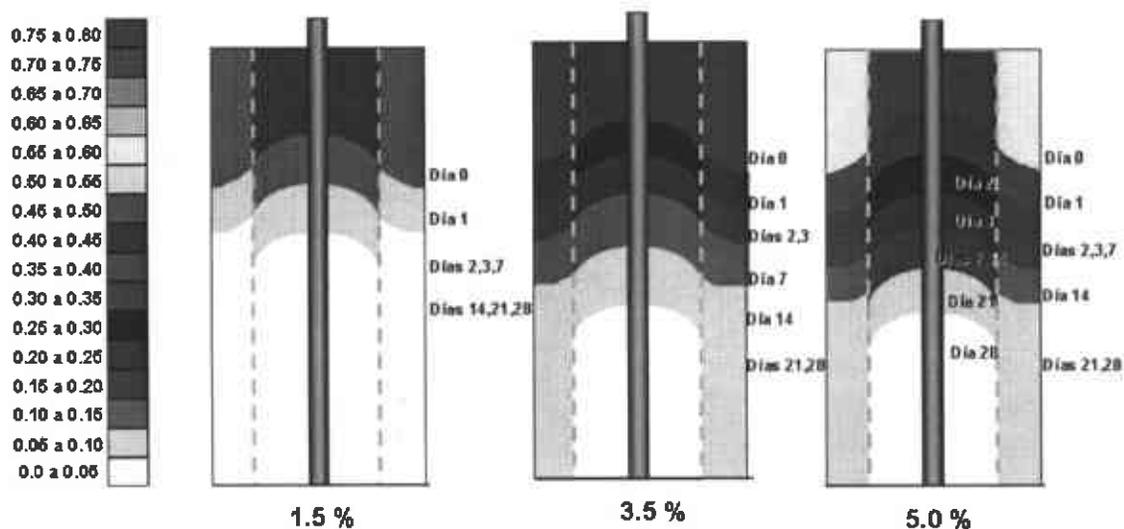


Figura 4.5. Representación esquemática de la variación de la concentración en los especímenes durante la aplicación de la EEC.

En la muestra con una contaminación de sal de 1.5% la cantidad de sal que se extrajo fue del 80.9%, en la de 3.5% de 90.2% y en la de 5% fue de 92.47%, lo cuál podría indicar que la eficiencia de la técnica aumenta con la concentración del contaminante en la muestra.

De acuerdo a los resultados con aplicar la técnica cinco días se obtienen resultados satisfactorios, ya que se alcanza un nivel aceptable de concentración, pero hay que tener en cuenta que se trató de concentraciones de cloruros relativamente bajas, en los casos con concentraciones muy altas puede tardar de 4 a 8 semanas.

4.2 pH.

Tabla 4.5. Resultados de pH obtenidos.

| MUESTRA | PH |
|---------|-------|
| S1 | 11.15 |
| A1 | 11.50 |
| B1 | 11.54 |
| C1 | 12.32 |
| D1 | 12.19 |
| E1 | 12.23 |
| F1 | 12.50 |
| G1 | 11.34 |
| H1 | 12.22 |
| I1 | 12.40 |
| J1 | 12.27 |
| S2 | 10.55 |
| A2 | 11.00 |
| B2 | 11.44 |
| C2 | 11.86 |
| D2 | 12.00 |
| E2 | 12.00 |
| F2 | 11.89 |
| G2 | 11.62 |
| H2 | 12.19 |
| I2 | 12.00 |
| J2 | 12.37 |
| S3 | 10.26 |
| A3 | 11.00 |
| B3 | 11.00 |
| C3 | 11.52 |
| D3 | 11.46 |
| E3 | 12.08 |
| F3 | 12.00 |
| G3 | 11.47 |
| H3 | 12.00 |
| I3 | 12.35 |
| J3 | 12.50 |

En la TABLA 4.5 se concentran los resultados obtenidos en la medición de pH en todas las muestras, y en la figura 4.6 se muestra gráficamente estos resultados.

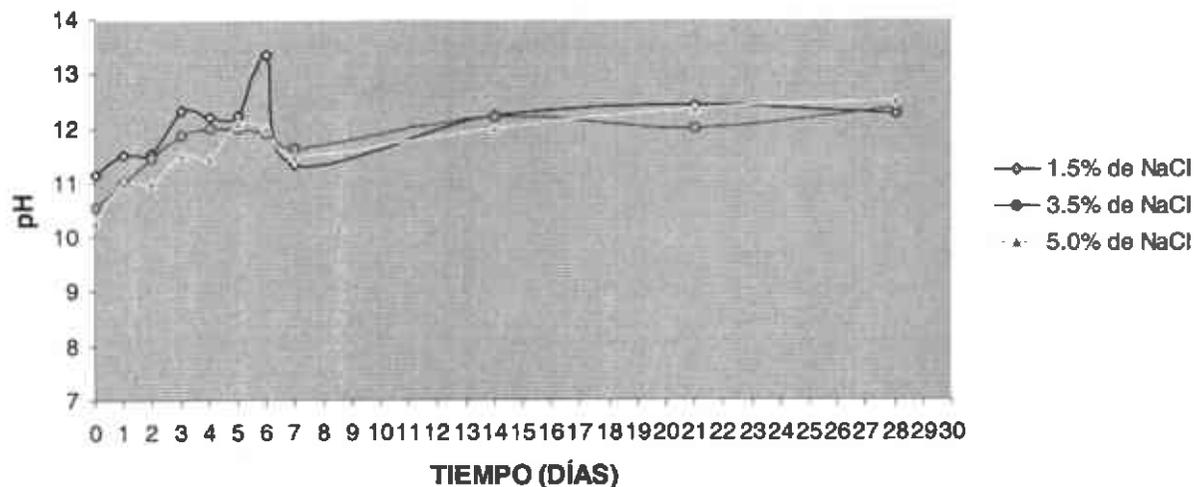


Figura 4.6. Gráfica de los pH determinados respecto al tiempo de los tres tipos de especímenes durante la aplicación de la EEC.

De los resultados anteriores se puede apreciar el aumento del pH en las zonas cercanas a la varilla, donde en el caso de las muestras contaminadas con 5.0% de NaCl se logra llegar al valor de pasivación (12.5-13), en general las muestras promediaron un pH de 10.65 y el aumento fue en un valor promedio de 12.38.

4.3 ANALISIS VISUAL.

Al terminar de aplicar la técnica se apreció en algunas mallas la formación de herrumbre, en ciertas zonas, la aparición del compuesto se empezó a observar en dichas mallas a partir de la segunda semana, al principio se creyó que era debido a que el espécimen contenía mayor cantidad de sal antes de la remoción, pero los otros especímenes con mallas que presentaban esta formación eran de los grados de contaminación más pequeños, lo que se observó en cada uno, era que el refuerzo estaba más cerca de la superficie del concreto en esa sección debido a una ligera inclinación del mismo, por la mala inmersión del refuerzo al momento de preparar los especímenes y en consecuencia

la varilla esta más cerca de la malla en ese sitio en comparación con otros (figuras 4.7-4.8).

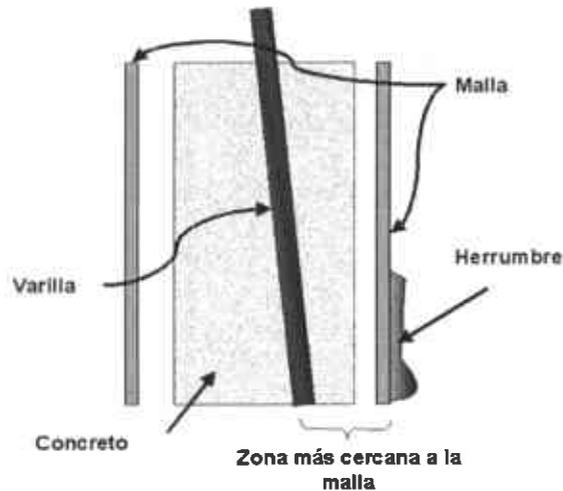


Figura 4.7. Vista transversal del concreto con la malla y la varilla con la posible inclinación que presento al embeberse en el espécimen.

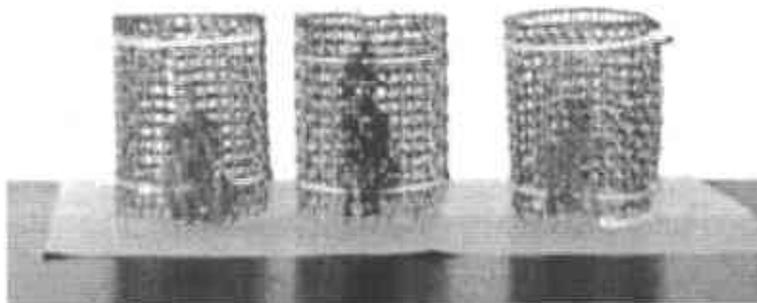


Figura 4.8. Mallas con la formación de herrumbre (Conglomerado café-rojizo).

También como consecuencia de la formación de la herrumbre, este óxido se mezcló en el electrolito produciendo una coloración anaranjada o café-rojizo claro (figura 4.9),

ocasionando que los cilindros de concreto se mancharan del mismo color (figura 4.10), esto en la práctica produce que la estructura presente un aspecto poco estético.

Al terminar de emplear la solución electrolito al día 28 se reviso el pH, y se observó que este varió de 13 en el electrolito original a 10.7.



Figura 4.9. En la fotografía se distingue el color anaranjado en contraste con el blanco del contenedor, que presentó el electrolito al disolverse la herrumbre que se formó.

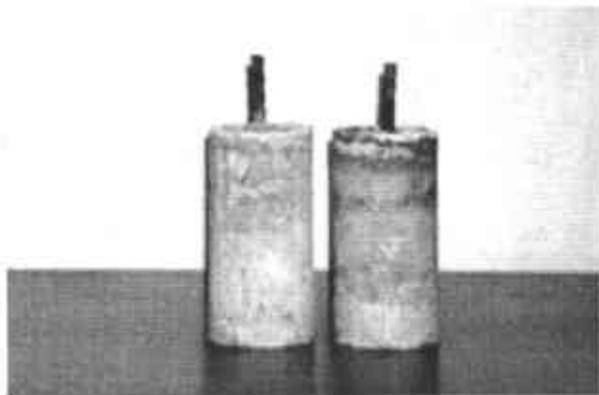
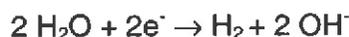
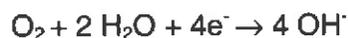


Figura 4.10. Especimen manchado con la herrumbre formada, comparado con el color original que presentaba el concreto.

Cómo se mencionó anteriormente, las reacciones que se presentan en el cátodo (varilla de refuerzo) son:



En las ecuaciones anteriores se puede apreciar que se produce hidrógeno el cual se desprende a la atmósfera en forma de gas, en los especímenes de prueba, se observó por la interfase refuerzo/concreto, en la parte superior del concreto, un burbujeo producido por el gas hidrógeno entre un agrietamiento que se formó por la mala inmersión de la varilla y la compactación del concreto (figura 4.11). Lo anterior durante la práctica en concretos con baja porosidad, es muy perjudicial ya que al evolucionar este gas buscará caminos de escape y al no encontrarlos tenderá a agrietar el concreto perdiendo la adherencia concreto/acero y en consecuencia la pérdida de propiedades estructurales.

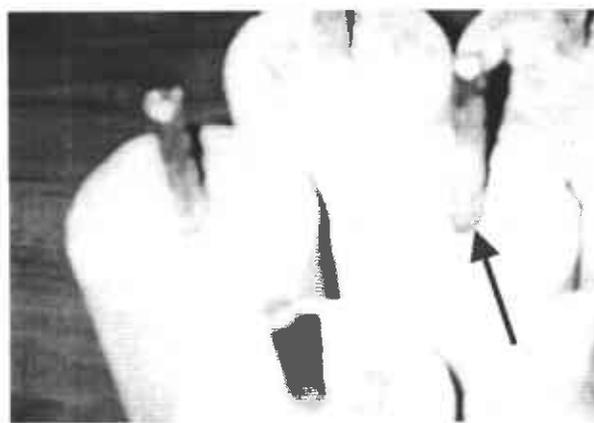


Figura 4.11. En la fotografía se puede apreciar el agrietamiento formado a un lado de la varilla en la parte superior del espécimen por donde se observó el burbujeo.

4.4 PARÁMETROS ELÉCTRICOS.

En la figura 4.12 se muestra la cantidad de carga eléctrica acumulada en amperes-hora/metro cuadrado ($A\cdot h/m^2$) que se estima haber pasado a través de cada muestra durante los días de tratamiento, esto se considera que se presentó por igual en los tres tipos de especímenes.

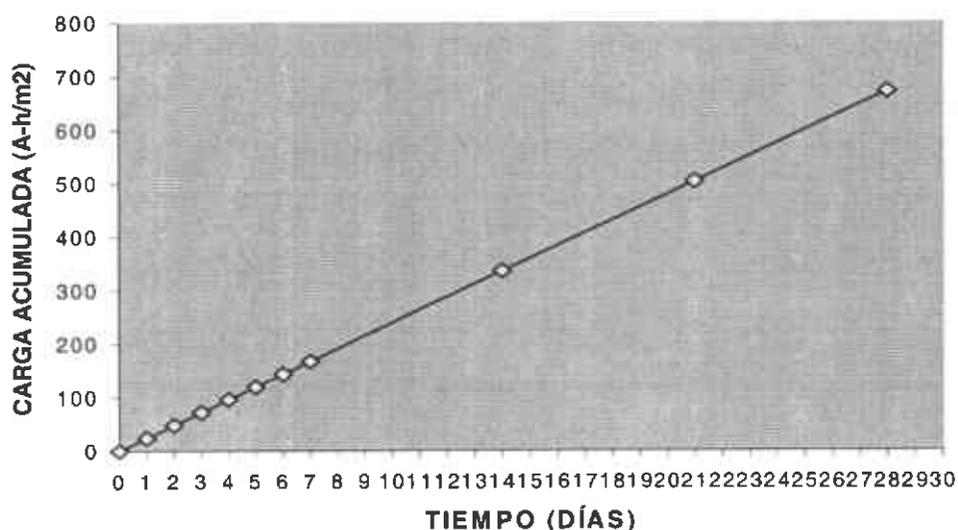


Figura 4.12. Gráfica de la carga acumulada durante la aplicación de la EEC.

Al final del tratamiento la carga total acumulada fue de aproximadamente $672 A\cdot h/m^2$. Si comparamos estos resultados con los obtenidos en la determinación de cloruros (figura 4.13) se puede apreciar que conforme aumenta la acumulación de carga la técnica se vuelve menos eficiente, es decir la remoción es menor.

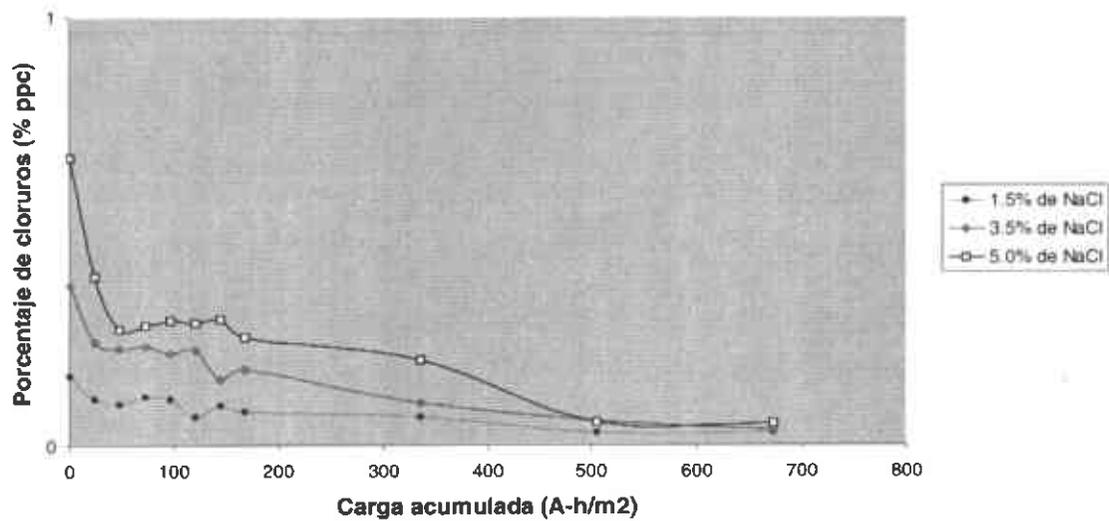


Figura 4.13. Gráfica de la carga acumulada contra la concentración de cloruros durante la aplicación de la EEC.

Durante el tratamiento también se observó la variación del potencial y la corriente (la cual se trató de mantener constante por medio del voltaje) esto probablemente fue ocasionado por el cambio de la resistencia en el sistema. En el inicio de la experimentación el voltaje aplicado se tuvo que aumentar ya que en el primer día de aplicación la corriente bajo, en promedio los parámetros obtenidos fueron un voltaje de 27.5 Volts y una corriente 0.035 Amperes.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.

- ✦ El análisis de las secciones en las diferentes muestras de concreto después de la EEC, indican que el tratamiento fue exitoso, por lo que la EEC puede ser usada en la remoción de los iones cloruro libres en el concreto contaminado, alcanzando inclusive a lugares que presentan irregularidades geométricas en el acero debido a la migración de los iones.
- ✦ La naturaleza electroquímica de la EEC facilita la desactivación del proceso de corrosión en el refuerzo. De esta manera la corrosión en zonas no detectadas se elimina. Durante el tratamiento, todas las picaduras son vaciadas y desactivadas por la reacción del cátodo (evolución de hidrógeno) lo que indica que también esta cargada negativamente y los iones negativos se alejan por la repulsión de cargas.
- ✦ Los valores mínimos de la concentración de cloruros fueron de 0.0225% para el centro, 0.0563% para el exterior de los especímenes y de todos los resultados de 0.0394%, por lo que en general se puede esperar que tras la EEC, la concentración de cloruros sea menor de 0.4% (valor límite), e inclusive si se hace referencia de la mayoría de las normas en la que los valores límite de cloruros se encuentran de 0.2 a 1% ppc, por lo tanto los valores obtenidos están por debajo.
- ✦ El grado de disminución en la concentración de cloruros, que se observó fue mayor se presentó en los especímenes contaminados con un 5% de NaCl, esto debido a que la velocidad de migración está en función de la concentración de los iones y la temperatura, es decir que a mayor concentración mayor es la migración de iones debido a que el número de transferencia se incrementa y es independiente de la

densidad de corriente, comprobándose esto por la aplicación de una corriente constante.

- * La cantidad de cloruros extraídos fue de 80.9% a 92.5% del total de cloruros presentes, estos datos resultan satisfactorios.
- * Durante el primer día de aplicación de la técnica se aprecia que se presenta el mayor cambio en la concentración de cloruros, así que el tiempo requerido para rehabilitar una estructura es poco, ya que a partir del segundo día los grados de contaminación se encontraban por debajo del límite de cloruros.
- * El porcentaje de la concentración de cloruros en la muestra al inicio de la aplicación de la EEC es máxima pero la eficiencia del sistema en función de la carga que fluye va disminuyendo, ya que esta en función del número de transferencia de los iones cloruros.
- * De acuerdo a los resultados del análisis visual, se encontró la formación de herrumbre en la malla de acero, esto sucedió en las zonas donde la varilla está más cercana a la superficie del concreto, lo anterior se explica a partir de la formación de las líneas de corriente imaginarias, recordando que las líneas que van directas del acero al refuerzo presentan un mayor transporte de iones cloruros debido a que la velocidad de migración es mayor, agregando a esto el factor de que el grosor de concreto entre el acero y la superficie del concreto es más delgado que en otras zonas, traduciéndose en una mayor cantidad de cloruros que reaccionaban con la malla.
- * Con respecto a la malla de acero empleada en este trabajo, se comprobó que efectivamente esta reacciona con los cloruros formando un compuesto o herrumbre de color café-rojizo, el cual es soluble en el electrolito y en consecuencia los especímenes sufrieron manchado del mismo color, lo que en la práctica no es deseable, sin embargo se puede solucionar con la limpieza por medio del chorro de arena.
- * En el desarrollo de la extracción electroquímica de cloruros se evidencia la evolución de hidrógeno que en forma de gas intentaba escapar a la atmósfera a través de las

grieta formada entre el acero y el concreto, esto es un gran inconveniente para la aplicación en campo.

- * Se observó la evolución de oxígeno en la malla y no de gas cloro, ya que el gas cloruro no evoluciona a un pH por arriba de 7.

5.2 RECOMENDACIONES.

- * La extracción electroquímica de cloruros puede ser aplicada más comúnmente en estructuras de concreto contaminadas por sales de deshielo, en costas, industria química o cuando se emplea materiales de PVC inmersos en el concreto.
- * La medición de cloruros se realizó en el espécimen de concreto, pero también existe la opción de efectuarla en el electrolito, verificando el aumento de la concentración de los iones en la solución.
- * La malla que se empleó en este trabajo es la más rentable en lo que a costos se refiere comparadas con las que existen disponibles en la actualidad (titanio o platino), que son demasiado costosas, por lo que surge la necesidad de experimentar con otros tipos que no necesariamente tienen que ser metálicas, para encontrar la más adecuada en servicio y costo.
- * Otro punto donde se puede buscar mejoras es el electrolito, ya que los que se emplean son líquidos y hay que adaptarse a las condiciones donde se va a emplear, por ello resulta interesante que en vez de utilizar las fibras celulósicas y otros materiales que son impregnados con la solución buscar algún otro tipo de material que por sí mismo brinde las funciones de electrolito y se pueda moldear al lugar y permanecer en ese sitio, como por ejemplo algún tipo de gel.

- * La selección del ánodo, electrolito y el medio es probablemente la más importante consideración para asegurar una instalación exitosa. Existen numerosas combinaciones y materiales disponibles. Cada una tiene sus propias ventajas y desventajas. Sin embargo resulta interesante seguir probando con otros tipos de materiales a los ya existentes para lograr mejores resultados.

- * En general la aplicación de la extracción electroquímica de cloruros en el presente trabajo se encuentra en un estado inicial, por lo que resulta necesario continuar más experimentaciones al respecto como es el monitoreo del comportamiento de otros parámetros como es la resistencia, la corriente y la temperatura.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1] Materials and Methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction. Report No. FHWA-RD-00-091.2000.
- [2] Kosmatka S. H. y Panarese W.C. Diseño y control de mezclas de concreto. IMCYC. ISBN 968-464-074-9. México. 1992.
- [3] Méndez G. Pavimentos de Concreto. Procedimientos para Autoconstrucción. IMCYC. México 1992.
- [4] Ibídem. Kosmatka.
- [5] Norma NMX-C-414-ONNCCE-1999. Grupo Cemex. México, 2000.
- [6] Instructivo para concreto. Secretaría de Recursos Hidráulicos. Dirección de Estructuras y Proyectos. Depto. de Ingeniería Experimental. México, 1960.
- [7] Ibídem. Méndez.
- [8] Higginson E.C. Manual de Control del Concreto. UNAM. Facultad de Ingeniería. México. 1962.
- [9] Ibídem. Méndez.
- [10] Ramírez C. Protección del concreto en la industria. Consultoría e Ingeniería de la Corrosión, S.C. Estado de México, México. 1987.
- [11] Trocónis de Rincón O. Romero de Carruyo A. Andrade C. Helene P. Díaz I. Manual de inspección, evaluación y diagnostico de corrosión en estructuras de hormigón armado. ISBN 980-296-541-3.

- [12] Tejada S. y Salas J. Glosario de términos de corrosión. UNAM. Facultad de Química. México 1995.
- [13] Castro P. Castillo R.M. Génesca J. Corrosión en estructuras de concreto reforzado. Un problema común de durabilidad. Construcción y tecnología. México, 1998.
- [14] *Ibidem*. Tróconis.
- [15] Holm J. Comparison of the corrosion potential of calcium chloride and a calcium nitrate based non-chloride accelerator a macrocell approach. Corrosión, concrete and chlorides. ACI SP 102-4. Detroit, USA, 1987.
- [16] Hansson C.M. Concrete The Advanced Industrial Material of the 21st century. Metallurgical and Materials transactions. Vol. 26-A. USA, 1995.
- [17] Neville A. Corrosión del acero de refuerzo en el concreto. IMCYC. Vol. 22. Núm. 162. México, 1984.
- [18] Fontana Mars G. Corrosión engineering. Mc Graw-Hill. Tercera edición. 1987.
- [19] Wright P. Concrete Durability. Curso de Ingeniería Civil. CECM. Gran Bretaña, 1999.
- [20] *Ibidem*. Trocónis.
- [21] Andrade C., San Juan M. A. Chloride diffusion coefficient obtained from migration tests of high performance concrete, proceedings of rebar. International Workshop on Durability of High Performance Concrete. Viena, 1994. Published by Rilem.
- [22] Fraczek J. A review of electrochemical principles as applied to corrosion of steel en a concrete or grout environment. Corrosion, Concrete and Chlorides. ACI SP 102-2. Detroit, USA, 1987.

- [23] Castro Borges P. Corrosión en estructuras de concreto armado. IMCYC. ISBN 968-464-085-4. México, 1998.
- [24] Idem. Castro Borges P.
- [25] Comité ACI 201. Guide to durable concrete (ACI 201.2 R-92). American Concrete Institute. Detroit, USA, 1980.
- [26] Ibídem. Trocónis.
- [27] Ibídem. Castro Borges.
- [28] Almeraya Calderón F., Gaona Tiburcio C. y Martínez Villafañe A. Monitoreo y control de la corrosión en estructuras de concreto. Construcción y Tecnología. México 1998.
- [29] Ibídem. Trocónis.
- [30] Elsener B. Molina M. and Böhni H. The electrochemical removal of chlorides from reinforced concrete. Corrosion Science, Vol. 35, Gran Bretaña, 1993.
- [31] Electrochemical Chloride Extraction from Concrete Bridge Components. Technical Brief # 2. Canadian Strategic Highway Research Program. Canada, 1995.
- [32] Idem. Elsener B. Molina M. and Böhni H.
- [33] Ibidem. Technical Brief # 2.
- [34] Piron D. L. The electrochemistry of corrosión. Published by NACE. 2ª edición. 1994
- [35] Ihekweba N.M., Hope B.B. and Hansson C.M. Pull-out and bond degradation of steel rebars in ECE concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, U.S.A. 1996

- [36] Mietz J. Elsener B. And Polder R. Corrosion of reinforcement in concrete. Monitoring, prevention and rehabilitation. European Federation of Corrosion by the institute of Materials Publications No. 25. Gran Bretaña, 1997.
- [37] *Ibidem.* Technical Brief # 2.
- [38] Clemeña G. and Jackson D. Trial Application of Electrochemical Chloride Extraction on concrete Bridge Components in Virginia. VTRC Report No. 00-R18, U.S.A., 2000.
- [39] Mietz J. Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures. A State of the Art Report. European Federation of Corrosion by the Institute of Materials Publications No. 24, Gran Bretaña, 1998.
- [40] Hansson I.L.H. and Hansson C.M Electrochemical Extraction of Chlorides from Concrete. Part I. A qualitative model of the process. Cement and Concrete Research. Vol. 23, U.S.A.1993.
- [41] *Ibidem.* Mietz J.
- [42] Chloride Removal. Rehabilitating Concrete Structures. NORCURE Chloride Removal Systems. 1996.
- [43] *Ibidem.* Mietz J.
- [44] Bennett J. Paper 316. Corrosión '90. NACE. USA 1990.
- [45] *Ibidem.* Mietz J.
- [46] *Ibidem.* Technical Brief # 2.
- [47] Norma C-773. Testing Method for compressive (crushing) strength of fired whiteware materials. American Society for Testing and Materials (ASTM). PA, USA, 1995.

- [48] Norma C-192. Práctica para la elaboración y curado de especímenes de concreto para pruebas en el laboratorio. American society for testing and materials (ASTM). PA, USA, 1995.
- [49] Norma E-200. Práctica para la preparación, estandarización y almacenamiento de soluciones reactivos y estándar para análisis químico. American Society for Testing and Materials (ASTM). PA, USA, 1995.
- [50] Norma D-1411. Método de prueba para cloruros solubles en agua presentes como agregados en mezclas. American Society for Testing and Materials (ASTM). PA, USA, 1995.