

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS CIVIL Y DEL AMBIENTE

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



SOLUCIONES A LOS EFECTOS DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE  
CONCRETO ARMADO

AUTORES:

PÉREZ ANGLES, ANDREA

CÓD.: 2015203092

ZÍNGARA PACHECO, ALONSO

CÓD.: 2015701591

CURSO: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN - SECCIÓN B

DOCENTE: ING. CÉSAR ALFREDO ESPEZÚA LLERENA

04-12-2017

AREQUIPA - PERÚ

# Índice general

Índice de Tablas	IV
Índice de Figuras	v
<b>1. El problema de investigación</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Formulación del problema . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.4. Justificación de la investigación . . . . .	2
1.5. Limitaciones de la investigación . . . . .	3
<b>2. Marco teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes de la investigación . . . . .	4
2.1.1. Resistencia de materiales . . . . .	4
2.1.2. Materiales de construcción . . . . .	5
2.1.3. Análisis estructural . . . . .	5
2.2. Bases teóricas . . . . .	6
2.2.1. Prevención de la corrosión . . . . .	6
2.2.2. Corrosión por carbonatación del hormigón . . . . .	6
2.2.3. Corrosión por acción de cloruros . . . . .	7
2.2.4. Principales problemas presentados en las estructuras por corrosión	8

2.3.	Definiciones de términos básicos . . . . .	10
2.4.	Formulación de hipótesis . . . . .	10
2.4.1.	Hipótesis 1 . . . . .	10
2.4.2.	Hipótesis 2 . . . . .	10
2.5.	Formulación de variables . . . . .	11
<b>3.</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>12</b>
3.1.	Nivel de investigación . . . . .	12
3.2.	Diseño de investigación . . . . .	12
3.3.	Análisis hipótesis 1 . . . . .	12
3.3.1.	Protección catódica . . . . .	13
3.3.2.	Extracción electroquímica de cloruros . . . . .	13
3.3.3.	La alcalinización electroquímica . . . . .	16
3.3.4.	Ventajas y desventajas . . . . .	16
3.4.	Análisis hipótesis 2 . . . . .	18
3.4.1.	Descripción del método . . . . .	18
3.4.2.	Ventajas y desventajas . . . . .	18
<b>4.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>21</b>
4.1.	Conclusiones . . . . .	21
4.2.	Recomendaciones . . . . .	22
	<b>Bibliografía</b>	<b>23</b>

# Índice de tablas

3.1. Características de los tratamientos de rehabilitación electroquímica. (Tesis Doctoral Esther Moreno) . . . . .	13
--	----

# Índice de figuras

1.1. Estructura de obras civiles . . . . .	1
1.2. Corrosión en estructuras de concreto armado . . . . .	2
2.1. Diagrama de fuerza cortante y momento flector (Principal estudio en 'Resistencia de materiales') . . . . .	5
2.2. Proceso de carbonatación del hormigón . . . . .	7
2.3. Fenómeno electroquímico de la corrosión por iones de cloruro . . . . .	7
2.4. Efectos en el acero . . . . .	9
2.5. Efectos en el sistema hormigón armado . . . . .	9
3.1. Protección catódica con ánodo de sacrificio (Artículo: Protección catódica con ánodos galvánicos) . . . . .	14
3.2. Perfil de concentración de cloruros (en relación al peso del hormigón) después de 0,7, 8 semanas de tratamientos. . . . .	15
3.3. Evolución de la tensión (U) y de la corriente (I) durante el tratamiento de extracción electroquímica de cloruros de un muro de 60 m <sup>2</sup> aproximadamente. . . . .	15
3.4. Extensión de la zona re alcalinizada alrededor de la armadura a mitad del tratamiento (primera fase) y al término del tratamiento (segunda fase) . . . . .	17
3.5. Periodo de iniciación de corrosión sin protección y con inhibidores de corrosión . . . . .	19
3.6. Inhibidores de corrosión migratorios . . . . .	20

# Introducción

La utilización del concreto en masa y con acero de refuerzo supera actualmente a todos los otros materiales considerados en conjunto, hecho que confiere una enorme importancia al conocimiento de la problemática que plantea la durabilidad de las estructuras de concreto armado actuales y futuras.

Las implicaciones económicas derivadas del aumento del número de casos de estructuras prematuramente deterioradas por corrosión han alcanzado cifras alarmantes. De allí que las consideraciones desde el punto de vista de corrosión desde la etapa de diseño, en el mantenimiento y en las intervenciones en estructuras dañadas, adquieran carácter obligatorio.

A lo largo de esta investigación analizaremos las alternativas de solución más viables para reducir los daños por corrosión en estructuras de concreto armado, describiendo cada método, las condiciones ideales en que se deben usar, sus ventajas y desventajas, llegando a conclusiones y recomendaciones acerca de cada posible solución y en qué ocasiones usarlas.

El trabajo consta, en primer lugar, de la descripción y planteamiento del problema, analizando además los objetivos generales y específicos. Se detallará también la justificación y limitación de la investigación.

Se describirá, en segundo lugar, los antecedentes de esta investigación y definiciones básicas, estableciendo también las causas por las que se produce la corrosión en elementos de concreto armado, sus efectos en dichas estructuras, para luego proceder a presentar las hipótesis de este trabajo, deduciendo según criterio las mejores opciones de métodos contra la corrosión. Se describirá además cada una de éstas, analizando sus ventajas y desventajas. Finalmente, se expondrán las conclusiones y recomendaciones finales del trabajo.

# Capítulo 1

## El problema de investigación

### 1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad y desde hace tiempo, el material de construcción más difundido es el concreto, cuyo consumo supera al de todos los materiales de construcción. Una parte muy importante de las estructuras de concreto está reforzada con varillas de acero y la corrosión de estos refuerzos es la causa principal del deterioro de las mismas.

Uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad estructural de las obras civiles como puentes, túneles, carreteras, muelles, etc., de un país es la corrosión de las varillas de los sistemas de concreto reforzado. El reporte Hoar calculó pérdidas por corrosión en el reino Unido de 250 millones de libras esterlinas en el sector de la construcción.

Las primeras observaciones de corrosión del acero embebido en el concreto fueron hechas a principios de este siglo, principalmente en ambientes marinos y plantas químicas. Sin embargo es hasta mediados de este siglo cuando se inicia el estudio sistemático de este problema habiendo llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de las investigaciones sobre corrosión a nivel mundial, por los problemas y tipos de estructuras involucrados [1].



Figura 1.1: Estructura de obras civiles



Figura 1.2: Corrosión en estructuras de concreto armado

## 1.2. Formulación del problema

¿Qué condiciones nos indican el tipo de solución a usar en cada caso de corrosión en estructuras de concreto armado?

## 1.3. Objetivos

- a) Determinar la solución más viable ante la corrosión en estructuras de concreto armado, según las condiciones de cada situación en que se presenta dicho fenómeno.
- b) Analizar las ventajas y desventajas de los principales métodos contra la corrosión en concreto armado.

## 1.4. Justificación de la investigación

Esta investigación se realiza para entender con mayor precisión cada uno de los métodos de prevención a la corrosión en estructuras de concreto armado; para que podamos determinar la mejor alternativa de solución en cada situación de riesgo por corrosión. Este estudio tiene gran relevancia en lo contemporáneo, ya que puede dar aportes prácticos en la prevención de daños de la corrosión en obras civiles. Si bien ya existen numerosos estudios sobre este tema y gracias a ello, diferentes soluciones ante este problema, se debe tener claro qué método usar específicamente en cada situación, dependiendo de las condiciones en que se dé, logrando así una optimización en obra.



## 1.5. Limitaciones de la investigación

Esta investigación es únicamente explicativa (no experimental), por ello nos vemos obligados a recurrir a datos ya investigados acerca de temas relacionados con esta investigación, como por ejemplo, resistencia en ciertos elementos expuestos a corrosión, tiempo de desgaste, etc.; no pudiendo corroborarlos por nuestra propia cuenta, habiendo ya una posibilidad de error ajena a nuestros experimentos. Sin embargo, y como es debido, citamos cada uno de los estudios utilizados para esta investigación.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Antecedentes de la investigación

Es bien sabido cómo afecta la corrosión por ambiente marino a las diferentes estructural, los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta con respecto a la construcción en zonas con un medio abrasivo, siendo víctima el concreto armado a usar. La investigación es un estudio de diferentes métodos para contrarrestar la corrosión de estructuras de concreto armado, con la finalidad de dar una conclusión de cuál es el método o solución más recomendada, y más efectiva.[2] El estudio se concentró en mayor medida en la especificación de conceptos, datos necesarios, conceptos fundamentales, posibles soluciones y de manera principal, la aplicación en estructuras reales y ver la efectividad de cada método.

La recolección de los datos, se realizó a través de la consulta de diferentes libros, y base de datos para poder tener las herramientas necesarias para el propio estudio. El análisis de los resultados permitió determinar los aspectos positivos y negativos de cada solución y a partir de allí, se estableció una conclusión. También se consultó el trabajo especial de grado que en enero 09 de 2001, fue presentado por el Ingeniero Eduardo Santos como requisito para optar el título de Magister Scientiarum en Ingeniería Civil que se dicta en la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, Campus Gustavo Galindo (Guayaquil, Ecuador). De manera adicional, a lo largo de nuestra carrera universitaria podemos denotar algunas materiales necesarias para poder realizar esta investigación, a continuación presentamos las principales, buscando globalizar a gran escala los conocimientos obtenidos.

#### 2.1.1. Resistencia de materiales

La resistencia de materiales clásica es una disciplina de la ingeniería mecánica, la ingeniería estructural y la ingeniería industrial que estudia la mecánica de sólidos

deformables mediante modelos simplificados. La resistencia de un elemento se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse, adquirir deformaciones permanentes o deteriorarse de algún modo. Un modelo de resistencia de materiales establece una relación entre las fuerzas aplicadas, también llamadas cargas o acciones, y los esfuerzos y desplazamientos inducidos por ellas. Generalmente las simplificaciones geométricas y las restricciones impuestas sobre el modo de aplicación de las cargas hacen que el campo de deformaciones y tensiones sean sencillos de calcular.[3]

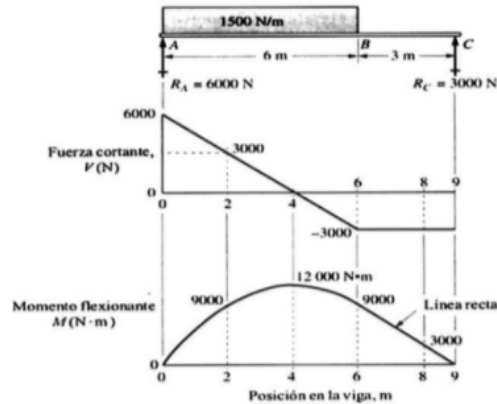


Figura 2.1: Diagrama de fuerza cortante y momento flector (Principal estudio en 'Resistencia de materiales')

### 2.1.2. Materiales de construcción

Un material de construcción es una materia prima o con más frecuencia un producto manufacturado, empleado en la construcción de edificios u obras de ingeniería civil. Los materiales naturales sin procesar (arcilla, arena, mármol) se suelen denominar materias primas, mientras que los productos elaborados a partir de ellas (ladrillo, vidrio, baldosa) se denominan materiales de construcción. De manera adicional se estudian su clasificación, amplia variedad, tipos, propiedades, etc.

### 2.1.3. Análisis estructural

Análisis estructural se refiere al uso de las ecuaciones de la resistencia de materiales para encontrar los esfuerzos internos, deformaciones y tensiones que actúan sobre una estructura resistente, como edificaciones o esqueletos resistentes de maquinaria. Igualmente el análisis dinámico estudiaría el comportamiento dinámico de dichas estructuras y la aparición de posibles vibraciones perniciosas para la estructura. Además se puede resaltar importantes temas con respecto a la materia: Determinación de esfuerzos, determinación de resistencia y rigidez, modelos materiales, método

de los nodos, elementos de fuerza cero, análisis de estructuras hiperestáticas, análisis dinámico de estructuras.[4]

## 2.2. Bases teóricas

### 2.2.1. Prevención de la corrosión

Para prevenir que exista la posibilidad de que en un futuro la corrosión provoque un deterioro en la estructura de hormigón armado, se debe tomar en cuenta 3 parámetros que son:

- Que el hormigón tenga una estructura de poros adecuada
- Que el recubrimiento tenga el espesor suficiente
- Que el hormigón esté libre de cloruros

A partir de los parámetros anteriores, es importante tener en cuenta:

- Los procesos de difusión de los ataques ya sea por carbonatación o por la presencia de iones de cloruro
- La humedad
- La temperatura

Estos parámetros indicados nos ayudarán de una u otra forma para poder prevenir la corrosión y que ésta no cause daño en la estructura de hormigón armado.

### 2.2.2. Corrosión por carbonatación del hormigón

Cuando el  $\text{CO}_2$  que es liberado de forma masiva en la atmósfera penetra en el hormigón se produce una reacción entre los hidróxidos de la fase líquida intersticial y los compuestos hidratados del cemento, de tal manera que cuando todo el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}(\text{OH})$  y  $\text{K}(\text{OH})$  presentes en los poros han sido carbonatados, el pH empieza a decrecer, dando como resultado un medio ácido que produce un constante y progresivo efecto corrosivo en el acero.

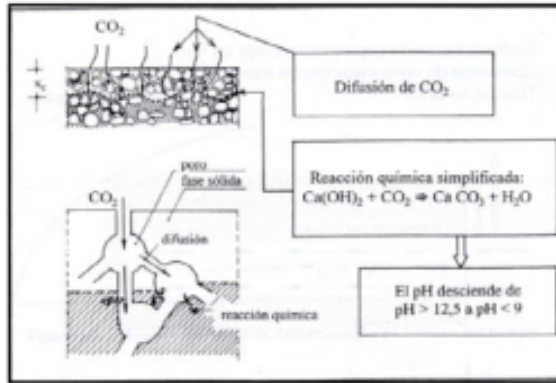


Figura 2.2: Proceso de carbonatación del hormigón

### 2.2.3. Corrosión por acción de cloruros

Este fenómeno generalmente se produce en las zonas costeras, los iones de cloruros que se encuentran en el ambiente penetran en el hormigón destruyendo la capa protectora que cubre al acero y provocando una pequeña zona anódica con relación a la catódica, las condiciones desfavorables de la superficie producen una profunda y acelerada penetración de la corrosión en el acero de refuerzo.

La presencia de cloruros en el concreto puede provenir de sus componentes como en el cemento, agua, agregados, aditivos o también en el ambiente.

El componente del cemento que reacciona con los iones de cloruro es el Aluminato tricálcico (C3A), formando Cloro aluminato cálcico lo cual provoca la disminución del pH provocando el medio ácido que genera la corrosión.

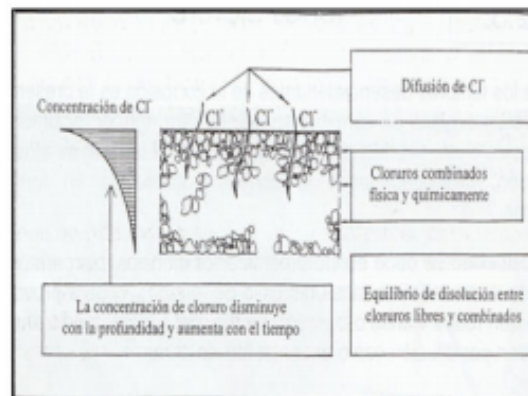


Figura 2.3: Fenómeno electroquímico de la corrosión por iones de cloruro

## 2.2.4. Principales problemas presentados en las estructuras por corrosión

La corrosión es una de las causas más comunes de deterioro de las estructuras de hormigón armado, esta puede afectar al acero (por reducción de su sección y propiedades mecánicas), al hormigón (por su fisuración) y a la sección en conjunto acero-hormigón (por pérdida de adherencia).

- Efectos en el hormigón

Debido a la formación de productos derivados durante el proceso de corrosión de armaduras dentro de un elemento estructural, ocurre un fenómeno de expansión volumétrica, esta expansión a su vez provoca tensiones radiales que generan esfuerzos de tracción al hormigón.

Cuando la generación de estos productos de corrosión es excedida por la capacidad de migración de los mismos a través de los poros del hormigón, en algún punto los esfuerzos de tracción del hormigón son superados por los esfuerzos de tracción producidos por los productos derivados de la corrosión. Esto provoca fisuración y desprendimiento del recubrimiento.

Cuando se trata de un elemento sometido principalmente a compresión (por ejemplo, las columnas) y se llega a desprender el hormigón, la consecuencia es la pérdida de sección resistente, lo cual disminuye la rigidez del elemento.[5]

Cuando se trata de un elemento sometido principalmente a flexión, como las vigas, se produce la pérdida de resistencia a la compresión del hormigón circundante a la armadura corroída, lo cual disminuye la ductilidad y aumenta la presencia de grietas.

- Efectos en el acero

La reducción de la sección transversal de la armadura de refuerzo es el efecto más inmediato de la corrosión, debido a la disolución del metal en las zonas anódicas. Esto implica la pérdida de capacidad resistente de forma progresiva y afecta la seguridad y la funcionalidad de la estructura. La corrosión puede producirse de manera uniforme a lo ancho de sección de la armadura, en estos casos la pérdida de resistencia es aproximadamente proporcional a la pérdida de sección. Distinto caso supone la presencia de picaduras, las cuales suponen una concentración de esfuerzos de tensión triaxiales que producen un comportamiento mecánico frágil en el material. (Tesis doctoral Esther Moreno) [8]

Bajo la acción de cloruros se produce una corrosión localizada o corrosión por picaduras, que reducen asimétricamente la sección transversal. Bajo la acción de carbonatación la penetración de ataque y la reducción de la sección de las armaduras de acero son homogéneas.

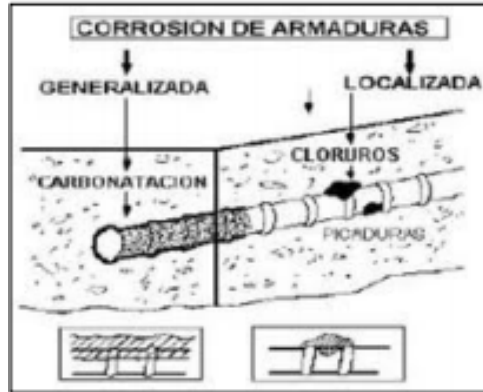


Figura 2.4: Efectos en el acero

- Efectos en el sistema hormigón armado

Una de las características que permiten que en acero y el hormigón trabajen conjuntamente es la adherencia junto con el anclaje entre ambos, durante el proceso de corrosión aparecen productos que quedan expuestos al contacto con el hormigón, por lo tanto, la naturaleza de la frontera entre el acero y hormigón es variable, y se pierde la adherencia con el acero.

Al incrementarse las tensiones radiales ejercidas por los productos de la corrosión, se producen en mayor medida las fisuras en el hormigón. A niveles pequeños de corrosión se aumenta la adherencia entre el acero y el hormigón, pero con niveles de corrosión que producen las primeras fisuras, la adherencia entre ambos materiales disminuye súbitamente

Una varilla corroída, presenta mayores afectaciones, como es lógico, en la corruga que en la sección en sí. En barras de refuerzo en las que se ha perdido el 3



Figura 2.5: Efectos en el sistema hormigón armado

## 2.3. Definiciones de términos básicos

- Corrosión

Es el proceso gradual destrucción y desintegración de los materiales debido a un proceso electro - químico, químico o de erosión gracias a la interacción del material con el medio que lo rodea.

- Acero de construcción

Con respecto a su composición, es una aleación de hierro y carbono. El acero es un material de construcción, el cual se caracteriza por ser el más versátil y adaptable. Ampliamente usado y a un precio relativamente bajo, el acero combina la resistencia y la trabajabilidad, lo que se presta a fabricaciones diversas. Asimismo sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos con calor, trabajo mecánico, o mediante aleaciones.

- Corrosión en acero

Para el caso del fierro y del acero, que son los materiales de construcción más comunes, el proceso de corrosión considera la formación de pequeñas pilas galvánicas en toda la superficie expuesta, presentándose un flujo de electrones de las zonas anódicas donde se disuelve el fierro hacia las zonas catódicas donde se desprende hidrogeno o se forman iones hidroxilo (álcali); para cerrar el circuito eléctrico se requiere la presencia de un electrolito proporcionado por el medio.[7]

- Corrosión en concreto armado

Es un problema de degradación de las estructuras de concreto debido a procesos de corrosión con respecto al acero de refuerzo, estribos y demás elementos metálicos. Esto es de vital importancia debido a la debilidad estructural que se da y la cual no es permisible por nosotros.

## 2.4. Formulación de hipótesis

### 2.4.1. Hipótesis 1

Los métodos electroquímicos de rehabilitación ante la corrosión en estructuras de concreto armado son la mejor opción de prevención de daños en estructuras de obras civiles.

### 2.4.2. Hipótesis 2

La solución más efectiva a la corrosión de estructuras de concreto armado es el uso de inhibidores de corrosión.



## 2.5. Formulación de variables

- Variable dependiente: corrosión o deterioro de estructuras de concreto armado
- Variable independiente: método o solución
- Variables extrañas: condiciones climáticas y correcta construcción de estructura

# Capítulo 3

## Marco metodológico

### 3.1. Nivel de investigación

Esta investigación es de tipo explicativa, debido a que expondremos de manera teórica las bases de cada método de solución ante la corrosión, mas no realizaremos una comprobación experimental de dichos métodos.

### 3.2. Diseño de investigación

El tipo de investigación según la estrategia adoptada para responder al problema planteado es documental explicativa.

### 3.3. Análisis hipótesis 1

Los procedimientos más utilizados para la rehabilitación de EHA mediante métodos electroquímicos se basan en la polarización catódica del acero y son:

- La re alcalinización electroquímica (RAE)
- Extracción electroquímica de cloruros (EEC)
- Protección catódica (PC)

Tabla 3.1: Características de los tratamientos de rehabilitación electroquímica. (Tesis Doctoral Esther Moreno)

	<b>RAE</b>	<b>ECC</b>	<b>PC</b>
Objetivo de la protección	Pasivar el acero	Extraer cloruros	Apoyar al potencial
Duración de la polarización	Temporal(3-14 días)	Temporal(6-10 sem.)	Permanente
Densidad de corriente sobre la superficie de hormigón	0,8-2 A/m <sup>2</sup>	0,8-2 A/m <sup>2</sup>	3-20 A/m <sup>2</sup>

### 3.3.1. Protección catódica

La protección catódica es uno de los métodos electroquímicos que más se utiliza para evitar que exista corrosión en las estructuras, puede ser por ánodo de sacrificio el cual consiste en utilizar un elemento con una electronegatividad menor el cual actuar y como ánodo mientras que el elemento a proteger actuar y como cátodo produciendo así que el flujo de electrones vaya de cátodo a ánodo haciendo que el ánodo de sacrificio sufra el proceso de corrosión, otra forma de protección catódica es por corriente impresa el cual consiste en proporcionar corriente continua, el terminal positivo de la fuente debe conectarse a un ánodo auxiliar, mientras que el negativo se conecta a la armadura a proteger produciendo así que el elemento a proteger actúe como cátodo y así evitar la corrosión.

La alcalinización electroquímica (RAE) y la extracción electroquímica de cloruros (EEC) han mostrado su capacidad de eliminar, en pocas semanas, las causas de la corrosión de las estructuras de hormigón armado (EHA), razón por la cual reciben, actualmente, una especialísima atención.[10]

### 3.3.2. Extracción electroquímica de cloruros

La técnica electroquímica de extracción de cloruros en las estructuras de hormigón contaminado por cloruros es muy parecida a la utilizada para la re alcalinización: además, mientras que se extraen los cloruros, se restablecen también las condiciones de alcalinidad en las armaduras. La extracción de cloruros, sin embargo, requiere tiempos de aplicación sensiblemente más elevados de los necesarios para la re alcalini-

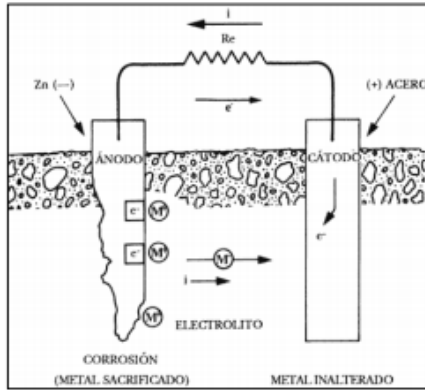


Figura 3.1: Protección catódica con ánodo de sacrificio (Artículo: Protección catódica con ánodos galvánicos)

zación. La posibilidad de aplicar esta técnica fue verificada por el Battelle Columbus Laboratories, en 1975. Se ejecutaron los ensayos sobre probetas aplicando 100 V, por un periodo de 12-24 horas, utilizando redes de titanio platinado como ánodo e hidróxido de calcio como electrolito. Se utilizó también una resina de intercambio iónico para limitar el desprendimiento de cloro. Trabajos posteriores demostraron que era necesario aplicar, por lo menos, 0,46 A/m. Se desarrolló también un ensayo de campo sobre una pequeña sección de un puente en Ohio, con resultados prometedores. Un ensayo paralelo fue llevado a cabo en los mismos años por el Kansas Department of Transportation, que utilizó una tensión de 220 V y corrientes de 22 A/m y ánodo de cobre. Además de la elevada temperatura alcanzada, el efecto más negativo fue un considerable aumento de la porosidad del hormigón. En Europa se han efectuado trabajos experimentales que han llevado a la comercialización del proceso Norcure, puesto a punto a mediados de los 80 por la sociedad noruega Norsk Overflate Teknik. Parámetros típicos del proceso de la extracción de cloruros son:

- Tensión aplicada: 40V máximo
- Tiempo: de tres semanas a tres meses
- Compartimento anódico exterior: ánodos a base de titanio activado, sumergidos en una disolución saturada de hidróxido de calcio.

Hasta ahora se han tratado con el proceso Norcure aproximadamente 40.000 m<sup>2</sup> de hormigón armado, pero sólo unos pocos proyectos tienen amplia documentación de los resultados obtenidos. Entre estos últimos figura un proyecto llevado a cabo en Estados Unidos y Canadá con el soporte SHRP (Strategic Highway Research Program) y uno en Suiza bajo control de la Politécnica Federal de Zurich [11,12]. En la figura 3.2, se indican algunos datos experimentales que hacen referencia a la extracción de cloruros al variar el tiempo de aplicación, obtenidos en los ensayos americanos.

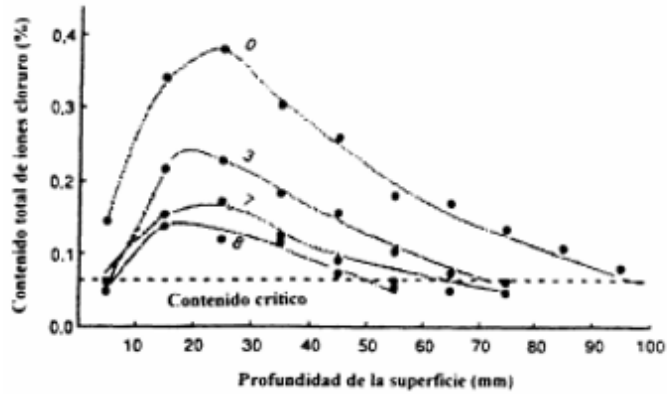


Figura 3.2: Perfil de concentración de cloruros (en relación al peso del hormigón) después de 0,7, 8 semanas de tratamientos.

En la figura 3.3, muestra la evolución de la tensión aplicada y de la corriente en el caso del proyecto suizo. La reducción de la corriente durante el tratamiento es debida al aumento de la resistencia del hormigón. Esta disminución contribuye, junto a la disminución de los cloruros y de su número de transporte, a reducir la eficiencia del proceso a medida que éste avanza. Los experimentos seguidos por la Politécnica de Zurich muestran una reducción del total de los cloruros parecida.

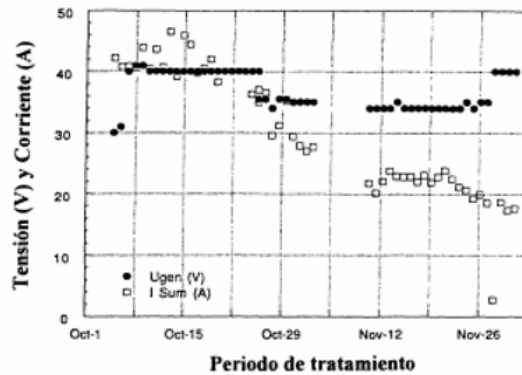


Figura 3.3: Evolución de la tensión (U) y de la corriente (I) durante el tratamiento de extracción electroquímica de cloruros de un muro de 60 m2 aproximadamente.

Estos ensayos han sido efectuados sobre un muro, caracterizado por una penetración de los cloruros muy heterogénea. Para la extracción de los cloruros en las zonas de más contaminación, ha sido necesario un doble tratamiento. Los mapas de potencial, efectuados antes del tratamiento, mostraban que, estaban sometidas a corrosión; mientras que los efectuados después del segundo tratamiento (que muestran potenciales 80-100 mv más positivos) indican la reactivación de todas las armaduras (Fig. 11). Para las estructuras contaminadas por cloruros valen, por lo que concierne a la

distribución de la corriente, las mismas consideraciones hechas para las estructuras carbonatadas. Por lo tanto, la extracción de cloruros, como la alcalinización, de hecho afecta solamente al recubrimiento.

### **3.3.3. La alcalinización electroquímica**

Las condiciones en las que en la práctica se realiza el proceso son las siguientes:

- Densidad de corriente, general mente de 1-2 A/m<sup>2</sup>, referida a la superficie de las armaduras.
- Tiempo: de 3 días a 3 semanas.
- Compartimento anódico extremó al hormigón: constituido por una disolución alcalina de carbonato de sodio, que se renueva a medida que la acidez producida por la reacción tiende a reducir el ph. Los ánodos empleados son frecuentemente a base de titanio activado.

Una vez que el hormigón cercano a las armaduras ha sido re alcalinizado, aproximadamente un quinto de la alcalinidad que se ha producido se aplica en elevar la alcalinidad del hormigón que rodea las armaduras y los 4/5 que quedan en elevar la alcalinidad del hormigón adyacente a esta primera zona, que forma parte de lo que podemos llamar compartimento central. Se puede notar como en este compartimento la alcalinidad entra, pero prácticamente no sale. En consecuencia, el volumen de hormigón re alcalinizado crece con el tiempo. Naturalmente, la re alcalinización concierne solamente al hormigón afectado por la circulación de corriente. En el caso de las geometrías más usuales, la distribución de ph alrededor de las armaduras resulta la de la figura 3.4.

### **3.3.4. Ventajas y desventajas**

#### **Ventajas**

- Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente.
- Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.
- Con una sola instalación se pueden proteger superficies muy grandes.
- Potencial y corriente variables.
- Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada.
- Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.

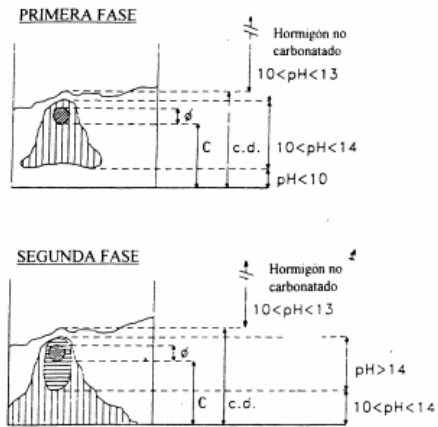


Figura 3.4: Extensión de la zona re alcalinizada alrededor de la armadura a mitad del tratamiento (primera fase) y al término del tratamiento (segunda fase)

### Desventajas

- Ni la RAE ni la EEC son capaces de repasivar superficies de acero muy corroídas.
- La RAE y la EEC repasivan, en cambio, las muestras de acero con grados incipientes de corrosión.
- La MER pueden considerarse como métodos adecuados de prevención pero, estrictamente hablando, no como métodos de rehabilitación.
- Puede causar problemas de interferencia.
- Está sujeto a rotura de la fuente de corriente.
- Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.
- Requiere de una fuente de corriente continua.
- Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilidad por acción del hidrógeno.
- Conexiones y cables sujetos a roturas.
- Tiene un costo elevado.

## 3.4. Análisis hipótesis 2

### 3.4.1. Descripción del método

Los aditivos inhibidores de la corrosión son sustancias químicas que, añadidas al agua de amasado, mantienen pasivo al acero de las armaduras en presencia de los factores agresivos, por lo que pueden resultar eficaces para prevenir el efecto de la carbonatación o de los iones cloruro en las estructuras de hormigón armado, la acción de los inhibidores no es definitiva, simplemente retrasan el proceso de corrosión.

La aplicación de inhibidores en la protección de estructuras ya construidas se lleva a cabo directamente sobre la superficie del hormigón. El compuesto orgánico migra a través de la estructura porosa endurecida del hormigón llegando a la armadura por fenómenos de acción capilar, difusión de vapor y atracción iónica. Una vez ha alcanzado la armadura, forma una capa debido a un triple efecto: la separación en iones de las sales, reacción y enlace con la superficie del metal y, por último, fijación de la capa por adsorción física.

Como consecuencia, se produce una drástica reducción de la corrosión al producirse un cambio de potencia en las áreas anódicas y catódicas, por formación de una capa hidrofóbica que impide la penetración de iones cloruro y desplazando los que puedan estar presentes en la superficie del acero. En estructuras de nueva construcción, la aplicación de este sistema se lleva a cabo mediante la adición de inhibidores directamente durante el amasado del hormigón.[11]

### 3.4.2. Ventajas y desventajas

#### Ventajas

- Los Inhibidores de Corrosión Migratorios (MCI) rehabilitan estructuras de concreto existentes y extienden la vida útil de nuevas estructuras. Muy a menudo el acero corroído en el concreto deteriorado es la causa de reparaciones muy costosas, grandes pérdidas financieras. Una característica única de los Inhibidores de Corrosión Migratorio es que el producto migra una distancia considerable dentro del concreto para proteger el acero embebido.
- Una vez que una estructura de concreto es construida, resulta imposible recubrir el acero de refuerzo con una resina adherida por fusión para protegerlo de la corrosión. El inhibidor, sin embargo, pueden agregarse fácilmente a concreto nuevo o utilizarse para rehabilitaciones y los mismos no demoraran los tiempos de construcción o incrementaran sus costos considerando solo el pequeño costo producto.
- El MCI no tienen que estar en contacto con el acero de refuerzo durante su





Figura 3.5: Periodo de iniciación de corrosión sin protección y con inhibidores de corrosión

aplicación debido a que ellos pueden migrar dentro del concreto hacia el acero y protegerlo contra la corrosión.

- Cuando son especificados para usarse en construcciones nuevas, la solución brinda al acero de refuerzo una protección contra la corrosión superior contra otros métodos.

### Desventajas

- Este método no se puede usar luego de encofrar el elemento estructural, debido a que el inhibidor se incluye durante la mezcla.
- Sólo se recurre a los inhibidores cuando resultan rentables, lo que limita por lo general su utilización a recintos gaseosos cerrados o a fluidos que se recirculan, pues, en atmósfera abierta, o en instalaciones por las que el fluido pasa sólo una vez, suelen resultar excesivamente caros.
- Compatibilidad con el proceso técnico: Debe garantizarse, además, que no existe incompatibilidad del inhibidor con el producto y que el empleo de aquél no introduce dificultades en el proceso técnico. Por ejemplo, el requisito de que los inhibidores tengan grupos funcionales fuertemente polares, para asegurar su adsorción sobre las superficies a proteger, les confiere un cierto grado de actividad superficial, pudiendo comportarse, con frecuencia, como jabones o detergentes

y generar espumas, emulsiones o lodos por desprendimiento de suciedades u óxidos. Como consecuencia, para evitar estos problemas, es a menudo deseable complementar el inhibidor con agentes antiespumantes, antiemulgentes, dispersantes o germicidas, entre otros. No obstante, en ciertos medios, como los baños de decapado, es frecuente que el inhibidor esté compuesto por una sola sustancia, pero en muchos otros está constituido por mezclas más o menos complejas, a las que se llega por vía empírica, lo que explica que muchos de ellos estén protegidos por patentes.

- **Compatibilidad con otros materiales:** En ciertos casos, una sustancia puede inhibir el ataque de un metal y acelerar el de otro, como sucede, por ejemplo, con algunas aminas que protegen eficazmente al acero y atacan severamente a las aleaciones de cobre. Otras veces el inhibidor puede producir, por reacción con el sistema, algún producto dañino, como ocurre en la reducción de los nitratos para formar amoníaco, que causa corrosión bajo tensiones en el cobre y los latones. La única forma de evitar estos problemas pasa por el perfecto conocimiento de todos los componentes metálicos del sistema y de las características del inhibidor, teniendo siempre presente la no “universalidad” de cualquier inhibidor, es decir, que ninguno de ellos actúa como tal en todas las circunstancias (metal, medio y condiciones) en las que la corrosión pueda tener lugar.
- **Evitar la bio-fertilización:** Algunos aditivos, como los polifosfatos pueden contribuir a la proliferación de organismos vivos, que pueden impedir la fijación del inhibidor sobre la superficie metálica, dar lugar a fenómenos de aireación diferencial e, incluso, obturar tubos y conducciones. Estos efectos obligan al uso frecuente de germicidas en muchos sistemas, como los circuitos con torres de enfriamiento de agua. Para este fin se recurre a adiciones discontinuas de cloro, clorofenatos, sales de amonio cuaternario, cloraminas y acroleína

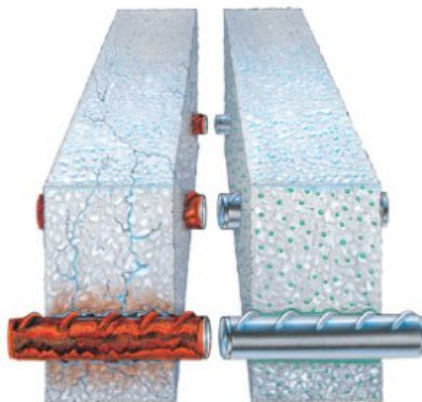


Figura 3.6: Inhibidores de corrosión migratorios

# Capítulo 4

## Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

- Como conclusión principal, podemos aclarar que la solución más adecuada para la corrosión en medios abrasivos son los diferentes métodos electroquímicos indicados en el documento, pues tienen más ventajas que el método de Inhibidores, por su mayor efectividad, control en el proceso y facilidad para su instalación.
- Existen varios factores que pueden potenciar el proceso de corrosión. En este trabajo se ha analizado el efecto de la variación de la relación agua/cemento y espesor de recubrimiento. A mayor relación agua/cemento, mayor permeabilidad del hormigón, el cual será más proclive ante factores desencadenante de corrosión. A menor espesor de recubrimiento, la agresividad del medio circundante afectará más al hormigón.
- Se han analizado varios factores desencadenantes de la corrosión, especialmente la carbonatación y la acción de iones de cloruro. Respecto a la carbonatación, se estableció que en ambientes con altas concentraciones de CO<sub>2</sub> y con humedades bajas en el ambiente, se acelera el proceso de corrosión. Respecto a la acción de iones de cloruro, se presentan estos casos en ambientes salinos.
- En ambientes con altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, en que la humedad sea baja, se produce en el acero un proceso de corrosión que afecta homogéneamente su sección. En ambientes salinos, por otro lado, ante relaciones agua/cemento bajas y recubrimientos mínimos, la acción de los iones de cloruro pueden afectar al acero, principalmente de manera localizada, produciéndose una corrosión de tipo picadura, que afecta heterogéneamente la sección y favorece la concentración de esfuerzos triaxiales en las armaduras.

## 4.2. Recomendaciones

- Si en el hormigón se observa que existen síntomas de corrosión como mancha de óxidos o fisuraciones en el acero de la estructura, se debe eliminar todo el material. Es necesario que esta medida se realice hasta la parte posterior de la armadura dejando libres unos dos centímetros alrededor de la misma con el fin de poder realizar una correcta limpieza, y así eliminar completamente todos los productos de corrosión del acero y permitir que el material de reparación envuelva correctamente las barras.
- El tiempo de iniciación del proceso de corrosión, así como el periodo de propagación pueden ser aumentados significativamente mediante la utilización de inhibidores de corrosión. Estos pueden aplicarse en el proceso constructivo, o pueden emplearse para retardar el inicio del proceso en estructuras ya construidas.
- Si las pérdidas de sección que existen en el acero son mínimas no es necesario restaurar la capacidad nominal del acero ya que con ese porcentaje no existen problemas estructurales, pero si las pérdidas pasan el quince por ciento se deberá recalcular la estructura o restaurar la capacidad inicial del acero.

# Bibliografía

- [1] Santos, I. (2001). Corrosión de acero en elementos de hormigón armado: Vigas y Columnas. Doctorado. Facultad de Ingenierías en Ciencias de la Tierra.
- [2] Rios, L. (2017). Materiales Construcción. Definición, características y tipos. [online] materialesconstruccion. Available at: <https://materialesconstruccion.wordpress.com/2010/11/27/materiales-construccion-definicion-caracteristicas-y-tipos/>
- [3] Martins, M.C., Pereira, C.M., Girault, H.H y Silva, F.; “Specific adsorption of tetraalkylammonium cations on the 1,2-dichloroethane/water interface”. *Electrochimica Acta* **50**,135,(2004).
- [4] Ding, Zhifeng. “Spectroelectrochemistry and photoelectrochemistry of charge transfer at liquid/liquid interfaces”. *Tesis, EPFL*,(1999).
- [5] CivilGeeks.com. (2017). Evaluación de la corrosión en las estructuras de concreto armado (I). [online] Available at: <https://civilgeeks.com/2011/11/02/evaluacion-de-la-corrosion-en-las-estructuras-de-concreto-armado-i/> *Technical Note 101*
- [6] Concreto, R. (2017). Evaluación estructural de vigas deterioradas por corrosión. [online] Blog 360 grados en concreto. Available at: <http://blog.360gradosenconcreto.com/ambientes-marinos-evaluacion-estructural-de-vigas-deterioradas-por-corrosion/>. *technical note 20*, 2097, (2005).
- [7] Cobo Escamilla, A. (2017). Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación. Doctorado. Universidad San Marcos de Lima. Santos, I. (2001). Corrosión de acero en elementos de hormigón arm
- [8] Moreno, E. (2017). Corrosión de Armaduras en estructuras de hormigón: Estudio experimental de la variación de ductilidad en armaduras corroídas aplicando el criterio de Acero Equivalente.. Doctorado. Facultad de Ingenieras Físicas y Formales.
- [9] Leal, J. and perfil, V. (2017). Cómo redactar los antecedentes de la investigación. [online] Asesoriatensis1960.blogspot.pe. Available at: <https://asesoriatensis1960.blogspot.pe/2010/12/antecedentes-de-la-investigacion.html>

- [10] Anon, (2017). [online] Available at: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/posadas/trabajos/0804.pdf>
- [11] Revistademetalurgia.revistas.csic.es. (2017). Citar un sitio web - Cite This For Me. [online] Available at: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/article/viewFile/1039/1051>