



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES
AVANZADOS, S. C.
POSGRADO

Tesis que como Requisito para obtener el Grado de
Doctor en Ciencias en Materiales presenta:

**“Condiciones necesarias para realizar una
Extracción Electroquímica de Cloruros
eficientemente”**

Estudiante de Doctorado:

M. C. Sandra Luz Rodríguez Reyna

Directores de Tesis:

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio CIMAV

Dra. Juana María Miranda Vidales UASLP

Chihuahua, Chihuahua, a 24 de Agosto del 2010



CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

ACTA DE GRADO

EN CHIHUAHUA, CHIH., A LAS 10:00 HORAS DEL DIA 24
MES DE AGOSTO DEL 2010. SE REUNIERON LOS
MIEMBROS DEL JURADO INTEGRADO POR LOS SEÑORES:

Dr. Alberto Martínez Villafañe
Dr. Miguel Ángel Neri Flores
Dr. José Castañeda Ávila
Dr. Facundo Almeraya Calderón
Dr. José Guadalupe Chacón Nava

BAJO LA PRESIDENCIA DEL PRIMERO Y CON EL CARÁCTER DE SECRETARIO
EL ÚLTIMO, PARA PROCEDER A EFECTUAR LA EVALUACIÓN DE LA TESIS
"DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES NECESARIAS PARA REALIZAR
UNA EFICIENTE EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS"

PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTORADO
EN CIENCIA DE MATERIALES
HABIÉNDOSE CUBIERTO LOS REQUISITOS ESTABLECIDOS
EN EL PLAN DE ESTUDIOS VIGENTE, QUE SUSTENTA:

Sandra Luz Rodríguez Reyna

LOS MIEMBROS DEL JURADO EXAMINARON AL SUSTENTANTE Y
DESPUÉS DE DELIBERAR ENTRE SI, RESOLVIERON DECLARARLO(A)

- APROBADA -

EL PRESIDENTE DEL JURADO LE DIO A CONOCER EL RESULTADO Y
PROCEDIÓ A TOMAR LA PROTESTA DE LEY.



POSGRADO

Dr. Alberto Martínez Villafañe
PRESIDENTE

Dr. Miguel Ángel Neri Flores
1er VOCAL

Dr. José Castañeda Ávila
3er VOCAL

Dr. José Guadalupe Chacón Nava
SECRETARIO

Dr. Facundo Almeraya Calderón
2do VOCAL

**“Condiciones necesarias para realizar una
Extracción Electroquímica de Cloruros
eficientemente”**

Dedicatoria

Con todo mi cariño y respeto dedico esta tesis a:

A mi Mamá y mi Papá por darme la vida, que con su cariño, amor y disciplina me guiaron en mi camino.

A mis hermanos: Sergio, Bibiana y Juan que con su ejemplo me enseñaron el amor al estudio y al trabajo.

A mis primos, sobrinos, cuñadas y mis queridos suegros que siempre han estado conmigo para apoyarme.

A mi esposo Leo que con su cariño y paciencia me ha enseñado amar y con su ayuda incondicional logre concluir esta tesis

A mi pequeño Daniel que ha sido mi motivación para mejorar día a día.

Y a mi Dios por valorar lo que soy y lo que tengo.

Agradecimientos

A mis directoras de tesis, la Dra. Juana María Miranda Vidales y la Dra. Citlalli Gaona Tiburcio por su dedicación, constancia y trabajo para que yo pudiera culminar mi tesis.

Mi gratitud a la Dra. Lilia Narváez, Dr. Luis Hernández y el Dr. Ángel Cárdenas por sus observaciones y sugerencias en este trabajo.

Agradezco a la dirección del CIMAV por darme la oportunidad de realizar este proyecto de investigación, asimismo al Instituto de Metalurgia en Ingeniería de Materiales en la UASLP desde profesores, personal administrativo y laboratoristas.

Mi cariño y gratitud a Imelda, Dora, Verónica, Alberto e Israel que siempre me tendieron una mano para seguir adelante.

A mis lindos compañeros de trabajo: Adrian, César, Enrique, Orlando, Aurelio y Mauro.

Gracias al Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo y al Dr. Ricardo Romero por ayudarme a creer que no existen fronteras y conseguir mi estancia breve pero sustanciosa en Madrid.

Con esta estancia tuve la fortuna de conocer y aprender de grandes compañeros en el Instituto de Construcción Eduardo Torroja que lograron motivar mi aprendizaje: Samuel, Lina, Filipe, Hitham, Fabiano y Leticia.

Mi agradecimiento y mi admiración a la Dra. Ma. Carmen Andrade Perdrix por sus conocimientos, su facilidad para resolver dudas y el gran amor que le profesa a la Investigación.

Finalmente agradezco el apoyo del CONACYT a lo largo de mis estudios de Maestría, Doctorado y mi estancia en el Extranjero.

ÍNDICE

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Título General | i |
| Dedicatoria | ii |
| Agradecimientos | iii |
| Índice | iv |
| Capítulos | |
| 1. Resumen | 1 |
| 2. Introducción | 5 |
| 2.1. COMPONENTES DEL CONCRETO | 7 |
| 2.1.1. El Cemento | 7 |
| 2.1.2. Los áridos del Concreto | 8 |
| 2.1.3. El Concreto | 9 |
| 2.1.4. Agua del amasado | 10 |
| 2.1.5. El Acero | 12 |
| 2.1.6. Concreto Armado | 12 |
| 2.2. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS | 13 |
| 2.2.1. Trascendencia económica de la corrosión en las Estructuras de Concreto Armado (ECA) | 13 |
| 2.2.2. Fundamentos sobre la corrosión | 14 |
| 2.2.3. Protección y durabilidad de las armaduras en el concreto | 16 |
| 2.2.4. Causas de la corrosión de las armaduras | 18 |
| 2.2.4.1. Corrosión localizada ocasionada por los cloruros | 19 |
| 2.2.4.2. Corrosión Generalizada | 23 |
| 2.2.5. Factores acelerantes | 25 |
| 2.2.6. Efectos de la corrosión | 27 |
| 2.2.7. Recomendaciones para aumentar la durabilidad de las armaduras | 28 |
| 2.2.8. Medidas de la corrosión en el concreto armado | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.9. Métodos electroquímicos de rehabilitación (MER) | 31 |
| 2.2.9.1. Protección Catódica (PC) | 32 |
| 2.2.9.2. Realcalinización Electroquímica (RAE) | 34 |
| 2.3. EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS | 36 |
| 2.3.1. Fundamentos de la EEC | 36 |
| 2.3.2. Estudios preliminares de la EEC | 38 |
| 2.3.3. Factores que influyen en una EEC | 39 |
| 2.3.4. Eficiencia de la EEC | 42 |
| 2.3.5. Efectos provocados en una ECA al aplicar la EEC | 43 |
| 3. Hipótesis y Objetivo General | 45 |
| 3.1. Hipótesis | 47 |
| 3.2. Objetivo General | 48 |
| 4. Metodología Experimental | 49 |
| 4.1. PROGRAMACIÓN DE LOS EXPERIMENTALES | 52 |
| 4.1.1. EXPERIMENTO A | |
| Efecto del grado de precorrosión en la armadura de acero y la duración de una EEC en cilindros de mortero | 52 |
| 4.1.2. EXPERIMENTO A Y B | |
| Efecto de la densidad de corriente aplicada durante la EEC en cilindros de mortero | 52 |
| 4.1.3. EXPERIMENTO C | |
| Efecto del tipo de contaminante al aplicar una EEC en cilindros de mortero | 53 |
| 4.1.4. EXPERIMENTO D | |
| Efectos ocasionados al aplicar densidades de corriente elevadas durante la EEC en cilindros de mortero cuando los grados de precorrosión son distintos | 53 |
| 4.1.5. EXPERIMENTO E | |
| Extracción de Sulfatos y Cloruros en cubos de mortero | 53 |

Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 4.2. | MATERIALES | 61 |
| 4.2.1. | a) Varillas decapadas | 61 |
| 4.2.1. | b) Varillas precorroídas al 1% NaCl | 63 |
| 4.2.2. | Tipos de Cementos | 63 |
| 4.2.3. | Arena | 65 |
| 4.3. | ELABORACIÓN DE PROBETAS | 65 |
| 4.3.1. | Probetas Cilíndricas | 65 |
| 4.3.2. | Probetas cubicas | 66 |
| 4.4. | REALIZACIÓN DEL LA EEC | 67 |
| 4.4.1. | EEC en cilindros de mortero | 67 |
| 4.4.2. | EEC en morteros cúbicos | 68 |
| 4.5. | TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN | 69 |
| 4.5.1. | Toma de muestras | 69 |
| 4.5.2. | Determinación de pruebas mecánicas de mortero | 71 |
| | 4.5.2.1. Ensayo de compresión en cilindros de concreto | 72 |
| 4.5.3. | Caracterización de las armaduras | 74 |
| 4.5.4. | Porosidad | 75 |
| 4.5.5. | Determinación del contenido de humedad | 77 |
| 4.5.6. | Contenido de cloruros | 78 |
| 4.5.7. | Contenido de Sulfatos | 79 |
| | 4.5.7.1. Análisis Cualitativo de sulfatos en el concreto | 80 |
| | 4.5.7.2. Análisis Cuantitativo de sulfatos en el concreto | 81 |
| 4.5.8. | Técnicas Electroquímicas utilizadas para estimar la corrosión en los refuerzos | 82 |
| | 4.5.8.1. Potencial de corrosión (Ecorr) | 82 |
| | 4.5.8.2. Resistencia de polarización (Rp) | 86 |
| | 4.5.8.3. Curvas de Polarización | 87 |
| 4.5.9. | Microscopio electrónico de Barrido | 88 |

| | |
|---|-----------|
| 5. Resultados y discusión | 89 |
| 5.1 EXPERIMENTO A | 91 |
| 5.1.1. Grados de precorrosión de las varillas de acero | 91 |
| 5.1.2. Extracción electroquímica de cloruros | 92 |
| 5.1.3. Contenido de Cloruros en el mortero | 93 |
| 5.1.4. Estado corrosivo de las varillas | 94 |
| 5.1.5. Polarización en las varillas | 97 |
| 5.2. EXPERIMENTOS A Y B | 99 |
| 5.2.1. Grados de precorrosión de las varillas de acero | 99 |
| 5.2.2. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC | 100 |
| 5.2.3. Análisis puntuales del porcentaje en peso de los Cloruros | 102 |
| 5.2.4. Estado corrosión en las varillas | 103 |
| 5.2.5. Potenciales de corrosión en las varillas | 105 |
| 5.3. EXPERIMENTO C | 109 |
| 5.3.1. Grados de precorrosión de las varillas de acero | 109 |
| 5.3.2. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC | 110 |
| 5.3.3. Estado corrosivo de las varillas | 111 |
| 5.3.4. Potenciales de corrosión en las varillas | 114 |
| 5.4. EXPERIMENTO D | 117 |
| 5.4.1. Perdidas de peso | 118 |
| 5.4.2. Grados de precorrosión de las varillas de acero | 120 |
| 5.4.3. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC | 121 |
| 5.4.4. Estado corrosivo de las varillas | 123 |
| 5.4.5. Potenciales de corrosión en las varillas | 126 |
| 5.4.6. Porosidad en el mortero | 127 |
| 5.5 EXPERIMENTO E | 131 |
| 5.5.1 Grados de precorrosión de las varillas de acero | 131 |
| 5.5.2. Perfil de Cloruros extraídos en diferentes puntos de muestra | 132 |
| 5.5.3. Perfil de Sulfatos extraídos en diferentes puntos de muestra | 134 |
| 5.5.4. Estado corrosivo de las varillas | 135 |

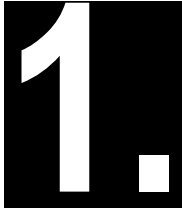
Índice

| | |
|---|------------|
| 5.5.5. Potenciales de corrosión en las varillas | 136 |
| 6. Conclusiones | 139 |
| 6.1. EXPERIMENTO A | 141 |
| 6.2. EXPERIMENTO A Y B | 142 |
| 6.3. EXPERIMENTO C | 143 |
| 6.4. EXPERIMENTO D | 144 |
| 6.5. EXPERIMENTO E | 145 |
| 6.6. CONCLUSIÓN FINAL DE LA INVESTIGACIÓN | 146 |
| 7. Referencias | 147 |



1 Resumen





RESUMEN

En este trabajo se estudio las *Condiciones necesarias para realizar una Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC) eficientemente* en probetas de mortero.

Se hace una comparación de las probetas con las siguientes variables:

1. Partiendo de grados de precorrosión incipientes y elevados en las armaduras de acero
2. Cambiando los tiempos y las densidades de corriente al aplicar la técnica
3. Utilizando distintas sales
4. Cambiando la geometría de los morteros

De acuerdo con los resultados obtenidos, la EEC puede disminuir las velocidades de corrosión cuando se parte de una armadura de acero con grados de precorrosión incipientes; sin embargo si el daño por corrosión es severo la EEC no logra repasivar al acero. Al incrementar la duración y las densidades de corriente del tratamiento se observa que la cantidad de cloruros removidos del mortero también aumenta.

Al utilizar sales distintas (NaCl y CaCl_2) se encontró que el Cloruro de Calcio ocasiona mayor daño por corrosión al acero que el utilizar cloruro de Sodio. No obstante no se observo un cambio en la efectividad (cantidad de cloruros extraídos) al variar el tipo de sal.

Resumen

De acuerdo con los datos obtenidos en porosidad, las probetas de mortero que no se les efectuó una EEC presentan en general una menor porosidad en comparación aquellas probetas con EEC. Un dato interesante en este estudio, fue que al incrementar la densidad de corriente también se incrementa la porosidad. Esto puede explicarse ya que al incrementar la energía aplicada en el sistema, esta contribuye a un mayor movimiento de cargas, ocasionando una mayor porosidad. Aún así, los valores se encuentran en el rango permitido para un mortero de calidad.

Con respecto al cambio de forma de la probeta de mortero, se encontró que el perfil de cloruros varía a lo largo de la sección transversal. Tanto para una probeta cilíndrica como una probeta cubica al utilizar densidades de corrientes bajas (1 y 2.5 A/m²) se encontró una mayor cantidad de cloruros removidos cerca del ánodo. La respuesta puede deberse a que la energía (densidad de corriente aplicada) disminuye en la superficie externa del mortero, es decir no es constante.

Finalmente en el último estudio se comprobó que la Extracción electroquímica de Cloruros también puede utilizarse como técnica para extraer otras especies (en este caso sulfatos); además que para aquellas probetas que fueron contaminadas con cloruros y sulfatos, se logro extraer en el mismo tratamiento las dos especies.

2 **Introducción**

2.1.

COMPONENTES DEL CONCRETO

2.1.1. EL CEMENTO.

Hace muchos años que se inicio la búsqueda de un material conglomerante para fabricar concreto de alta resistencia frente a las acciones químicas. La aparición del cemento, ha sido un factor determinante para que el mundo adquiriera un aspecto diferente.

En un sentido muy general, el cemento es un material pulverizado de extremada finura que actúa como conglomerante hidráulico, es decir, que amasado con agua adquiere consistencia pastosa, fraguando tanto al aire como bajo el agua, endureciendo después gradualmente hasta adquirir consistencia pétreo.

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo. Los egipcios ya utilizaban yeso impuro calcinado, los griegos y romanos empleaban caliza calcinada y posteriormente aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo; dando origen al primer concreto de la historia (*Neville, 1999*). A partir de esta mezcla se desarrollaron otros tipos de cementos, como el “cemento Portland” patentado por el inglés Joseph Aspdin, en 1824.

El cemento Portland, es un cemento hidráulico compuesto principalmente de silicatos de calcio hidratados que fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua. En el curso de esta reacción, denominada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una pasta, y cuando se le agrega arena y grava, se forma lo que se conoce como el material más versátil utilizado para la construcción: EL CONCRETO. En la tabla 2.1 se muestran los compuestos que integran el cemento Portland.

Tabla 2.1. Compuestos principales del cemento Portland.

| Nombre del compuesto | Composición de óxido | Abreviatura |
|-----------------------------|---|-----------------------|
| 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 |
| Aluminoferrita tetracálcica | $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | C_4AF |

Para determinar los compuestos principales en el cemento Portland se pueden utilizar los cálculos realizados por (Labahn, 1985) (Bogue, 1955), denominados “composición de Bogue”. Estas ecuaciones aparecen a continuación (los términos entre paréntesis representan el porcentaje del óxido dado en la masa total del cemento).

$$\text{C}_3\text{S} = 4.07(\text{CaO}) - 7.60(\text{SiO}_2) - 6.72(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.43(\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2.85(\text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = 2.87(\text{SiO}_2) - 0.754(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$$

$$\text{C}_3\text{A} = 2.65(\text{Al}_2\text{O}_3) - 1.69(\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.04(\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

2.1.2. LOS ÁRIDOS DEL CONCRETO.

La acción agresiva puede llegar no solo a la pasta de cemento endurecida, sino también a los áridos, razón por la que se deben conocer sus características físicas y químicas, para la fabricación del concreto. Asimismo, este hecho indica que la fabricación de un concreto con el cemento apropiado; y teniendo en cuenta todas las precauciones, carece de sentido si no se da la debida importancia a la elección del árido. Las normas DIN 1047 y 4232 están dedicadas a los áridos de concreto. Lo dispuesto en la norma ASTM Sr C 33 sobre los áridos del concreto, deja principalmente en manos del ingeniero constructor su elección.

Arena.- La dimensión máxima de sus granos será de 5 mm. La arena esta formada principalmente de cuarzo, con algo de mica y, en menores cantidades algunos granos de otros minerales. El cuarzo es un mineral de grandes resistencias mecánicas, que soporta la acción agresiva de todos los ácidos orgánicos e inorgánicos, con excepción del ácido fluorhídrico. La

arena no debe de contener impureza alguna de origen orgánico; ya que su acción sobre la resistencia mecánica es perjudicial. Las impurezas orgánicas influyen sobre el endurecimiento de los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados, ya que estabilizan los geles, retardando o evitando su cristalización (*Imre Biczok, 1981*).

2.1.3. EL CONCRETO.

El concreto es el material de construcción más usado debido a las propiedades que éste presenta. Algunas de las características de éste material, son:

- **Posee una excelente resistencia al agua.** A diferencia de la madera y del acero común, la capacidad del concreto para soportar la acción del agua sin sufrir un serio deterioro, lo hace un material ideal para construir estructuras destinadas a controlar, almacenar y transportar agua.
- **Facilidad para dar una gran variedad de formas y tamaños a los elementos del concreto estructural.** Esto se debe a que el concreto fresco tiene una consistencia plástica, lo que permite al material fluir dentro de la cimbra prefabricada.
- **Es un material de construcción económico.** Los principales ingredientes para producir el concreto, son relativamente baratos frente a otros materiales.
- **Consideraciones sobre energía y conservación de recursos naturales.** Comparado con la mayoría de los materiales para el uso en la Ingeniería, la producción del concreto requiere menos insumo de energía, además de que se pueden reciclar grandes cantidades de desperdicios industriales como sustituto de materiales cementantes o de los agregados (*Kumar y Monteiro, 1998*).

La mezcla del concreto se compone básicamente de: **agregados y pasta**. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada) para formar una masa semejante a una roca,

debido a que endurece al reaccionar químicamente el cemento y el agua (Valle, et al., 2001). Después de proporcionar adecuadamente los componentes que se requieren para la elaboración del concreto (dosificación, mezclado, consolidación, acabado y curado), el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, que requiere poco o nulo mantenimiento.

2.1.4. AGUA DEL AMASADO.

Para la fabricación del concreto es preciso emplear agua apropiada. El agua del amasado no debe contener nunca sustancias perjudiciales, que influyan desfavorablemente sobre el fraguado, endurecimiento y estabilidad del concreto.

Para la preparación del concreto pueden emplearse todas las aguas potables existentes en la Naturaleza, sin embargo las que no pueden utilizarse son:

1. Las aguas con contenidos iguales o superiores al 3 por ciento de sales
2. Las aguas con contenidos iguales o superiores al 0.5 por ciento de sulfatos
3. Las aguas ácidas con pH inferiores a 4.

Es indispensable examinar las aguas que pueden ser sospechosas antes de su empleo, comprobando su capacidad de utilización mediante ensayos de laboratorio.

La presencia de agua o humedad es un factor importante que controla los diferentes procesos de deterioro del concreto. El transporte del agua en el concreto está determinado por el tipo y distribución del tamaño de poros. Estos poros son de vital importancia desde el punto de vista electroquímico, por ser el medio por el cuál, los iones despasivantes se introducen dentro del concreto, causando la corrosión de la armadura de acero.

Los tipos de poros que se encuentran en el concreto son: poros de compactación, aire ocluido o incluido por agentes aireantes, poros de gel y poros capilares; siendo estos últimos poros los más importantes; ya que se presentan con mayor frecuencia.

Los poros capilares afectan de manera relevante la durabilidad del concreto; ya que constituyen alrededor de dos tercios de la porosidad total. Estos poros inciden en mayor medida en todos los fenómenos de transporte,

debido a la existencia de fuerzas capilares y de tensión superficial que aceleran determinados procesos, y es a través de los poros, por donde penetran agentes agresivos externos. En la figura 2.1 se observa un esquema de la pasta de concreto que incluye los poros de gel y capilares. La porosidad del concreto puede variar dependiendo de la relación agua/cemento, la compactación y el curado (*Sanjuán y Castro., 2002*).

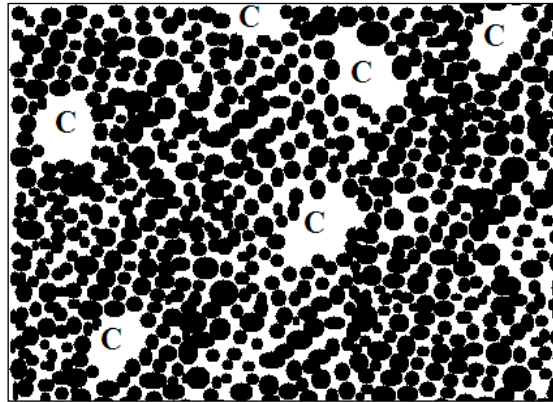


Figura 2.1 Modelo simplificado de la estructura de la pasta (*Powers, 1958*). Los puntos rellenos representan partículas de gel; los espacios intersticiales son poros del gel; los espacios marcados con **C** son cavidades capilares (se ha exagerado el tamaño de los poros de gel).

Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida, durante su dosificación.

Un **Aditivo** se utiliza como un ingrediente para mejorar las propiedades del mortero o concreto, y se añade a la revoltura inmediatamente antes o después del mezclado. El empleo de aditivos permite modificar a conveniencia las características y propiedades del concreto en estado fresco y/o endurecido, además de beneficios de costo. El aditivo más utilizado para acelerar el proceso de fraguado durante muchas décadas fue el *Cloruro de Calcio* (CaCl_2), sin embargo presenta un serio problema; los cloruros presentes aumentan el riesgo de corrosión de los metales embebidos en el concreto.

Algunos investigadores expresan que el CaCl_2 no contribuye significativamente a la corrosión del refuerzo de acero si el concreto está bien proporcionado y compactado, y si el refuerzo se encuentra recubierto (*Cohen y Mather; 1991*). Desgraciadamente, a veces, tal perfección no se puede alcanzar en la obra, y el riesgo de emplear CaCl_2 pesa más que sus beneficios.

2.1.5. EL ACERO.

El acero empleado como refuerzo en el concreto cumple la función de absorber las tensiones a tracción de la estructura. Las armaduras de acero para uso en concreto armado pretensado se clasifican en los diferentes tipos de alambres, barras y cordones. El acero empleado para armado es llamado genéricamente de “construcción” y proviene de la fundición de chatarra. Su contenido se sitúa entre 0.3 y el 0.4 por ciento. En la tabla 2.2 se muestran los porcentajes de algunos elementos químicos del acero utilizado para la “construcción”.

Tabla 2.2 Porcentajes mínimos y máximos de elementos químicos constituyentes de las armaduras de acero (NMX-C-407-ONNCCE-2001).

| Elemento | (%) Mínimo masa | (%) Máximo masa |
|----------------|-----------------|-----------------|
| Carbono | 0.3 | 0.45 |
| Manganeso | 0.50 | 0.90 |
| Silicio | 0.15 | 0.40 |
| Fósforo | - | 0.05 |
| Azufre | - | 0.04 |

2.1.6. CONCRETO ARMADO.

El *Concreto Armado (CA)*; es un material estructural mixto compuesto de acero y concreto, en donde el acero se encuentra en forma de barras en el interior del concreto. La excelente combinación de resistencia a la tracción por parte de las varillas de acero y la resistencia a la compresión del concreto, son algunas de las razones por las cuales, el CA es usado como material estructural (*Murcía, et. al., 1997*).

2.2.

CONCEPTOS BASICOS SOBRE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS

2.2.1. TRASCENDENCIA ECÓNOMICA DE LA CORROSIÓN EN LAS ECA.

En la figura 2.2 se muestra uno de los mayores problemas de degradación en las Estructuras de Concreto Armado (ECA), la corrosión del refuerzo metálico; que causa anualmente elevadas pérdidas económicas. Por lo cuál el detener o frenar este fenómeno electroquímico se ha convertido en una oportunidad de mejora para ingenieros, investigadores, diseñadores, y todo aquel que se encuentre involucrado en la industria de la construcción. La degradación de las ECA debido a procesos de corrosión ha causado implicaciones económicas elevadas (Valle, et. al., 2001).

En un estudio económico se estimó que el costo directo anual ocasionado por la corrosión en Estados Unidos de América era de 276 billones de dólares, de los cuales 22.6 billones de dólares correspondían a daños en infraestructura (edificios, puentes, carreteras, plantas, etc.) (Gerhardus et. al., 2002).



Figura 2.2 Estructura de Concreto Armado altamente dañado por la corrosión.

2.2.2. FUNDAMENTOS SOBRE LA CORROSIÓN.

Los metales se encuentran en general en la naturaleza, formando compuestos (óxidos, sulfatos, etc.) con otros elementos. Para usarlos en forma elemental hay que extraer el metal mediante un proceso de reducción, lo que requiere comunicarle cierta cantidad de energía. El proceso inverso por el que el metal vuelve a su estado natural, va acompañado de un descenso de su energía de Gibbs, es decir, tiene lugar mediante una reacción espontánea. Este proceso, que corresponde a una oxidación, se conoce como corrosión y representa la destrucción paulatina del metal.

La corrosión metálica cuando tiene lugar en medio acuoso, es un fenómeno de carácter electroquímico, es decir, supone la existencia de una reacción de oxidación y una de reducción, y la circulación de iones a través del electrolito. Así, sobre la superficie del metal, se generan dos zonas, de las cuales donde se produzca la oxidación del metal, actuará de ánodo:



Liberando electrones, que emigran a través del metal hacia otro lugar donde reaccionan a base de producir una reducción de alguna sustancia existente en el electrolito. Esta sustancia serán los iones de hidrógeno en medios ácidos:



y el oxígeno disuelto en el agua en medios alcalinos y neutros:



El proceso supone, pues, la generación de una pila electroquímica, tal y como se muestra en la figura 2.3. La corrosión a través del metal y a través del electrolito entre el ánodo y el cátodo, supone el funcionamiento de un circuito cerrado. Si el circuito se interrumpe en alguno de sus puntos, la pila no puede funcionar y la corrosión se detiene. (*Feliu y Andrade 1989*).

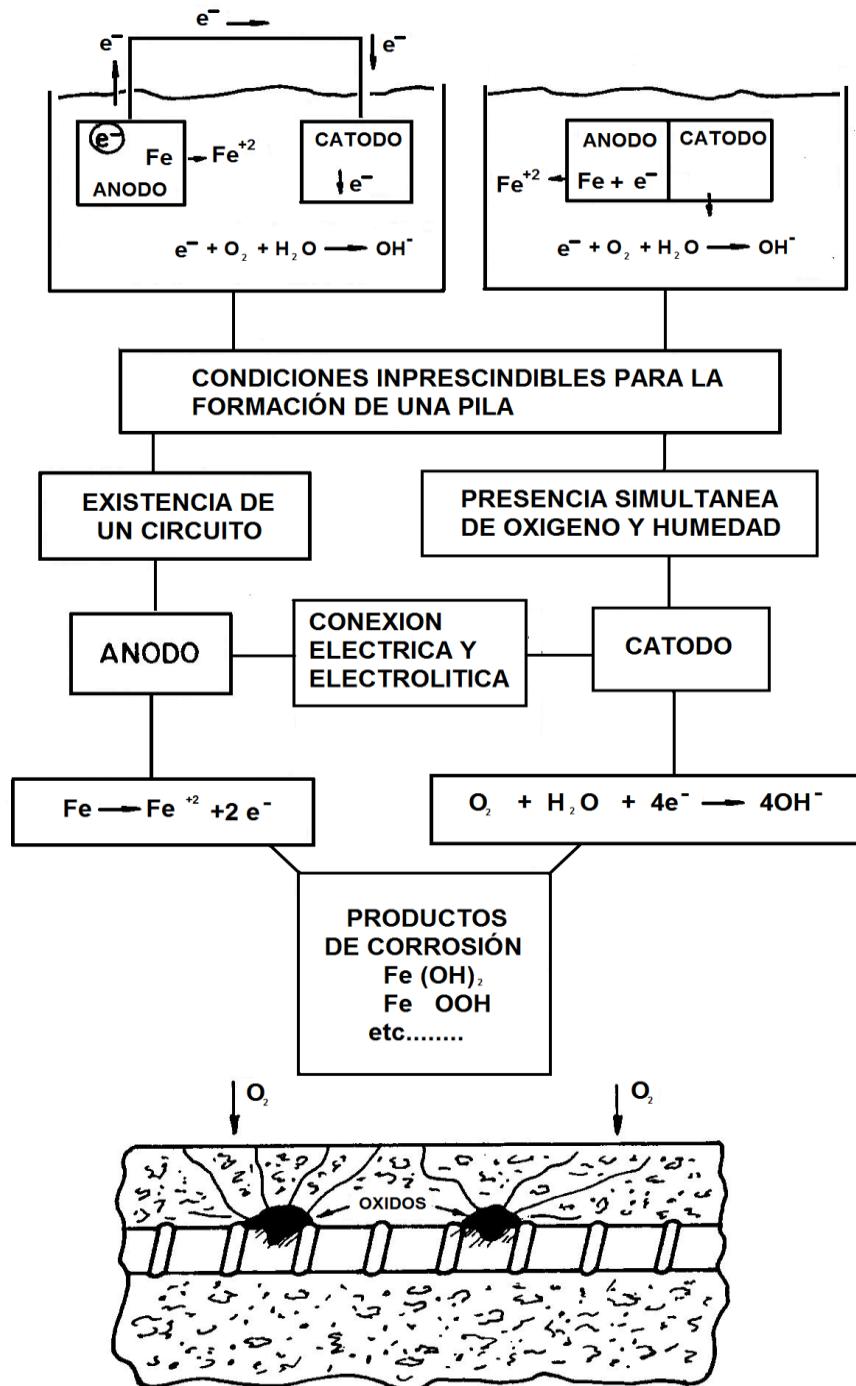


Figura 2.3. Formación de una pila de corrosión.

2.2.3. PROTECCIÓN Y DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS EN EL CONCRETO.

El concreto armado, además de aportar unas excelentes propiedades mecánicas, ha demostrado poseer una durabilidad adecuada para la mayoría de los usos a los que se destina. Esta durabilidad de las ECA es el resultado de la acción protectora, de doble naturaleza, que el concreto ejerce sobre el acero:

- Por una parte, el recubrimiento del concreto supone una barrera física que retarda o previene la penetración de especies agresivas, como cloruros o dióxido de Carbono (CO_2) en la interface concreto/acero (*Mietz, 1995*).
- Y por otra, la varilla de acero en las ECA, se encuentra protegida contra el ataque de la corrosión, debido a la pasividad que otorga el concreto.

Cuando el cemento se mezcla con el agua, sus distintos componentes se hidratan formando un conglomerado sólido, constituido por fases hidratadas del cemento, y una fase acuosa que proviene del exceso de agua de amasado, necesaria para la mezcla adecuada de todos sus componentes. El concreto resulta pues, un sólido compacto y denso, pero poroso. La red de poros es un entramado de capilares, que no siempre se comunican entre sí, pero que permiten que el concreto presente cierta permeabilidad a los líquidos y gases. Así, aunque el recubrimiento de las armaduras supone una barrera física, está es permeable en cierta medida y permite el acceso de elementos agresivos hasta el acero. En la figura 2.4 se visualiza la situación habitual de las armaduras embebidas en concreto (*González y Andrade, 1984*).

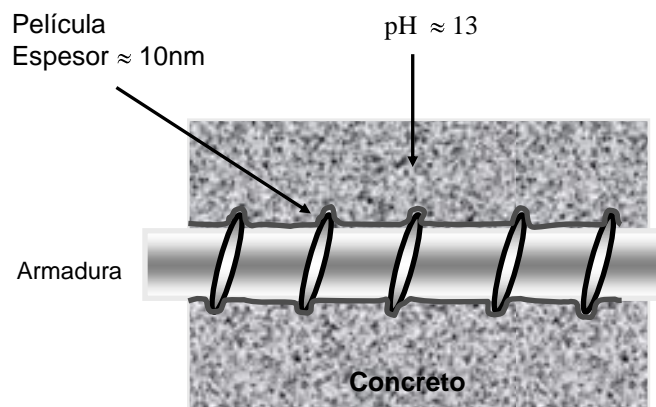
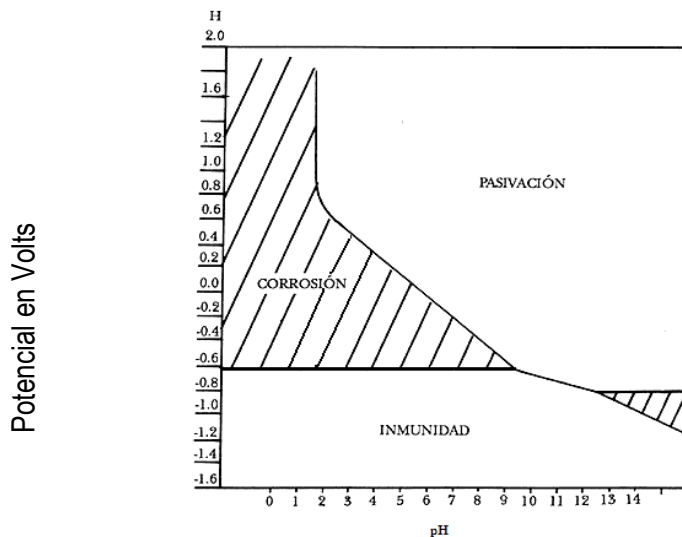


Figura 2.4 Armadura embebida en un concreto sin contaminar.

La alcalinidad del concreto es debida principalmente al hidróxido cálcico que se forma durante la hidratación de los silicatos del cemento, y a los álcalis que puedan estar incorporados como sulfatos en el clinker. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12.6 y 14, es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. Bajo esta situación, el hierro se sitúa en una zona de pasividad en el diagrama de Pourbaix potencial-pH, formando una capa protectora en la superficie del metal, la cuál tiene un pequeño espesor de aproximadamente 10nm, que protege al metal de la disolución. Cuando la armadura de acero se encuentra pasiva, presenta una velocidad de ataque ≤ 0.01 milésimas por año (mpy); mientras que una armadura activa presenta valores de dos ordenes de magnitud, más elevados que la armadura pasiva (Rodríguez, 1994).



**Figura 2.5 Diagrama simplificado de Pourbaix para el Fe a 25°C.
(Pourbaix, 1976).**

Los diagramas de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que un metal se corroe, se pasiva o permanece inmune. En la figura 2.5 se muestra el diagrama de Pourbaix para el Fe a 25°C. El estado definido como de “pasividad” y que por fortuna presentan diversos metales, supone que el metal se recubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa de barrera impidiendo la posterior oxidación. El metal posee la apariencia de mantenerse inalterado. En

cambio, el estado de “inmunidad” supone que el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en el que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.

2.2.4. CAUSAS DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

No obstante, existen ambientes agresivos o sustancias que se añaden durante o después del amasado, iniciando el proceso de corrosión de las armaduras; ocasionando que la capa pasiva de la armadura se rompa o que el concreto deje de proteger a la armadura (González, et. al., 2005).

Esencialmente son dos las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasiva del acero:

1. La presencia de una cantidad suficiente de cloruros (Tanto porque se añaden durante el amasado, como porque penetran desde el exterior) u otros iones despasivantes en contacto con la armadura,
2. La disminución de la alcalinidad del concreto por reacción con sustancias ácidas del medio. (Abdullah, y A. Almusallam. 2001).

La primera causa que es la presencia de los iones despasivantes como los cloruros, dan lugar a una corrosión de tipo localizado. La segunda Causa que es el descenso del pH del concreto, permite la disolución completa de la capa pasivante y por lo tanto da lugar a una corrosión tipo generalizada. En la figura 2.6 se alude también a otro tipo de corrosión, la corrosión fisurante bajo tensión, que aparece sólo en el concreto pretensado o postensado.

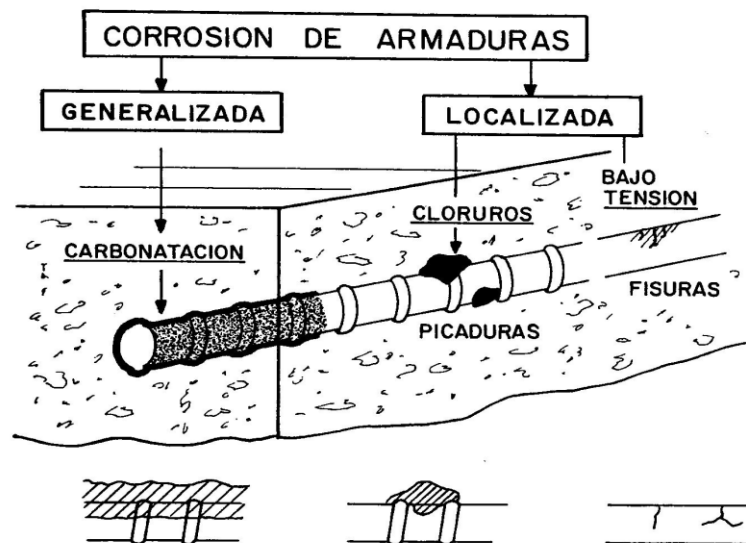


Figura 2.6 Tipos de corrosión de armaduras y factores que los provocan.

2.2.4.1. Corrosión localizada ocasionada por los cloruros

La situación más agresiva y la responsable del mayor número de casos de corrosión de armaduras, es la presencia de cloruros (los iones sulfuro y sulfato son también despasivantes, pero mucho menos frecuentes y peligrosos que los cloruros). Estos iones tienen la prioridad de destruir de forma puntual la capa pasivante, lo que provoca una corrosión conocida con el nombre de “picaduras”. Estos cráteres son el ánodo de la pila de corrosión, por lo que progresan en profundidad, llegando a producir la ruptura puntual de las barras. Los cloruros pueden estar en el concreto porque se añaden con sus componentes como son los aditivos, el agua, etc. (Pruckner y Gjør, 2004) o bien porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta última situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales de deshielo en carreteras o puentes en climas fríos (Cobo, et. al., 2000). Todas las normativas limitan el contenido en cloruros en el concreto fresco, y varían de unos países a otros. Ello es debido a la dificultad de establecer un límite seguro, por debajo del cual no exista riesgo de despasivación del acero, ya que este límite depende de numerosas variables, algunas de las cuales son: tipo de cemento (finura, contenido de yeso, contenido de aluminato tricálcico, etc.), proporción del cemento, relación a/c,

contenido de humedad, etc. Un valor medio generalmente aceptado es de 0.4% en relación al peso del cemento ó 0.05 – 0.1% en relación al peso del concreto. Cabe hacer notar que son solo peligrosos los cloruros que quedan disueltos en la fase acuosa de los poros. De todas formas, las normativas se refieren siempre al límite de cloruros “totales”, porque los cloruros combinados pueden volver a la disolución por efecto del proceso de carbonatación.

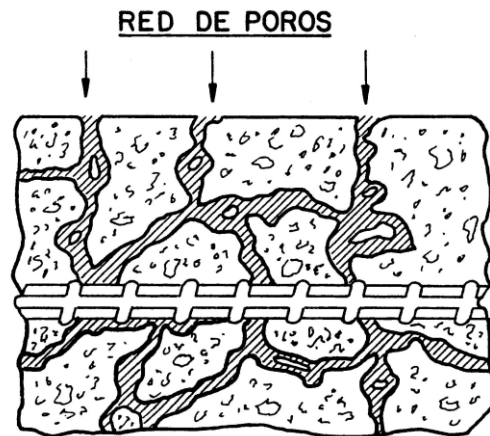


Figura 2.7 Visualización simplificada de la red de poros del concreto.

Aunque el concreto no contenga cloruros inicialmente, éstos pueden llegar hasta la armadura a través de la red de poros, si la estructura esta situada en ambientes marinos o si se añaden sobre la superficie del concreto para evitar su helada (ver figura 2.7). En estos casos la cantidad de cloruros se va incrementando con el tiempo, llegando a atacar toda la superficie de la armadura y provocar velocidades de corrosión muy peligrosas.

- **Cinética de la corrosión ocasionada por cloruros:**

(Tuuti, 1982) sugiere, que el ataque de la corrosión en las ECA (figura 2.8), puede dividirse en un período de incubación (t_1) y un período de propagación (t_2).

- *El período de incubación (t_1):* corresponde a la penetración de cloruros dentro de los poros del concreto, y la acumulación de estos en la periferia de la varilla. Esta duración depende de la superficie del concreto y de la concentración requerida de cloruros para iniciar el proceso de corrosión.

- *El período de propagación (t_2):* corresponde al estado cuando los iones cloruros despasivan la superficie de la armadura de acero, y se inicia el desarrollo de la corrosión, lo que provoca el deterioro local de la estructura.

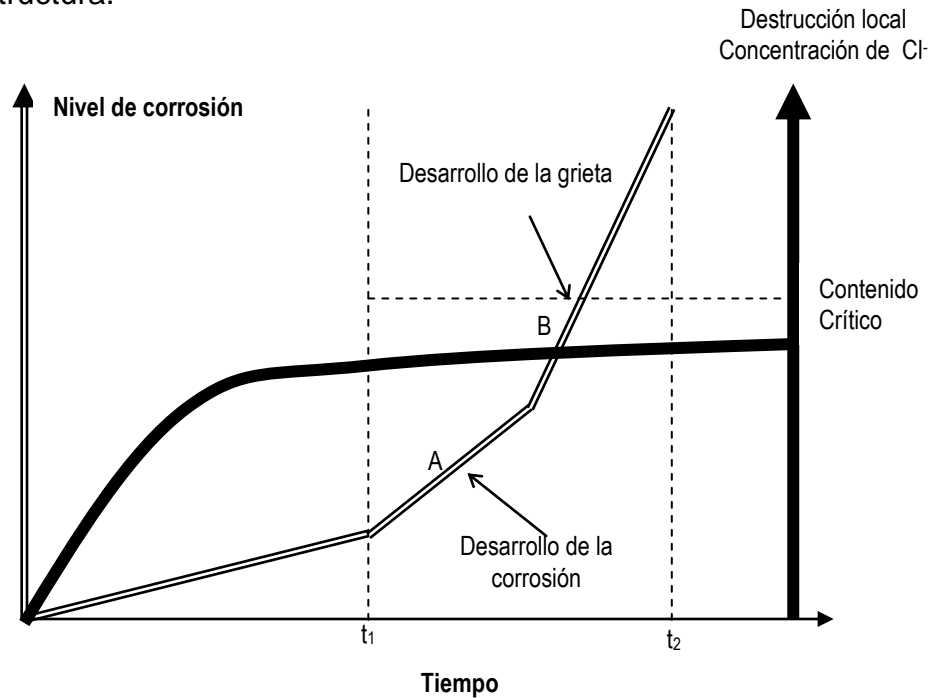


Figura 2.8 Esquema de la secuencia de la corrosión en ECA.

Sin embargo, se debe tener en cuenta, que los cloruros por sí solos no son capaces de iniciar la corrosión en las armaduras, los factores condicionantes para iniciar la corrosión en las ECA, es la introducción del oxígeno y la presencia de resquicios en la interfase acero/concreto (*Otero, et. al., 1990*). Cuando existe una diferencia de potencial eléctrico a lo largo del acero en el concreto, se establece una celda electroquímica: se forman regiones anódicas y catódicas, conectadas por el electrolito de agua, que se encuentra en los poros de la pasta de cemento endurecido.

Los iones ferrosos con carga positiva (Fe^{++}) del ánodo pasan a la solución, mientras que los electrones libres con carga negativa (e^-) pasan a través del acero, donde los constituyentes del electrolito los absorben y se combinan con el agua y oxígeno para formar iones hidróxido (OH^-). Éstos viajan a

Introducción

través del electrolito y se combinan con los iones ferrosos formando óxido férrico (Fe_3O_2) que se convierte por oxidación adicional en herrumbre.

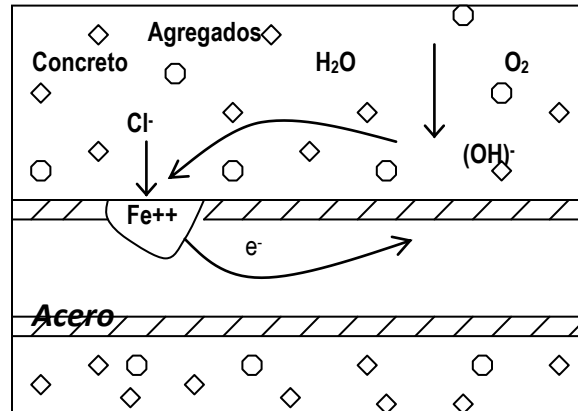
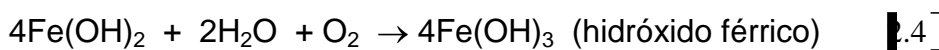
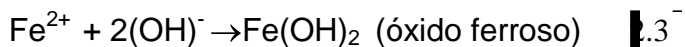
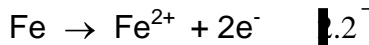


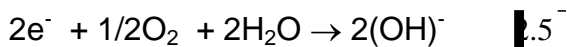
Figura 2.9 Representación esquemática de corrosión en presencia de cloruros.

Las reacciones comprendidas son las siguientes:

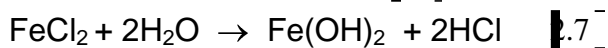
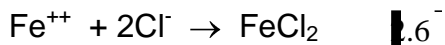
Reacciones anódicas:



Reacciones catódicas:



Al penetrar los iones cloruro la capa pasiva, inician el proceso de corrosión. Las reacciones comprendidas en el rompimiento de la capa pasiva, son las siguientes:



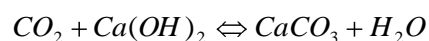
En la ruptura de la capa pasiva el Cl^- se regenera, de manera que la herrumbre $\text{Fe}(\text{OH})_2$ no contiene cloruro, aunque se forma cloruro ferroso (FeCl_2) en la etapa intermedia (ecuación 2.6). Probablemente a una

humedad relativa menor del 60 %, no exista corrosión en el concreto seco; la humedad relativa óptima para la corrosión es 80% en adelante (*Sanjuan y Castro, 2001*).

2.2.4.2. Corrosión Generalizada

Se produce por un descenso en la alcalinidad del concreto, que puede ser debido a un “deslavado” por la circulación de aguas puras o ligeramente ácidas, o por reacción de los compuestos de carácter básico NaOH, KOH y Ca(OH)₂ de la fase acuosa del concreto, con los componentes ácidos de la atmosfera, como el dióxido de carbono (CO₂) y de azufre (SO₂), para dar carbonatos, sulfatos y agua. El más abundante es el CO₂, por lo que a este proceso de reducción de la alcalinidad se le llama genéricamente “carbonatación” (ver figura 2.10). Una característica de este proceso es la existencia de un “frente” de avance que separa dos zonas con pH muy distintos, una con un pH > 13 y otra con pH < 9. Este “Frente” se puede visualizar mediante un indicador apropiado de fenolftaleína, que se torna incoloro en una zona carbonatada y toma un color rojo purpura en la zona que permanece alcalina.

La reacción que ocurre en este proceso es:



Dando por resultado la disminución del pH:

De un pH entre 12.5 a 13.5 baja a un pH ≤ 9

Al caer el pH por debajo de 9 debido a la carbonatación sufrida en el concreto, la película formada en la superficie de la varilla se rompe, dejando el acero desprotegido contra la corrosión (*Duffó, et. al., 2004*).

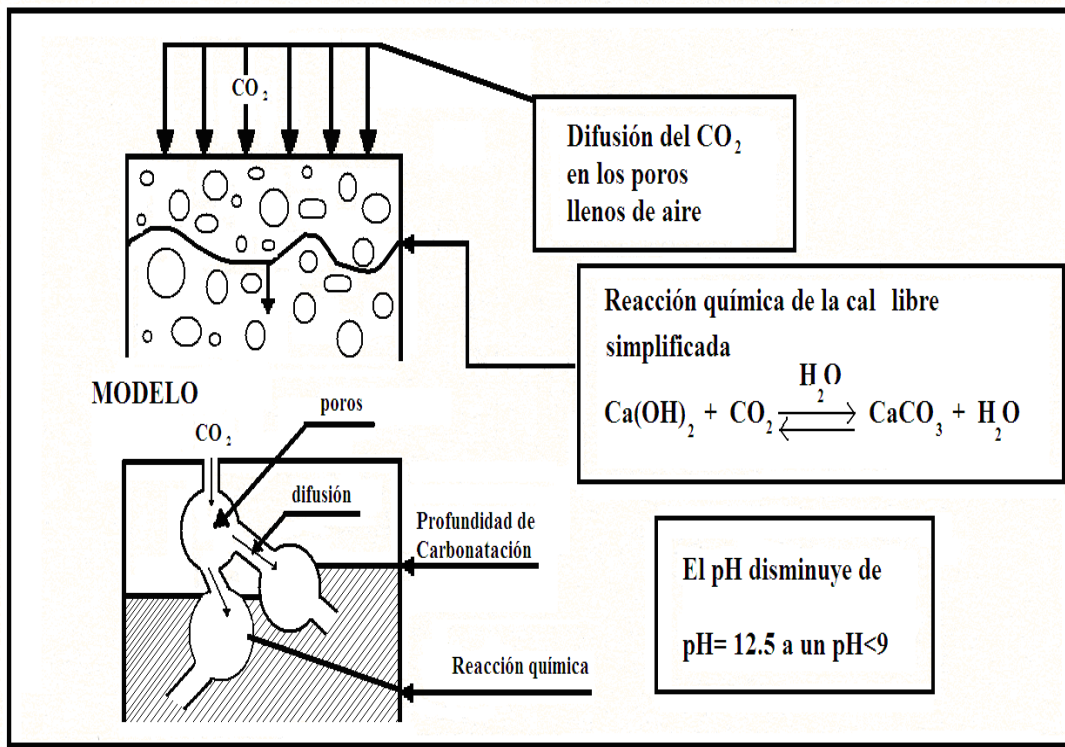


Figura 2.10. Proceso de Carbonatación.

La rapidez de carbonatación más alta ocurre cuando hay una humedad relativa del 50 al 70 por ciento. La velocidad de avance de la carbonatación es un proceso lento que se atenúa con el tiempo, ajustándose a una ley parabólica:

$$D = K \sqrt{t}$$

Donde:

D= profundidad de carbonatación en mm.

K= coeficiente de carbonatación en $\frac{mm}{\sqrt{\text{año}}}$

t= tiempo de exposición en años.

Los valores de K son con frecuencia más de 3 ó 4 $\text{mm}/(\text{año})^{1/2}$ para concreto de baja resistencia (Duffó et. al., 2004).

La constante de esta ley depende de muchos factores relacionados con la calidad y resistencia mecánica del concreto (tipo de cemento, proporción por m^3 de concreto, relación a/c, etc), y de la humedad ambiental.

El tiempo que tarda en llegar el frente carbonatado hasta la armadura es a su vez el “período de iniciación” de este tipo de proceso, ya que una vez que alcanza el acero, la capa pasiva de este no es estable en los valores próximos a 7, típico de un concreto carbonatado. Desaparecida la capa pasivante, el acero se corroe en forma generalizada, tal y como si estuviera expuesto a la atmosfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del concreto, y por lo tanto en contacto con la armadura, más tiempo que sí está estuviera libremente expuesta al aire, ya que el concreto absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio.

Cuando la carbonatación se produce en un concreto que contiene cloruro, se suman los efectos de ambos agentes agresivos provocando una fuerte corrosión. Además por el efecto de la acción del CO_2 sobre las fases sólidas del cemento, los cloroaluminatos se pueden disgregar y dejar libre a los cloruros que mantenían combinados.

2.2.5. FACTORES ACELERANTES

Una vez que ha iniciado la corrosión y despasivado el acero, la velocidad del deterioro sólo es significativa en términos de vida útil, para una oferta suficiente de oxígeno y por encima de un mínimo de humedad. Los factores que fijan la cinética del proceso de corrosión de las armaduras, son:

- **El contenido de Humedad:** El contenido de humedad es el factor que más influye en la velocidad de corrosión. Si los poros están saturados de humedad, como en el caso **c)** de la figura 2.11. Aún cuando la resistividad sea muy baja y por lo tanto la pila de corrosión estará muy facilitada, el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua para poder alcanzar la armadura. En estas condiciones se dice que el proceso esta “controlado por el acceso de oxígeno” y las velocidades de corrosión serán bajas, como el caso de las estructuras en los mares a cierta profundidad. Cuando los poros tiene muy poca humedad, entonces la resistividad es muy elevada y el proceso de corrosión también será bajo, aún cuando el concreto se encuentre

carbonatado y contaminado de cloruros, figura 2.11 inciso **a)**. Las velocidades de corrosión serán máximas en concretos con contenidos de humedad altos, pero sin saturar los poros.

Esto debido a que el oxígeno llega libremente hasta la armadura y la resistividad es lo suficientemente baja para permitir velocidades de corrosión elevadas, figura 2.11 **b)**.

- **Temperatura:** La temperatura juega un papel doble en los procesos de deterioro. Por un lado su incremento, promueve un aumento de la velocidad de corrosión y de la movilidad de los iones, pero por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que a su vez pueden producir incrementos locales de contenidos de humedad.
- **Proporción de Cloruros**

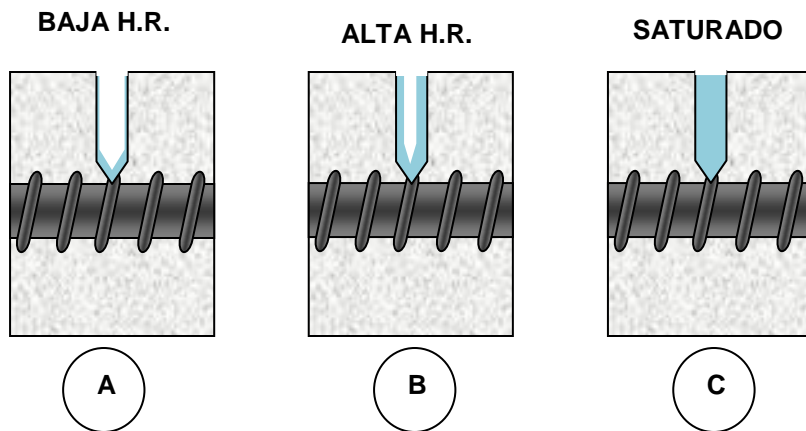


Figura 2.11 Contenido de humedad de los poros del concreto en función de la humedad relativa.

2.2.6. EFECTOS DE LA CORROSIÓN.

Los efectos de la corrosión se manifiestan en tres vértices: a) sobre el acero con una disminución de su capacidad mecánica, b) sobre el concreto, cuando este se fisura c) sobre la adherencia acero/concreto.

- **Sobre el acero:** a) Los productos de corrosión ocupan un volumen mayor que el acero original, provocando así el agrietamiento y desprendimiento en el concreto (figura 2.12). Generalmente penetraciones de la corrosión de 25 a 100 μ m son las que causan agrietamiento en el recubrimiento del concreto. b) El progreso de la corrosión en el ánodo (armadura) reduce el área de la sección recta del acero, disminuyendo así su capacidad de soportar carga. Cabe señalar, que la corrosión inducida por cloruros se localiza en un ánodo pequeño, ocurriendo la picadura del acero (*Andrade, et. al., 1993*).

No siempre se produce fisuración cuando las armaduras se corroen, si el concreto esta muy húmedo, los óxidos se generan a una velocidad constante y pueden emigrar a través de la red de poros, y aparecer en la superficie en forma de manchas, que incluso a veces no coinciden con la situación de las armaduras, ya que si hay circulación de agua (ejemplo, la lluvia), aparece en donde emerge la humedad.

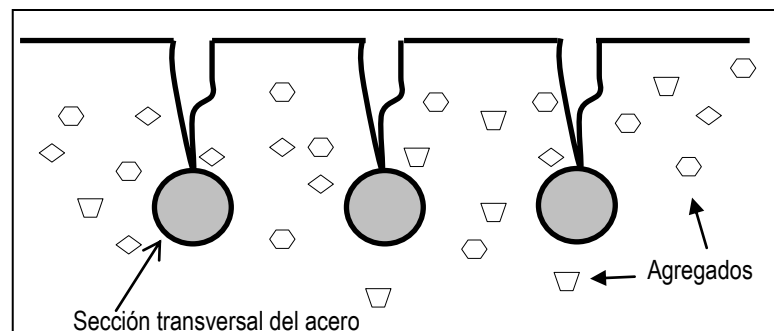


Figura 2.12 Representación del daño inducido por la corrosión: agrietamiento.

- **Sobre el concreto:** La acumulación de óxidos expansivos en la interfase acero- concreto, provoca una expansión, agrietamiento y un eventual desprendimiento del concreto
- **Sobre la adherencia acero – concreto:** Incapacidad de una elevada resistencia a la tracción de la armadura al concreto (*Cady, 1978*).

2.2.7. RECOMENDACIONES PARA AUMENTAR LA DURABILIDAD DE LAS ARMADURAS

Además de un diseño adecuado que evite innecesarias circulaciones de las aguas a través del concreto, se puede deducir de todo lo expuesto hasta el momento, que para asegurar una durabilidad adecuada, resulta decisiva la *calidad y el espesor del recubrimiento*, ya que es la única barrera contra el medio ambiente siempre agresivo para un metal como el acero, que no es estable al medio ambiente.

Así pues, la primera recomendación para hacer durable el concreto armado, en especial si se va a situar en ambientes agresivos, es diseñarlo y ponerlo en obra de tal forma que se consiga una homogeneidad que asegure una buena calidad. Además de extremar las precauciones para asegurar un espesor de recubrimiento homogéneo y suficiente.

En cuanto a la influencia del *tipo de cemento* es necesario resaltar que el Portland sin adiciones es el que proporciona mayor cantidad de “reserva alcalina”, que como su nombre indica supone una reserva o “coeficiente de seguridad” frente al ataque de los cloruros o la carbonatación. Ahora bien, el empleo de adiciones como puzolanas o cenizas volantes si están bien curados, confieren al concreto un grado mucho mayor de impermeabilidad, lo que hace que el periodo de iniciación, (tiempo que tarda el agresivo en tocar la armadura) pueda ser más largo en cementos con adición.

La proporción del cemento es de vital importancia para asegurar la adecuada compactación del concreto. Concretos de altos contenidos de cemento, son mucho más durables que hormigones pobres de cemento, aunque ambos alcancen las mismas resistencias mecánicas.

Igual consideraciones pueden efectuarse con respecto a la *relación agua / cemento (a/c)*, parámetro que resulta decisivo a la hora de fabricar el concreto denso y poco permeable. Es deseable siempre acudir a aditivos que permitan trabajar con relaciones a/c lo más bajas posibles. El curado del concreto es otro factor que influye en la compactación final del material. Un curado insuficiente bloquea determinadas reacciones de hidratación y da como resultado un concreto poroso y mucho más atacable.

En cuanto a las armaduras, el estado superficial del acero limpio también influye en la capacidad de despasivación de las armaduras. Si el acero se encuentra recubierto de óxidos de color pardo, su pasivación será más difícil e incompleta y la cantidad de agresivo necesario para despasivarlo será menor a una superficie que se coloca limpia de óxidos y otras suciedades.

Para proteger el metal contra el ataque electroquímico de soluciones agresivas, se utilizan sustancias químicas conocidas como *inhibidores*. El nitrito de calcio y nitrito de sodio parecen ser buenos inhibidores de la corrosión en las ECA (*Dhouibi, et. al., 2002*). Estudios con sales a partir de nitritos adicionados con agua en el amasado del concreto han demostrado que éstas protegen de la corrosión provocada por cloruros. Cuando se añade un 2% de nitrito de sodio a la mezcla, la velocidad de corrosión se reduce significativamente en la armadura de acero embebida en el concreto (*González, et. al., 1998*). Otra manera de proteger a la armadura de acero es el empleo de *recubrimientos*. Esto puede lograrse mediante el empleo de pinturas, resinas, galvanizado o por aplicación de recubrimientos diversos. De esta forma, se aísla el metal al contacto directo con el medio agresivo.

2.2.8. MEDIDAS DE LA CORROSIÓN EN EL CONCRETO ARMADO.

La corrosión es la manifestación de una tendencia general de todos los sistemas hacia un estado de equilibrio de mínima energía. En este sentido es un fenómeno inevitable que, afortunadamente, transcurre con suficiente lentitud como para que se pueda sacar provecho en la práctica de las propiedades de los materiales metálicos. La corrosión se debe, en la inmensa mayoría, a la actividad conjunta de innumerables pilas de corrosión, e implica la formación y movimiento de partículas de carga eléctrica. Consecuentemente, puede medirse con una sensibilidad enorme, mediante la aplicación de señales eléctricas al sistema, a través de la señal y la respuesta del sistema.

Las **técnicas electroquímicas** consisten en la aplicación de señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente, o bien, la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta en potencial. En ambos casos se polariza la interfase y su respuesta es característica de cada sistema bajo estudio.

El uso de las técnicas electroquímicas se ha presentado como una opción para el estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto. Algunas ventajas de las técnicas electroquímicas, son la rapidez de medición y la sensibilidad, además de ser pruebas no destructivas.

Introducción

Las más utilizadas son: medición de potencial (E_{corr}), resistencia de polarización (R_p), voltimetría cíclica y espectrometría de impedancia electroquímica (EIS) (Siegwart *et. al.*, 2003). Cada una de ellas aporta información acerca de las condiciones en la interfase acero – concreto y con ello el grado de corrosión que presenta la armadura. Las técnicas utilizadas en este trabajo fueron: E_{corr} y R_p ; las cuales se explican con detalle en el capítulo tres. Para estructuras de concreto es importante la estimación del estado de corrosión de las varillas, por métodos no destructivos y confiables. Los ensayos electroquímicos reúnen estas características, aunque se tienen algunos inconvenientes de tipo práctico. Aplicar las técnicas electroquímicas directamente sobre estructuras reales (figura 2.7), se complica considerablemente, ya que la fuente principal de inexactitudes reside en que las señales eléctricas se extienden, a partir del contraelectrodo utilizado para imponerlas, una longitud crítica, desconocida en todo caso, atenuándose progresivamente hasta anularse.

Por una parte, las señales eléctricas se reparten de modo no uniforme en el área afectada y, por otra, se desconoce ésta, siendo casi imposible calcular la velocidad de corrosión. La posibilidad de recurrir a contraelectrodos del mismo tamaño que las estructuras, para conseguir como en el laboratorio, un reparto uniforme de las señales eléctricas, resulta impracticable. Gracias a los avances de la ciencia, en fechas recientes, se cuenta con técnicas no destructivas que permiten obtener, de modo fiable, información de velocidades de corrosión en grandes estructuras (Feliu *et. al.*, 1988).

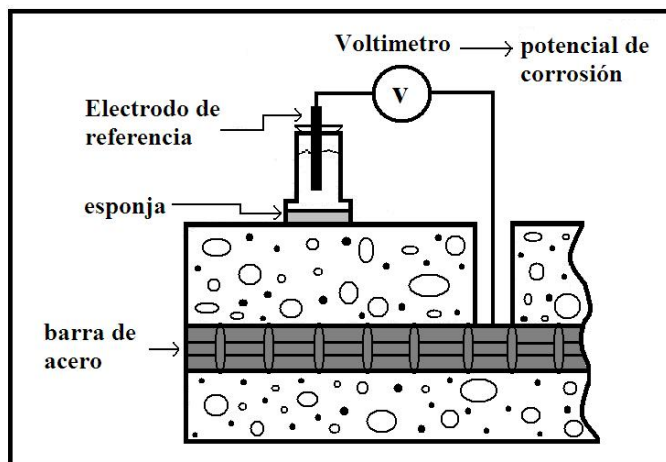


Figura 2.13 Medición del potencial en una ECA.

En general todas las técnicas aportan información que se complementa con apreciaciones visuales de deterioro físico (como fisuras), químicas (carbonatación y penetración de cloruros principalmente) y mecánicas (ensayos de tensión para determinar la resistencia de la armadura de acero y ensayo de compresión para determinar la resistencia del concreto).

2.2.9. MÉTODOS ELECTROQUÍMICOS DE REHABILITACIÓN (MER).

Una manera de corregir los daños ocasionados en las ECA, es utilizar los métodos convencionales de reparación. Estas técnicas consisten en eliminar el concreto carbonatado o que contiene cloruros, aún detrás de las armaduras, la limpieza de éstas en todo su perímetro y, frecuentemente la aplicación de un tipo de protección que evite nuevas reparaciones (Fernández, 1984).

Esta situación puede explicar el porque se le dedique mucho tiempo y dinero a la búsqueda de nuevos métodos alternativos a los procedimientos convencionales de reparación. Entre estos métodos alternativos se encuentran los Métodos electroquímicos de Rehabilitación MER, siendo estos:

- La Protección Catódica PC
- La Realcalinización Electroquímica RAE
- La Extracción Electroquímica de Cloruros EEC

La realización práctica de las tres técnicas tiene muchas similitudes. Se utiliza una fuente de corriente externa con un ánodo auxiliar, de la misma extensión que la estructura, inerte y formando parte de ella en el caso de la PC, externo y, frecuentemente desechable y de bajo costo en la REA y EEC. La estructura de acero es conectada a la terminal negativa de la fuente de poder, forzando al acero a actuar como cátodo. Las principales características de los métodos de rehabilitación se muestran en la tabla 2.3. (Miranda J. M. 2004).

Tabla 2.3 Características de los MER aplicados en las ECA.

| <i>MÉTODO</i> | <i>PC</i> | <i>RAE</i> | <i>EEC</i> |
|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|
| Objetivo de la técnica | Imponer un potencial de protección | Conseguir un medio pasivante | Conseguir un medio pasivante. Extraer cloruros |
| Duración de la polarización | Permanente | Temporal (3 a 14 semanas) | Temporal (6 a 10 semanas) |
| Densidades de Corriente | 3 a 20 mA/m ² | 0.8 a 2 A/m ² | 0.8 a 2 A/m ² |

2.2.9.1. Protección Catódica (PC).

La protección catódica (PC) es una técnica de control de la corrosión, que está siendo aplicada cada día con mayor éxito en el mundo entero, y se ha acreditado como la única técnica de rehabilitación capaz de detener la corrosión en estructuras de concreto carbonatadas o contaminadas con cloruros (cualquiera que sea el grado de contaminación de la estructura con estos iones). En la práctica se puede aplicar protección catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón y aluminio, contra la corrosión en todos los suelos y en casi todos los medios acuosos.

La PC aplicada en las ECA es un método tradicional, basado en principios básicos de electroquímica. Consiste en polarizar la estructura lo suficiente para forzar su potencial hasta la zona de inmunidad del diagrama de Pourbaix, anulándose la semirreacción anódica de oxidación que se desarrolla íntegramente en los ánodos auxiliares, ya sea de sacrificio o dispersores de corriente. En otras palabras, el mecanismo consiste en polarizar el cátodo, llevándolo mediante el empleo de una corriente externa, más allá del potencial de corrosión, hasta alcanzar por lo menos el potencial del ánodo en circuito abierto, adquiriendo ambos el mismo potencial eliminándose la corrosión del sitio, por lo que se considera una técnica de **POLARIZACION CATODICA**. La protección catódica no elimina la corrosión, protege a la armadura y la concentra en un punto donde se descarga la corriente.

A pesar de su simplicidad conceptual, la aplicación práctica de la PC al sistema que nos ocupa es compleja, especialmente cuando se trata de

utilizarla en el concreto, exigiendo la intervención de personal especializado. Para su funcionamiento práctico requiere de un electrodo auxiliar (ánodo), una fuente de corriente continua cuya terminal positiva se conecta al electrodo auxiliar y la terminal negativa que se conecta a la estructura a proteger, fluyendo la corriente desde el electrodo a través del electrolito llegando a la estructura. Para conseguir una PC eficaz es necesario que la corriente aplicada alcance todas las partes metálicas expuestas al medio corrosivo. Las áreas donde no llegue la corriente continuarán corroyéndose. Para evitar esto, se suelen colocar los ánodos de sacrificio, o los ánodos dispersores de corriente en la PC por corriente impresa, alejados de la superficie a proteger, para facilitar que las líneas de corriente cubran todo el contacto (ver Figura 2.14).

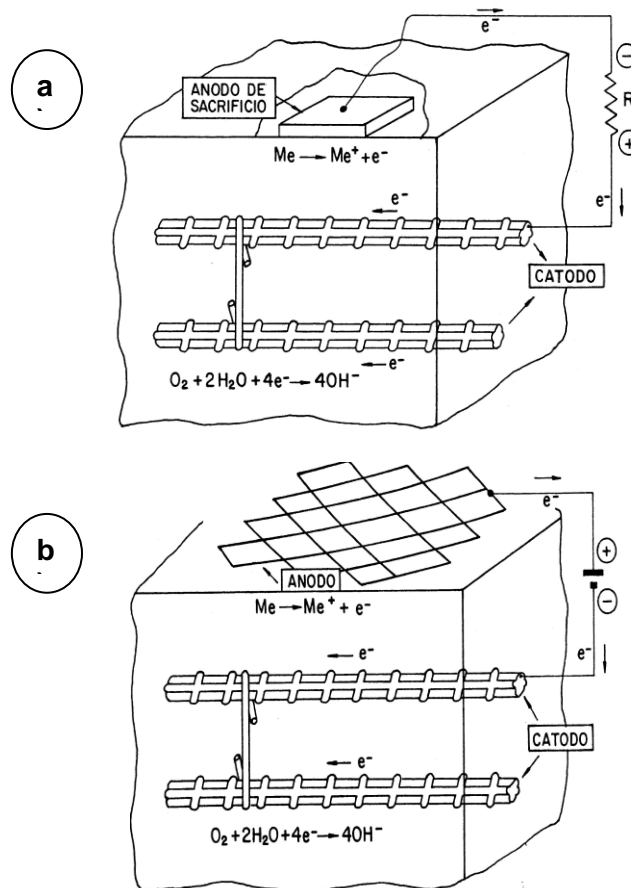


Figura 2.14 Ejemplo de protección catódica mediante a) "Ánodo de sacrificio"
b) "Corriente impresa"

2.2.9.2. Realcalinización Electroquímica (RAE).

En la Realcalinización práctica, como en el caso de la PC, se aplica una corriente continua a toda la red de refuerzos que se une a la terminal negativa de la fuente de poder de corriente; forzando el paso de una intensidad muy superior a la requerida en la PC, los ánodos para cerrar el circuito suelen ser externos y desechables al tratarse de procedimientos de corta duración, unidos a la superficie de la estructura a través de un electrolito alcalino para facilitar la conductividad eléctrica. En otras palabras, la realcalinización electroquímica es un método no destructivo, utilizado en las ECA ya carbonatadas. En la figura 2.15 se representa una RAE en la ECA.

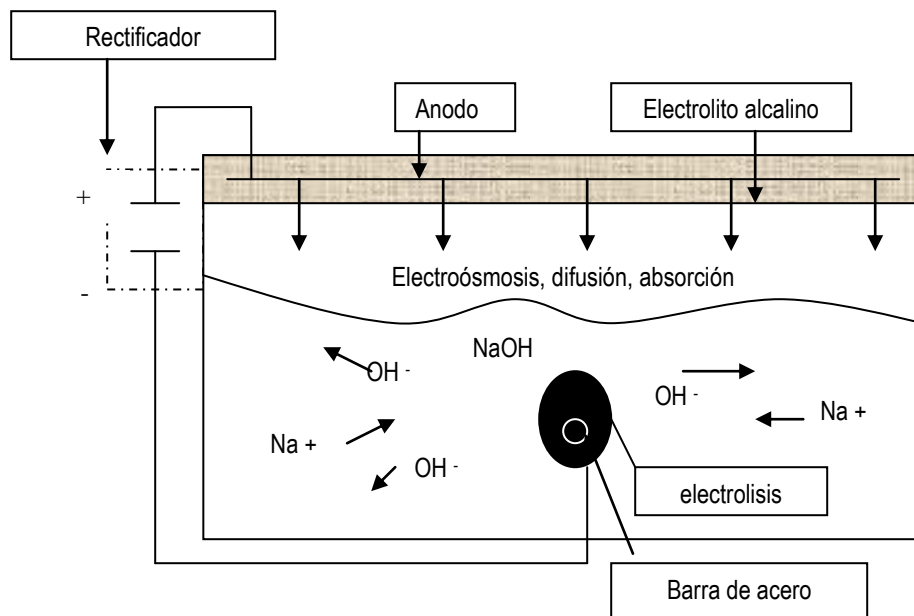
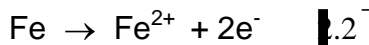
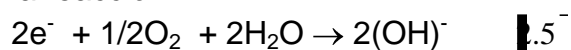


Figura 2.15 Representación esquemática de la RAE.

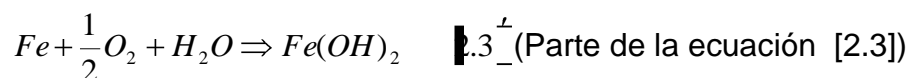
El fenómeno de la corrosión se compone de dos procesos parciales: el de oxidación y el de reducción. El anódico, de oxidación o corrosión, que para el caso del acero se puede expresar por la reacción:



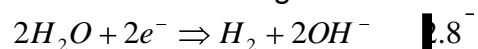
Y el catódico, de reducción, que en medios alcalinos como el concreto consume los electrones generados en el proceso de oxidación [2.2], según la reacción:



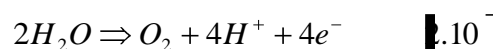
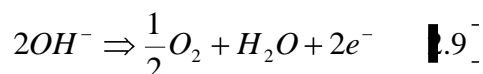
El proceso global, suma de las dos semireacciones, implica la formación de un producto de corrosión, que posteriormente se transforma en productos férricos, y suele ser hidróxido ferroso:



Los tres procedimientos electroquímicos de rehabilitación tienen en común, que inyectan en la red de las armaduras una cantidad de electrones suficiente para que la reacción [2.2] se desplace totalmente hacia el primer miembro, no teniendo lugar la disolución del refuerzo. Una vez que el oxígeno se ha consumido según la reacción [2.5], lo cuál, con las densidades de corrientes típicas de la RAE, es probable que ocurra en menos de 24 horas (*Mietz, 1998*), cambia el proceso catódico, ajustándose a la reacción [2.8]. Se siguen produciendo hidróxidos, pero ahora simultáneamente con la formación de hidrógeno como subproducto:



En el ánodo externo, se produce la oxidación de los hidróxidos y la electrolisis del agua según las ecuaciones:



El método produce en la superficie de los refuerzos un incremento de la concentración de iones OH^- suficiente para alcanzar valores de pH mayores a 14 inmediatamente después del tratamiento, conservándose entre 12 y 13, varios meses después del mismo. De acuerdo con el diagrama de Pourbaix (figura 2.2), estos valores de pH deberían garantizar la repasivación de las armaduras. Los iones OH^- se desplazan por electromigración, forzada por el campo eléctrico, hacia el ánodo externo; y la zona realcalinizada se va extendiendo a partir de los refuerzos (Figura 2.16). Con las densidades de corriente usuales en la RAE, parece demostrarse que la absorción, difusión y electroósmosis tienen una participación muy secundaria en la extensión de la zona realcalinizada a partir de los refuerzos.

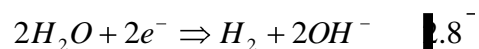
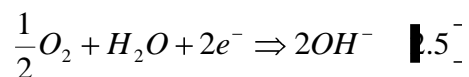
2.3.

EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS

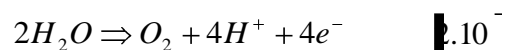
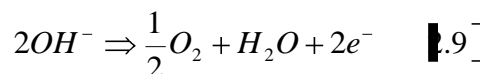
2.3.1. FUNDAMENTOS DE LA EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DE CLORUROS (EEC).

La *Extracción Electroquímica de Cloruros (EEC)* es un método electroquímico de rehabilitación para combatir la corrosión ocasionada por la introducción de iones despasivantes (cloruros). En estructuras de concreto armado, se utiliza una fuente poder para suministrar una energía eléctrica que logra expulsar los iones cloruro hacia la superficie del concreto.

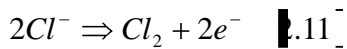
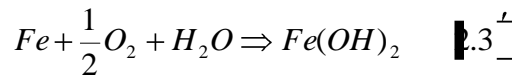
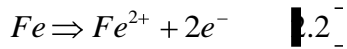
En forma muy general, la EEC consiste en aplicar una corriente eléctrica continua entre la armadura que actúa como cátodo y un material inerte como ánodo; el cuál puede ser externo, temporal y en ocasiones consumible. Durante la EEC, los aniones (cloruros e hidróxidos) son expulsados del cátodo (armadura de acero) y, los cationes (sodio, potasio y calcio) son atraídos hacia el cátodo.(Orellan y Escadeillas, 2001). Las siguientes reacciones se desarrollan sobre el refuerzo, incrementando la alcalinidad en su entorno.



En el ánodo se agotan primeramente los hidróxidos consumidos tal como se muestra en la reacción [2.9], produciéndose a continuación la electrólisis del agua con formación del oxígeno según la reacción [2.10]



Coexistiendo con las reacciones [2.2] y [2.3] si se trata de un ánodo consumible, y con descarga de los iones Cl^- para formar cloro en estado gaseoso, según la reacción [2.11]



Los iones H^+ formados en [2.10] se mueven hacia el cátodo por el efecto del campo eléctrico, encontrándose con los iones OH^- que se mueven en dirección contraria, neutralizándose mutuamente para formar agua. Parte de los Cl^- pueden constituir ácido clorhídrico (HCl) con los H^+ en las proximidades del ánodo, determinándose valores de pH ácidos, entre 1 y 3. En la figura 2.16 se esquematiza la EEC en una ECA.

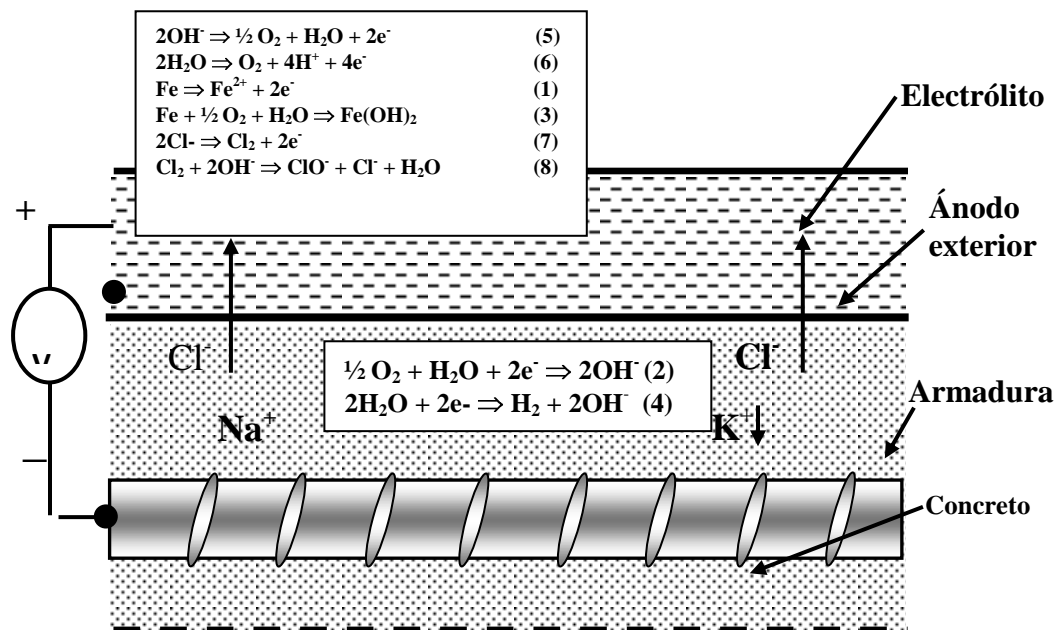


Figura 2.16 Esquema de la EEC en las ECA.

Para algunos autores el incremento de los OH^- alrededor de la armadura, junto con la disminución de iones cloruro, parece que podría repasar el

acero, si es posible llegar a concentraciones de cloruro inferiores a los valores críticos (Cobo, 2001).

2.3.2. ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA EEC

EUA fue el primer país en realizar ensayos de laboratorio de EEC. Sus ideas eran centradas en obtener un tratamiento electroquímico que lograra detener la corrosión en la armadura de acero. Las investigaciones se llevaron a cabo entre los primeros años de la década de los setenta. En estos estudios se aplicaron potenciales altos, dando como resultado una disminución de los iones cloruro en el concreto. Sin embargo se presentaron algunos efectos no positivos. Uno de ellos fue una distribución no homogénea en el perfil de cloruro dentro del concreto, se encontró un incremento en la porosidad, además de presentar un incremento en la temperatura de 28 °C (Lankard, 1975), (Morrison, 1976).

Las condiciones experimentales (cuestiones de seguridad al utilizar potenciales elevados), los resultados obtenidos (porcentaje bajo de las concentraciones de los iones cloruro eliminados), así como los efectos negativos (alta porosidad, pérdida de adherencia entre la armadura y el concreto y, el incremento de la temperatura), ocasiono que los investigadores consideran esta técnica de rehabilitación con bajas expectativas en el uso real de las ECA.

Después de veinte años, nuevamente fue estudiado este método más detallado en el "Strategic Highway Research Program". En este programa se recomienda el uso del Titanio como ánodo comercial, el empleo de un electrolito alcalino para prevenir la formación del gas cloro, como para evitar el deterioro de la superficie de concreto. Las densidades de corriente que se aplicaron fueron entre 1 a 5 A/m². Los resultados arrojaron que después de 5 x 10⁶ C/m², la extracción de los cloruros se hace ineficiente. Bajo estas condiciones, se lograron extracciones entre el 20 al 50% de eficiencia (Bennet, 1993).

En 1992 se realiza el primer estudio bien documentado en Europa, este trabajo fue llevado a cabo por "Swiss Federal Highway Agency", (Elsener 1992), los resultados fueron una extracción de Cloruros del 50% en un lapso de ocho semanas. Rose en 1994 realiza una importante contribución, al utilizar como ánodo un papel de aluminio como ánodo exterior. El aluminio actuó como material de sacrificio; ya que el aluminio se disolvió a una velocidad proporcional a la velocidad de la corriente. En zonas donde existía

algún tipo de defecto local, la resistividad del concreto era pequeña, por lo que la densidad de corriente elevada, logrando disolver al aluminio e impidiendo el paso posterior de corriente, con lo cual el aluminio además de actuar como ánodo de sacrificio realizaba la función de regulador de corriente para el caso de concretos muy heterogéneos (Mietz 1998).

2.3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN UNA EEC

Debido a la complejidad de una estructura de concreto armado, como de aplicar una EEC; existen innumerables variables que pueden influir en la efectividad de esta técnica electroquímica. Entre las variables que pueden afectar, son:

1. *Forma geométrica del concreto.*

El perfil de cloruros remanentes del concreto a través del cilindro es distinto a un concreto de sección transversal rectangular. Debido a que el ion cloruro es movido por medio de un campo eléctrico, las líneas de flujo eléctrico son importantes para determinar el movimiento que tendrán que hacer los iones cloruro. Como se puede apreciar para una sección rectangular (figura 2.17), en la vertical entre el ánodo y cátodo, es la línea más corta, esto significa que la fuerza que actúa sobre los iones es mayor y también la velocidad de extracción. Por detrás de la barra, la cantidad de cloruros que se puede extraer es significativamente menor.

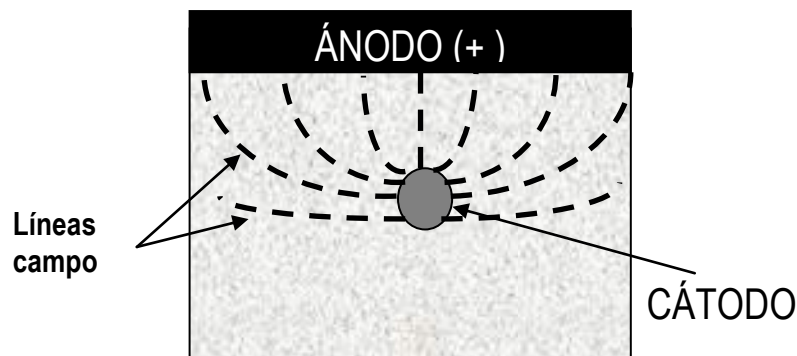


Figura 2.17 Distribución de las líneas de campo eléctrico para una sección rectangular.

Como se puede apreciar en la figura 2.18, con respecto de una muestra cilíndrica, las líneas de flujo eléctrico son equidistantes en el centro del cátodo (acero), por lo que debe esperarse un perfil casi constante

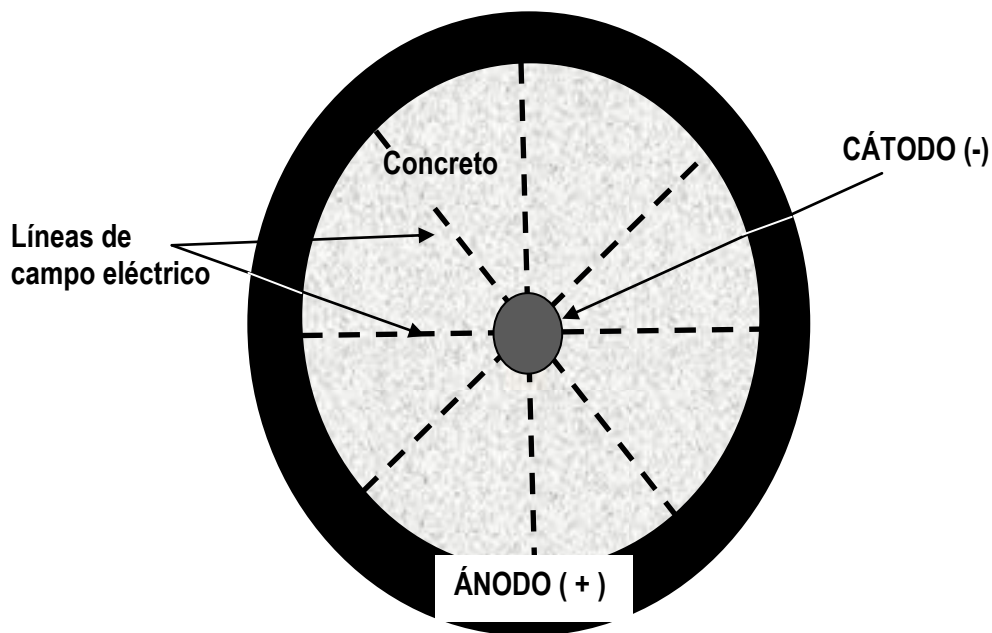


Figura 2.18 Distribución de las líneas de campo eléctrico para una sección circular.

2. Contenido inicial de Cloruros

Como se muestra en la figura 2.19, la eficiencia de una EEC también depende del contenido inicial de iones cloruro, entre mayor sea la cantidad que se coloca dentro del concreto, mayor será la cantidad de cloruros removidos de este. Esto se atribuye a que entre mayor sea la cantidad de cloruros totales, mayor será la cantidad de cloruros libres y por lo tanto la resistividad del concreto será menor, lo que ocasionará una mayor eficiencia en la EEC (*Arya and Newman 1990*).

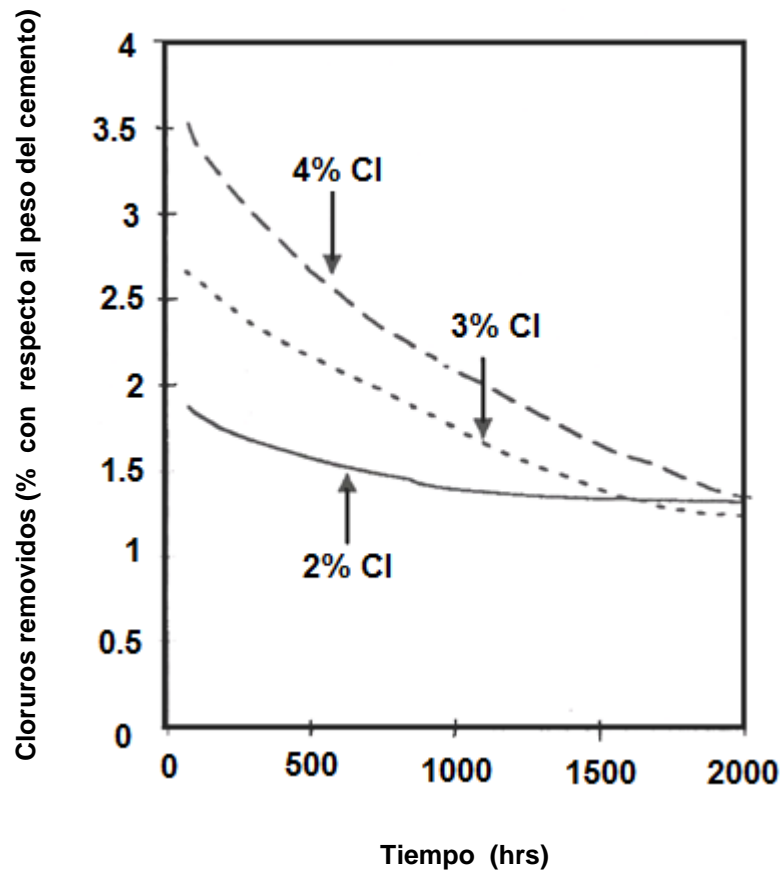


Figura 2.19 Efecto de la cantidad de cloruros iniciales, con respecto a la eficiencia de la EEC (Arya et al., 1996)

3. Número de barras de Refuerzo

Si se toma como constante el potencial eléctrico suministrado, y se tiene como variable el número de barras sumergidas dentro del concreto, se obtendrá una mayor eficiencia en la técnica electroquímica al tener un mayor número de barras. Esto se debe a que entre mayor cantidad de barras de acero haya, mayor será el área catódica y mayor la carga de corriente aplicada.

4. Profundidad del contenido de cloruros

Estudios en el tratamiento de la EEC, han demostrado que entre menor sea el avance en la concentración de iones cloruro dentro del concreto, será mayor la capacidad de remover estos. Esto supone una menor superposición del campo eléctrico entre el cátodo y el ánodo. Los resultados arrojados en prismas de concreto contaminados con un 3%Cl⁻ (con respecto al peso del cemento), y con profundidades de 25, 50 y 120 mm, indican que se logra una mayor cantidad de cloruros removidos en profundidades de 25mm. Por lo cual es de suponer que la EEC será más eficiente cuando el grado de contaminación de este ion sea inicial en el concreto, en comparación de aquellas ECA que ya han sido gravemente dañadas por este contaminante (*Arya et al., 1996*).

2.3.4. EFICIENCIA DE LA EEC

Para determinar la efectividad de la EEC, se calcula la cantidad de cloruros remanentes dentro del concreto una vez hecha la extracción. Se realiza una comparación del perfil de cloruros previo y posterior a la EEC. Pero la simple comprobación de la disminución del contenido en cloruros no debe satisfacer, ya que es una información insuficiente. El tratamiento nunca elimina los cloruros en su totalidad, lo que puede ocasionar con el tiempo, que la armadura sea atacada nuevamente por estos iones despasivantes, (*Elsener, Molina y Bohni; 1993*

Algunos países, como Estados Unidos de América, recomiendan que el contenido crítico de cloruros dentro del concreto no debe sobrepasar el 0.3% del peso de cemento para ambientes normales y, para ambientes húmedos este porcentaje es del 0.15% del peso del cemento según la norma ACI 318. La resistencia eléctrica es un indicador de la permeabilidad de los cloruros. Un concreto seco actúa como aislante con una resistencia aproximada de 109 mΩ, en contraste un concreto húmedo actúa como conductor y presenta una resistencia de 50 mΩ. Por consiguiente, un concreto seco tendrá la capacidad de resistir más a la penetración de cloruros.

Además del trazado de los perfiles en cloruros, la elaboración de mapas de potencial antes y después del tratamiento, el determinar las velocidades de corrosión, son técnicas que se emplean con frecuencia para justificar el éxito de la EEC. Se utilizan los mapas de potenciales, así como los valores de las densidades de corrosión, con la finalidad de saber si la armadura de acero se ha repasivado o sigue corroyendo.

Una de las ventajas que presenta éste método de rehabilitación, es que gracias a que ***la contaminación de cloruros es por un proceso difusivo, estos iones pueden ser extraídos de las ECA en un período corto de tiempo gracias a la EEC.***

2.3.5. EFECTOS PROVOCADOS EN UNA ECA AL APLICAR LA EEC

Se enfatiza, que si bien es cierto que la EEC reduce sustancialmente el contenido de cloruros (*Elsener, Molina y Bohni; 1993*), éste método no es capaz de eliminarlos totalmente, lo que puede ocasionar que con el tiempo nuevamente la armadura sea atacada por estos iones despasivantes, sin embargo la migración nuevamente de los cloruros es de una manera muy lenta (al no contar con una energía que logre mover los iones fácilmente), lo que puede ser una ventaja para que las ECA permanezcan pasivas por períodos de tiempo largos.

Otro efecto no positivo se presenta en el momento en que ocurre la migración y difusión del cambio de especies tal como los cloruros dentro del concreto, lo cuál ocasiona una alteración a la estructura base, incrementando su microporosidad (*Castellote, et. al. 1996*). Por lo que, después de realizarse la extracción, el concreto es más susceptible al ataque tanto de la carbonatación y de la difusión de los cloruros; ya que el material será más permeable y las especies que se encuentren en su entorno atacaran con mucho más facilidad a la armadura (*Tritthart, 1995*).

En estudios recientes (*Rodríguez, 2005*) se encontró un cambio en la composición de los productos de corrosión de la armadura de acero, una vez aplicada la EEC. Sobre un concreto altamente corroído por el ataque de los iones cloruros se le aplico una EEC, otra parte de la ECA se dejo libre de este tratamiento. Se utilizo DRX para obtener las fases encontradas en los productos de corrosión de ambas muestras. Se determino un incremento en

Introducción

la cantidad de Magnetita al comparar los tratamientos electroquímicos con y sin EEC, lo que pudo ocasionar una reducción de la interfase acero-concreto. Se conoce por otros trabajos que el aplicar una densidad de corriente en una técnica electroquímica, puede provocar un daño en la fuerza de enlace entre el acero y concreto. Estos estudios fueron investigados por (*Bennett, 1993*). Sus estudios en prismas de concreto contaminados con cloruros y con diferentes densidades de corriente aplicadas (0.02, 1 y 5 A/m², con respecto al acero), arrojó una reducción del 11% en la resistencia última de adherencia; sin embargo él no detectó una influencia con el cambio de la densidad de corriente.

3 Hipótesis y Objetivo General

3.1.

HIPÓTESIS

Con la realización de esta investigación, se espera comprobar que la EEC pueda ser utilizada como un método electroquímico para extraer cloruros así como otras especies (para este caso los sulfatos) que se encuentran inmersos en el mortero; además de determinar si la EEC es capaz de repasivar el acero de refuerzo cuando se tienen grados incipientes de corrosión y obtener los efectos colaterales que esta técnica puede provocar en el mortero y en la varilla de acero bajo distintos parámetros experimentales (duración de la técnica, densidades utilizadas, cambio en el tipo de contaminante). Finalmente se desea encontrar las condiciones óptimas para realizar una EEC.

3.2.

OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene por objetivo el determinar ***cuáles son las condiciones necesarias para efectuar una extracción electroquímica de cloruros de manera eficiente, basándose en el tipo, cantidad y tiempo de contaminación así como la intensidad de corriente y duración de la EEC.***

Para alcanzar este objetivo general es necesario cumplir con los siguientes objetivos específicos:

Hipótesis y Objetivo General

3.2.1. Objetivos específicos

1. Determinar si ésta técnica es capaz de frenar o aún mejor repasivar el acero, cuando presentan grados de precorrosión incipientes, y corroborar lo ya encontrado por otros autores cuando el grado de precorrosión en las varillas de acero es elevado.
2. Determinar el momento óptimo para aplicar una EEC, variando los siguientes parámetros: Densidad de corriente aplicada en las varillas de acero y la duración en las extracciones.
3. Estudiar la influencia del tipo de contaminante.
4. Establecer la efectividad de la EEC por medio de la concentración de cloruros remanentes.
5. Analizar los Efectos ocasionados al aplicar densidades de corriente elevadas durante la EEC en cilindros de mortero.
6. Verificar si esta técnica puede aplicarse a morteros que han sido previamente contaminados con Sulfatos.

4 Metodología Experimental

4.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para determinar cuáles son las condiciones necesarias para efectuar una EEC de manera eficiente, fue necesario realizar varios experimentos en condiciones muy precisas.

La Metodología experimental en este trabajo consistió en:

- i. Programación de experimentos
- ii. Materiales
- iii. Elaboración de probetas
- iv. Realización de extracciones
- v. Caracterización del mortero y varillas de acero

Los ensayos cuyas metodologías se describen a continuación, constituyen información básica para poder efectuar un dictamen sobre las causas que pueden provocar una extracción en las propiedades del mortero y armadura de acero. Estos ensayos son:

- Resistencia mecánica del mortero
- Características de las armaduras
- Porosidad
- Contenido de cloruros
- Contenido de Sulfatos
- Medidas de Potencial de corrosión
- Microscopio electrónico de Barrido

De entre todos ellos, la determinación del contenido de cloruros y (en el caso de algunas probetas) el contenido de sulfatos, son los dos únicos ensayos que resultan imprescindibles para determinar la eficiencia de la extracción. El conocimiento de la resistencia del mortero, de su porosidad y del espesor del recubrimiento, aportan información complementaria que ayuda a dictaminar los efectos ocasionados por el tratamiento. En cuanto a la medida de

potencial electroquímico de corrosión de las armaduras, facilita indicaciones cualitativas sobre si el acero está activo o se conserva pasivo. Finalmente, el contenido de humedad puede resultar indicativo de la velocidad de propagación del proceso en el futuro.

4.1. PROGRAMACIÓN DE LOS EXPERIMENTALES

4.1.1 Experimento A.

Efecto del grado de precorrosión en la armadura de acero y la duración de una EEC en cilindros de mortero.

Con el objetivo de determinar si ésta técnica es capaz de frenar o aún mejor repasar el acero, cuando presentan grados de precorrosión incipientes, y corroborar lo ya encontrado por otros autores cuando el grado de precorrosión en las varillas de acero es elevado, se fabricaron morteros con grados de precorrosión moderados y elevados. Además este experimento incluía el determinar si existía una relación entre la duración de una EEC, con la cantidad de cloruros removidos del mortero después del tratamiento. Para esto, se efectuaron extracciones con distintos tiempos de EEC: 15, 30 y 60 días, suministrando una corriente de 1 A/m^2 de manera constante a lo largo del ensayo, sobre cilindros de mortero que contenían tres barras de acero, con una relación cemento/arena/agua: 1/3/0.45.

4.1.2 Experimentos A y B.

Efecto de la densidad de corriente aplicada durante la EEC en cilindros de mortero.

Se utilizaron probetas cilíndricas de mortero con grados de precorrosión incipientes y elevados en la armadura de acero, contaminadas con un 2%NaCl con respecto al peso del cemento. Bajo ambas condiciones se efectuaron extracciones con 1 y 2 A/m^2 con respecto al área del acero. La duración de las extracciones fueron de 15, 30 y 60 días. Bajo estas condiciones se deseaba conocer si al aplicar una mayor densidad de corriente durante la extracción, se lograría obtener una mayor eficiencia en la cantidad de cloruros removidos del mortero.

4.1.3 Experimento C.

Efecto del tipo de contaminante al aplicar una EEC en cilindros de mortero.

Para determinar si la eficiencia de la extracción es función del tipo de contaminante, se utilizaron dos tipos de sales distintas. Por un lado se utilizó Cloruro de Sodio (2%NaCl) y por otro lado, se comparó con el Cloruro de Calcio (2%CaCl₂), ambos contenidos en función al peso del cemento. La relación de cemento/arena/agua fue de 1/3/0.45. Las extracciones fueron por 15 y 30 días. Utilizando una densidad de corriente de 2 A/m². Los cilindros contenían tres barras de acero, con un grado de precorrosión incipiente. Todos los cilindros fueron contaminados con las sales desde su preparación, al añadir el contaminante en el agua desde el amasado.

4.1.4 Experimento D.

Efectos ocasionados al aplicar densidades de corriente elevadas durante la EEC en cilindros de mortero, cuando los grados de precorrosión son distintos

En este experimento se utilizaron varillas de acero que presentaban grados de precorrosión distintos. Esta contaminación fue realizada desde antes de colocar las varillas en el mortero. Se utilizó una jeringa de 3 ml con 1%NaCl, la solución fue colocada en la periferia de la varilla y posteriormente cada varilla se mantuvo en una cámara de humedad durante 24, 48 y 72 Hrs. Para la fabricación de los morteros cilíndricos se utilizó una relación cemento/arena/agua de 1/3/0.45. Posteriormente se dejó fraguar el mortero durante más de 28 días. Las Extracciones se realizaron con 2, 4 y 6 A/m², en función del área de acero. El tiempo de extracción en cada probeta fue el mismo, 30 días.

4.1.5 Experimento E.

Extracción de Sulfatos y Cloruros en cubos de mortero

Para verificar si esta técnica es capaz de extraer otras especies (en este caso Sulfatos), se realizaron seis probetas cubicas de mortero de 7 x 7 x 7 cm; colocando una varilla de acero recién decapada en el interior del mortero. Se agregó 2%NaCl en un par de morteros, otros dos morteros con 3%Na₂SO₄ y los últimos con las dos sales (2%NaCl + 3%Na₂SO₄).

Metodología Experimental

Tres morteros se utilizaron para realizar la extracción, los otros tres se utilizaron como morteros de referencia, para comparar propiedades. El tiempo de fraguado fue de 7 días. La densidad de corriente aplicada fue de 2.5 A/m^2 , durante 582 hrs de tratamiento. La relación de cemento/arena/agua fue de 1/3/0.5. El tipo de cemento utilizado en este experimento fue el *OPC CEM 1-42.5 R/SR* (resistente a los sulfatos).

En las tablas 4.1, a 4.5. Se puede observar la distribución de las probetas de acuerdo a los tiempos de precorrosión de las armaduras de acero, tipo de mortero, las densidades de corriente aplicadas, tipo y cantidad de contaminante, y los tiempos de las EEC para cada muestra.



Figura 4.1. Montaje de la Extracción en cilindros de mortero.



Figura 4.2. Montaje de la Extracción en morteros cúbicos.

Tabla 4.1 Experimento A. Distribución de probetas.

| Muestra cilíndrica | Condición | Varillas | Contaminación | | tiempo de contaminación (días) | 1er. Perfil de Cl- | EEC | | | | 2do. Perfil de Cl- | | |
|-----------------------|-------------------------------------|----------|----------------|---------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|----|----|--------------------------|------------|---|
| | | | Tipo | Modo | | | Densidad de corriente | Tiempo (días) | | | | Mediciones | |
| | | | 2% w/c NaCl | adición | | | 1 A/m ² | 15 | 30 | 60 | Ecorr | Rp | |
| A | solo concreto: pruebas de porosidad | | | | | | | | | | | | |
| 1A | CEEC | 123 | X | X | 1 | | X | X | | | X | X | X |
| 2A | CEEC | 456 | X | X | 1 | | X | | X | | X | X | X |
| 3A | CEEC | 789 | X | X | 1 | | X | | | X | X | X | X |
| 4A | SEEC | 101112 | X | | | X | | | | | | | |
| 5A | SEEC | 131415 | X | | | X | | | | | | | |
| 6A | CEEC | 161718 | X | X | 60 | | X | | X | | X | X | X |
| 7A | CEEC | 192021 | X | X | 60 | | X | | X | | X | X | X |
| 8A | CEEC | 222324 | X | X | 60 | | X | | | X | X | X | X |
| 9A | SEEC | 252727 | X | X | | | | | | | | | |
| 10A | SEEC | 282930 | X | X | | | | | | | | | |

NOTAS:

relación cemento / arena/ agua: 1/3/0.45

cemento CPC 30R (C. Monterrey)

SE UTILIZARAN PARA PRUEBAS ELECTROQUIMICAS

Tabla 4.2 Experimento B. Distribución de probetas.

| Muestra cilíndrica | Condición | Varillas | Contaminación | | | | 1er. Perfil de Cl- | Mediciones | | | | 2do. Perfil de Cl- |
|-------------------------------------|-----------|----------|---------------|------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------|---------|----|----|--------------------|
| | | | Tipo | Modo | tiempo de contaminación (días) | Densidad de corriente | | Tiempo (días) | | | Rp | |
| | | | | | | | | 2% w/c NaCl | adición | 15 | | |
| A | | | | | | | | | | | | |
| solo concreto: pruebas de porosidad | | | | | | | | | | | | |
| 1B | CEEC | 123 | X | X | 1 | | X | X | | | X | X |
| 2B | CEEC | 456 | X | X | 1 | | X | | X | | X | X |
| 3B | CEEC | 789 | X | X | 1 | | X | | | X | X | X |
| 4A | SEEC | 101112 | X | | | X | | | | | | |
| 6B | CEEC | 161718 | X | X | 60 | | X | X | | | X | X |
| 7B | CEEC | 192021 | X | X | 60 | | X | | X | | X | X |
| 8B | CEEC | 222324 | X | X | 60 | | X | | | X | X | X |

NOTAS:

relación cemento / arena/ agua: 1 / 3 / 0.45
 cemento CPC 30R (C. Monterrey)

Tabla 4.3 Experimento C. Distribución de probetas.

| Muestra cilíndrica | Condición | Vanillas | Contaminación | | | | ter. Perfil de Cl- | Densidad de corriente 2 A/m ² | Tiempo (días) | Mediciones | |
|-------------------------------------|-----------|----------|----------------|-----------------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------|--|------------------|-------------------|----------------|
| | | | Tipo | | Modo adición | tiempo de contaminación (días) | | | | E _{corr} | R _p |
| | | | 2% w/c NaCl | 2% w/c CaCl ₂ | | | | | | | |
| A | | | | | | | | | | | |
| solo concreto: pruebas de porosidad | | | | | | | | | | | |
| 1C=1B | CEEC | | X | | X | 1 | X | X | | X | X |
| 2C=2B | CEEC | | X | | X | 1 | X | | X | X | X |
| 3C = 4B | SEEC | | X | | X | 1 | X | | | | |
| 4C | SEEC | 123 | | X | X | 1 | X | | | | |
| 5C | CEEC | 456 | | X | X | 1 | X | X | | X | X |
| 6C | CEEC | 789 | | X | X | 1 | X | | X | X | X |

NOTAS:

relación cemento / arena/ agua: 1/3/0,45

cemento GPC 30R (C. Monterrey)

Tabla 4.4 Experimento D. Distribución de probetas.

| Muestra cilíndrica | Condición | Varillas | Tiempo de precorrosión de la varilla | | Contaminación | | 1er. Perfil de Cl- | EEC | | | | | | |
|-----------------------|-----------|----------|---|---|------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|------------|-------|
| | | | | | Tipo 2% w/c NaCl | Modo adición | | tiempo de contaminación (días) | Densidad de corriente | | | Tiempo (días) | Mediciones | |
| | | | | | | | | | 2 A/m ² | 4 A/m ² | 6 A/m ² | | 30 | Ecorr |
| A | | | | | | | | | | | | solo concreto: pruebas de porosidad | | |
| 1D | CEEC | 1 | 72 | X | X | 30 | | X | | | | X | X | X |
| | | 2 | 48 | X | X | | | X | | | | | | |
| | | 3 | 24 | X | X | 30 | | X | | | | | | |
| 2D | CEEC | 4 | 72 | X | X | 30 | | | X | | | X | X | X |
| | | 5 | 48 | X | X | | | | X | | | | | |
| | | 6 | 24 | X | X | 30 | | | X | | | | | |
| 3D | CEEC | 7 | 72 | X | X | 30 | | | | X | | X | X | X |
| | | 8 | 48 | X | X | | | | | X | | | | |
| | | 9 | 24 | X | X | 30 | | | | X | | | | |
| 4A | SEEC | 10 | 72 | X | X | | | | | | | | | |
| | | 11 | 48 | X | X | | | | | | | | | |
| | | 12 | 24 | X | X | | | | | | | | | |

NOTAS:
 relación cemento / arena/ agua: 1/3/0.45
 cemento CPC 30R (C. Monterrey)
 tipo de acero: varilla de 9 mm de diámetro
 para la precorrosión de cada varilla, se utilizo una jeringa de 3ml al 1% de NaCl
 gasto por varilla: 3 ml de solución

Tabla 4.5 Experimento E. Distribución de probetas.

| Muestra cubica | Condición | Varillas | Tiempo de precorrosión de la varilla | | Contaminación | | | Tiempo de Fraguado (7 días) | 1er. Perfil de Cl- | Densidad de corriente 2.5 Alm ² | EEC | | 2do. Perfil de Cl- |
|----------------|-----------|----------|--------------------------------------|---|---------------|------------------------------------|--|------------------------------|--------------------|---|-------------------|---------------------|--------------------|
| | | | | | Tipo | 3% Na ₂ SO ₄ | 3% NaCl + 3% Na ₂ SO ₄ | | | | Tiempo (562 Hrs) | Mediciones Ecorr | |
| SA8 | CEEC | 1 | Decapada | X | | | X | | X | | X | X | |
| SA9 | SEEC | 2 | Decapada | X | | | X | X | | | | | |
| SA10 | CEEC | 3 | Decapada | | X | | X | | | X | X | X | |
| SA11 | SEEC | 4 | Decapada | | X | | X | X | | | | | |
| SA12 | CEEC | 5 | Decapada | | | | X | | | X | X | X | |
| SA13 | SEEC | 6 | Decapada | | | X | X | X | X | | | | X |

NOTAS:

relación cemento / arena/ agua: 1/3/0.5

Cemento: OPC CEM 1-42.5 R/SR

Alambrón de acero de 6 mm

Arena: normalizada

Ensayo realizado en el Instituto de Construcción Eduardo Torroja, Madrid, España

4.2. MATERIALES.

4.2.1. a) Varillas decapadas

En la figura 4.3 se observan una varilla limpia y una varilla después del decapado. En los experimentales se utilizaron varillas de acero con un diámetro de 9 mm y un alambión de 6 mm. La longitud de las varilla fue de 12 cm, y 7 cm la longitud del alambión. Los electrodos de acero fueron decapados en una solución de ácido clorhídrico al 50% con 4g/l de hexametilentramina (urotropina) como inhibidor durante 2 min, posteriormente se lavaron con abundante agua y se sumergieron en un baño con β -cetopropano durante 2 segundos, e inmediatamente se secaron con aire a presión. La composición química de la varilla, así como el alambión se presentan en la tabla 4.6.

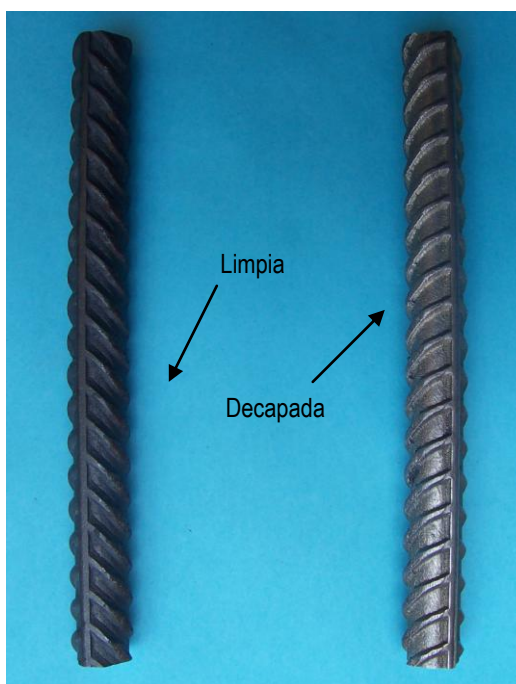


Figura 4.3. Varillas: limpia y decapada.

| ANÁLISIS QUÍMICOS DE LA VARILLA Y ALAMBRÓN | | |
|--|---------|----------|
| ELEMENTO (% peso) | Varilla | Alambrón |
| Fe | balance | balance |
| C | 0.4670 | 0.220 |
| Si | 0.1800 | |
| Mn | 0.8290 | |
| P | 0.0210 | 0.050 |
| S | 0.0260 | 0.050 |
| Cr | 0.1260 | |
| Mo | 0.0400 | |
| Ni | 0.0680 | |
| Al | 0.0040 | |
| Cu | 0.2800 | |
| Ti | 0.0010 | |
| V | 0.0010 | |
| Sn | 0.0150 | |
| Diámetro (mm) | 9 | 6 |

Tabla 4.6. Composición química de la Varilla y alambrón de acero

En la tabla 4.7 se muestran las propiedades mecánicas más importantes de las varilla y el alambrón utilizados en los experimentales. Las Varilla de 9 mm de diámetro nominal, presenta una gran diferencia con respecto a las propiedades mecánicas del alambrón de 6 mm de diámetro. Esta diferencia se debe a que el alambrón fue fabricado en España de acuerdo con la norma **B 500 SD UNE-36065**. Por lo cual este alambrón exige mucho mejores propiedades en Resistencia Mecánica, en comparación con las varillas fabricadas en México con grado 40, que requieren propiedades mecánicas mucho menores.

Tabla 4.7. Propiedades de las Varillas y alambrón de acero

| Producto | Diámetro nominal mm | Grado Norma | Norma Equivalente ASTM | Limite Elástico MPa | Resistencia a la Tracción MPa | % Alargamiento |
|----------|---------------------|-------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------|
| Varilla | 9 | N-40 | 40 | 275 | 481 | 16 |
| Alambrón | 6 | B 500 SD | UNE 36065 | 500 | 575 | 16 |

4.2.1.b) Varillas precorroidas al 1%NaCl

Para verificar si existe una relación entre el grado de precorrosión y la eficiencia de una Extracción, se utilizaron varillas de acero con distintos grados de precorrosión. Después de decapar cada varilla, se añadieron gotas diminutas con una jeringa de 3 ml en la periferia de la varilla, la solución contenía 1%NaCl. El gasto total de solución por varilla fue de 3ml. Para lograr grados distintos de precorrosión, las varillas estuvieron expuestas a esta solución durante 24, 36 y 72 hrs antes de ser embebidas en el mortero. En la Figura 4.4 se muestra un esquema de la varilla de acero expuesta a gotas de NaCl.



Figura 4.4. Varilla de acero expuesta a gotas de NaCl.

4.2.2. Tipos de Cementos

Los cementos utilizados en los experimentales fueron de dos tipos:

a) Cemento CPC 30R

Cemento utilizado en los especímenes cilíndricos. El cemento CPC 30R "fraguado rápido" llega a desarrollar una mayor resistencia a los 3 días, que permite desmoldar o descimbrar en menor tiempo que otros cementos. Este cemento está elaborado principalmente con clinker gris, yeso natural, y otros materiales naturales. Este cemento corresponde a la clasificación de CPC (Cemento Pórtland Compuesto) de la actual norma mexicana para cementos en México, NMX-C-414-ONNCCE.

El nivel de resistencias a la compresión del CPC 30R, sobrepasa los límites mínimos de la clase resistente 30 de la norma antes mencionada. En la tabla 4.8 se presentan las resistencias de

compresión que llega alcanzar este cemento después de 3 y 28 días de fraguado.

**Tabla 4.8 Resistencias esperadas del cemento CPC 30R
Con 3 y 28 días de fraguado (especificaciones según proveedor).**

| Resistencia a la Compresión | | | |
|-----------------------------|---------------|---------|-----|
| Tiempo de Fraguado | 3 días Min | 28 días | |
| | | Mín. | Max |
| Kg / cm ² | 204 | 306 | 510 |
| MPa = N / mm ² | 20 | 30 | 50 |

b) Cemento OPC CEM 1-42.5 R/SR

Se elaboraron muestras cubicas debido a que se deseaba comparar este tipo de probetas con otros experimentales realizados por otros investigadores de España. El utilizar un cemento resistente a sulfatos, fue para comprobar su efectividad en la resistencia a este tipo de contaminante. El cemento resistente al sulfato se diseña especialmente para los ambientes agresivos, se utiliza en sótanos y sistemas de aguas residuales. La composición de este cemento es diferente que el cemento medio, debido al contenido limitado del aluminato de calcio en la escoria y al contenido limitado de la escoria en el cemento. Esto es significativo para limitar la reacción entre el aluminato tricálcico (C3A) y el sulfato que daña el concreto. En general este tipo de cemento se diseña para los ambientes agresivos y corrosivos. En la tabla 4.9 se presentan las propiedades mecánicas que se obtienen de este cemento con distintos tiempos de fraguado.

**Tabla 4.9 Resistencias del cemento OPC CEM 1-42.5 R/SR
con 3, 7 y 28 días de fraguado (especificaciones según proveedor).**

| Resistencia a la Compresión | | | |
|-----------------------------|--------|--------|---------|
| Tiempo de Fraguado | 3 días | 7 días | 28 días |
| Kg / cm ² | 230 | 305 | 420 |
| MPa = N / mm ² | 23 | 31 | 42.5 |

4.2.3. Arena

Se utilizaron dos distintos tipos de arena. Para las probetas cilíndricas se manejó arena común, y en las probetas cúbicas se utilizó arena normalizada, para tener una mayor uniformidad en los experimentales. La arena normalizada se utiliza en el control de las características resistentes de los cementos. Se utiliza en la fabricación de morteros y concretos. Su compuesto principal es la $\text{SiO}_2 \geq 98\%$, y cuenta con una humedad $< 0.2\%$. En la tabla 4.10 se presenta la granulometría de la arena estandarizada.

Tabla 4.10 Granulometría de la arena normalizada

| Tamiz Luz de malla (mm) | Residuo Acomulado |
|----------------------------|----------------------|
| 2.00 | 0 |
| 1.60 | 7 ± 5 |
| 1.00 | 33 ± 5 |
| 0.50 | 67 ± 5 |
| 0.16 | 87 ± 5 |
| 0.08 | 99 ± 5 |

4.3. ELABORACIÓN DE PROBETAS

4.3.1. Probetas cilíndricas

Para la fabricación de las probetas de mortero cilíndricas se utilizó un cemento Portland CPC 30R, con una relación cemento/arena/agua de 1/3/0.45. Los morteros fueron contaminados con distintos compuestos, como: Cloruro de sodio (2% y 5% NaCl) y Cloruro de Calcio (2% CaCl_2 en relación al peso del cemento). Las probetas de mortero fueron fabricadas con un diámetro de 11 cm y una de longitud de 10 cm. En el centro de las probetas cilíndricas de mortero se colocaron tres varillas limpias previamente decapadas. Los diámetros de las varillas utilizadas fueron de 9 mm, con una longitud total de 12 cm y 8 cm de longitud expuesta, dejando un recubrimiento de 3 cm a los lados y 1 cm en la parte superior e inferior del cilindro de mortero. Las probetas permanecieron bajo una Humedad Relativa (HR) $\geq 95\%$, durante uno y 60 días, con el fin de lograr dos distintos grados de precorrosión, y posteriormente realizarles una EEC. Otras probetas se mantuvieron expuestas a esta humedad relativa

durante 140 días, con el objetivo de observar el proceso de corrosión en los refuerzos del acero, sin tratamiento alguno. En la figura 4.5 se observa el montaje de las barras de acero embebidas en el cilindro de mortero.

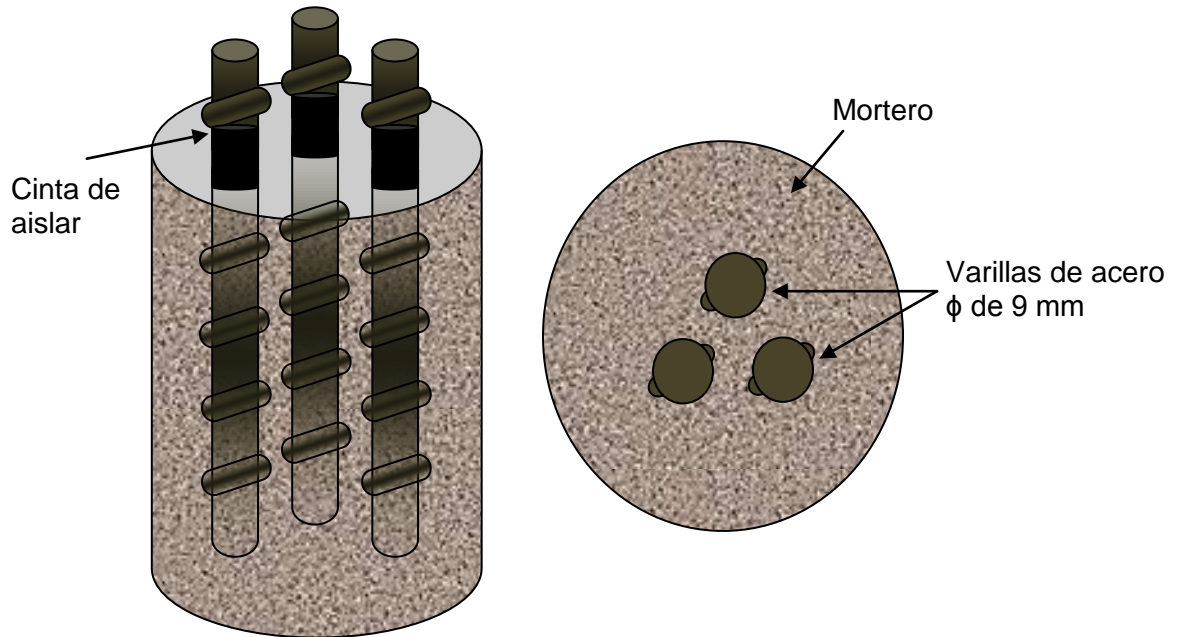


Figura 4.5. Esquema del montaje de las barras de acero dentro de un cilindro de mortero.

4.3.2. Probetas cúbicas

Otro tipo de espécimen de mortero utilizado fue de forma cúbica. Para la fabricación de este tipo de probetas se utilizó un cemento OPC CEM 1-42.5 R/SR (cemento resistente al ataque de sulfatos), con una relación:

$$\text{Cemento /arena /agua} = 1/3/0.5$$

Los morteros fueron contaminados con distintos compuestos, como: 2%NaCl, 2% NaCl + 3% Na₂SO₄ y 3% Na₂SO₄ con respecto al peso del cemento. Las dimensiones de mortero fueron de 7 cm³. En el centro del mortero se colocó un alambrión decapado de 6 mm de diámetro, con una longitud de 7cm, el área de exposición del alambrión fue de solo 5.65 cm². La parte superior del alambrión se cubrió con cinta de aislar para evitar el ataque por aireación diferencial. Un recubrimiento de 3 cm a los lados y 1.5 cm en la parte superior e inferior del cilindro de mortero. Las probetas

permanecieron bajo una Humedad Relativa (HR) $\geq 95\%$, durante un día. Posteriormente el tiempo de fraguado de estas probetas fue de 7 días. Tres probetas se utilizaron para el tratamiento de extracción, otras tres con las mismas condiciones que las anteriores solo se utilizaron como testigos de comparación. En la figura 4.6 se observa el montaje del alambión de acero embebido en el mortero cúbico.

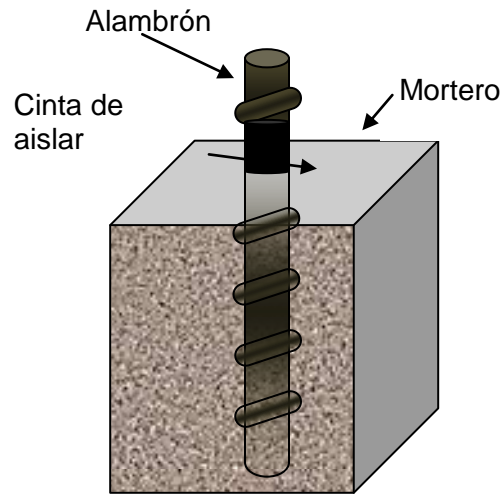


Figura 4.6. Esquema del montaje del alambión (corrugado) de acero Inmerso en un mortero cúbico.

4.4. REALIZACIÓN DE LA EEC.

La EEC realizada en los morteros cilíndricos y cúbicos descritos en la sección anterior se explica a continuación.

4.4.1. EEC en cilindros de mortero

Las probetas cilíndricas de mortero previamente contaminadas con iones cloro (Cl^-), fueron cubiertas en la periferia del cilindro con una franela humedecida con solución saturada de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Encima de la franela se colocó una malla de titanio. Las tres barras de acero contenidas en el mortero fueron cortocircuitadas y conectadas a una terminal negativa de una fuente poder; así, la armadura de acero actuaba como un cátodo; mientras que la malla de titanio se conectó a la terminal positiva de dicha fuente actuando como ánodo. La densidad de corriente suministrada fue distinta sobre la

superficie del acero, 1 y 2, 4 y 6 A/m^2 . Los períodos de aplicación de la extracción fueron 15, 30 y 60 días. En la figura 4.7 se hace una representación esquemática del montaje de los cilindros de mortero durante la EEC.

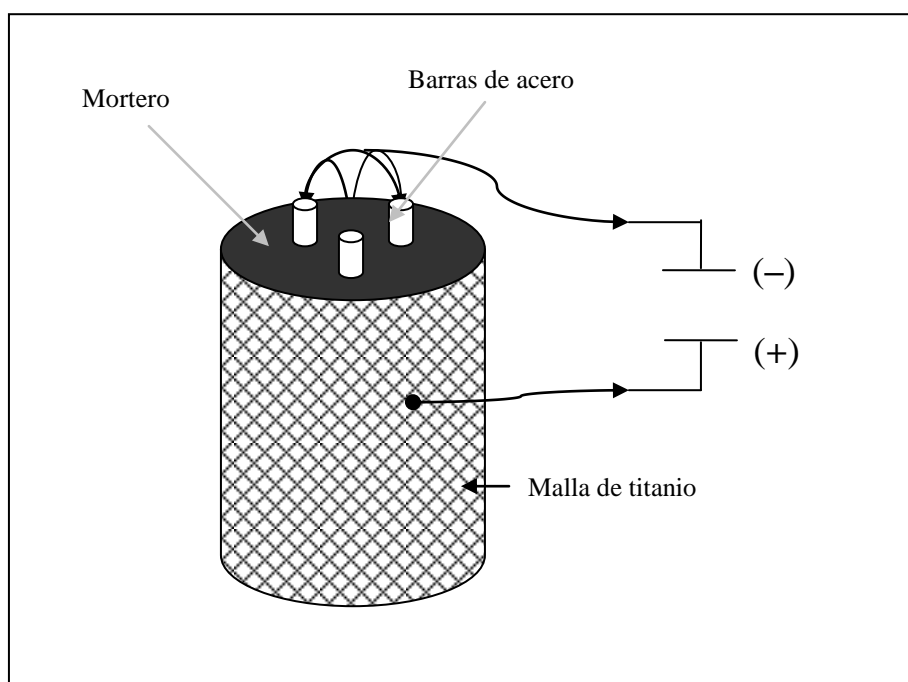


Figura 4.7. Representación esquemática del montaje y las conexiones de los cilindros de mortero empleados en la EEC.

4.4.2. EEC en morteros cúbicos.

A las probetas cúbicas de mortero previamente contaminadas con iones cloruro, sulfato y ambos (Cl^- y SO_4^{2-}), se les colocó en la parte inferior una malla de acero con un spontex humedecido con agua destilada. El alambre de acero contenido en el mortero fue conectado a una terminal negativa del Datalogger, así la armadura de acero actuaba como un cátodo; mientras que la malla de acero (ánodo) se conectó a la terminal positiva de una fuente de poder. El Datalogger fue utilizado para medir la carga total pasada a lo largo del ensayo. La densidad de corriente suministrada fue $2.5A/m^2$ sobre la superficie del acero. Los períodos de aplicación de la extracción fueron 580 hrs. En

la figura 4.8 se hace una representación esquemática del montaje de los cilindros de mortero durante la EEC.

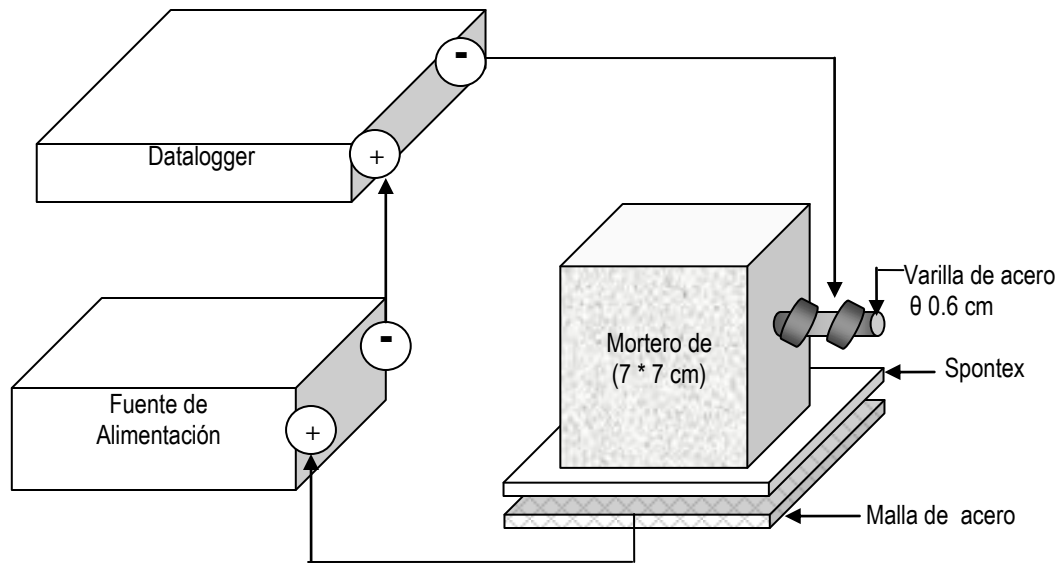


Figura 4.8. Representación esquemática del montaje y la conexión del mortero Utilizado durante la Extracción.

4.5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

4.5.1. Toma de muestras

Se tomaron todas las precauciones para que las muestras del mortero sobre las que se realizan las distintas determinaciones, representen lo más fielmente la composición del objeto de estudio. Los testigos que se obtienen del mortero se fraccionan en rebanadas, o como se considere más conveniente, con el fin de obtener muestras para la realización de todos los ensayos.

En el caso de haber sido muestras en las que se requería determinar cloruros y sulfatos, se trato de evitar el empleo de agua en la extracción de testigos, ya que estos producen un cierto lavado y pueden disolver parte

Metodología Experimental

de los iones de la corteza del testigo. Ya que resulto casi imprescindible el uso de agua en la extracción de las probetas, se utilizo una velocidad de penetración máxima. Lo que se consiguió con una sonda en un buen estado y el control del caudal de agua. Posteriormente se elimino esta corteza. Para probetas pequeñas esto no fue necesario, ya que las extracciones se realizaron de manera manual.



Figura 4.9. Obtención de testigos en cilindros de mortero, Utilizando una brocadora de manera manual.

Cuando fue necesario conocer también el gradiente de concentración de cloruros o sulfatos a lo largo del espesor del mortero, el testigo fue fraccionado en rodajas (en corte en seco), mediante cortes transversales, para obtener porciones de al menos 50 gramos de mortero.

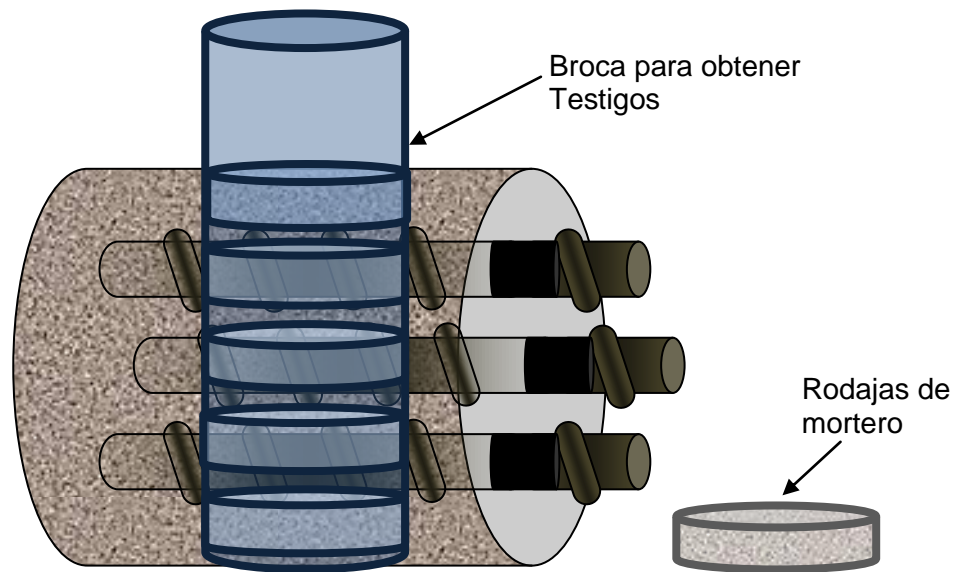


Figura 4.10. Esquema para obtener testigos en cilindros de mortero.

4.5.2. Determinación de la resistencia Mecánica del mortero

Para determinar la resistencia mecánica del mortero “in situ” pueden utilizarse ensayos destructivos solamente o la combinación con ensayos no destructivos, lo que resulta siempre lo más recomendable.

Los métodos de ensayos no destructivos más utilizados actualmente son:

- a) Método de dureza superficial
- b) Métodos ultrasónicos basados en la medida de la velocidad de paso longitudinal de ultrasonidos.

El campo de aplicación de los ultrasonidos está en el estudio de la uniformidad del concreto en distintos elementos estructurales, delimitando las zonas del concreto de baja calidad, comparación de la calidad en términos de resistencia o modulo de elasticidad de los concretos colocados en la misma estructura.

Entre las técnicas no destructivas que emplean impulso ultrasónico, la más utilizada en el caso del concreto es la basada en “*la velocidad de propagación del impulso*”. Dado que el concreto debido a su constitución es suficientemente heterogéneo para las ondas elásticas de alta frecuencia y que, por otra parte es preciso operar con longitudes de onda relativamente

pequeñas, para poder hablar de trayectorias definidas, se adopta un compromiso operando entre 40 y 50 Hz, que se encuentra dentro de la banda baja de ultrasonidos (**Norma UNE 83308-86**).

4.5.2.1. Ensayo de compresión en cilindros de concreto

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (limitado a concretos con una masa unitaria que exceda 800 Kg/cm^2).

Preparación del ensayo:

- El concreto utilizado para elaborar los especímenes moldeados debe tener los mismos niveles de asentamiento, contenido de aire y porcentaje de agregado que el concreto que representa.
- Los cilindros de mortero deben ser elaborados en moldes de acero, hierro fundido o cualquier material no absorbente y no reactivo con el concreto.
- El molde se debe aceitar con una capa delgada de aceite mineral antes del uso.
- Los cilindros de concreto deben ser vaciados y fraguados en posición vertical, con una altura igual a dos veces el diámetro. El espécimen patrón debe ser un cilindro de 150 mm de diámetro interior por 300 mm de altura. No se deben emplear cilindros más pequeños, a menos que sea requerido en las especificaciones del proyecto.
- Los especímenes deben elaborarse sobre una superficie nivelada, rígida y libre de vibración o cualquier otra perturbación.
- Los cilindros pueden compactarse por vibración.
- Después de la compactación el espécimen, se enrasa la superficie de este para quitar el exceso de concreto, utilizando la varilla de compactación.
- Los especímenes deben ser curados, con el fin de impedir la pérdida de humedad. Esto se garantiza manteniendo las muestras inicialmente en ambientes húmedos.

Cálculos

Como resultado de esta prueba se calcula y se reporta la resistencia a compresión simple soportada por el espécimen, utilizando la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{compresión}} = F/A$$

Donde:

σ = Resistencia a la compresión simple (MPa)

F = Carga máxima soportada por el espécimen (KN)

A = Área promedio de la sección transversal del espécimen (cm²)

Para presentar un informe del ensayo es necesario que cubra los siguientes puntos:

1. Número de identificación de la probeta
2. Diámetro y longitud de la probeta
3. Área de la sección transversal en cm²
4. Carga máxima en Newton
5. Resistencia a la compresión en MPa
6. Tipo de la fractura (si hay una diferencia a la cónica usual)
7. Defectos, ya sea del espécimen o del refrentado
8. Edad del espécimen

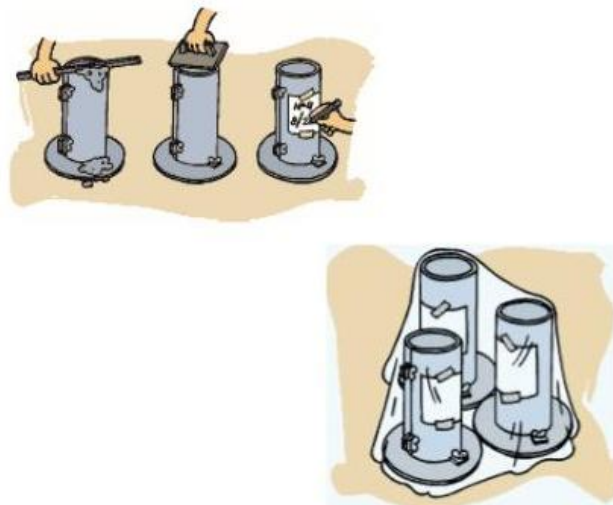


Figura 4.11. Preparación de los cilindros de concreto

4.5.3. Características de las armaduras De las armaduras interesa conocer su recubrimiento y diámetro, conocer si existen pérdidas de sección transversal por la corrosión y, en ocasiones su límite elástico.

Existen instrumentos electromagnéticos conocidos como “Pachometros”, estos sirven para detectar la presencia y dirección de las barras, así como su recubrimiento.

En cuanto a la determinación de la pérdida de sección causada por la corrosión, solo es posible determinarla mediante ensayos destructivos. EL límite elástico del acero se determina ensayando a tracción probetas extraídas de los especímenes de mortero.

Para la pérdida de sección debida a la corrosión fue necesario limpiar la armadura de los óxidos que contenía. Esta limpieza se efectuó con un cepillo de cerdas apropiado y al introducir la muestra en ácido clorhídrico más un inhibidor. Con un calibre apropiado se determinó la pérdida de sección en varios puntos, considerando en la media aritmética la máxima pérdida en la sección. Este valor medio se utilizó para determinar una estimación de la velocidad de corrosión (pérdida en mm/año).



Figura 4.12. Varilla de acero altamente corrida en una solución de NaCl.

4.5.4. Porosidad

La medida de porosidad de un concreto se puede realizar mediante métodos muy sofisticados que permiten conocer no sólo la porosidad total, sino también el diámetro de los poros y el volumen porcentual de cada diámetro. Todos los métodos de medida que actualmente se utilizan son destructivos en cierta medida, o no aportan datos completamente exactos, ya que el material (agua, mercurio, nitrógeno, etc.), que se introducen en el concreto afectan en cierto modo a su estructura interna y la falsean.

El obtener el valor de porosidad de un concreto puede aportar indicaciones sobre la calidad del mismo, y puede ser índice indirecto de la permeabilidad.

- **Procedimiento.**

Una porción de concreto íntegra y libre de grietas de unos 5 x 5 x 10 cm. se deseca en una estufa a 105° C hasta peso constante, luego se introduce en un desecador hasta que adquiere la temperatura ambiente y en estas condiciones se pesa. Después se sumerge en un vaso con suficiente cantidad de agua para que cubra por completo. El vaso con la muestra se introducen en una campana o en un recipiente cerrado, al que se somete a vacío (1 mm de presión de Hg) durante 24 horas al menos. Transcurrido ese tiempo se extrae la muestra y se le seca el agua superficial con un paño poco absorbente e inmediatamente se pesa. Luego se vuelve a introducir en el agua y se vuelve a pesar suspendiendo la muestra directamente de la balanza sin extraerla del agua.

Si no se dispone de bomba para hacer el vacío, esta operación se puede sustituir por otro procedimiento que consiste en hervir la muestra dentro siempre del agua durante 2 horas, se deja enfriar durante 12 horas y luego se seca superficialmente antes de pesarla. La porosidad por volumen del concreto se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\text{Porosidad \%} = \frac{P_{sat} - P_{seco}}{P_{sat} - P_{sumergido}} * 100$$

P_{sat} = peso de la probeta saturada (después del vacío o hervido)
 P_{seco} = peso de la probeta seca
 $P_{sumergido}$ = peso de la probeta saturada y sumergida en agua

Todos los pesos se darán en gramos. Con estos valores también es posible calcular la densidad aparente y real del concreto a través de las siguientes formulas.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{P_{seco}}{P_{sat} - P_{sumergido}}$$

$$\text{Densidad real} = \frac{P_{seco}}{P_{seco} - P_{sumergido}}$$

- **Criterios de Valoración**

1. De acuerdo con la norma **ASTM-C-642-97** los valores de porosidad menores del 10% indican un concreto compactado de buena calidad
2. Valores de entre 10 y 15%, indican un buen concreto, pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos
3. Valores superiores al 15%, son características de concretos muy permeables e inadecuados para proteger a la armadura a largo plazo.

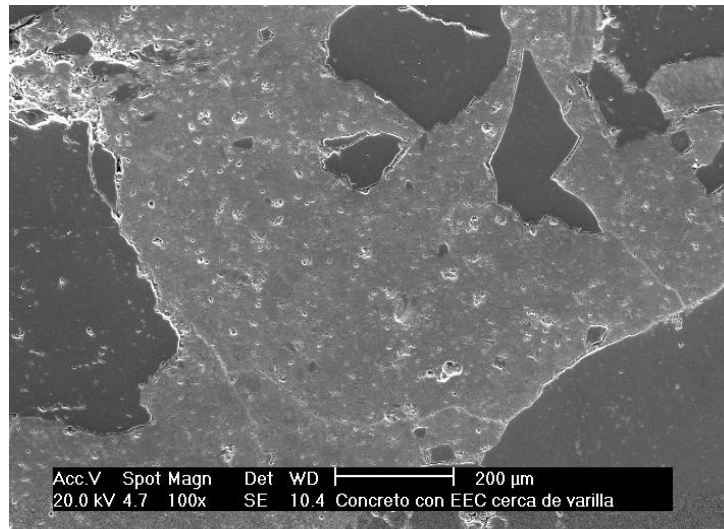


Figura 4.13. Imagen tomada en el MEB donde se observa el tamaño aproximado de los poros (entre 10 y 20 μm) en un concreto después de aplicar una EEC.

4.5.5. Determinación del contenido en Humedad

El contenido en humedad del concreto es la variable que controla tanto el acceso de oxígeno u otros gases (carbónico, sulfuroso, etc.), hasta la armadura, como la resistividad del concreto, es decir es la variable que incide más directamente sobre la velocidad de corrosión. Así, si los poros están saturados de humedad, aunque la resistividad del concreto será la más baja posible, el acceso de oxígeno estará dificultado al tener que llegar hasta la armadura por difusión a través del agua. Cuando los poros están casi secos, el oxígeno llega con facilidad pero la resistividad será muy elevada, permitiendo velocidades de corrosión muy bajas. Los contenidos de humedad que permitan una resistividad baja, pero no saturen los poros serán los que permitirán las velocidades de corrosión máximas.

No existen todavía correlaciones entre contenidos de humedad y velocidad de corrosión, pero a continuación se describe una metodología simple para cuando se considere oportuno conocer esta variable.

- **Procedimiento.**

1. El contenido en humedad de un concreto se calcula mediante la simple diferencia entre el peso de la muestra sometida a una humedad ambiental concreta y el peso después de estar la muestra 24 h. en estufa a 105 °C, o sometida a vacío.
2. En el caso de que la muestra sea extraída en obra, se debe introducir inmediatamente en un frasco hermético. La muestra húmeda se pesará dentro del frasco, luego se extraerá de él y tanto la muestra como el frasco destapado y su tapa se meterán en una estufa a 105 °C o en la cámara de vacío (el frasco debe ser de un material que no se altere con la temperatura en el caso de la estufa), y se pesarán finalmente para hallar el contenido en humedad evaporada de los poros de la muestra.
3. Si se conoce el valor de la porosidad de una muestra gemela de concreto o se efectúa el ensayo con posterioridad al de determinación de la humedad, es posible obtener datos porcentuales de la saturación en humedad de los poros, a partir del peso de la muestra saturada de agua (P_{sat} mencionado en el apartado de porosidad). Así, el % de saturación

en humedad podría expresarse como:

$$\% \text{ Saturación} = \frac{100 * P_m - P_{seca}}{P_{sat} - P_{seca}}$$

Siendo: P_m el peso de la muestra a la humedad del ensayo, P_{seco} el peso después de desecar a 105°C y P_{sat} , cuando la muestra se satura de agua mediante vacío o ebullición.

En caso de que se quiera expresar el contenido de humedad en volumen o peso por m³ de concreto la expresión sería:

$$\frac{\text{1 ó Kg de humedad}}{\text{m}^3 \text{ concreto}} = \frac{[P_m \text{ (Kg)} - P_{seca} \text{ (Kg)}]}{P_{sat} \text{ (Kg)} - P_{seca} \text{ (kg)}} * (10^3)$$

4.5.6. Contenido de Cloruros

Se puede seguir la norma **UNE 80240-86**, **ASTM D 1411** o guiarse por el siguiente procedimiento.

Al menos 20 gr. de muestra seca, se tritura hasta que pase por el tamiz 0.16 (UNE 7050). Posteriormente se homogeniza cuidadosamente y se vuelve a secar en una estufa a 100°C.

Para determinar los cloruros solubles en agua o libres, se toma mediante cuarteo de la muestra triturada y seca, una porción de 20 gr pesados con aproximación de 1 mg, y se introduce al Erlenmeyer de 500 ml provisto de boca esmerilada. Se adicionan a la muestra unos 200 ml de agua destilada. Se agita bien durante una hora hasta disolver la muestra lo más posible. Luego se filtra en un Buhner bajo succión, utilizando un papel filtro de porosidad media, y se lava el residuo varias veces con agua.

El filtrado de las aguas de lavado se traspasa a un frasco Erlenmeyer de 500 ml y se acidula con 10 ml HNO₃ concentrado, luego se añade disolución 1M de AgNO₃ con una bureta hasta que se aprecie que todo el cloruro a precipitado. Entonces se añaden 5 ml más de disolución de AgNO₃ 1M y se calienta a ebullición para coagular el precipitado de AgCl.

Se deja enfriar a temperatura ambiente, se añaden 10 ml de alcohol bencílico y se agita fuertemente. Se adicionan 10 ml de indicador de

Volhard y se valora el exceso de nitrato de plata con NH_4SCN 1M, hasta que aparezca una coloración rojiza permanente.

Para determinar los cloruros totales, se procede de manera similar, excepto que en la disolución inicial de la muestra triturada, que se realiza en 50 ml de agua añadiendo 10 ml de HNO_3 1:4. Finalmente se enfría y se filtra, y se continua la valoración como antes se ha indicado, o mediante el método de Mohr. El contenido de los cloruros puede estar referenciado sobre el peso de la muestra de concreto o al de la proporción del cemento.

- **Criterios de Valoración**

Como limite muy general se considera que el 0.4% en relación al peso del cemento, o el 0.05-0.1% en relación al peso del concreto, son cantidades suficientes de cloruros para despasivar el acero. Aun así se han encontrado armaduras corroídas en concreto con contenidos inferiores a los citados, y armaduras no corroídas en concretos con cantidades de cloruros incluso muy superiores a este límite, por lo cual es indispensable considerar otras variables para trazar un veredicto. En general el contenido de cloruros da una idea del grado de contaminación y de la evolución posible del daño, pero no se puede tomar como un límite matemático en la interpretación basada en la experiencia del técnico responsable.

4.5.7. Contenido de Sulfatos

Aunque los sulfatos no tienen un efecto tan nocivo sobre las armaduras como los cloruros, son también iones despasivantes, y su determinación resulta conveniente, ya que permite valorar si el concreto del recubrimiento ha podido verse afectado por el ataque de estos iones y provocado un aumento de la permeabilidad debido a expansiones y agrietamientos típicos del ataque por sulfatos. Si los sulfatos se encuentran en el exterior del concreto, al penetrar a través del recubrimiento, provocan en primer lugar una cierta expansión al formarse los sulfoaluminatos expansivos ya bien conocidos. Este agrietamiento superficial del recubrimiento va a producir una mayor permeabilidad del mismo y una menor protección de la armadura, que se puede corroer ya no tanto por una despasivación del tipo de la que producen los cloruros, sino por el efecto sinérgico de un deterioro simultáneo del recubrimiento. En la figura 4.14 se muestra una grafica representativa de la velocidad de

deterioro del concreto expuesto a sales que contenían sulfatos. Antes de determinar el cuantitativo de azufre total, en el concreto que se puede realizar perfectamente y con una gran precisión analítica, por la **UNE 83 120**. Se recomienda un análisis cualitativo de sulfatos en el concreto. En el caso de que sea negativo, solamente se tendría que realizar el contenido en sulfatos, eliminado el azufre total.

4.5.7.1. Análisis cualitativo de sulfatos en concreto

Fundamento: Tanto el ión sulfuro, como el SH_2 precipitan el SPb negro, con soluciones de sales de plomo poco ácidas, neutras o alcalinas.

Reactivo: El PbO_2Na_2 , se prepara añadiendo $NaOH$, a una disolución de $(CH_3COO)_2Pb$, 1N, hasta redisolución del precipitado de $Pb(OH)_2$.

- **Método No. 1.** Se toman unos 10 gr. de concreto molido, que pase por el tamiz 0.63, y sea retenido por el tamiz 0,32 (UNE 7050). Se lleva esta muestra a una cápsula de níquel o de hierro, de unos 125 ml. de capacidad. Se agregan ahora del orden de 40 gr. de $NaOH$, se funde con cuidado a una temperatura de 450 °C. Una vez fría la cápsula, se toma una porción de la masa fundida fría y se lleva a un erlenmeyer de 600 ml de capacidad, agregándose 20 ml de agua. A continuación se agrega gota a gota, CIH (1:1), sobre el erlenmeyer con la muestra a analizar y se calienta el recipiente. En caso de presencia de sulfuros, los gases que se desprenden serán de SH_2 . Se recogen sobre papel filtro humedecido con unas gotas de solución de reactivo de plumbito sódico. Este pasa a negro, en presencia del SH_2 . Ante una presencia franca de sulfuros, la mancha en el papel es de color negro-metálico.
- **Método No. 2.** En vez de fundir con $NaOH$, la muestra se ataca con CIH (1:1), recogiendo los gases en un papel de filtro humedecido con solución de plumbito sódico. Coloración negra, presencia de sulfuros desplazables por el CIH .

4.5.7.2. Análisis cuantitativo de sulfatos en concreto

La muestra para determinar el contenido de sulfatos debe obtenerse de la misma forma que se indicó para la determinación de los cloruros; por tanto, puede utilizarse una parte de la misma triturada y seca.

Se pesa, entonces, con aproximación de 1 mg. una porción de unos 5 g. de dicha muestra triturada, y seca en un vaso de 250 ml se añaden 25 ml de agua destilada fría y 10 ml de *HCl* concentrado, poco a poco y removiendo con varilla de vidrio.

Se calienta en baño, cubriendo el vaso con un vidrio de reloj, y se remueve de vez en cuando hasta que se observe un ataque completo. Se diluye con 50 ml de agua destilada caliente y se deja en digestión sobre el baño durante 15 minutos. Se filtra en caliente utilizando papel filtro de porosidad media, y se lava varias veces con agua caliente.

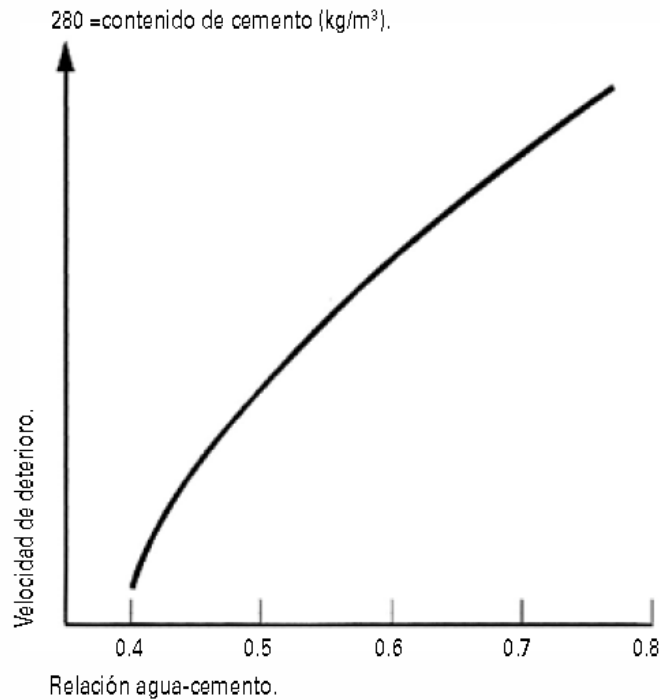


Figura 4.14 Efecto de la relación agua - cemento sobre la velocidad de deterioro del concreto expuesto a sales que contienen sulfatos (de acuerdo a Verbeck).

El filtrado, llevado a 250 ml. se calienta a ebullición y se añaden gota a gota 10 ml de disolución caliente de $BaCl_2$ al 10%, y se continúa la ebullición unos minutos. Se deja el vaso tapado, en digestión, entre 12 y 24 horas, transcurridas las cuales se filtra el precipitado, utilizando papel de baja porosidad, y se lava con agua caliente hasta la desaparición de los cloruros en las aguas de lavado. El precipitado se calienta entre 900 y 1000°C en crisol previamente tarado y se pesa después.

- ***Criterios de Valoración***

El contenido en sulfatos de un concreto depende de la proporción de cemento y del contenido en yeso del citado cemento. Así por ejemplo, un concreto de densidad 2.3 g/cm³ con 350 kg. de cemento/m³, cuyo cemento pudiera contener como máximo un 3% de yeso, daría un contenido máximo en sulfatos del 0.46% por peso de muestra. Si contiene la muestra cantidades superiores es porque las ha adquirido durante el amasado (aditivos) o han penetrado desde el exterior.

4.5.8. Técnicas Electroquímicas utilizadas para estimar la corrosión en los refuerzos.

Para determinar el grado de corrosión en las varillas de acero, se utilizaron las siguientes técnicas:

4.5.8.1. Potencial de corrosión

El potencial electroquímico de corrosión de las armaduras embebidas en concreto es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad de las mismas. Aporta indicaciones meramente cualitativas que se deben utilizar siempre como complemento de otro tipo de ensayos y nunca de forma aislada. La medida consiste en la determinación de la diferencia de potencial eléctrico entre el acero de las armaduras y un electrodo de referencia, que se coloca en contacto con la superficie del concreto. La adopción de un electrodo de referencia particular es equivalente a la elección arbitraria de un punto cero en la escala de potenciales.

Como el potencial de corrosión es función de un gran número de variables (contenido de humedad y oxígeno del concreto, espesor de recubrimiento, etc.) no se deben extraer conclusiones cuantitativas de su medida, ya que no da información sobre la cuantía de la corrosión, sino sólo sobre la probabili-

dad de que este proceso se esté produciendo o no. La medida del potencial de corrosión resulta imprescindible en la supervisión y posterior control de estructuras que van a ser o están sometidas a protección catódica. Las principales circunstancias que pueden conducir a conclusiones erróneas en las medidas de potencial son:

- 1. El contenido en humedad del concreto.**
- 2. Contenido de oxígeno.**
- 3. Diferentes espesores de recubrimiento.**
- 4. La presencia de fisuras o grietas en el concreto.**
- 5. La existencia de corrientes erráticas.**

1. Según el concreto se encuentre seco o húmedo, la misma medida de potencial puede variar unos pocos milivoltios o incluso 100-200 mV (~l concreto húmedo siempre da lugar a potenciales más negativos). Zonas secas y húmedas en una misma estructura pueden dar por tanto diferencias en potencial que no podrían ser atribuibles a un mayor riesgo de corrosión, sino a un diferente contenido de humedad en contacto con la armadura. Por ello se recomienda humedecer ligeramente el concreto de forma homogénea antes de proceder al muestreo inicial. Si ello no es posible, se deberá tener en cuenta muy cuidadosamente la situación de sequedad o humedad en que se encuentran las zonas de la estructura sometida a la supervisión.
2. La falta de oxígeno cerca de las armaduras, produce también unos valores de potencial mucho más negativos que cuando la estructura está bien aireada. Esta circunstancia hay pues que tenerla en cuenta cuando se supervisan estructuras sumergidas o enterradas donde la oferta de oxígeno está limitada, para no atribuir riesgos mayores a los potenciales más negativos, cuando en realidad una menor oferta de oxígeno está limitada, para no atribuir riesgos mayores a los potenciales más negativos, cuando en realidad una menor oferta de oxígeno lleva a velocidades de corrosión más pequeñas, aunque los potenciales sean más negativos.
3. Debido a la elevada resistividad del concreto sobre todo cuando está seco, el potencial que se mide en la superficie no es el mismo que tiene

el acero si se midiera mediante una sonda que llegara hasta la misma superficie de la armadura. Esta circunstancia hace que puedan medirse potenciales diferentes para el mismo estado de una armadura situada a diferentes profundidades en el concreto.

4. La presencia de grietas o desperfectos, además de poder provocar una corrosión localizada sobre la armadura, hace variar la resistividad del concreto, por lo que los potenciales que se miden pueden resultar falsados por una resistividad del medio heterogénea.
5. La existencia de corrientes erráticas normalmente dará lugar a detectar potenciales muy alejados de los valores habituales que se miden en el concreto.

La medida del potencial de corrosión se puede aplicar tanto a probetas pequeñas en el laboratorio como a estructuras de gran tamaño, con independencia de su geometría. Las medidas se pueden realizar aisladas o bien de forma sistemática y predeterminada, lo que permite delimitar el «mapa de potenciales» de la estructura. Esta última modalidad puede resultar muy útil a la hora de planear la reparación de una estructura, ya que se pueden identificar las zonas posiblemente corroídas, y las zonas donde la armadura permanece pasiva.

- **Procedimiento.**

Zonas de medida.- Para realizar un mapa de potenciales es necesario definir el espaciamiento en la longitud de la «retícula» que servirá de base de medida. La distancia elegida dependerá en cada caso. Cuando las medidas se vayan a efectuar de forma asistemática se definirán las zonas donde se pretende medir, identificando en ellas las posibles fuentes de error descritas en el apartado anterior (humedades discontinuas, grietas, espesor de recubrimiento, etcétera).

Humectación del concreto.- Se procederá a humedecer de forma homogénea la superficie sobre la que se va a medir. Si la humedad ambiental es habitualmente elevada o ha llovido recientemente, esta operación no es necesaria. En todo caso es necesario recordar que los criterios de interpretación que se establecerán en un apartado posterior, están especificados para un concreto que no esté seco. El concreto se humedecerá al menos 15 o 30 minutos antes de las medidas, con agua

potable. No se debe saturar completamente, sino simplemente humedecer.

Debido a la higroscopicidad de los cloruros, el concreto contaminado de esta sustancia suele estar mucho más húmedo de lo que sería de esperar por la humedad ambiental.

Contacto eléctrico con las armaduras.- Se establecerá mediante la oportuna perforación para establecer un contacto directo de ésta con el borne del aparato de medida.

Electrodo de referencia.- Normalmente se utiliza un electrodo de calomelanos saturado (ECS), aunque también es común el electrodo de $Cu/Cu SO_4$. El ECS tiene un potencial de +241 mV a 20°C con respecto al de hidrógeno y el de $Cu/Cu SO_4$ de +316 mV. Es necesario comprobar que la membrana de contacto está en buen estado de conservación, antes de cada medida.

Contacto con el concreto.- Para asegurar un buen contacto entre el electrodo de referencia y el concreto y no dañar el electrodo, se utiliza una esponja o un papel de filtro ligeramente humedecidos.

Instrumentación.- Cualquier voltímetro con elevada impedancia interna es válido para realizar las medidas. El instrumento debe tener una exactitud mínima de ± 1 mV. En obra se recomienda el uso de aparatos portátiles.

Realización de las medidas.- Las armaduras serán conectadas siempre al polo (+) o rojo del voltímetro, y el electrodo de referencia al polo (-) o negro.

Si las medidas a realizar son muy numerosas se recomienda utilizar un sistema de fichas donde se puede identificar con precisión la ubicación del punto de medida y los detalles que se aprecien sobre el aspecto de las armaduras o del concreto. También puede ser utilizado un sistema informatizado de recolección de datos.

- **Criterios de Valoración**

El procedimiento para la evaluación de la corrosión de la armadura de acero embebido en el concreto en referencia del E.S.C. se encuentra en la norma ASTM –C-876-91, la cual establece criterios que relacionan al potencial de corrosión y su condición de corrosión, estos criterios se muestran en la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Criterios de corrosión de la norma ASTM-C-876-91.

| $E_{corr} (mV)_{ESC}$ | Probabilidad de corrosión |
|-----------------------|---------------------------|
| >-120 | 10% que se presente |
| -120 a -275 | Zona incierta |
| <-270 | 90% que se presente |

4.5.8.2 Resistencia de Polarización (R_p).

La Resistencia de Polarización, es la técnica electroquímica más simple y de mayor facilidad. Consiste en desplazar el sistema de su potencial en circuito abierto a otro valor de potencial, registrando valores de potencial (ΔE) y de corriente (ΔI). Esta técnica consistió en aplicar a las varillas de acero un pulso de + / - 10mV con respecto a su potencial de corrosión, y medir su respuesta en corriente, durante 15 seg. El equipo que se utilizó para las mediciones fue un: potencióstato-galvanostato (Vimar 30Volts-1 Amper).

La relación entre E y I es lineal en un pequeño entorno del E_{corr} , la relación entre ambas variables tiene las dimensiones de una resistencia de acuerdo con la ley de Ohm, y resulta inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, relacionada con una intensidad de disolución metálica a través de la constante B de la ecuación de **Stern y Geary**:

$$I_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

I_{corr} = Corriente de corrosión en el sistema

B = Relación de las pendientes de Tafel anódica y catódica

R_p = Resistencia de polarización

La constante B es poco sensible a las variaciones de las pendientes de Tafel, se encuentra, en la mayoría de los casos entre 13 y 52 mV.

4.5.8.3. Curvas de Polarización.

Las curvas de polarización son obtenidas al aplicar potenciales en un campo mucho más amplio de potenciales que cuando se mide la R_p . En esta técnica, las varillas de acero se polarizaron en un rango de $+ / - 1000\text{mV}$ sobre el potencial de corrosión. En la figura 3.7 se muestra la representación grafica de la curvas de polarización.

Esta técnica se puede definir como la relación entre el potencial o la corriente impuesta y la respuesta en la variable conjugada. Con esta técnica es posible calcular las pendientes de Tafel, que son parámetros cinéticos útiles en el cálculo de la I_{corr} por medio de la R_p .

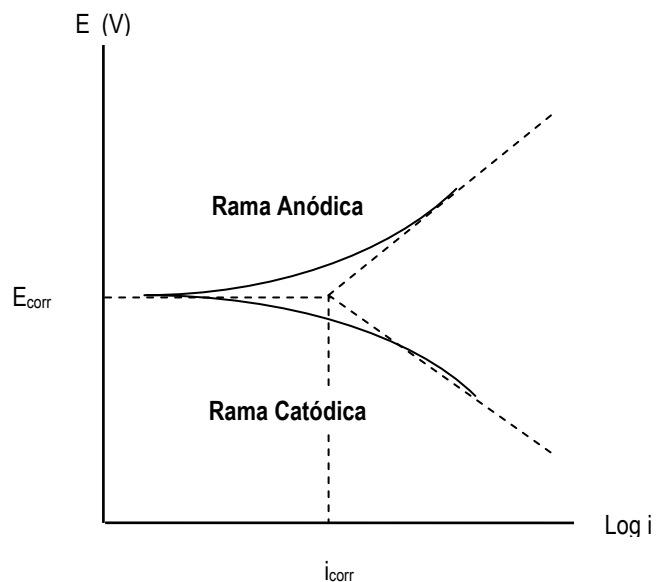


Figura 4.15 Representación grafica de las curvas de polarización para determinar I_{corr} por el método de intersección.

Las curvas de polarización, con imposición de amplias polarizaciones dan idea del comportamiento general de un material metálico frente a un medio y, proporciona valiosa información, por ejemplo, si el control del proceso es:

- a) Mixto.
- b) Catódico por difusión.
- c) Anódico por pasivación.

El principal inconveniente de la extrapolación de Tafel es que desplaza a la interfase de sus condiciones naturales, con la posibilidad que no vuelva al estado estacionario inicial, o que tarde mucho tiempo en restablecerse.

4.5.9. Microscopio Electrónico de Barrido.

Para observar la morfología de los óxidos en las varillas de acero, así como la microporosidad en las muestras de concreto; se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) Phillips XL-30. En algunos casos se utilizó Análisis de Dispersión de Rayos X (EDX) para obtener la composición química local de los productos de corrosión (formados en las varillas de acero), así como de las muestras de mortero.

Para analizar los trozos de concreto sin y con EEC en el MEB, fue necesario recubrir las muestras con una capa de oro para facilitar el contacto eléctrico. Las observaciones microscópicas se realizaron con un voltaje de 20 kV. Se utilizaron detectores de Electrones Secundarios (SE) principalmente, y en algunas ocasiones el detector de electrones retrodispersados (BSE).

5 Resultados y Discusión

5.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 EXPERIMENTO A.

Efecto del grado de precorrosión en la armadura de acero, y la duración de una EEC en cilindros de mortero.

El objetivo de este ensayo es determinar si ésta técnica puede detener el proceso de corrosión en el acero o aún mejor retroceder el proceso de degradación cuando se presenta precorrosión incipiente y, observar los efectos que esta técnica le puede provocar al acero cuando el grado de precorrosión en las varilla es elevado.

5.1.1. Grados de precorrosión de las varillas de acero.

Los grados de precorrosión obtenidos en las varillas contaminadas con cloruros, en función del tiempo de exposición dentro de una cámara de humedad, se presentan en la tabla 5.1. Como puede observarse se obtienen grados de precorrosión distintos, las muestras expuestas por un día presentaron valores de E_{corr} aproximados a -317 mV y valores de i_{corr} en torno a $0.36 \mu A/cm^2$, lo cual implica un riesgo por daño de corrosión con un grado de incertidumbre de acuerdo a la norma ASTM C 876-91, y un nivel de corrosión moderado con referencia a la medida de la i_{corr} (tabla 5.2 a y b). Con respecto a los refuerzos que permanecieron durante 60 días en la cámara de humedad, los E_{corr} presentaron en promedio valores de -435 mV y medidas de i_{corr} en torno de $1.0 \mu A/cm^2$. Ambas medidas sitúan a los refuerzos en una zona de corrosión elevada de acuerdo a las referencias indicadas.

Resultados y Discusión

Tabla 5.1. Resultados de los grados de precorrosión en función de las medidas de E_{corr} e i_{corr} obtenidas en las probetas de mortero después de ser contaminadas y expuestas durante 1 y 60 días.

| Grado de precorrosión moderado (Un día). | | | Grado de precorrosión elevada (60 días). | | |
|---|------------------------------|-----------------------------|---|-----------------|-----------------------------|
| Probeta | E_{corr} (mV) [*] | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | Probeta | E_{corr} (mV) | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) |
| A1 | -286 | 0.25 | A6 | -489 | 1.15 |
| A2 | -344 | 0.39 | A7 | -391 | 0.89 |
| A3 | -321 | 0.44 | A8 | -425 | 1.23 |
| Promedio | -317 | 0.36 | Promedio | -435 | 1.09 |

* E_{corr} vs. Electrodo saturado de Calomelanos. (ESC).

Tabla 5.2.a) Potenciales de Corrosión en el concreto armado bajo la Norma ASTM C876-91.

| | |
|--------------------------------------|---|
| Potenciales más positivos que -200mV | El riesgo que ocurra corrosión es de un 10% |
| Valores entre -200 mV y -350 mV | Corrosión incierta |
| Más negativos que -350 mV | Se tendrá una probabilidad del 90% de que se esté corroyendo el acero |

Tabla 5.2.b) Niveles de corrosión en el sistema acero/concreto, según diferentes autores (*Rincón et al., 1997*¹) (*González et al., 1994*²)

| i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | Nivel de corrosión [¹] | Nivel de corrosión [²] |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| < 0.1 | Despreciable | Despreciable, $\rho > 100K\Omega$ |
| 0.1 a 0.5 | Moderado | Significativo, $\rho > 20K\Omega$ |
| 0.5 a 1 | Elevada | |
| > 1 | Muy elevada | Muy peligroso, $\rho > 20K\Omega$ |

5.1.2. Extracción electroquímica de cloruros.

Como ya se mencionó anteriormente, la eliminación de cloruros del concreto contaminado ya ha sido probada en varias ocasiones por diferentes autores aplicando la EEC (*Abdelaziz et al., 2009*). Este trabajo no es la excepción, ya que pueden lograrse extracciones hasta un 37 % (figura 5.1). Algunos autores reportan extracciones de cloruros hasta del 60 % al aplicar una

densidad de corriente de 1 A/m^2 con respecto al acero, durante 90 días de tratamiento (Fajardo et al., 2006).

Si se define la efectividad de la técnica como la capacidad de extraer los cloruros del mortero sin tomar en cuenta los porcentajes, se puede decir que en este trabajo la EEC fue efectiva. Si se hace referencia a los porcentajes de extracción, se deben tomar en cuenta las condiciones a las cuales se realizó el ensayo (tiempos de EEC, densidades de corriente aplicada, etc.). Es importante mencionar que fue posible hacer una comparación de las extracciones en función de los tiempos de aplicación de la EEC (15, 30 y 60 días), observándose que conforme aumenta el tiempo de la extracción, la cantidad de cloruros extraídos también aumenta (figura 5.1).

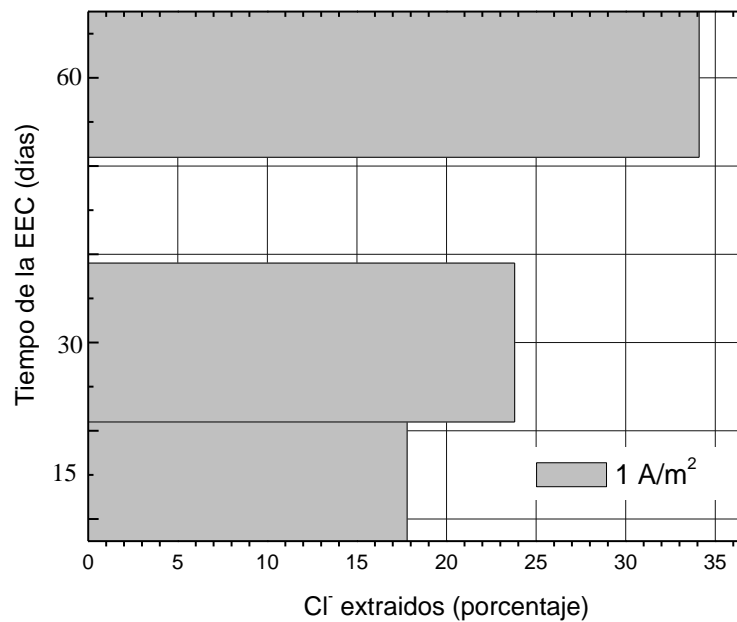


Figura 5.1. Porcentaje de cloruros removidos en cilindros de mortero después de realizar las EEC durante 15, 30 y 60 días, con una densidad de corriente de 1 A/m^2 .

5.1.3. Contenido de Cloruros en el mortero.

Todas las probetas se contaminaron inicialmente con un 2% de NaCl con respecto al peso del cemento, por lo cual solo fue necesario determinar el

Resultados y Discusión

contenido de los cloruros después de finalizar la EEC. Se obtuvieron testigos de los morteros, los cuales fueron pulverizados proporcionando 20 gr. de muestra, de los cuales se extraían los cloruros por medio de una lixiviación de agua destilada a una temperatura muy cercana a la ebullición. El análisis de cloruros se realizó bajo la norma de ASTM D 512. Cada probeta de mortero se analizó por triplicado y se obtuvo un promedio general. La diferencia entre el contenido de cloruros antes y después de la EEC permite calcular la eficiencia del tratamiento, expresado como el porcentaje de cloruros extraídos.

5.1.4. Estado corrosivo de las varillas.

Existen resultados contradictorios en la literatura con respecto a la posibilidad de que una vez aplicada la EEC las varillas de acero vuelvan a un estado de pasividad. Algunos autores han observado una disminución en el estado de degradación por corrosión del acero de refuerzo, lo cual podría ser un indicio del restablecimiento en la pasividad del acero (*Green et. al., 1993*). Por otro lado, otros investigadores han notado incrementos en la degradación del acero, indicando que estos efectos podrían resultar de: a) la acumulación localizada de los iones hidróxido en la superficie de la varilla, b) la reducción del oxígeno en la interfase acero-mortero, lo que provoca un incremento de pH en valores aproximados a 14; además la polarización catódica provocada durante la EEC con potenciales en torno de los -1000 mV, ocasiona que el acero se sitúe en una zona de corrosión alcalina en el diagrama Pourbaix E /pH (*Marcotte et. al., 1999*) (*Pourbaix, 1976*).

En este trabajo se encontró que cuando se aplica una EEC sobre el refuerzo de acero con grado de precorrosión moderado, es posible detener la velocidad de corrosión en valores iguales o ligeramente por debajo de los valores iniciales, como se puede apreciar en la *figura 5.2*. Claramente se puede observar en esta misma figura que antes de iniciar con los tratamientos de EEC las densidades de corrosión de los refuerzos son cercanas a $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y al finalizar las extracciones en distintos tiempos (15, 30 y 60 días) sus valores se acercan a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Para estas i_{corr} , los refuerzos se ubican dentro de los límites atribuibles al estado moderado de corrosión. Si bien es claro que la EEC no logró repasar al acero, si logró detener el daño por corrosión al menos durante el tiempo que duró el ensayo.

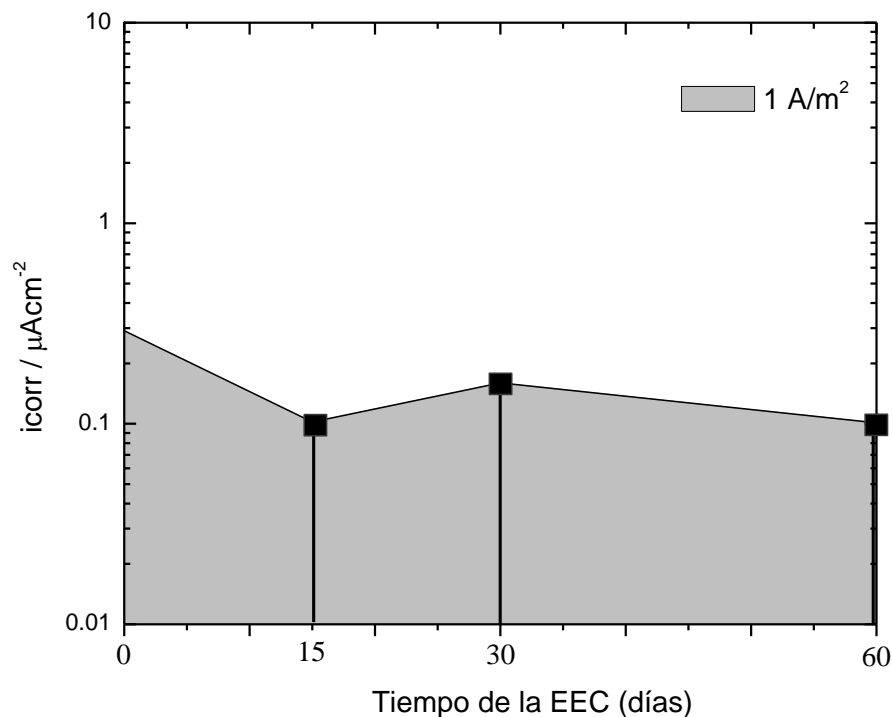


Figura 5.2. i_{corr} contra el tiempo de aplicación de la EEC en probetas precorroídas con Cl^- durante un día de exposición en cámara de humedad.

Con respecto al comportamiento de los electrodos con grado de precorrosión elevado (*Figura 5.3*); puede decirse que no se observan señales de repasivación después de aplicar la EEC; antes de aplicar la técnica los valores de i_{corr} son aproximadamente de $1 \mu A/cm^2$ y posteriormente a los tratamientos, las i_{corr} se mantuvieron en un intervalo de 1 a $0.7 \mu A/cm^2$, valores correspondientes a un estado activo y muy peligroso en las estructuras de concreto armado, ya que puede provocar grietas en los recubrimientos de concreto para penetraciones de corrosión inferiores a $100 \mu m$ (*González et. al., 1993*).

Resultados y Discusión

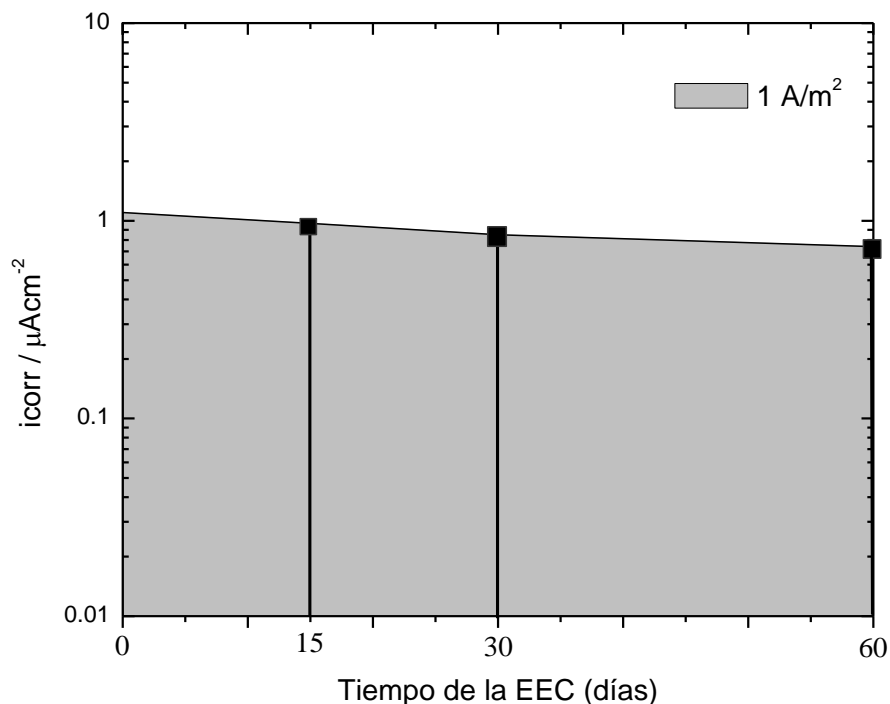


Figura 5.3. i_{corr} contra el tiempo de aplicación de la EEC en probetas precorroídas con Cl^- durante 60 días de exposición en cámara de humedad.

Los resultados de E_{corr} también permiten ubicar de una manera cualitativa los estados de corrosión de los electrodos antes y después de la EEC. Como puede verse en las *figuras 5.4, 5.5 y 5.6*, los potenciales antes y después de la EEC son muy similares y se sitúan en riesgos de corrosión que van desde probabilidad incierta a posibilidades $\geq 90\%$ de que exista corrosión, de acuerdo a la norma ASTM C 876-91. Estos resultados vuelven a mostrar que no existe repasivación en los electrodos aun cuando se parte de velocidades de corrosión moderadas (*figura 5.2*) y lo mismo sucede cuando se tienen velocidades de corrosión elevadas (*figura 5.3*).

5.1.5. Polarización en las varillas

Uno de los problemas que ocurren al realizar las mediciones electroquímicas es la polarización de los electrodos durante la aplicación de la EEC, esto puede apreciarse en las *figuras 5.4, 5.5 y 5.6*, en la zona donde se presenta la evolución de los potenciales durante la EEC; los valores de E_{corr} se dispararon hasta los -1000 mV. Durante este tiempo es imposible determinar el estado corrosivo de las armaduras tomando como indicativo los valores de E_{corr} , tampoco se pueden realizar mediciones de R_p debido a la polarización ocurrida, cabe mencionar que para obtener resultados reales después de aplicar la EEC fue necesario esperar a que el sistema se estabilizara durante un tiempo considerable, entre mayor era el tiempo que duraban las EEC, mayor es el tiempo que tardaban los potenciales en estabilizarse. La polarización en las armaduras de acero puede ser atribuida a las cargas de energía suministradas durante el tratamiento, ya que la terminal negativa de la fuente de corriente fue conectada al cátodo, forzando a las barras de acero a que se polarizaran negativamente mientras que la terminal positiva fue conectada a la malla de titanio (ánodo), polarizándose positivamente. Otros autores explican que la polarización de la armadura de acero es causada por el efecto del campo eléctrico aplicado (*Fajardo et. al., 2007*).

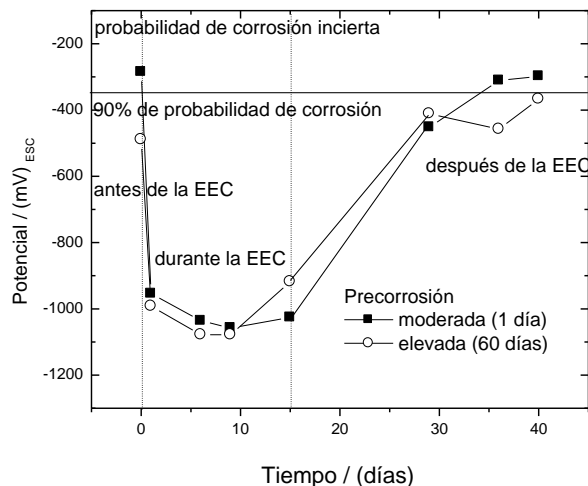


Figura 5.4. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 15 días de aplicación de una EEC con una densidad de corriente de 1 A/m^2 .

Resultados y Discusión

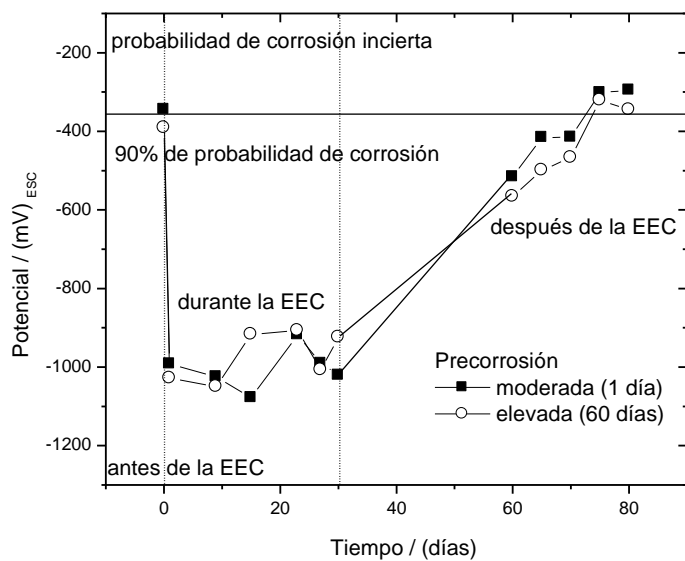


Figura 5.5. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 30 días de aplicación de una EEC con una densidad de corriente de 1 A/m^2 .

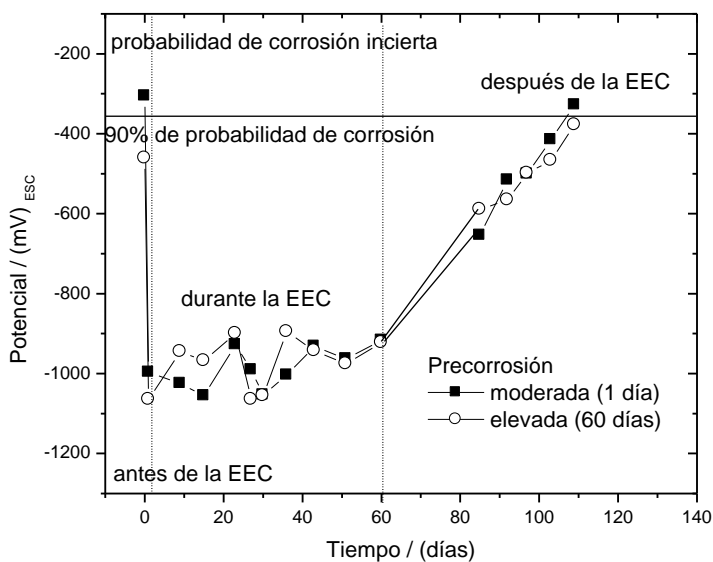


Figura 5.6. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 60 días de aplicación de una EEC con una densidad de corriente de 1 A/m^2 .

5.2. EXPERIMENTOS A Y B.

Efecto de la densidad de corriente aplicada durante la EEC en cilindros de mortero.

Para determinar si existe un incremento en la cantidad de cloruros extraídos en relación a un incremento de la densidad de corriente cuando se aplica una EEC, se comparo el procedimiento con dos energías distintas (1 y 2 A/m² con base al área del acero). La duración de las extracciones fueron nuevamente de 15, 30 y 60 días. Bajo estas condiciones se encontró que la eficiencia de la técnica (en cuanto a cantidad de cloruros extraídos) no varía al incrementar la corriente aplicada.

5.2.1. Grados de precorrosión de las varillas de acero.

En la tabla 5.3 se presentan los potenciales de corrosión de las varillas de los especímenes expuestos por uno y sesenta días dentro de una cámara de humedad. Para aquellas probetas que se mantuvieron por un día dentro de estas condiciones, se obtuvieron valores de E_{corr} en torno a -312 mV y valores de i_{corr} alrededor de 0.46 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo cual implica un riesgo por daño de corrosión con un grado de incertidumbre de acuerdo a la norma ASTM C 876-91 y un nivel de corrosión moderado con referencia a la medida de la i_{corr} (tabla 5.2). Con respecto a los refuerzos que permanecieron durante 60 días en la cámara de humedad, los E_{corr} presentaron en promedio valores de -454 mV y medidas de i_{corr} en torno de 1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Ambas medidas sitúan a los refuerzos en una zona de corrosión elevada de acuerdo a la norma ASTM C 876-91 y con referencia a los valores de i_{corr} expuestos en la tabla 5.2.

Tabla 5.3. Resultados de los grados de precorrosión en función a las medidas de E_{corr} e i_{corr} obtenidas en las probetas de mortero después de ser contaminadas y expuestas durante 1 y 60 días (2 A/m²).

| Grado de precorrosión moderado | | | Grado de precorrosión alto | | |
|--------------------------------|------------------------------|--|----------------------------|------------------------------|--|
| Probeta | E_{corr} (mV) [*] | i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | Probeta | E_{corr} (mV) [*] | i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) |
| B1 | -275 | 0.28 | B6 | -467 | 1.54 |
| B2 | -305 | 0.47 | B7 | -484 | 0.75 |
| B3 | -357 | 0.65 | B8 | -413 | 0.86 |
| Promedio | -312 | 0.46 | Promedio | -454 | 1.05 |

* E_{corr} vs. Electrodo saturado de Calomelanos. (ESC).

Resultados y Discusión

5.2.2. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC.

En la figura 5.7 se muestran los porcentajes de cloruros removidos del mortero variando: el grado de precorrosión y la duración de las extracciones. Las probetas cilíndricas que estuvieron durante 15 días en EEC, sus eficiencias para 1 y 60 días de precorrosión fueron de 21 y 19% respectivamente. Las muestras con 30 días de extracción lograron eficiencias del 25 y 27%. Finalmente las probetas de mortero con sesenta días de tratamiento lograron la eficiencia más alta, de aproximadamente un 36%. Se puede observar que las probetas de mortero con distintos tiempos de precorrosión y con los mismos tiempos de extracción, presentan eficiencias en el tratamiento semejantes; lo que supondría que el grado de precorrosión no afecta directamente con la eficiencia de la técnica. Por el contrario, una variable que influye en la cantidad de cloruros extraídos es la duración de la técnica, ya que entre más tiempo dure la EEC será mayor la cantidad de cloruros removidos del mortero.

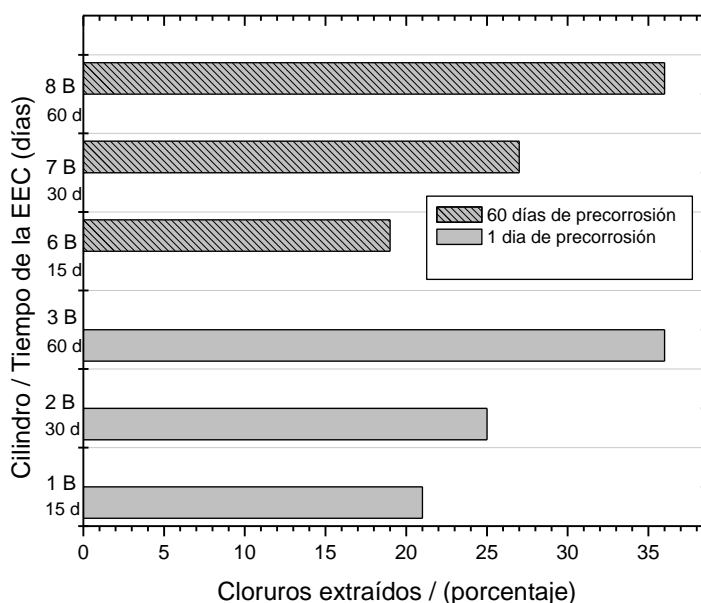


Figura 5.7. Porcentaje de cloruros removidos en cilindros de mortero después de realizar EEC variando: grado de precorrosión y duración de la EEC (15, 30 y 60 días), con $2 A/m^2$.

En la figura 5.8 se presentan los resultados de los cloruros removidos después de efectuar una extracción bajo dos condiciones: tiempos de extracciones (15, 30 y 60 días) y dos densidades (1 y 2 A/m²).

Es importante señalar que en esta figura se observa nuevamente que conforme aumenta el tiempo de la extracción, la cantidad de cloruros extraídos también aumenta. En esta misma figura se muestra que la eficiencia de la técnica (en cuanto a cantidad de cloruros extraídos) no varía al incrementar la corriente aplicada. Esto es atribuido a que si la carga suministrada ha sido la misma, no hay una dependencia entre la eficiencia de la extracción y la densidad de corriente. El único factor que varía es el tiempo que tarda en pasar la carga a través del mortero (Sánchez *et. al.*, 2006).

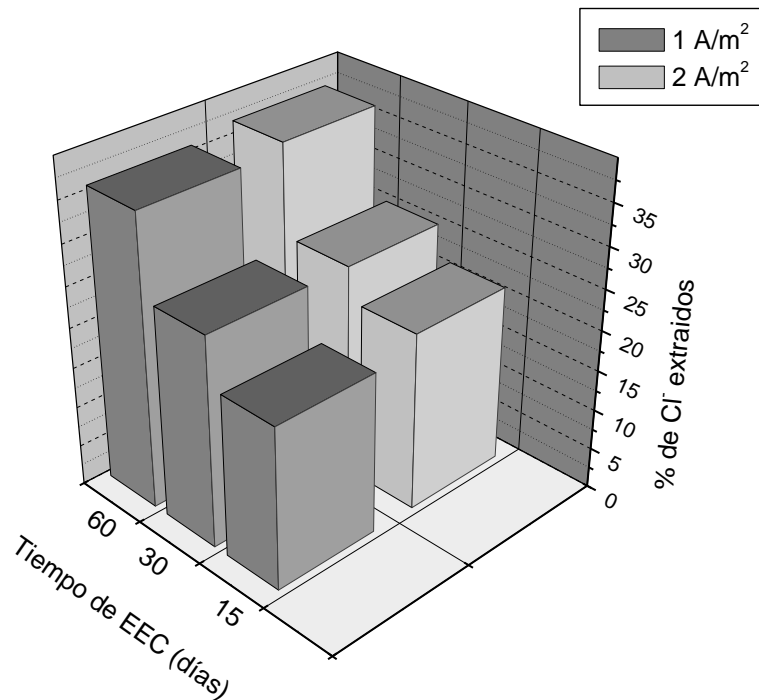


Figura 5.8. Porcentaje de cloruros removidos en cilindros de mortero después de realizar las EEC durante 15, 30 y 60 días con densidades de corriente de 1 y 2 A/m².

Resultados y Discusión

5.2.3. Análisis puntuales del porcentaje en peso de los Cloruros

En la tabla 5.4 se presentan los análisis puntuales en porcentaje en peso de los Cl⁻ remanentes en cilindros de mortero después de realizar extracciones de 15, 30 y 60 días, con densidades de 1 y 2 A/m² respectivamente. Se realizaron 3 tomas en cada posición, obteniendo promedios de estos puntos; desde la superficie del mortero hacia la varilla, con avances de 1 cm. Estos análisis puntuales fueron hechos con el MEB (Microscopio electrónico de Barrido).

En la tabla 5.4 (al aplicar 1A/m²), se muestra que existe un incremento de los cloruros retenidos cerca de la varilla para las tres probetas, y una disminución de cloruros en la superficie del mortero. El avance no es constante, hay una mayor cantidad de cloruros removidos en la superficie del mortero, que en el interior de la varilla después de realizarse la EEC. Esto puede deberse a que en el interior del cilindro (cerca de la varilla) la densidad de corriente es más baja y por lo tanto la migración de los iones cloruro más lenta. En otras palabras, la cantidad de cloruros retenidos después de efectuar la EEC varía a lo largo de la sección transversal del mortero debido a que la densidad de corriente suministrada no se mantiene constante.

En la misma tabla se puede apreciar que al aplicar en la EEC una densidad de corriente de 2 A/m² los valores cambian de una manera muy sutil con respecto a un 1A/m²; por lo cual posiblemente bajo estas condiciones la migración de cloruros a lo largo de la sección transversal de mortero se comporten de una manera similar.

Tabla 5.4. Análisis puntuales de % wt de Cl⁻ en cilindros de mortero, después de realizar extracciones de 15, 30 y 60 días a 1 y 2 A/m².

| Duración de la EEC (días) | Densidad de Corriente aplicada (A/m ²) | Desde la Superficie hacia la Varilla | | |
|---------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | 1 cm % wt de Cl ⁻ | 2 cm % wt de Cl ⁻ | 3 cm % wt de Cl ⁻ |
| 15 | 1 | 0.15 | 0.23 | 0.53 |
| 30 | 1 | 0.19 | 0.27 | 0.41 |
| 60 | 1 | 0.18 | 0.31 | 0.43 |
| 15 | 2 | 0.22 | 0.25 | 0.48 |
| 30 | 2 | 0.20 | 0.32 | 0.45 |
| 60 | 2 | 0.24 | 0.24 | 0.51 |

5.2.4. Estado de corrosión en las varillas

En las figura 5.9 y 5.10 se estudian las densidades de corrosión de las armaduras de acero previamente expuestas a un día (figura 5.9) y sesenta días de precorrosión (figura 5.10), contra los tiempos de EEC. En ambos casos las probetas fueron sometidas a densidades de 1 y 2 A/m². En la grafica 5.9 se observa que antes de iniciar con los tratamientos las velocidades de corrosión de los refuerzos son cercanas a 0.3 μA/cm², siendo un nivel de corrosión moderado de acuerdo con la tabla 5.2, posteriormente estos valores de intensidades de corrosión (de aproximadamente 0.1 μA/cm²) ligeramente disminuyen al incrementar el tiempo del tratamiento. Se puede observar en la misma figura que el incremento de la densidad de corriente parece ser un factor menos importante en la disminución de las velocidades de corrosión. Con estos valores de i_{corr} los electrodos se ubican dentro de los límites atribuibles al estado pasivo (González *et al.*, 1994) (Broomfield 1991) y (Clear 1990). Así se pone en manifiesto que las armaduras de acero pueden repasivarse con la EEC, si el grado de precorrosión es incipiente (1 día de precorrosión).

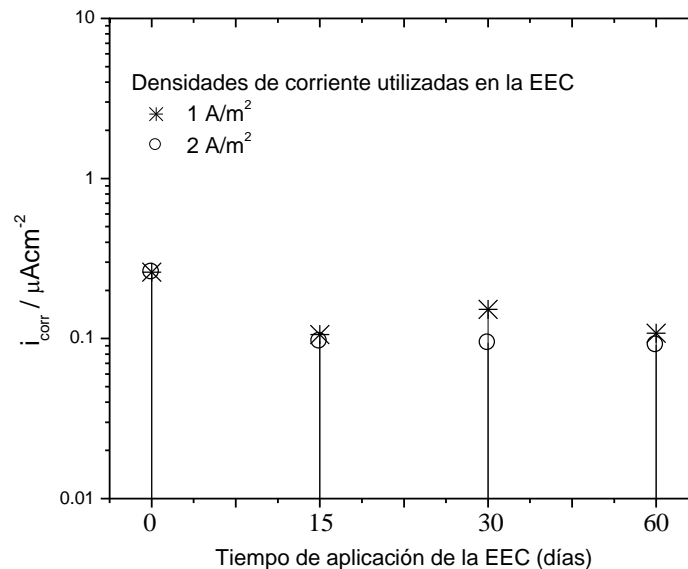


Figura 5.9. i_{corr} contra el tiempo de aplicación de la EEC en probetas precorroídas con Cl⁻ durante un día de exposición en cámara de humedad.

Resultados y Discusión

En la Figura 5.10 se observa que las velocidades de corrosión son en torno de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para los refuerzos de acero con sesenta días de precorrosión y sin aún aplicar la técnica. Estos valores de i_{corr} colocan a los refuerzos en un estado activo y muy peligroso, de acuerdo con los riesgos señalados por varios autores (González *et al.*, 1993).

Después de efectuar extracciones en diferentes tiempos, las densidades de corrosión se situaron en valores levemente menores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, esto conlleva a decir, que una vez que los electrodos se someten a tiempos prolongados de precorrosión (60 días), la EEC no es capaz de repasivar a los refuerzos de acero, aun con diferentes tiempos de tratamiento. Cabe señalar que los valores de los i_{corr} que se muestran después de las extracciones, fueron calculados con los potenciales ya estables.

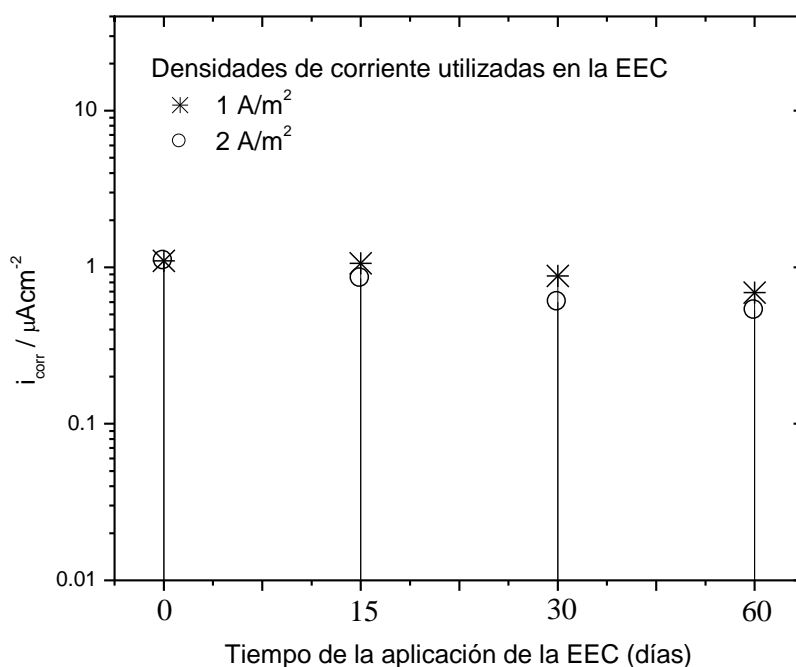


Figura 5.10 i_{corr} contra el tiempo de aplicación de la EEC en probetas precorroídas con Cl^- durante 60 días de exposición en cámara de humedad.

5.2.5. Potenciales de corrosión en las varillas

En las figuras 5.11 y 5.12 se presenta la evolución de los potenciales antes, durante y después de las EEC (con 15 y 30 días de tratamiento), y densidades de corriente (de 1 y 2 A/m²). Se observa que antes de iniciar las extracciones los potenciales se situaban en valores negativos en torno a los -300 mV (para los refuerzos con un grado de precorrosión moderada), y alrededor de los -400 mV (en relación a los refuerzos con un grado de precorrosión alta). Durante las extracciones estos valores se dispararon hasta los -1000 mV, esto debido a una polarización ocurrida por el tratamiento. Otros autores como Fajardo (*Fajardo et al., 2006*), trabajaron con cilindros de concreto previamente contaminados con 1% Cl⁻ con respecto a la masa de cemento, y aplicando una densidad de corriente de 1A/m². Al medir los potenciales durante el tratamiento, las armaduras de acero presentaron polarización y los valores de E_{corr} se situaron en los -1050 mV. De acuerdo con Green (*Green et al., 1993*), la disponibilidad de oxígeno es uno de los parámetros de control de la despolarización del refuerzo de acero; entre más rápido llegue a la superficie del acero, más rápido encuentra su estado de equilibrio. Sin embargo los resultados demostraron lo contrario (un estado fuera de equilibrio que contribuyo a que la varilla presentara polarización).

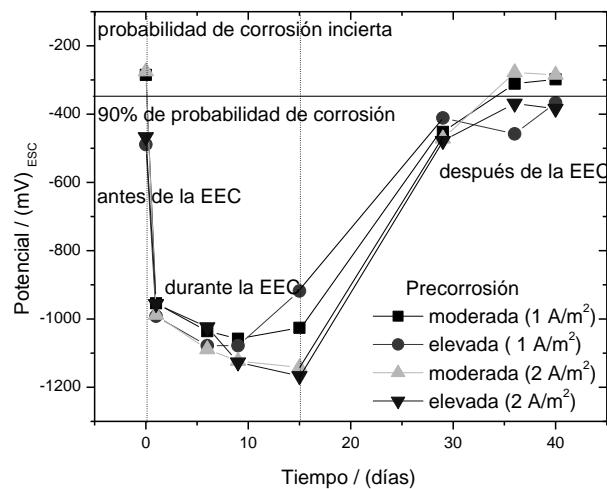


Figura 5.11. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 15 días de aplicación de una EEC con densidades de corriente de 1 y 2 A/m².

Resultados y Discusión

Un punto a resaltar en la investigación es el tiempo que tardaron los refuerzos de acero en estabilizar sus potenciales, esto dependió de la duración de la técnica. Entre más tiempo duraban las EEC, más tiempo tardaban los potenciales en estabilizarse. En general los potenciales tomaron valores más positivos, situándolos en -280 mV, siendo una zona incierta de corrosión como lo señala la norma ASTM C-876.

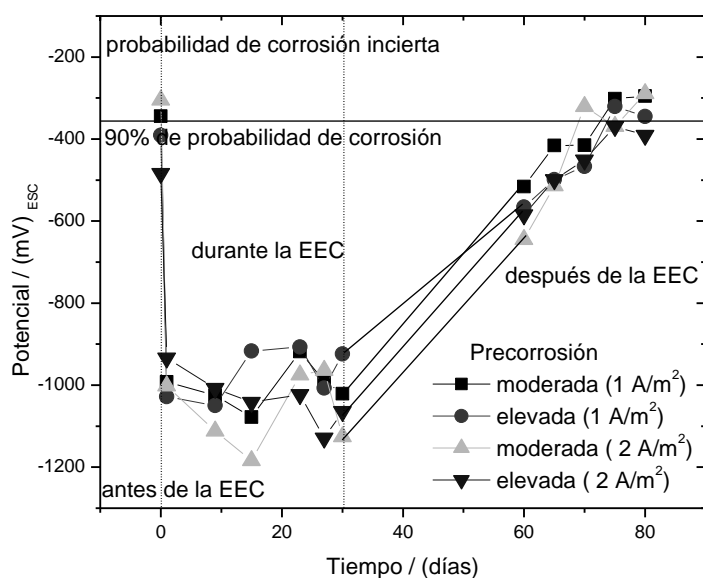


Figura 5.12. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 30 días de aplicación de una EEC con densidades corriente de 1 y 2 A/m^2 .

En la figura 5.13 se presentan los E_{corr} de las armaduras de acero antes, durante y después de la extracción realizada durante sesenta días y con densidades de corriente de 1 y 2 A/m^2 . Como se puede apreciar antes de iniciar con la extracción los valores de las armaduras se situaban en una zona de alta probabilidad de corrosión (-450 mV). Durante el tratamiento la armadura de acero presentó una elevada polarización de -1080 mV. Al desconectar las varillas de la fuente de poder se realizaron nuevamente mediciones de los potenciales de corrosión.

Sin embargo los primeros días estos valores no se estabilizaban debido a la alta polarización que tuvieron en los sesenta días de tratamiento. Para poder llevar las varillas a un potencial de equilibrio, se espero más de 40 días. Estos potenciales ya estables de alrededor de -300 mV, situaron a las armaduras en una zona incierta de corrosión, como lo marca la norma ASTM C-876. Con estos resultados, se podría pensar que la extracción logro bajar los potenciales de las varillas a una zona menos probable de corrosión, sin embargo no se tiene la certeza de que las varillas lograron su despasivación.

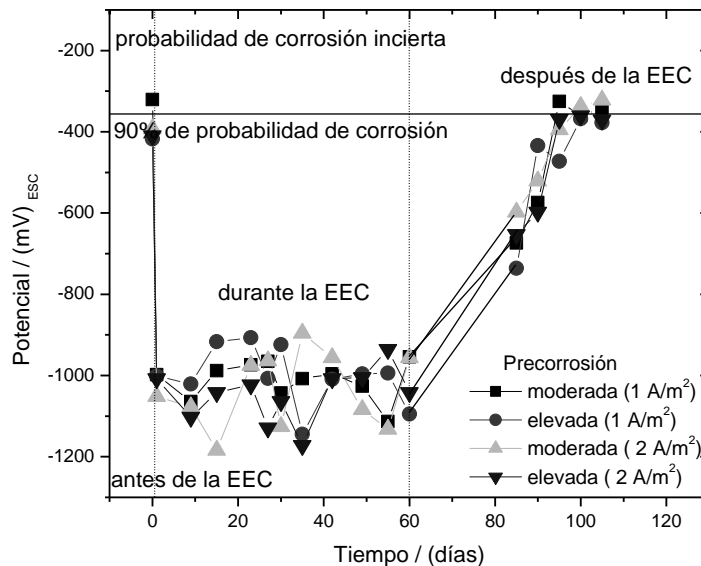


Figura 5.13. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 60 días de aplicación de una EEC con densidades de corriente de 1 y 2 A/m^2 .

Finalmente en la figura 5.14 se muestra un comparativo de los potenciales de corrosión antes, durante y después de realizar la extracción de cloruros durante 15, 30 y 60 días aplicando 1 y 2 A/m^2 . Se puede distinguir que conforme aumenta la duración del tratamiento, se requiere mucho más tiempo en estabilizar los potenciales.

Para el caso de las armaduras de acero que parten de grados de precorrosión incipientes, al finalizar el tratamiento estos valores son más positivos, situándose en una región de probabilidad de corrosión incierta. En

Resultados y Discusión

caso de las armaduras de acero con grados de precorrosión elevados, al concluir con la EEC, los valores de E_{corr} también son más positivos, acercándose más a una probabilidad incierta conforme se incrementa el tiempo y la densidad de corriente aplicada.

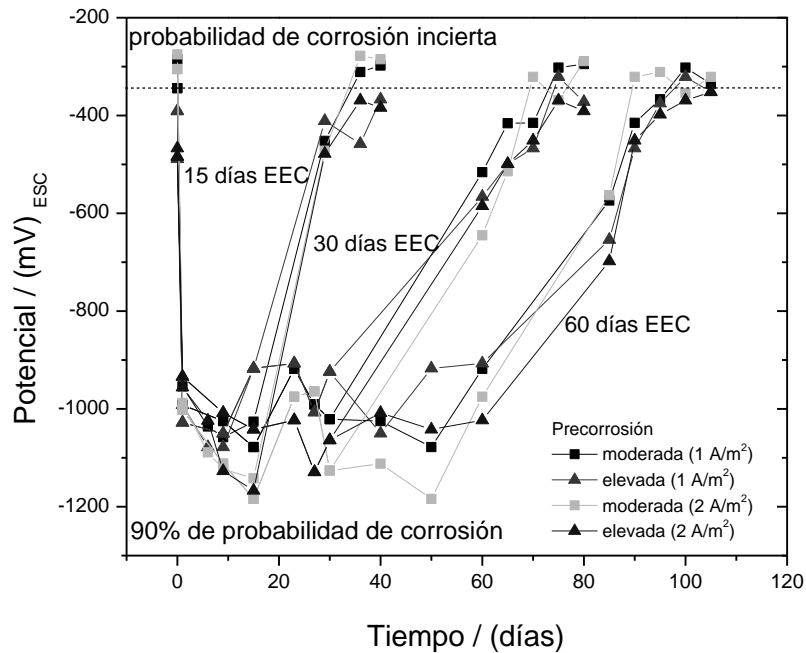


Figura 5.14. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 15, 30 y 60 días de aplicación de una EEC con densidades de corriente de 1 y 2 A/m².

5.3. EXPERIMENTO C.

Efecto del tipo de contaminante al aplicar una EEC en cilindros de mortero.

Para determinar si la eficiencia en la Extracción Electroquímica de Cloruros es función del tipo de aditivo del cemento, se utilizan dos sales distintas. Por un lado se utilizó Cloruro de Sodio (NaCl) y por otro lado, se comparó con el Cloruro de Calcio (CaCl_2), ambos contenidos en función al peso del cemento. Diferentes morteros con una relación a/c de 0.5 fueron preparados. Los cilindros contenían tres barras de acero, previamente limpias. Todos los cilindros fueron contaminados desde su preparación, al añadir el contaminante en el agua desde el amasado. Estas muestras fueron finalmente tratadas con una EEC usando una densidad de corriente de 2 A/m^2 por 15 y 30 días. El estado corrosivo fue monitoreado regularmente cada dos semanas sin interrupción hasta completar el proceso. Los resultados muestran que el NaCl es menos corrosivo que el CaCl_2 , mientras que para la eficiencia en la EEC el tipo de contaminante parece ser irrelevante.

5.3.1. Grados de pre corrosión de las varillas de acero.

En la tabla 5.5 se muestran los grados de pre corrosión obtenidos en las varillas durante un día de pre corrosión, contaminando al mortero con cloruros (ya sea con NaCl o con CaCl_2).

Para las muestras de mortero que se contaminaron con NaCl puede observarse a los E_{corr} en valores aproximados a los -278 mV , y valores de i_{corr} en torno a $0.23 \mu\text{A/cm}^2$, situando a los refuerzos de acero en una probabilidad incierta de acuerdo a la norma ASTM C 876-91 y un nivel de corrosión moderado con referencia a la medida de la i_{corr} (tabla 5.2).

Con respecto a las probetas contaminadas con CaCl_2 , los E_{corr} presentaron en promedio valores -325 mV y medidas de i_{corr} de $0.41 \mu\text{A/cm}^2$. A pesar de que ambas medidas son más altas en comparación a las contaminadas con NaCl, los valores de corrosión colocan nuevamente a los refuerzos en una zona de corrosión incierta de acuerdo con las categorías establecidas en la tabla 5.2 a) y b). Posiblemente la diferencia del grado de pre corrosión de las varillas de acero es muy pequeña en función del tipo de contaminante, pero cabe señalar que también el tiempo de exposición fue muy breve.

Resultados y Discusión

Algunos investigadores han encontrado que el daño por corrosión del CaCl_2 es más grave que el NaCl . Ellos han atribuido el efecto negativo que tiene el CaCl_2 sobre el acero ya que: a) este contaminante reduce el nivel de pH b) se reduce la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ c) y finalmente el CaCl_2 , incrementa la velocidad de hidratación dando lugar a resistencias iniciales altas y a una gran liberación de calor en sus primeras horas, al actuar como catalizador en las reacciones de hidratación del aluminato del cemento, formando la sal de Friedel. (Pruckner, Gjorv, 2003).

Tabla 5.5. Resultados de los grados de precorrosión en función a las medidas de E_{corr} e i_{corr} obtenidas en las probetas de mortero, después de ser contaminadas y expuestas durante 1 día a HR $\geq 95\%$.

| Grado de precorrosión moderado | | | |
|--------------------------------|-------------------------|---|----------------------|
| Probeta | E_{corr} (mV)* | i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | Tipo de contaminante |
| 1C | -294 | 0.27 | NaCl |
| 2C | -275 | 0.24 | |
| 3C | -269 | 0.18 | |
| Promedio | -278 | 0.23 | |
| 4C | -304 | 0.41 | CaCl ₂ |
| 5C | -342 | 0.46 | |
| 6C | -328 | 0.35 | |
| Promedio | -325 | 0.41 | |

* E_{corr} vs. Electrodo saturado de Calomelanos. (ESC).

5.3.2. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC.

En la figura 5.15 se resumen los resultados obtenidos de los porcentajes de cloruros removidos en el mortero después de haber aplicado una EEC durante 1, 30 y 60 días, para los refuerzos de acero precorroidos con NaCl y CaCl_2 .

Las eficiencias de las extracciones para 15 días es de casi un 20%, para 30 días aumentó alrededor de un 25%, y para las extracciones de 60 días se lograron eficiencias en torno al 38%. Los datos de los % de Cl^- extraídos, ponen de manifiesto que en relación a la efectividad de la técnica parece ser irrelevante el tipo de contaminante, ya que tanto para el cloruro de sodio como para el cloruro de calcio los valores en los porcentajes de extracción son muy similares. Se hace inca pié en que un factor decisivo para reducir la

cantidad de cloruros del mortero será el tiempo que dure el ensayo, para tiempos más prolongados mayor será la cantidad de cloruros removidos.

Otra variable que puede influir de una manera muy sutil es la cantidad de densidad de corriente suministrada durante la EEC, ya que si se compara la figura 5.15 ($J= 2 \text{ A/m}^2$) con la figura 5.1 ($J =1\text{A/m}^2$), se puede visualizar que a mayor densidad de corriente aplicada puede existir un incremento en la efectividad de la técnica, siempre y cuando la carga pasada a través del mortero sea mayor.

En algunos trabajos publicados por algunos investigadores se ha manifestado que el incremento de la cantidad de cloruros removidos es función del potencial eléctrico aplicado y este efecto también es atribuido al incremento de la densidad de corriente (Arya C., Sa íd Shawqi, 1996).

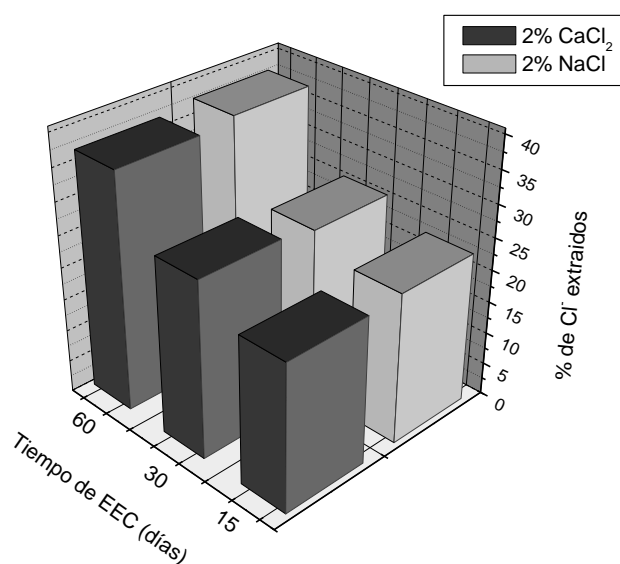


Figura 5.15. Porcentaje de cloruros removidos en cilindros de mortero después de realizar las EEC durante 15, 30 y 60 días con densidades de corriente de 1 y 2 A/m².

5.3.3. Estado corrosivo de las varillas.

En trabajos publicados recientemente por investigadores que utilizaron muestras de mortero (fabricadas con 2% NaCl, imponiendo densidades de corriente de 2 A/m^2 y realizando extracciones por 2, 4 y 8 semanas), se

Resultados y Discusión

presentaron resultados de la efectividad a largo plazo de una EEC. Esta efectividad la midieron en función de la i_{corr} . Estos investigadores monitorearon las velocidades de corrosión a lo largo de un año, y reportaron que al inicio del tratamiento los refuerzos de acero presentaban valores de i_{corr} por encima de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (siendo un estado de corrosión muy peligroso), y al término del tratamiento de 4 semanas estos valores bajaron drásticamente a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Este patrón se mantuvo para todos los casos de estudio. En este estudio los investigadores concuerdan con uno de los puntos que se ha mencionado anteriormente en este trabajo acerca de la EEC. Ellos explican que después de aplicar el tratamiento es preferible esperar al menos 4 semanas para medir las i_{corr} , y no inmediatamente después de que se concluye con la EEC (Abdelaziz, et. al., 2009).

En este experimento no se logró bajar drásticamente la velocidad de corrosión después de aplicar la EEC como en el trabajo precedente, sin embargo los valores de i_{corr} que se observan al inicio ($0.23 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) son menores al finalizar la EEC ($0.07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), además de que estos valores se encuentran en los límites atribuibles al estado moderado de corrosión (figura 5.16 y 5.17).

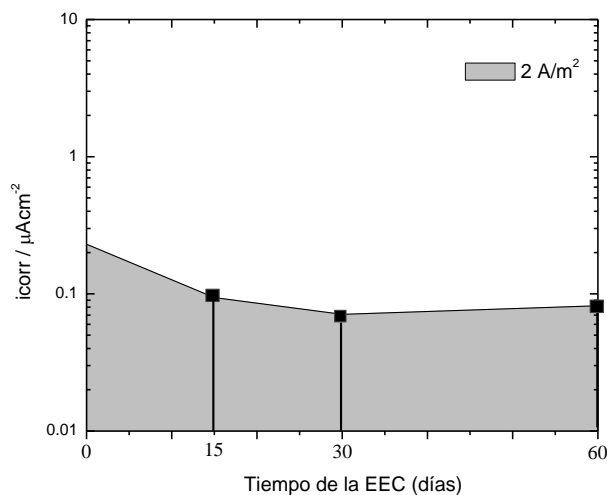


Figura 5.16. i_{corr} contra el tiempo de aplicación de la EEC en probetas precorroídas con NaCl durante un día de exposición en cámara de humedad.

En la figura 5.16 se pueden apreciar las velocidades de corrosión que presentaron las probetas de mortero contaminadas con NaCl, antes y después de finalizar la EEC (para distintos tiempos). Al comienzo del tratamiento las i_{corr} caen en valores mayores a $0.1 \mu A/cm^2$ y después de cada tratamiento estos valores son menores a dicho valor.

En la figura 5.17 con las mismas condiciones que la figura 5.16 (excepto que se le agrego $CaCl_2$), su comportamiento muy similar. Las velocidades disminuyen nuevamente con el tratamiento, aún cuando la velocidad de corrosión inicial ($0.4 \mu A/cm^2$) es mayor que al inicio del tratamiento de la figura 5.16. Bajo estos resultados, se puede decir que para estas condiciones la extracción fue efectiva.

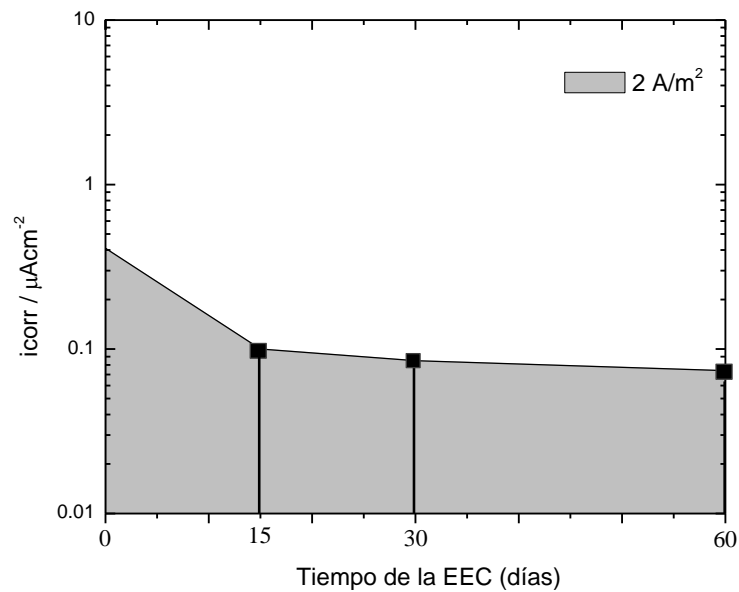


Figura 5.17. i_{corr} contra el tiempo de aplicación de la EEC en probetas precorroídas con $CaCl_2$ durante 60 días de exposición en cámara de humedad.

5.3.4. Potenciales de corrosión en las varillas

Resultados y Discusión

Las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 describen la evolución de los potenciales de corrosión antes, durante y después de la EEC, al utilizar una densidad de corriente de 2 A/m^2 , en probetas de mortero contaminadas con NaCl y CaCl_2 .

Al inicio del tratamiento los potenciales son de -300 mV (siendo una zona de probabilidad de corrosión incierta). Posteriormente, en el transcurso del tratamiento los potenciales se polarizaron, situándose en torno de los -1000 mV . El tratamiento que presentó más variabilidad en los potenciales de corrosión fue con las probetas que estuvieron por 60 días en extracción. Cabe mencionar que los valores de E_{corr} , tanto para las probetas contaminadas con NaCl como para las probetas contaminadas con CaCl_2 , presentaron casi el mismo comportamiento durante todo el proceso.

Con la finalidad de poder observar si existía un cambio de los potenciales después de haber aplicado la EEC, se procuró que las probetas se monitorearan por un tiempo más prolongado. Para los tres distintos tiempos en las extracciones, se logro que los potenciales en los refuerzos de acero se situaran en una zona de probabilidad de corrosión incierta, además que estos valores fueron más positivos que los presentados al inicio del tratamiento.

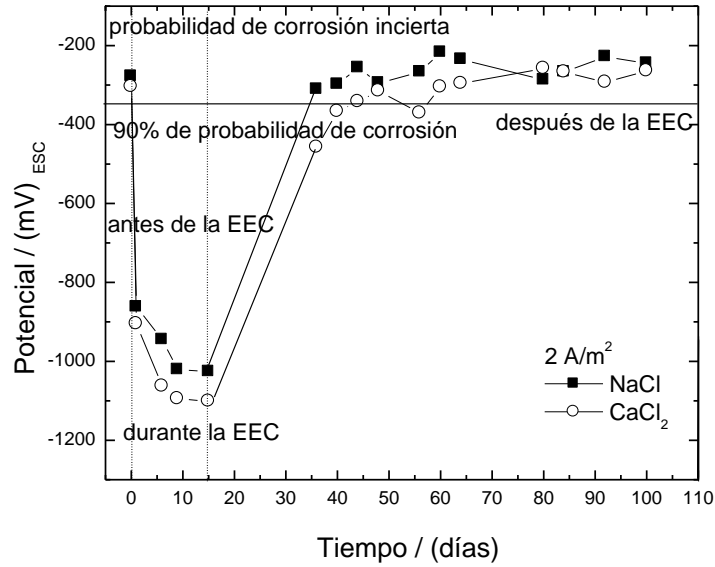


Figura 5.18. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 15 días de aplicación de una EEC con una densidad de corriente de 2 A/m^2 .

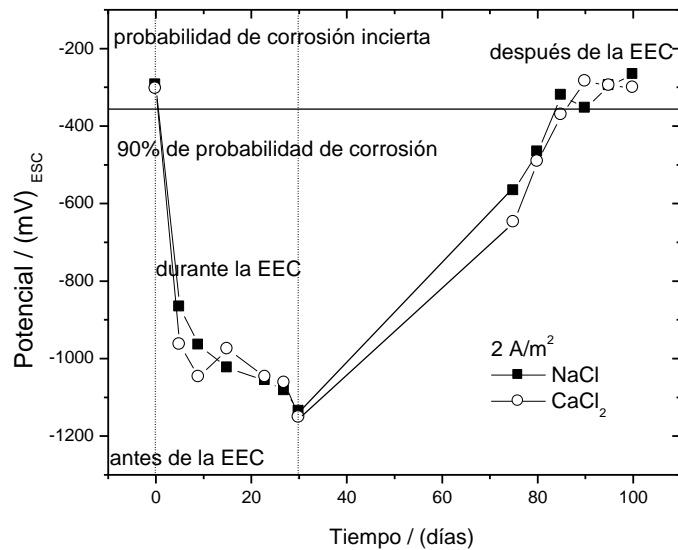


Figura 5.19. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 30 días de aplicación de una EEC con una densidad de corriente de 2 A/m^2 .

Resultados y Discusión

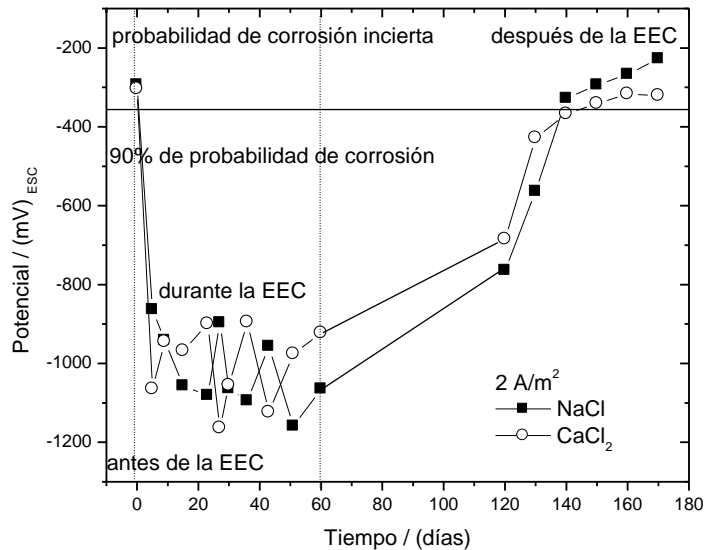


Figura 5.20. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 60 días de aplicación de una EEC con una densidad de corriente de 2 A/m².

En el trabajo publicado por Fajardo (*Fajardo G. et al., 2007*), llevaron a cabo una EEC utilizando cilindros de concreto contaminados con agua de mar “artificial”, aplicando una densidad de corriente de 1 A/m², durante 21 y 90 días de tratamiento. Los resultados en relación a las medidas de potencial de corrosión durante el tratamiento muestran valores de -1000 mV (una polarización en el acero). Un punto importante en esta investigación, es que ellos sugieren que la carga total junto con la facilidad de polarizar el refuerzo, contribuye a extender el tiempo en que las probetas pueden ser estabilizadas para tener medidas de i_{corr} certeras.

5.4. EXPERIMENTO D.

Efectos ocasionados al aplicar densidades de corriente elevadas durante la EEC en cilindros de mortero, cuando los grados de precorrosión son distintos

En este experimento se utilizaron varillas de acero que presentaban grados de precorrosión distintos. Esta contaminación fue realizada desde antes de colocar las varillas en el mortero. Se utilizó una jeringa de 3 ml con 1%NaCl, la solución fue colocada en la periferia de la varilla, y posteriormente cada varilla se mantuvo en una cámara de humedad durante 24, 48 y 72 Hrs. Para la fabricación de los morteros cilíndricos se utilizó una relación cemento/arena/agua de 1/3/0.45. Posteriormente se dejó fraguar el mortero durante más de 28 días. Las Extracciones se realizaron con 2, 4 y 6 A/m², en función del área de acero. El tiempo de extracción en cada probeta fue el mismo, 30 días.

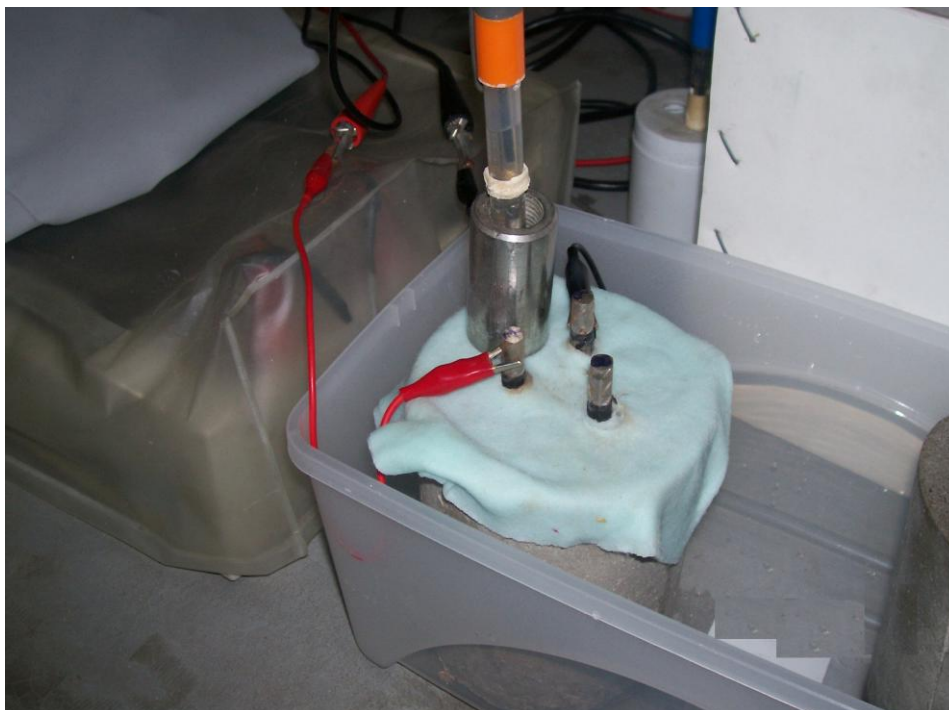


Figura 5.21. Imagen de un cilindro de mortero obteniendo sus medidas electroquímicas.

Resultados y Discusión

5.4.1. Pérdidas de peso

En la tabla 5.5. Se presentan los pesos de las varillas de acero expuestas a una solución de 1% NaCl durante 24, 48 y 72 hrs. mantenidas dentro de una cámara a una HR \approx 90 %. Se utilizó la norma ASTM G1 - 03 para determinar el grado de corrosión de las varillas de acero, obteniendo la pérdida en peso (gr/cm^2). Con la finalidad de garantizar el ensayo, se utilizaron varillas de la misma especie, variando únicamente su longitud. Las pruebas determinaron que entre mayor es el tiempo de exposición del contaminante sobre el acero, se tiene una mayor pérdida de peso. Debido a que no existe diferencia significativa en la degradación del acero para las varillas expuestas durante el mismo tiempo y distinta longitud (13 y 15 cm), se puede decir que el procedimiento se realizó adecuadamente.

Tabla 5.5 Pérdidas de peso para las varillas de acero expuestas a una solución al 1 % NaCl, durante 1, 2 y 3 días.

| Tiempo de Exposición | 1 día | | 2 días | | 3 días | |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 13 cm | 15 cm | 13 cm | 15 cm | 13 cm | 15 cm |
| Longitud de la varilla | | | | | | |
| Peso inicial (gr) | 66.045 | 76.699 | 67.908 | 76.639 | 65.595 | 76.869 |
| 1 pesada | 66.034 | 76.685 | 67.886 | 76.616 | 65.576 | 76.840 |
| 2 pesada | 66.025 | 76.676 | 67.886 | 76.611 | 65.568 | 76.837 |
| 3 pesada | 66.021 | 76.672 | 67.882 | 76.608 | 65.563 | 76.825 |
| 4 pesada | 66.020 | 76.670 | 67.880 | 76.605 | 65.558 | 76.823 |
| Pérdida en masa (gr) | 0.025 | 0.029 | 0.028 | 0.034 | 0.037 | 0.046 |
| Área (cm^2) | 40.841 | 47.124 | 40.841 | 47.124 | 40.0841 | 47.124 |
| Pérdida en peso (gr/cm^2) | 0.00061 | 0.00062 | 0.00069 | 0.00073 | 0.00091 | 0.00098 |

En la figura 5.22 se muestran las fotografías tomadas de las varillas de acero después de haber sido expuestas a una solución de 2%NaCl durante 24, 48 y 72 hrs. dentro de una cámara a una HR \approx 90 % que posteriormente fueron decapadas para obtener sus pérdidas de peso.

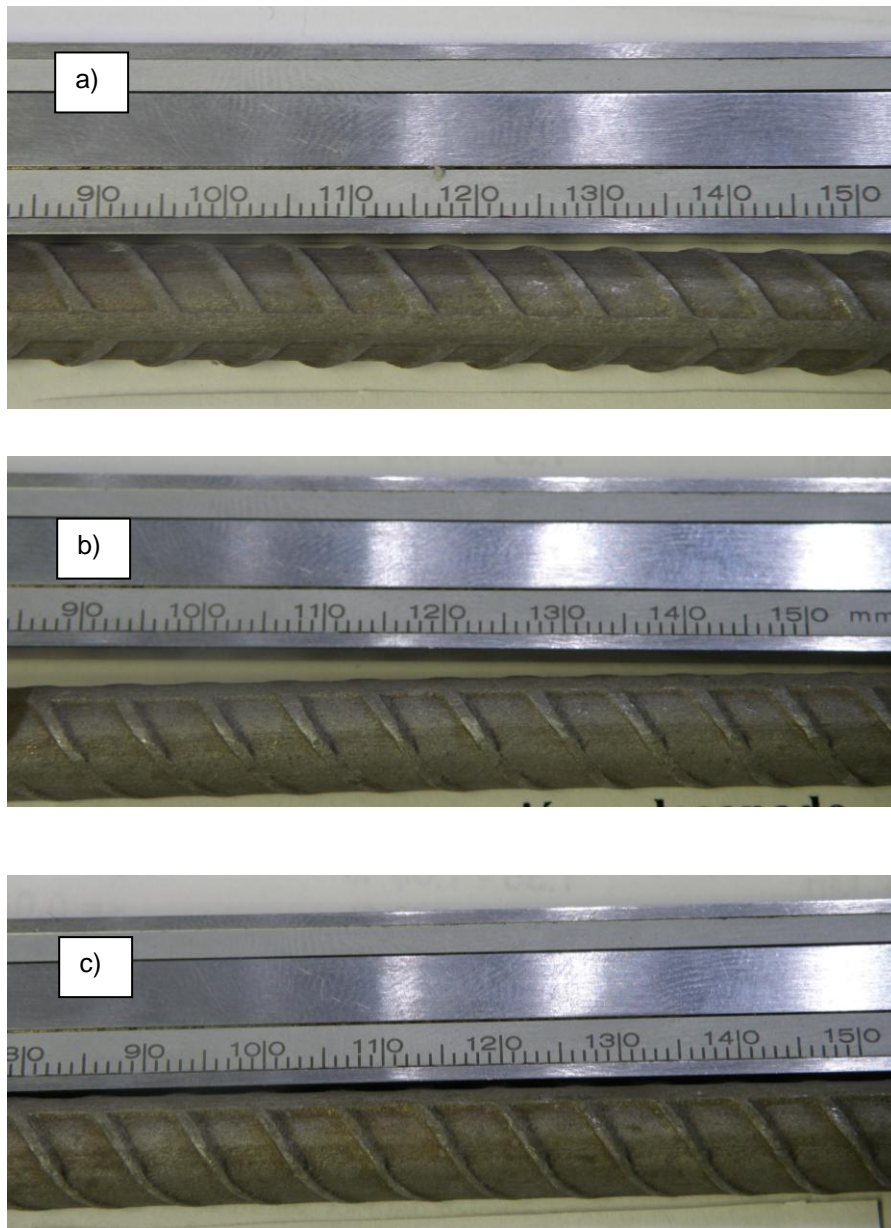


Figura 5.22. Se muestran las varillas que fueron sometidas a una solución de 1% NaCl y posteriormente decapadas con tiempos de a) 24 hrs, b) 48hrs y c) 72 hrs.

Resultados y Discusión

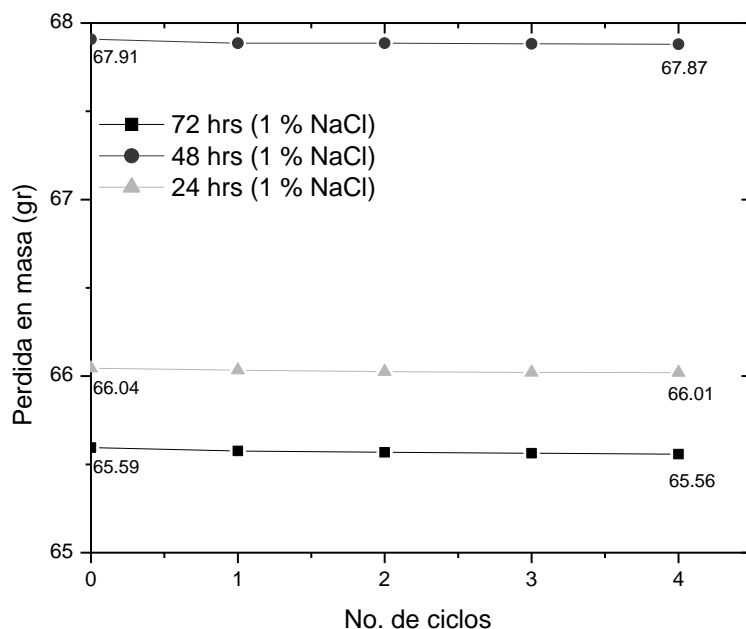


Figura 5.23. Pérdida de Masa de las varillas de acero Sometidas a distintos tiempos de corrosión.

En la figura 5.23 se muestran las pérdidas en masa que las varillas de acero presentaron al ser contaminadas con NaCl. Se puede apreciar que la probeta de 72 hrs presenta la mayor pendiente, posteriormente sigue la de 48hrs y sin cambio casi visible es la muestra de 24 hrs. Por consiguiente la muestra de 72 hrs de exposición con NaCl fue la varilla que presentó el mayor daño por corrosión.

5.4.2. Grados de precorrosión de las varillas de acero.

Antes de iniciar el tratamiento de la extracción de cloruros, se determinaron los potenciales y velocidades de corrosión de cada varilla de acero. En la tabla 5.6 se resumen estos valores. Con respecto de los datos de E_{corr} para las varillas expuestas durante 24 hrs, sus potenciales se encuentran entre los -390 mV, al aumentar un día de exposición sus valores son de -420 mV y para tres días los potenciales ya son de -450 mV. En relación a las

velocidades de corrosión se observa un incremento en función al aumento en el tiempo de exposición. Sus valores son de 1, 2 y 3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para las varillas expuestas por 24, 48 y 72 hrs respectivamente.

Tanto los datos de E_{corr} como de i_{corr} , colocan a los refuerzos de acero en una zona de corrosión elevada, de acuerdo a la norma ASTM C 876-91 y a las condiciones indicadas en la tabla 5.2.

Tabla 5.6. Resultados de los grados de precorrosión en función de las medidas de E_{corr} e i_{corr} obtenidas en las probetas de mortero después de ser contaminadas y expuestas durante 1 y 60 días.

| Probeta | Tiempo de Precorrosión (hrs) | E_{corr} (mV)* | i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) |
|---------|------------------------------|-------------------------|---|
| D0 | 24 | -379 | 1.64 |
| | 48 | -425 | 2.10 |
| | 72 | -448 | 2.87 |
| D1 | 24 | -398 | 1.05 |
| | 48 | -431 | 2.34 |
| | 72 | -443 | 3.49 |
| D2 | 24 | -385 | 1.14 |
| | 48 | -397 | 2.92 |
| | 72 | -468 | 3.75 |
| D3 | 24 | -394 | 0.98 |
| | 48 | -428 | 2.55 |
| | 72 | -447 | 3.61 |

* E_{corr} vs. Electrodo saturado de Calomelanos. (ESC).

5.4.3. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC.

En la tabla 5.7 y la figura 5.24 se resumen los resultados obtenidos de las EEC realizadas en probetas cilíndricas de mortero, al aplicar distintas densidades de corriente (2, 4 y 6 A/m^2), durante 30 días de tratamiento. Nótese las diferencias en las cantidades de cloruros removidos al aplicar una mayor cantidad de energía durante la EEC (ver figura 5.24). Al utilizar una $J = 2 \text{ A}/\text{m}^2$ se logró una extracción del 28.5 %, al incrementar la densidad al doble se obtuvo una eficiencia del 35.8 % y al triplicar esta energía se obtuvo la cantidad de remoción de cloruros más alta en torno del 55 %.

Nzeribe concluye en uno de sus trabajos que existe una diferencia en la reducción de iones cloruro cuando las muestras son tratadas con una densidad de corriente de 1 A/m^2 , en comparación con las muestras tratadas

Resultados y Discusión

con 3 A/m^2 (Nzeribe, et. al., 1996). La reducción total del contenido de iones Cl^- fue de cerca de 26 % a 1 A/m^2 , y del 48 % a 3 A/m^2 . Sin embargo, ellos mismos afirman que a pesar de poder incrementar la cantidad de cloruros removidos de concreto al aplicar mayor energía, otras propiedades se ven reducidas, como las propiedades mecánicas del concreto; no obstante en este trabajo no mencionan cuantitativamente dicho daño.

Tabla 5.7 Resultados de los porcentajes de cloruros extraídos en probetas de mortero después de aplica la EEC utilizando densidades de corriente de 2, 4 y 6 A/m^2 .

| Probeta | Tratamiento | Densidad de Corriente aplicada (A/m^2) | Duración de la EEC (días) | % de Cloruros extraídos |
|---------|-------------|---|---------------------------|-------------------------|
| D0 | Sin EEC | No aplica | No aplica | Base |
| D1 | Con EEC | 2 | 30 | 28.5 % |
| D2 | Con EEC | 4 | 30 | 35.8 % |
| D3 | Con EEC | 6 | 30 | 54.7 % |

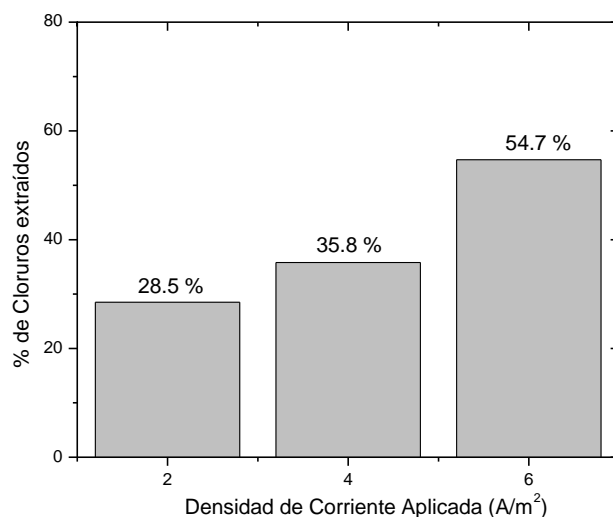


Figura 5.24. Porcentaje de cloruros removidos en cilindros de mortero después de realizar las EEC durante 30 días con densidades de corriente de 2, 4 y 6 A/m^2 .

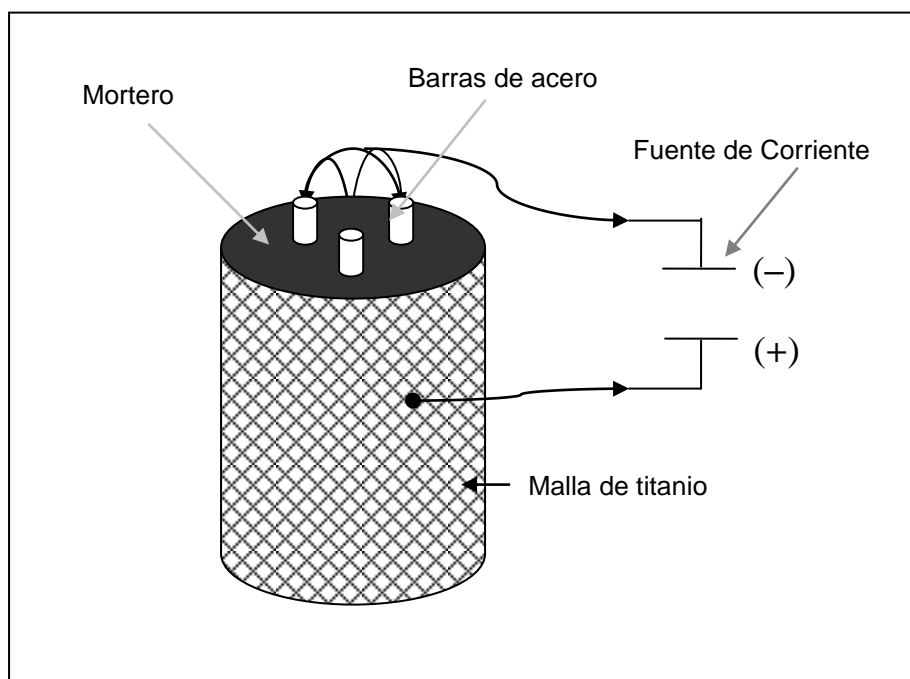


Figura 5.25. Representación esquemática del montaje y las conexiones de los cilindros de mortero empleados en la EEC.

5.4.4. Estado corrosivo de las varillas.

Una parte novedosa de este trabajo de investigación fue el realizar extracciones en morteros con varillas de acero conteniendo distintos grados de pre corrosión. Como se puede observar en la figura 5.26 las varillas de acero del mortero D1 presentan antes de la EEC distintos valores de i_{corr} , aumentando estos valores al incrementar la duración de pre corrosión. Estos resultados son de 1.05, 2.34 y 3.49 $\mu A/cm^2$ para tiempos de pre corrosión de 24, 48 y 72 hrs respectivamente, situando a las tres varillas en un nivel de corrosión muy elevado con base en la tabla 5.2.

Después de realizar la EEC y esperar a estabilizar las velocidades de corrosión, los datos de i_{corr} son entorno a los 2 $\mu A/cm^2$ para las tres varillas, sin llegar a la pasividad del acero. Para el caso de la varilla pre corrosida durante 24 horas, y posteriormente efectuarle la EEC, su velocidad de corrosión se incrementa (de 1 $\mu A/cm^2$ pasa a 2 $\mu A/cm^2$). Este comportamiento puede deberse a que las tres varillas con distintos grados de pre corrosión están inmersas en un mismo mortero, lo cuál provoco que

Resultados y Discusión

con el transcurso de la EEC, las varillas de acero llegaron a tener casi las mismas densidades de corriente; aún que partieron de valores distintos.

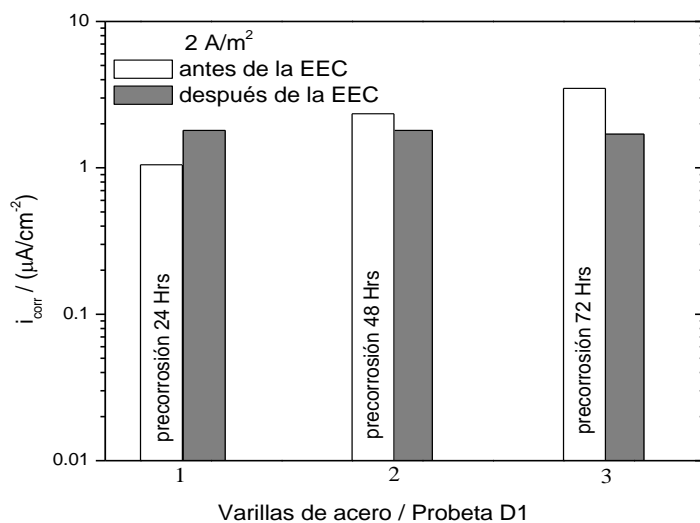


Figura 5.26. i_{corr} antes y después de la EEC ($2 \text{ A}/\text{m}^2$) con distintos tiempos de precorrosión (24, 48 y 72 hrs).

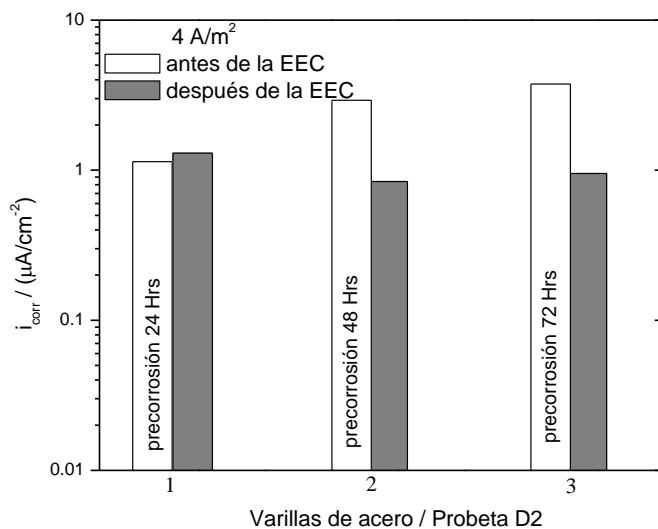


Figura 5.27. i_{corr} antes y después de la EEC ($4 \text{ A}/\text{m}^2$) con distintos tiempos de precorrosión (24, 48 y 72 hrs).

En la figura 5.27 se observa que antes de comenzar con la EEC las velocidades de corrosión son mayores de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, y al finalizar el tratamiento estas velocidades caen por debajo de dicho valor. Debe enfatizarse nuevamente que los valores de i_{corr} bajaron gracias al ensayo, e incluso estos valores son mucho más pequeños que en la EEC en la que se utilizó una menor energía ($2 \text{ A}/\text{m}^2$). Para terminar con las velocidades de corrosión, aparece a continuación la figura 5.28, en esta grafica se aprecia que las varillas de acero parten de i_{corr} distintas pero superiores a $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ y al concluir con el tratamiento, estas densidades de corriente son semejantes y menores de $0.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

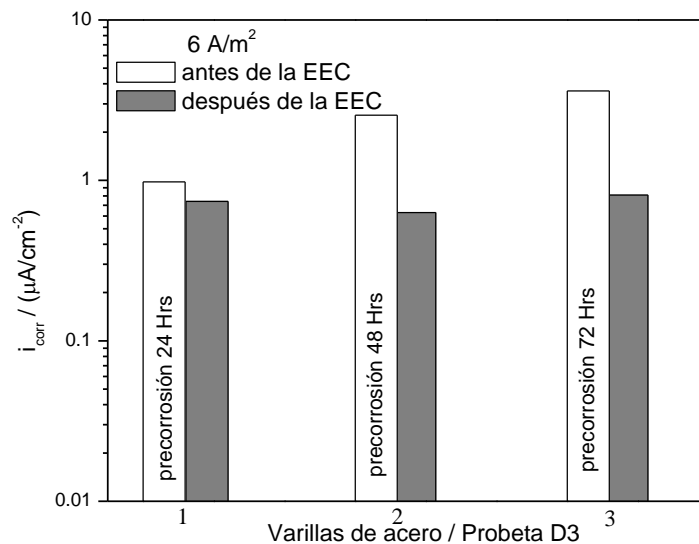


Figura 5.28. i_{corr} antes y después de la EEC ($6 \text{ A}/\text{m}^2$) con distintos tiempos de pre-corrosión (24, 48 y 72 hrs)

Otro punto importante a señalar, es que independientemente de que las varillas comiencen con distintos grados de pre-corrosión, posteriormente al ser sometidas a la EEC, las varillas presentan casi los mismos valores de i_{corr} , e incluso estos valores llegan a disminuir con la extracción.

Andrade expone en uno de sus trabajos que la EEC puede lograr la repasivación del acero, incluso cuando las varillas de acero inician con potenciales de corrosión de -600 mV y velocidades de corrosión más altas que $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. La investigadora informó que posterior a la EEC y con tres

Resultados y Discusión

años de monitoreo, todos los valores de potencial de corrosión fueron más positivos (-200 mV), así como las velocidades de corrosión (menores de $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) situando al acero en valores típicos de pasividad. En el trabajo se sugiere que un parámetro determinante para lograr una EEC eficiente es la relación de carga contra resistencia, conocida como ***Standardized by the Resistance Charge (SRC)***, debiendo tener un valor de al menos $1800 \text{ Ah}/\text{m}^2\text{k}\Omega$. (Andrade et. al., 2008). Para este ensayo los valores obtenidos de SRC fueron mayores de $1980 \text{ Ah}/\text{m}^2 \text{ k}\Omega$, por lo cual es posible pensar que si al monitorea por al menos un año estas probetas, se lograría que las armaduras se sitúan en una zona de pasividad, gracias al aplicar la EEC.

5.4.5. Potenciales de corrosión en las varillas

En la Figura 5.29 se resume la evolución de los potenciales en el transcurso de todo el experimental. Antes de comenzar con el tratamiento todos los potenciales se situaban en un 90% de probabilidad de corrosión. Al aplicar la EEC (con distintas densidades de corriente), los potenciales se polarizaron tomando valores entre -800 a -1200 mV. En la región de 0 a 30 días (tiempo que duro la EEC), se puede observar que la probeta a la que se le aplico la mayor densidad de corriente ($6 \text{ A}/\text{m}^2$), presenta una mayor alteración en los potenciales, esto posiblemente se deba al alto suministro de energía en los electrodos de acero, lo que provoco estas variaciones.

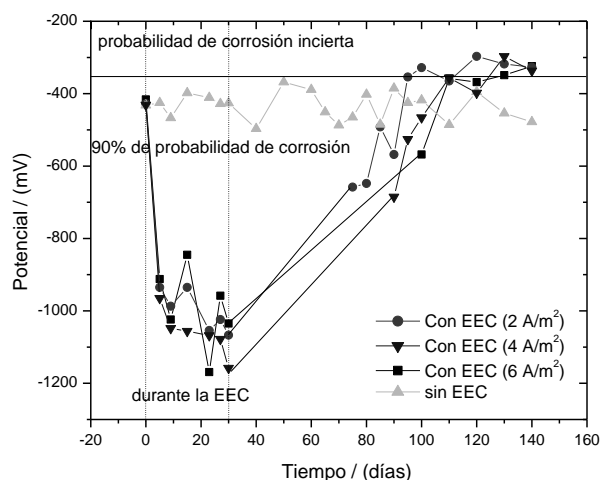


Figura 5.29. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de 30 días de aplicación de una EEC con densidades de corriente de 2, 4 y $6 \text{ A}/\text{m}^2$.

Al concluir con el tratamiento se espero a estabilizar el sistema. Los tiempos de espera fueron de 30, 40 y 55 días para las probetas a las que se les aplico una densidad de corriente de 2, 4 y 6 A/m². Finalmente, después de 110 días de haber concluido con el ensayo, las medidas de potencial de corrosión se situaron en una región de probabilidad de corrosión incierta (-350 mV), por lo cual es posible pensar que si las probetas se hubiesen monitoreado por un tiempo mucho más prolongado, se podrían obtener potenciales mucho más positivos, y así pensar que si es posible repasar el acero con esta técnica, como algunos autores lo han defendido (*Andrade et. al., 2008*).

Cabe señalar que en la misma grafica aparece una probeta que parte con el mismo grado de precorrosión que las anteriores, sin embargo a esta muestra no se le efectuó EEC. Se puede distinguir que en el transcurso del ensayo la probeta se sitúa todo el tiempo en una zona de corrosión elevada, por lo que la EEC afecta de manera positiva en la degradación de la armadura, con respecto a una probeta que no tiene tratamiento.

5.4.6. Porosidad en el mortero

Debido a que la EEC es un tratamiento que tiene que ver con el movimiento de los iones dentro de la fase acuosa del mortero, se ha pensado que puede existir una alteración en la microestructura del mortero, por lo cual fue importante medir en este experimento el cambio de la porosidad que pueden tener las probetas al aplicarse la EEC. En la tabla 5.8 se muestran los resultados de porosidad de las muestras de mortero antes y después de la EEC (al aplicar distintas densidades de corriente 2, 4 y 6 A/m²).

**Tabla 5.8. Resultados de la porosidad en el mortero
Obtenidos de acuerdo la norma ASTM-C-642-971.**

| Probeta | Tratamiento | Densidad de Corriente aplicada (A/m ²) | Duración de la EEC (días) | % de Porosidad |
|---------|-------------|--|---------------------------|----------------|
| D0 | Sin EEC | No aplica | No aplica | 5.98 % |
| D1 | Con EEC | 2 | 30 | 6.55 % |
| D2 | Con EEC | 4 | 30 | 6.97% |
| D3 | Con EEC | 6 | 30 | 7.42 % |

Resultados y Discusión

La probeta sin EEC (D0) presenta la menor porosidad en comparación a las probetas (D1, D2 y D3) a las cuales se les realizó la extracción de cloruros. Al mismo tiempo se puede visualizar que existe un incremento en la porosidad en función del aumento de densidad de corriente. Puede pensarse que al incrementar la energía aplicada en el sistema, esta contribuye a un mayor movimiento de cargas y a su vez una mayor porosidad.

En base a tener una idea más clara del aumento de porosidad causado por la EEC, se realizaron micrografías en el Microscopio electrónico de Barrido (MEB). Para tener datos más acercados a la realidad se realizó una EEC a losa de concreto contaminada con 2%NaCl, durante 6 semanas (por cada cara de la losa), aplicando una densidad de corriente de 5 A/m².

Los resultados obtenidos del MEB arrojan que las muestras sin EEC (figura 5.30) y con EEC (figura 5.31), tomadas a bajos aumentos son muy semejantes. Se visualiza la apariencia general de un concreto; con grietas y grandes poros sobre toda la superficie. Este tipo de poros y fisuras son comunes en el concreto.

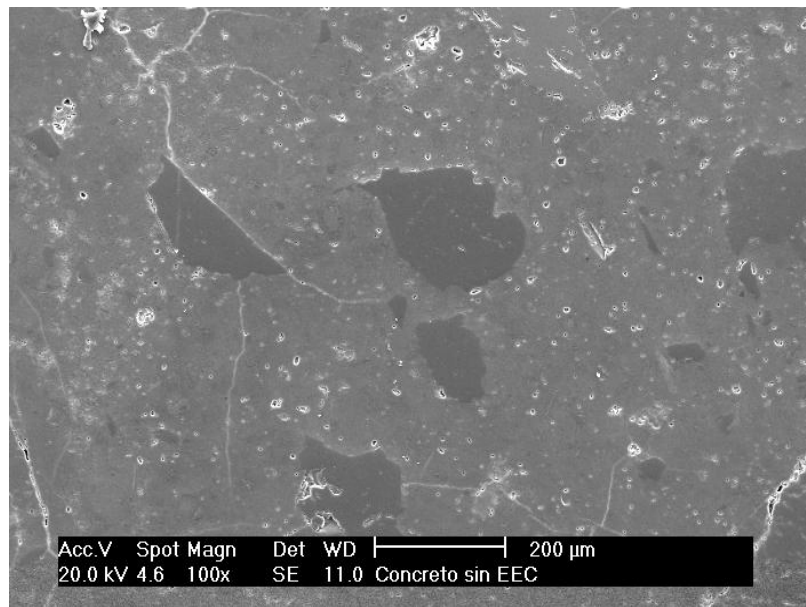


Figura 5.30. Micrografía (MEB) a 100x de una muestra de concreto sin EEC recubierta con Au.

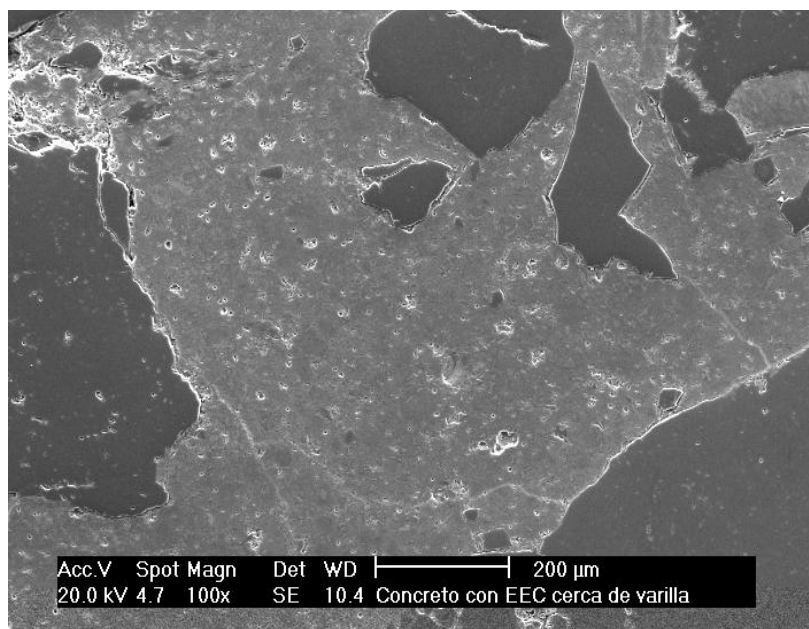


Figura 5.31. Micrografía (MEB) a 100x de una muestra de concreto con EEC recubierta con Au.

Al realizar una comparación entre las figura 5.32 (concreto sin EEC) y la figura 5.33 (concreto con EEC) realizadas a altos aumentos, puede apreciarse una mayor cantidad de micro-poros en la muestra con EEC (figura 5.33), esto puede ser debido a la migración de especies, principalmente Cl^- durante la extracción, de acuerdo con lo encontrado por Siegwart (Siegwart et. al.,2003). En la figura 5.33 se observó, después de la EEC, una sección del concreto que se encontraba cerca de la varilla,. Al realizar un análisis por EDX se encontró que las partículas blancas tienen una composición rica en calcio; lo cual confirma, que cuando se realiza una EEC la estructura del concreto es alterada, debido a la migración y difusión del cambio de especies que ocurren dentro de la misma, dando por resultado *un incremento en la porosidad*.

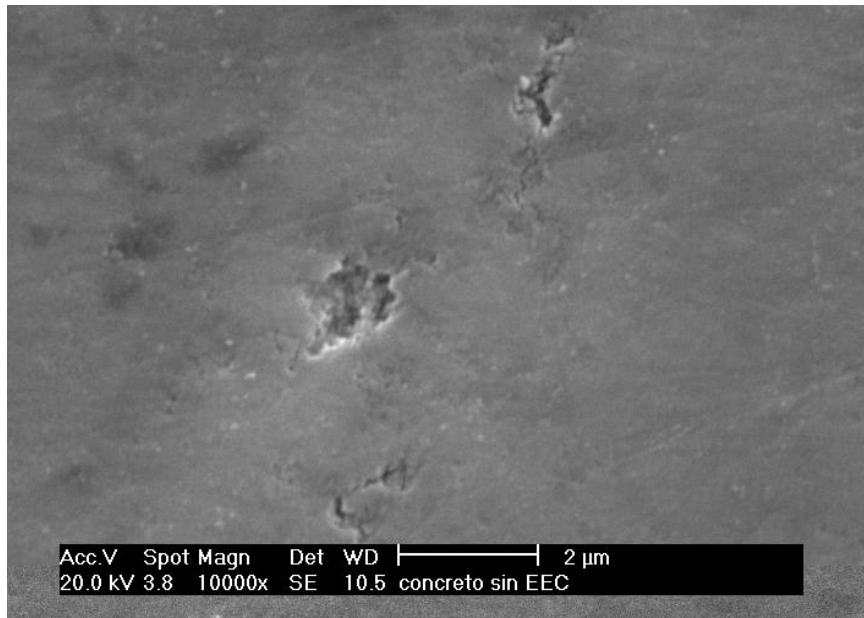


Figura 5.32. Micrografía (MEB) a 10,000x de una muestra de concreto sin EEC recubierta con Au.

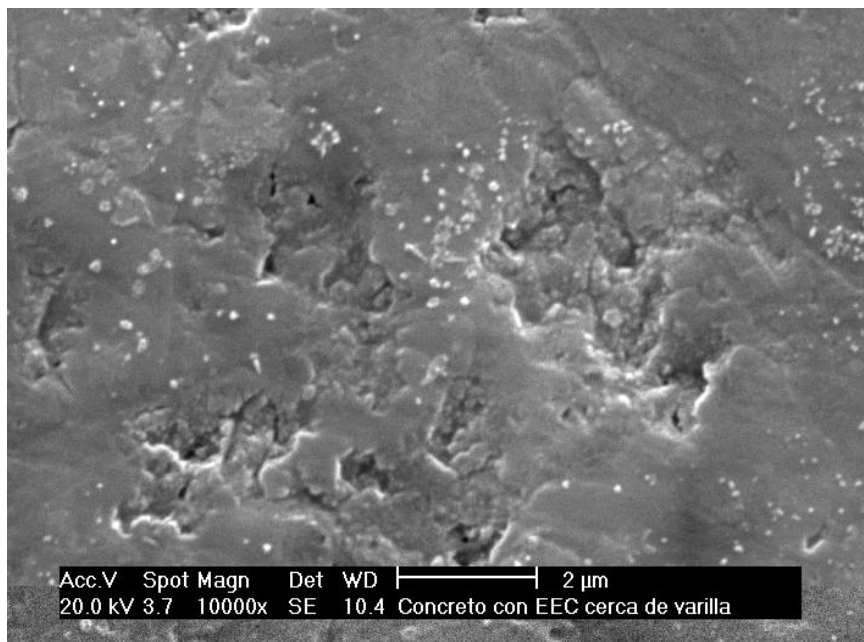


Figura 5.33. Micrografía (MEB) a 10,000x de una muestra de concreto con EEC recubierta con Au.

5.5 EXPERIMENTO E.

Extracción de Sulfatos y Cloruros en cubos de mortero

Con esta experimentación se pretende encontrar las ventajas y limitaciones que tendrá el extraer los cloruros y sulfatos contenidos dentro de un mortero (previamente contaminado). Dentro de este experimental se tienen algunas interrogantes, que se pretenden resolver, como:

- ¿Se lograra detener la degradación de la varilla al extraer los cloruros y sulfatos dentro del mortero?
- ¿Qué especie contaminante será eliminada en mayor porcentaje?
- ¿Cómo será el perfil de estos iones a través del mortero?

5.5.1 Grados de precorrosión de las varillas de acero.

Al inicio del tratamiento todas las varillas de acero fueron decapadas para asegurar que sus medidas de potencial y velocidades de corrosión se situaran en una zona de pasividad. Para el decapado se utilizo ácido clorhídrico al 50% con 4g/l de hexametilentramina (urotropina) como inhibidor durante 1 minuto dentro de una recipiente de vibración, Las varillas de acero se lavaron inmediatamente con abundante agua y se secaron con aire a presión. ver figura 5.34 y tabla 5.9.



En la figura 5.34. Se observa una varilla limpia y después del decapado.

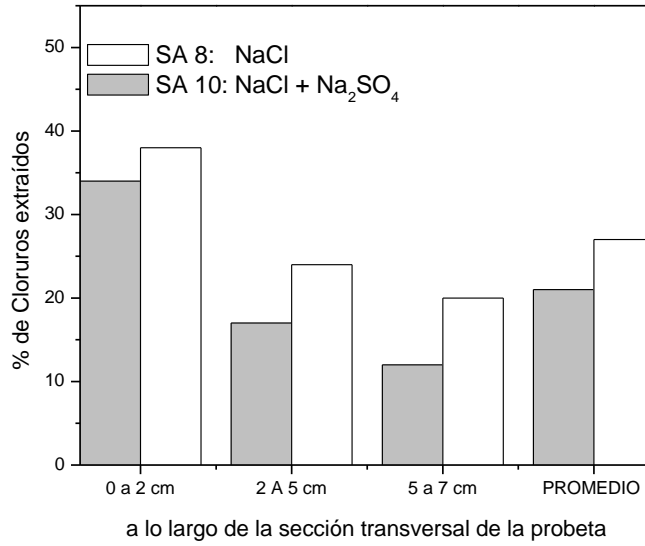
Resultados y Discusión

Tabla 5.9. Resultados de las medidas de E_{corr} e i_{corr} obtenidas en las varillas de acero al inicio del experimental después del decapado.

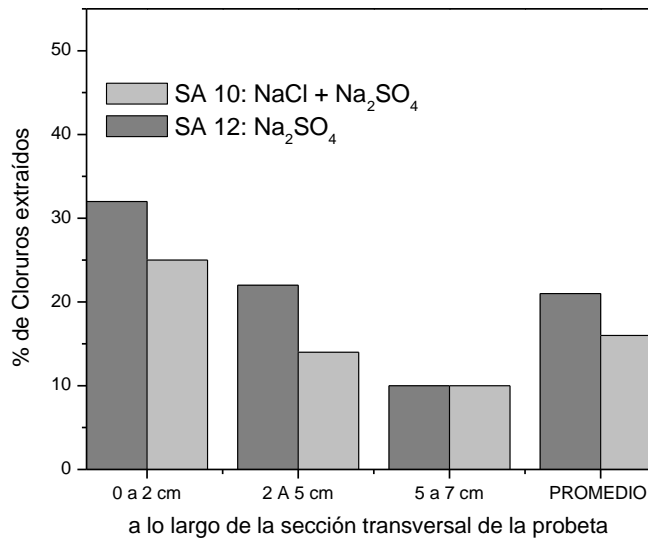
| Probeta | Contaminante | Tratamiento | E_{corr} (mV) Ag/AgCl | i_{corr} ($\mu A/cm^2$) | Estado corrosivo de la Varilla |
|---------|---------------------|-------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| SA8 | Cloruros | Con EEC | -187 | 0.07 | PASIVO |
| SA10 | Cloruros y sulfatos | | -247 | 0.07 | |
| SA12 | Sulfatos | | -243 | 0.08 | |
| SA9 | Cloruros | Sin EEC | -241 | 0.06 | |
| SA11 | Cloruros y sulfatos | | -231 | 0.05 | |
| SA13 | Sulfatos | | -224 | 0.08 | |

5.5.2. Perfil de Cloruros extraídos en diferentes puntos de muestra

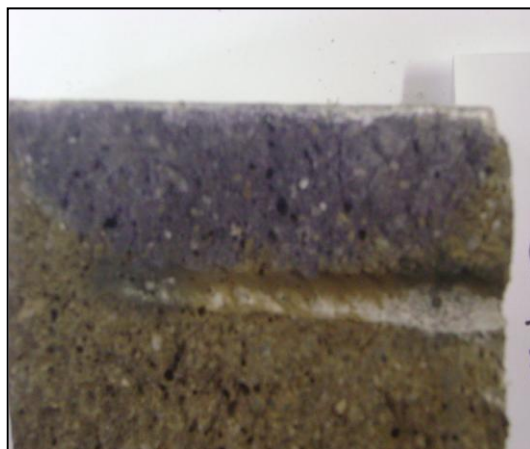
La figura 5.35 muestra los perfiles de cloruros remanentes a lo largo de la sección transversal del mortero, para las probetas SA8 (contaminada con cloruros) y SA10 (contaminada con cloruros y sulfatos). El contenido promedio inicial de cloruros en ambas muestras era de 0.5% con respecto al peso de mortero. La mayor cantidad de cloruros removidos se da en la parte cercana al ánodo (0 a 2 cm), obteniendo una eficiencia del 38 y 34 % para las probetas SA8 y SA10 respectivamente. En la cuna de la varilla (cerca del cátodo) el porcentaje de cloruros remanentes se incrementa, es decir existe una disminución en la eficiencia de la técnica, situando los valores por debajo del 25 %. La disminución mas baja de la extracción de los iones cloruro se da después de la armadura de acero (5 a 7 cm), sus valores se sitúan entre el 14 y 22 % de efectividad. En general existe una mayor cantidad de cloruros removidos para la probeta de mortero que fue contaminada solo con cloruros (SA8) en comparación con la probeta que fue contaminada con cloruros y sulfatos (SA10). Posiblemente la intervención de más especies provocó que la eficiencia en la extracción fuera afectada en forma negativa. Otro punto importante a resaltar es la diferencia significativa entre la cantidad de cloruros removidos cerca del ánodo (0 a 2 cm) en comparación a la cantidad de iones extraídos en la superficie exterior del mortero (5 a 7 cm), esto puede atribuirse a que la energía (densidad de corriente aplicada) disminuye en la superficie externa del mortero. En otras palabras, el campo eléctrico no es lo suficientemente intenso para movilizar a los iones que se encuentran más alejados del ánodo y el cátodo.



En la figura 5.35. Perfil de Cloruros a lo largo de la sección transversal de las probetas SA8 y SA10 después de la extracción.



En la figura 5.36. Perfil de Sulfatos a lo largo de la sección transversal de las probetas SA10 y SA12 después de la extracción.



**Figura 5.37. Avance frontal de cloruros para los morteros SA
Utilizando el indicador de Nitrato de plata**

5.5.3. Perfil de Sulfatos extraídos en diferentes puntos de la muestra.

Para tener una idea de cómo los sulfatos extraídos varían a lo largo del mortero, se realizaron tres mediciones, cerca del ánodo (0 a 2 cm), cerca de la cátodo (2 a 5 cm) y por último en la superficie más alejada del tratamiento (5 a 7 cm), para la probeta contaminada con cloruros y sulfatos (SA10), y para la probeta contaminada solo con sulfatos (SA12).

Lo más interesante de esta gráfica es que se puede observar que la técnica de extracción de cloruros, también puede ser utilizada para extraer otras especies, como en este caso los sulfatos. Nuevamente la mayor cantidad de especies removidas (en este caso los sulfatos) se encuentra en el ánodo, dando eficiencias del 24 y 32% con respecto a las probetas SA10 y SA12. La cantidad de sulfatos extraídos se ve mermada cerca de la cuna de la varilla, en el cátodo, ya que estas eficiencias son entre el 14 y el 23 %. Cerca de la superficie externa (donde la densidad de corriente disminuyó), la cantidad de sulfatos extraídos baja drásticamente, hasta llegar a valores del 10% de efectividad.

Como en el caso anterior del perfil de cloruros (figura 5.35), para esta gráfica de sulfatos (figura 5.36); el tener dos especies en combinación puede ocasionar una disminución en las extracciones. Sin embargo hay que considerar que esta técnica puede extraer especies distintas al mismo tiempo.

5.5.4. Estado corrosivo de las varillas.

En la Figura 5.38 se presenta la evolución de las i_{corr} antes, durante y después del tratamiento. Puede observarse que las tres probetas se comportaron de manera semejante, al inicio del tratamiento los valores eran en torno de 0.1 y 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, siendo una zona de probabilidad de corrosión moderada, sin embargo al finalizar el tratamiento, después de haber transcurrido 17 días y dejar un lapso de una semana para que se estabilizaran estos valores electroquímicos, se obtuvieron medidas de velocidades de corrosión más bajas, (menores de 0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Gracias a esta grafica, se puede mencionar que el Metodo electroquímico de extracción, además de ser eficiente para eliminar los cloruros y sulfatos inmersos en el mortero, también puede disminuir levemente el estado corrosivo de las armaduras de acero, siempre y cuando las i_{corr} partan de un estado corrosivo bajo o moderado, y después de que el sistema este estabilizado.

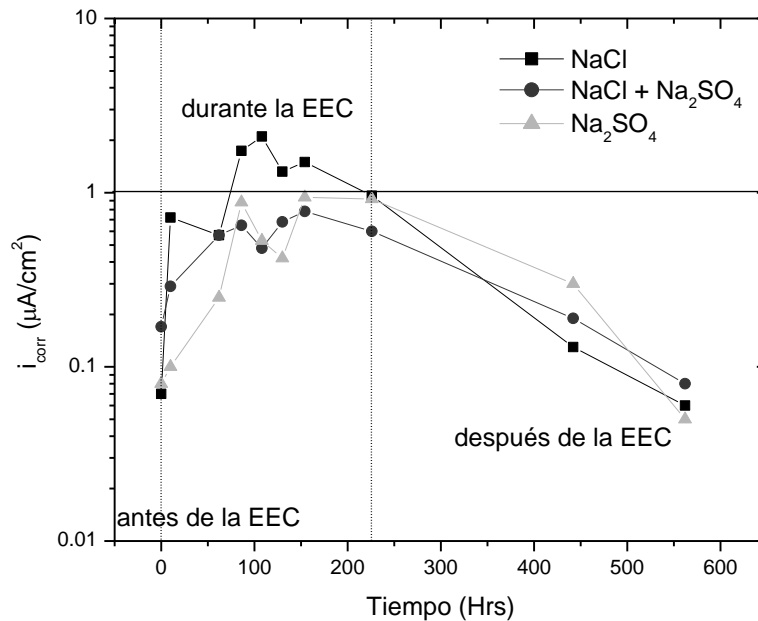


Figura 5.38. Evolución de los i_{corr} antes, durante y después de la aplicación de una extracción en morteros cúbicos (SA8, SA10 y SA12).

Resultados y Discusión

5.5.5. Potenciales de corrosión en las varillas

La figura 5.39 describe la evolución de los potenciales de corrosión antes, durante y después de la EEC, al utilizar una densidad de corriente de 2.5 A/m^2 , en probetas de mortero contaminadas con NaCl, NaCl + Na_2SO_4 y Na_2SO_4 .

Al inicio del tratamiento los potenciales están en torno de -200 a -300 mV (siendo una zona de probabilidad de corrosión incierta). Posteriormente en el transcurso del tratamiento los potenciales se polarizaron, situándose en torno de los -400 a los -600 mV. El tratamiento que presentó más variabilidad en los potenciales de corrosión fue el de las probetas contaminadas solo con sulfatos (Na_2SO_4), y es esta misma muestra la que presenta al final del tratamiento el potencial de corrosión más positivo (con un valor de -98 mV). Cabe mencionar que los valores de E_{corr} tanto para las probetas contaminadas con NaCl como para las probetas contaminadas con NaCl + Na_2SO_4 presentaron casi el mismo comportamiento durante todo el proceso.

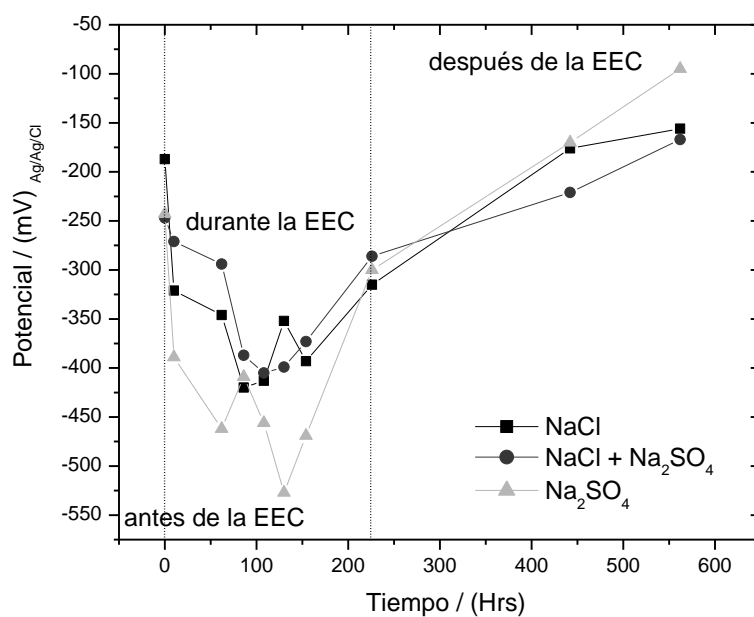


Figura 5.39. Evolución de los E_{corr} antes, durante y después de la aplicación de una extracción en morteros cúbicos (SA8, SA10 y SA12).

Con la finalidad de poder observar si existía un cambio de los potenciales después de haber aplicado la EEC, se procuro que las probetas se monitorearan por un tiempo más prolongado. Para las tres probetas distintas, se logro que los potenciales en los refuerzos de acero se situaran en una zona de probabilidad de corrosión incierta, además que estos valores fueron más positivos que los presentados al inicio del tratamiento.

Como conclusión de este experimento se puede decir que la extraccion funciona de una manera positiva en probetas de mortero contaminadas con otras especies (como en este caso los sulfatos), además que puede extraer distintas especies en el mismo tratamiento (sulfatos y cloruros). Puede lograr que las medidas de corrosión bajen después del tratamiento, siempre y cuando la armadura de acero inicie con grados de precorrosión incipientes o moderados, y el ensayo cumpla con la relación de carga contra resistencia, teniendo un valor de al menos $1800 \text{ Ah/m}^2\text{k}\Omega$.

6 Conclusiones

6.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos y el respaldo de la literatura, se presentan las siguientes conclusiones:

6.1 EXPERIMENTO A.

Efecto del grado de precorrosión en la armadura de acero, y la duración de una EEC en cilindros de mortero.

1. Cantidad de cloruros removidos del mortero después de la EEC

Al aumentar el tiempo en la extracción, la cantidad de cloruros extraídos también aumenta. Los porcentajes de cloruros extraídos fueron de 18, 24 y 34 % para 15, 30 y 60 días de EEC, aplicando una densidad de corriente de 1 A/m².

2. Estado corrosivo de las varillas

En este trabajo se encontró que cuando se aplica una EEC sobre el refuerzo de acero con grado de precorrosión moderado, es posible detener la velocidad de corrosión en valores iguales o ligeramente por debajo que los valores iniciales. Con respecto al comportamiento de los electrodos con grado de precorrosión elevado; puede decirse que no se observan señales de repasivación después de aplicar la EEC durante el tiempo que duro el experimental.

3. Polarización de las varillas

Todas las probetas sometidas a una EEC durante el tratamiento presentaron una polarización, estos valores de E_{corr} se dispararon hasta los -1000 mV. La polarización en las armaduras de acero puede ser atribuida a las cargas de energía suministradas durante el experimental.

6.2. EXPERIMENTO A Y B.

Efecto de la densidad de corriente aplicada durante la EEC en cilindros de mortero

1. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC

Las probetas de mortero con distintos tiempos de precorrosión y con los mismos tiempos de extracción, presentan eficiencias en el tratamiento semejantes; lo que supondría que el grado de precorrosión no afecta directamente con la eficiencia de la técnica. Sin embargo, una variable que influye en la cantidad de cloruros extraídos es la duración de la técnica, ya que entre más tiempo dure la EEC será mayor la cantidad de cloruros removidos del mortero (resultado comprobado en el experimento A).

2. Análisis puntuales del porcentaje en peso de los Cloruros

Existe una mayor cantidad de cloruros removidos en la superficie del mortero, que en el interior de la varilla después de realizar la EEC; esto puede deberse a que en el interior del cilindro (cerca de la varilla) la densidad de corriente es más baja, y por lo tanto la migración de los iones cloruro más lenta. En otras palabras, la cantidad de cloruros retenidos después de efectuar la EEC varía a lo largo de la sección transversal del mortero, debido a que la densidad de corriente suministrada no se mantiene constante.

3. Estabilización de los potenciales al aplicar la EEC

Debido a la polarización que ocurre durante el tratamiento, es necesario esperar a estabilizar las medidas electroquímicas. Entre más tiempo duraban las EEC, más prolongado es el tiempo de espera para que los potenciales se estabilicen.

6.3. EXPERIMENTO C.

Efecto del tipo de contaminante al aplicar una EEC en cilindros de mortero.

1. Grados de precorrosión de las varillas de acero de acuerdo con el tipo de contaminante

En base a los mismas condiciones experimentales, las medidas de E_{corr} se sitúan en valores promedio de -278 mV y valores de i_{corr} en torno a 0.23 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para las probetas contaminadas con NaCl. Con respecto a las probetas contaminadas con CaCl_2 los E_{corr} presentaron en promedio valores -325 mV y medidas de i_{corr} de 0.41 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. Siendo las medidas de corrosión más altas en las probetas contaminadas con CaCl_2 .

2. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC utilizando contaminantes distintos

Los datos de los porcentajes de Cloruros extraídos, ponen de manifiesto que en relación a la efectividad de la técnica parece ser irrelevante el tipo de contaminante, ya que tanto para el cloruro de sodio como para el cloruro de calcio los valores en los porcentajes de extracción son muy similares.

Además es importante señalar que con el incremento en la densidad de corriente aplicada en el tratamiento, puede mejorar la efectividad de la extracción. A mayor energía mayor será la cantidad de cloruros removidos del mortero.

3. Disminución de las i_{corr} después de aplicar una EEC

En este experimento no sé logro bajar drásticamente las velocidades de corrosión después de aplicar la EEC; sin embargo los valores de i_{corr} que se observan al inicio (0.23 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) son menores al finalizar la EEC (0.07 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), y estos valores se localizan en los límites atribuibles al estado moderado de corrosión.

6.4. EXPERIMENTO D.

Efectos ocasionados al aplicar densidades de corriente elevadas durante la EEC en cilindros de mortero, cuando los grados de precorrosión son distintos.

1. Pérdidas de peso

Las pruebas realizadas bajo la norma ASTM G1-03 determinaron que entre mayor es el tiempo de exposición del contaminante sobre el acero, se tiene una mayor pérdida de peso en la armadura.

2. Cantidad de cloruros removidos después de la EEC utilizando distintas densidades de corriente (2, 4 y 6 A/m²)

Al incrementar la densidad de corriente, se observa de manera recíproca un aumento en la cantidad de cloruros removidos del mortero. Al utilizar una $J = 2 \text{ A/m}^2$ se logró una extracción del 28.5 %, al incrementar la densidad al doble se obtuvo una eficiencia del 35.8 % y al triplicar esta energía se obtuvo la cantidad de remoción de cloruros más alta en torno del 55 %.

3. Estado corrosivo de las varillas

A pesar de que inician las varillas de acero con distintos grados de precorrosión, al concluir con el tratamiento (fin de la EEC), las velocidades de corrosión se sitúan en valores muy semejantes. Nuevamente, si las varillas de acero parten de velocidades de corrosión elevadas (90% de probabilidad de que ocurra corrosión), la técnica no es capaz de repasar el acero.

4. Porosidad en el mortero

La probeta sin EEC (6 %) presenta la menor porosidad en comparación a las probetas a las cuales se les realizó la extracción de cloruros (mayor del 6%). Además de que existe un incremento en la porosidad en función del aumento de densidad de corriente. Puede pensarse que al incrementar la energía aplicada en el sistema, esta contribuye a un mayor movimiento de cargas y a su vez una mayor porosidad.

6.5 EXPERIMENTO E.

Extracción de Sulfatos y Cloruros en cubos de mortero

1. Perfil de Cloruros extraídos en diferentes puntos de la muestra

Existe una mayor cantidad de cloruros removidos para la probeta de mortero que fue contaminada solo con cloruros en comparación de la probeta que fue contaminada con cloruros y sulfatos. Posiblemente la intervención de más especies provocó que la eficiencia en la extracción fuera afectada en forma negativa. Otro punto importante a resaltar es la diferencia significativa entre la cantidad de cloruros removidos cerca del ánodo (0 a 2 cm) en comparación a la cantidad de iones extraídos en la superficie exterior del mortero (5 a 7 cm), esto puede atribuirse a que la energía (densidad de corriente aplicada) disminuye en la superficie externa del mortero. En otras palabras, el campo eléctrico no es lo suficientemente intenso para movilizar a los iones que se encuentran más alejados entre el ánodo y el cátodo.

2. Perfil de Sulfatos extraídos en diferentes puntos de la muestra

Lo más interesante de este ensayo es que la técnica de extracción de cloruros, también puede ser utilizada para extraer otras especies, como en este caso los sulfatos.

La mayor cantidad de especies removidas (en este caso los sulfatos) se encuentra en el ánodo (dando eficiencias del 24 y 32%), en el cátodo las eficiencias son entre el 14 y el 23 %, y cerca de la superficie externa (donde la densidad de corriente es disminuida), la cantidad de sulfatos extraídos baja drásticamente, hasta llegar a valores del 10% de efectividad.

3. Medidas de corrosión en las varillas

Esta técnica es capaz de lograr que las medidas de corrosión bajen después del tratamiento, si se cumplen las siguientes condiciones:

- La armadura de acero inicie con grados de precorrosión incipientes o moderados
- El ensayo cumpla con la relación de carga contra resistencia, teniendo un valor de al menos $1800 \text{ Ah/m}^2\text{k}\Omega$
- Se dé el tiempo necesario a estabilizar las medidas electroquímicas.

6.6. CONCLUSIÓN FINAL DE LA INVESTIGACIÓN.

Se encontró que la extracción electroquímica de cloruros es eficiente para eliminar una gran cantidad de cloruros inmersos sobre el mortero, además de que esta técnica también puede utilizarse para extraer otras especies agresivas (como los sulfatos), y en caso de que la estructura de concreto armado esté contaminada tanto por cloruros y sulfatos la técnica podrá eliminar un alto porcentaje de estos iones.

La EEC funciona de manera favorable al disminuir las medidas de corrosión cuando la armadura de acero presenta grados de precorrosión incipientes. En el caso de que el acero este altamente corroído y se aplique la extracción, los potenciales y velocidades de corrosión disminuyen, sin embargo para el tiempo que se monitorearon no se logró observar la repasivación.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los experimentales, las condiciones apropiadas para realizar una EEC de manera eficiente son:

1. *Duración del tratamiento.*- al incrementar el tiempo en la EEC, se obtiene una mayor cantidad de cloruros removidos (Para este caso se realizaron EEC con 15, 30 y 60 días).
2. *Densidad de corriente aplicada.*- Con el aumento de la energía suministrada en la EEC, se obtiene un incremento en la cantidad de iones cloruros removidos en el mortero. (Las densidades suministradas fueron de 1, 2, 4 y 6 A/m²).
3. *Tipo de contaminante.*- la efectividad de la técnica parece ser irrelevante el tipo de contaminante, ya que tanto para el cloruro de sodio como para el cloruro de calcio los valores en los porcentajes de extracción de iones cloruro son muy similares.

Efectos colaterales provocados por la EEC:

- *Polarización:* debido al suministro de energía aplicada durante el tratamiento, este contribuye a polarizar la armadura de acero durante la extracción, este efecto desaparece al terminar y esperar a estabilizar el sistema.
- *Porosidad:* la cantidad de porosidad incrementa con la EEC, sin embargo aún se encuentra en los límites de un concreto de buena calidad.

Aporte Científico y tecnológico:

Entre las novedades obtenidas del trabajo de investigación, se encontró que esta técnica electroquímica puede ser utilizada para extraer otras especies.

El tipo de contaminante parece ser irrelevante en la cantidad de cloruros extraídos.

Para el caso de que una estructura de mortero parta con varillas que tengan grados de precorrosión distintos, sus valores de i_{corr} y E_{corr} serán muy semejantes al finalizar la extracción.

Finalmente como aporte tecnológico se encontró que el Nitrato de plata es un indicador efectivo para visualizar el avance de los iones cloruro en el mortero.

7 Referencias

**REFERENCIAS**

- Abdelaziz G.E., Abdelalim A.M.K., Fawzy Y.A. 2009. "*Evaluation of the short and long-term efficiencies of electro-chemical chloride extraction*". Cement and Concrete Research 39 . Pp. 727-732.
- Abdullah, Almusallam A. 2001. "*Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars*". Construction and Buildings Materials 15. Pp. 361-368.
- Andrade C. Martinez I. Castellote. 2008. "*Efficiency control electrochemical repair techniques*". Concrete repair, Rehabilitation and Retrofitting II, South Africa, November Pp. 24-26.
- Andrade C., Alonso C. and Molina F.J. 1993. "*Cover cracking as a function of bar corrosion. Part I: Experimental test*". Material Structural. Pp. 26 453.
- Arya C. and Saíd Shawqi. 1996. "*Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete*". Pergamon. 00067-1. Pp. 851-860.
- Arya C. and Newman J.B., Proc.1990. Instrn. Civ. Engrs, Part 1. Tomo 88. Pp. 875
- ASTM C 642-971. "*Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*".
- ASTM D 512, Standard Test Methods for Chloride Ion in Water, American Society Testing Materials.
- ASTM D1411 – 09. "*Standard Test Methods for Water-Soluble Chlorides Present as Admixtures in Graded Aggregate Road Mixes*". American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards.

Referencias

- ASTM G-1-03. 2003. "Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens". West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ASTM Standard C876-91, 1999. "*Standard test method for half cell potentials of uncoated reinforced steel in concrete*". West Conshohocken, PA. Annual Book of ASTM Standard, vol. 04.02.
- ASTM-C-642-97. "*Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*". American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards. Vol 04 02 2004. Pp, 334-335.
- Bennett J.E. y Schue T.J. 1993. "*Chloride removal implementation guide*". Report Strategic Highway Res. Program Washington D.C. SHRP -S-347. P-45.
- Bogue R.H. 1955. "*The Chemistry of Portland Cement*". 2nd. New York: Reinhold Publishing Corporation. Pp.793.
- Broomfiel J.P. 1991. "*Life prediction of corrodible structures*". NACE Symposium, Cambridge, Sept. Paper 14.
- Cady P.D. 1978. ASTM STP 169B. Pp. 275-299.
- Castellote M., Andrade C., Cruz Alonso. 1996. "Changes in concrete pore size distribution due to Electrochemical Chloride Migration Trials". ACI Materials Journal. No. 96-M39. Pp. 314-319.
- Clear K.C. Inc. 1990. "*3LP Package: Tests procedures. Data analysis and general information*". July, Appendix, P.9.
- Cobo A. Escamilla. 2001. "*Corrosión de las Armaduras de hormigón armado: Causas y procedimientos de rehabilitación*". Ed. Fundación Escuela de la Edificación. Madrid. Pp. 131-159.

- Cobo A., Nieves M., Otero E. y González J. 2000. *“Consideraciones sobre la reparación de las estructuras corroídas de hormigón armado”*. Revista Metal Madrid 36. Pp. 170-178.
- Cohen, M.D. and Mather, B. 1991. *“Sulfate Attack on Concrete”*. Research Needs. J. ACI 88. Pp.1:62-69.
- CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. 1998. *“DURAR Red Temática XV.B Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”*. 2ª edición. Pp. 37-121.
- Duffó G. S., Morris W., Raspini I. and Saragovi C. 2004. *“A study of steel rebars embedded in concrete during 65 years”*. Corrosion Science 46. Pp. 2143-2157.
- Elsener B., Angst U. 2007. *“Mechanism of electrochemical chloride removal”*. Corrosion Science 49. Pp. 4504-4522.
- Elsener, B. Molina M. and Bohni H. 1993. *“Electrochemical removal of chloride from hardened cement paste”*. Cement and Concrete Reserch. 23 Pp. 1095.
- Elsener B., Molina M. y Bohni. 1992. *“Electrochemical Removal of Chlorides from Reinforced Concrete”*. Int. Conf. Advances in Corrosion and Protection, UMIST, Manchester, 28 June-3 July 1992.
- Fajardo G., Escadeillas G., Arliguie G., Valdez P. 2007. *“Decloruración de Concreto reforzado sometido a dos modos de exposición en agua de mar artificial”*. Ciencia Fic, Universidad Autónoma de Nuevo León, No. 2.
- Fajardo G., Escadeillas G. and Arliguie G. 2006. *“Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel- reinforced concrete specimens contaminated by artificial sea-water”*. Corrosion Science 48 Pp. 110-125.
- Feliu S., y Andrade C. 1989. *“Manual de inspección de las obras dañadas por corrosión de las armaduras”*. Ed. CSIC. Madrid. Pp. 45-50.

Referencias

- Feliu S., González J.A., Andrade C. 1988. "On Site determination of polarization resistance in reinforced concrete beam". Corrosion NACE 44 (19). Pp. 761.
- Fernández M. Cánovas. 1984. "Patología y terapéutica del Hormigón armado". 2 edición, Editorial Dossat, S.A. Barcelona, Pp. 443 -473.
- Gerhardus H. Koch , Michiel P. H. Brongers , Neil G. Thompson , Y. Paul Virmani , and J. H. Payer. 2002. "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States", Supplement to Materials Performance", July, Federal Highway Administration, McLean, Report No. FHWA - RD - 01 – 156.
- González J.A., Miranda J.M., Birbilis N., and Feliu S. 2005. "Electrochemical Techniques for Studying Corrosion of Reinforcing Steel: Limitations and Advantages". Corrosion, Vol.61, año No.1. Pp. 37-50.
- González J.A., Ramírez E., and Bautista A. 1998. "Protection of steel embedded in chloride containing concrete by means of inhibitors". Cement and Concrete, Res., 28 (4) Pp. 577-589.
- González J.A., Benito M., Bautista A. y Ramírez E. 1994. "Inspección y diagnóstico de las estructuras de hormigón armado". Revista Metalúrgica de Madrid, 30 Pp. 271-282.
- González J.A., Andrade C., Rodríguez P., Alonso C., Feliu S.1993. "Effect current on the degradation of reinforced concrete structures, en Progress in the understanding and prevention of corrosion". Instituto de Materiales y la Sociedad Española de Química Industrial. Reino Unido. Pp. 629-633.
- González J.A. y Andrade C., 1984. "La corrosión en estructuras de hormigón armado. Formas de prevenirla y evaluarla". Teoría y Práctica de la lucha contra la Corrosión, ED. C.S.I.C. Madrid.
- Green W.K., Lyon S.B, Scantlebury J.D. 1993. "Electrochemical changes in chloride-contaminated reinforced concrete following cathodic polarization". Corrosion Science 35. Pp. 1627-1631.

- Imre Biczok. 1981. *"Materiales componentes del hormigón"*. Corrosión y protección del Hormigón, Editorial Urmo, S.A. Ediciones. Bilbao España Pp. 126-130.
- Kumar Mehta y Paulo Monteiro. 1998. *"Concreto: estructura, propiedades y materiales"*, IMCYC, Instituto Mexicano del cemento y concreto. México.Pp. 1- 205.
- Labahn Otto, Kohlhaas B. 1985. *"Protuario del cemento"*. Reverte, 5ta. Edición. Pp. 1016.
- Lankard D.R., Slater J. Hedden W.A. y Niesz D. 1975. *"Neutralization of chloride in concrete"*. Battelle Columbus Laboratories, Federal Highway Administration (USA), Report No. FHWA-RD-76-60. Pp 1-143.
- Marcotte T.D., Hansson C.M., Hope B.B. 1999. *"The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar"*. Cement and Concrete Research 29. Pp. 1555-1560.
- Mietz J, 1998. *"Electrochemical Rehabilitation Methods for reinforced concrete Structures" - A State of the Art Report*, Publication in the EFC Series, The Institute of Materials, London, UK, *English*, of interest to group(s) B,C. ed. No. 24, Pp.68.
- Mietz J. 1995. *"Electrochemical realkalisation for rehabilitation of reinforced concrete structures"*. Materials and Corrosion 46. Pp. 527-533.
- Miranda J. M. 2004. *"Analysis of Repassivation Possibilities of Corroded Reinforced Concrete Structures"*, (Doctoral Thesis, Universidad Complutense de Madrid, Depto. Ing. Mater. E Ingeniería Metalúrgica, Madrid).
- Morrison G. L. Virmani y Stratton F. W. y Gilliland W. 1976. *"Chloride removal and monomer impregnation of bridge deck concrete by electro-osmosis"*. Kansas department of transportation Federal Highway Administration (USA), Report No. FHWA-KS-RD-74-1. Pp 1-41.

Referencias

Murcia V. J., Aguado C., Mari B. 1997. "*Hormigón armado y pretensado – I*", Ediciones UPC, Universidad Politécnica de Cataluña, reimpresión, p. 23.

Neville Adam M. 1999. "*Antecedentes del cemento*". Tecnología del concreto, IMCYC, Instituto Mexicano del cemento y concreto, Segunda versión, Pp.1.NMX-C-407-ONNCCE-2001. Norma Mexicana.

NMX-C-414-ONNCCE-2004 "*industria de la construcción – cementos Hidráulicos - especificaciones y métodos de prueba*" Norma Mexicana.

Nzeribe M. Ihekwa & Brian B. Hope. 1996. "*Mechanical properties of anodic and cathodic regions of ECE Treated concrete*". Cement and Concrete Research, Vol. 26 No. 5 Pp. 771-780.

Orellan, J. C. Escadeillas G. 2001. "*Electrochemical chloride extraction: efficiency and site effects*". Cement and Concrete Research, 27. Pp. 227.

Otero E., González J.A., Feliu S., López W. y Andrade C. 1990. "*On the generation of local acid pH in concrete structures*". 11th Int. Corrosion Congress, Florence (Italia), April Vol.2, Pp. 459.

Poupard O., Ait-Mokhtar A., Dumargue P. 2004. "*Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy*". Cement and Concrete Research 34 Pp. 991 - 1000.

Pourbaix M. 1976. Atlas of electrochemical Equilibrium in aqueous solutions- Pergamon Press Ltd. London.

Powers, T.C.1958. "*Structure and physical properties of hardened Portland cement pastes*". J. American Ceramic Society, 41 (1). Pp.1-6.

Protección del Hormigón, Editorial Urmo, S.A. Ediciones. Bilbao España Pp. 126-130.

Pruckner F., Gjørsv O. E. 2004. "*Effect of CaCl₂ and NaCl additions on concrete corrosivity*". Cement and Concrete Research 34. Pp. 1209-1217.

- Rincón O.T. y Miembros de la red DURAR, *Manual de inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de hormigón armado*, CYTED. Maracaibo, Venezuela, 1997 (1era.Ed).
- Rodríguez P. Ramírez E. and González. A. 1994. "Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete". Magazine of Concrete Research, 46 (167). Pp.81-90.
- Rodríguez S. L. 2005. "Efecto de una extracción Electroquímica de Cloruros sobre el concreto Armado". Tesis de Maestría, Instituto de Metalurgia, Facultad de Ingeniería, UASLP. Pp. 71-75.
- Rodríguez S.L., Miranda J.M., Narváez L. and Robledo A. 2007. "Eficiencia de una Extracción electroquímica de Cloruros en probetas de mortero modificando tiempos y densidades de corriente". Congreso Internacional Materia, México-Morelia.
- Sánchez M.J., Garcés P., Climent M.A. 2006. "Electrochemical extraction of chlorides from reinforced concrete: variables affecting treatment efficiency". Materials of Construction 56 (284). Pp 17-26.
- Sanjuán M.A. y Castro Borges P. 2002. "Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto". Revista de IMCYC: Instituto Mexicano del cemento y concreto. Pp.1.
- Siegwart M., Lyness J., McFarland J. 2003. "Change of pore size in concrete due to electrochemical chloride extraction and possible implications for the migration of ions". Cement and Concrete Research 33, Pp. 1211-1221.
- Stern, and Geary, 1957. "Electrochemical Polarization No. 1 Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves". Journal of the Electrochemical Society, 104 (56) (1957) 56.
- Tritthart, J. 1995. "Changes in the composition of pore solution and solids during electrochemical chloride removal in contaminated concrete". Proc. 21 CANMET/ACI Int. Symp. On Advances in Concrete Technology, USA, SP 154-8. Pp. 127-143.

Referencias

Tuutti. K. 1982. *“Corrosion of steel in concrete”*. Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Swden, CBI Research Report no. 4 Pp. 82.

UNE 7050-1:1997. *“Tamices y tamizado de ensayo”*.

UNE 80240:1986, *“Método de ensayo de cementos. Análisis Químico”*. Determinación de cloruros. Método Volumétrico (Volhard).

UNE 83120:1988. *“Determinación de los compuestos de azufre”*.

UNE 83308-1993. *“Velocidad de Propagación de ultrasonidos”*.

Valle A., Pérez T., Martínez M. 2001. *“El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado”*. Publicación Técnica No. 82, Sanfandila, Querétaro, pp. 27.