

**MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO: MÉTODOS,
APLICACIONES Y FACTORES DE IMPACTO**

Mildred Karolay Villarreal Guerrero

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, Diciembre de 2020**

**MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN DE LA CORROSIÓN: MÉTODOS,
APLICACIONES Y FACTORES DE IMPACTO EN ESTRUCTURAS DE
CONCRETO REFORZADO.**

Mildred Karolay Villarreal Guerrero

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIER(A)O QUÍMIC(A)O**

Director:

Dr. Jaqueline Corredor Acuña

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, Noviembre de 2020**

Dedicatoria

Dedicó este trabajo a Dios, porque ha sido la guía para alcanzar mis metas, a mis padres Orlando Amador Villarreal Sanjuanelo y Yorleida Guerrero Márquez quienes a diario me motivan a seguir a delante brindándome su confianza y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme el don del entendimiento, a mi madre por ser mi guía, ejemplo y apoyo incondicional, a mi padre por su sacrificio diario para que pudiera ser profesional, a mis hermanos por ser fuente de motivación, a todas esas personas que me han brindado su gentileza y han sido un apoyo incondicional, por último, a los docentes por compartir su conocimiento y ser una guía en mi formación profesional.

GLOSARIO

Hormigón: el hormigón es la mezcla de cemento, agua, arena y piedra.

Fraguado: proceso de endurecimiento del hormigón

Curado: proceso en el que se mantiene la humedad de la mezcla de hormigón durante el endurecimiento.

Cemento portland: conglomerante o cemento hidráulico compuesto por silicatos de calcio.

Embebido: que se encuentra incrustado en otro material.

CP: protección catódica

CEC: extracción electroquímica del cloro

CI: inhibidores de corrosión

RC: concreto reforzado

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 OBJETIVO GENERAL	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. CORROSIÓN EN CONCRETOS REFORZADOS (RC)	15
4.1 CONCRETO REFORZADO.....	15
4.1.1 GENERALIDADES.	15
4.1.1.1 HORMIGÓN	15
4.1.1.2 ACERO.	15
4.1.1.3 CONCRETO Y ACERO DE REFUERZO	16
4.2 CORROSIÓN	17
4.2.1 MECANISMOS DE CORROSIÓN	17
4.2.1.1 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA.....	17

4.2.1.2	CORROSIÓN QUÍMICA.....	20
4.3	MECANISMOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO.....	20
4.3.1	FACTORES QUE ACELERAN LA CORROSIÓN.....	22
4.3.1.1	HUMEDAD.....	22
4.3.1.2	TEMPERATURA.....	22
4.3.1.3	CONCENTRACIÓN DE OXIGENO.....	¡Error! Marcador no definido.
4.3.1.4	CONCENTRACIÓN DE IONES CLORUROS	23
4.3.1.5	FORMACIÓN DE CELDAS GALVÁNICAS	¡Error! Marcador no definido.
4.3.2	MECANISMOS DE CORROSIÓN	20
4.3.2.1	CARBONATACIÓN O MECANISMO DE REACCIÓN ACIDA.....	21
4.3.2.2	CONTAMINACIÓN POR CLORUROS	21
4.4	MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN.....	25
4.4.1	INHIBIDORES DE CORROSIÓN (CI).....	25
4.4.2	PROTECCIÓN CATÓDICA (CP).....	26
4.4.3	CAPAS DE RECUBRIMIENTOS	27
4.4.4	RECUBRIMIENTOS EN EL METAL.....	27
4.4.5	RECUBRIMIENTOS EN EL HORMIGÓN.....	28
4.4.6	REALCALIZACIÓN ELECTROQUÍMICA.....	28
4.4.7	EXTRACCIÓN ELECTROQUÍMICA DEL CLORO (ECE)	28
4.4.8	APLICACIONES DE LOS METODOS DE MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
4.5	FACTORES DE IMPACTO	31
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	28
6.	CONCLUSIONES	34
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	34
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

9. ANEXOS.....	41
----------------	----

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero de refuerzo	16
Tabla 2. Serie de potencial electroquímico de metales	18
Tabla 3. Componentes del agua de mar	23
Tabla 4. Consecuencias del cambio climático para las estructuras de concreto.....	24
Tabla 5. Inhibidores que son usados usualmente en ambientes industriales.	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variación de las proporciones utilizadas en concreto en proporción al volumen total de la mezcla.	15
Figure 2. Volumen relativo de los productos de corrosión respecto al Fe.	22
Figure 3. Fig. 7: Micrografías ópticas del acero de refuerzo (REBAR) a 5X después de las pruebas de corrosión EIS en 1M hcl sin inhibidor y con moléculas de ALOE-VERA como inhibidor de la corrosión.....	29
Figure 4. Perfiles de concentración de cloruro antes de ECE (inicial) y después de ECE (final) y eficiencias locales del proceso de extracción. Detalles ECE: densidad de corriente: 2 A / m ² , densidad de carga: 1,5 MC / m ² , ambos relacionados con la superficie de hormigón visto. ..	30
Figure 5. Perfiles de contenido de Cl ⁻ en muestras tratadas previamente con ECE y después con CP (EA), con ECE y después de cpre (EB), y en la muestra de referencia solo tratada con ECE (ER), todas ellas sometidas al proceso de contaminación por Cl ⁻ , después de ECE y primera fase de CP o cpre (24 semanas).	31
Figure 6. Costos de los trabajos de reparación parcial ejecutados en el año 2012 en varias estructuras deterioradas por el fenómeno.	33

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno a tener en cuenta en cualquier ámbito de la industria o de la vida cotidiana, es de gran importancia ya que afecta de forma significativa la utilidad de equipos, estructuras, construcciones y procesos industriales, entre otros, que están constituidos por metales o en su defecto aleaciones de estos. Estas afecciones se reflejan generalmente como un problema de seguridad e implicaciones económicas y ambientales (Lahiri, 2017). La NACE *international measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study* (IMPAC) estima que la corrosión representa un gasto a nivel global de aproximadamente \$2 trillones de dólares, es decir, que tiene un impacto significativo en la economía de los países.

Las construcciones que usualmente encontramos a gran escala como puentes, edificios y carreteras, están fabricados o elaborados por concreto reforzado o comúnmente conocido como hormigón armado, el hormigón es la mezcla de cemento, agua, arena y piedra que forman una pasta o mezcla que al secarse da la apariencia de ser una piedra tipo sintética (Moya et al., 2012). El desgaste o deterioro de este material, se debe en gran proporción a la corrosión generada en la estructura metálica del refuerzo, que como consecuencia afecta características físicas como la adherencia o puede provocar agrietamiento en las estructuras (Lowińska-Kluge & Błaszczyńska, 2012), por lo tanto, al ser un problema frecuente, el estudio de este campo se ha convertido en un tema de importancia para la investigación. La mezcla de cemento suele ser alcalina y tiene un potencial de hidrógeno mayor a 12,5 ($\text{pH} > 12,5$) actuando como un protector de la corrosión en los refuerzos de acero, sin embargo, con el transcurso del tiempo esta propiedad se pierde debido principalmente a dos factores, el primer lugar es la carbonatación, donde el concreto reacciona con el dióxido de carbono existente en la atmósfera disminuyendo la alcalinidad del mismo (Vidaud, 2012). Como segundo factor se presenta la contaminación por cloruros que se ocasiona debido al contacto de estas estructuras con ambientes que lo contienen en concentraciones significativas (Fernando, 2013). Ambos fenómenos pueden presentarse de forma independientemente o en conjunto, y producen una ruptura en la pasividad del concreto que se traduce en una pérdida de la protección anticorrosiva (Pietro Pedferri, 2018).

Desde hace tiempo se han planteado métodos y materiales que permitan controlar la corrosión en las varillas de acero, se ha probado el uso de sustancias que actúen como inhibidoras que se

pueden adicionar a la mezcla durante el proceso de preparación. Existen numerosos estudios que emplean extractos de plantas como inhibidores de la corrosión en aceros (Mo et al., 2016). Muchos de estos inhibidores muestran buenos resultados controlando el proceso en el concreto como es el caso de inhibidores de corrosión amigables con el medio ambiente (Palanisamy et al., 2016). Otra alternativa que se emplea es la protección catódica, que ha demostrado ser efectiva para el control de la corrosión (Khazanov, 2012). Esta consiste en utilizar un metal o aleación que tenga una mayor actividad electroquímica comparado con el metal que se desea proteger, de esta forma este metal más electroquímico se corroerá actuando como ánodo de sacrificio (P. Pedferri, 2018).

En esta compilación bibliográfica se busca profundizar en los métodos que existen para retardar o mitigar la corrosión en los concretos reforzados, teniendo en cuenta que estos dependen del tipo del uso y las condiciones ambientales en las que estos se realizan, además se estudiarán los factores en los que genera mayor impacto y que alternativas se han planteado para disminuirlos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Gran parte de la infraestructura global está basada en estructuras fabricadas en concreto reforzado, ya que es uno de los materiales más utilizados por ser económico y poseer propiedades físicas y mecánicas que hacen idónea su implementación. Este material se compone por barras de acero de refuerzo recubiertas por una matriz de hormigón (Stupenengo, 2011), sin embargo, ese refuerzo que mejora las características del concreto también representa uno de los principales problemas en el deterioro y falla de estas estructuras al ser propenso a corroerse (Victorio, 2018). Durante décadas se han investigado métodos que permiten reducir el impacto de la corrosión en este tipo de materiales compuestos (hormigón-refuerzo), sin embargo, en la actualidad sigue representando un problema de alto impacto que genera un riesgo inminente tanto a la población en general como a la integridad de las estructuras que también se ven reflejados en afectaciones económicas.

En el futuro se espera que las construcciones sean más complejas, y al serlo, el requerimiento de los materiales que son utilizados también aumentará, no habrá espacio para fallas y se requerirá durabilidad, es decir, que el desafío actual será mayor en el futuro y para lograr que los materiales actuales de construcción se sigan utilizando habrá que transformarlos y reducir sus defectos, por ende, es de suma importancia llevar a cabo diversos estudios sobre la corrosión en estos sistemas para prevenir fallas, desconche, agrietamiento o fisuras en las estructuras que lo comprenden, brindando seguridad y extendiendo su vida útil. En otras palabras, el estudio de la corrosión en estas estructuras constituye un papel importante en la construcción misma de la sociedad, porque da soporte al avance tecnológico de infraestructuras con mejores propiedades mecánicas que prolonguen la resistencia y vida útil de las edificaciones en el futuro.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar los métodos de mitigación y protección de la corrosión del acero en concreto reforzado.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Plantear los tipos de corrosión que se presentan en las estructuras de concreto reforzado y que implicaciones tiene este fenómeno en el acero empleado en obras civiles.
- Describir la importancia que tiene la corrosión en este tipo de materiales y que factores son los que afectan al concreto reforzado.
- Profundizar sobre impacto que representa la corrosión en la industria de construcción.
- Identificar las metodologías que actualmente se emplean para prevenir y mitigar la corrosión que se presenta en las estructuras de concreto reforzado.

4. CORROSIÓN EN CONCRETOS REFORZADOS

4.1 CONCRETO REFORZADO (RC)

4.1.1 Generalidades.

4.1.1.1 Hormigón

El concreto u hormigón se ubica como uno de los materiales de construcción con mayor antigüedad (Rendon Diaz, 2017). Consiste en la mezcla de cemento portland, arena, grava y agua. Estos componente forman una pasta viscosa que permite moldearse al encofrado en el que es vertido (Moreno, 2019). El concreto puede cambiar según las cantidades o proporciones que se utilizan en la mezcla de sus componentes (cemento, agua, arena y grava) (Kosmatka, 2004). en la figura 1, se muestran algunas variaciones comunes, al final la mezcla pasa por un proceso de fraguado y toma la consistencia de las rocas. las proporciones de los componentes permiten que este varié sus propiedades para adaptarse al uso que se le quiera dar (Saltos et al., 2020).

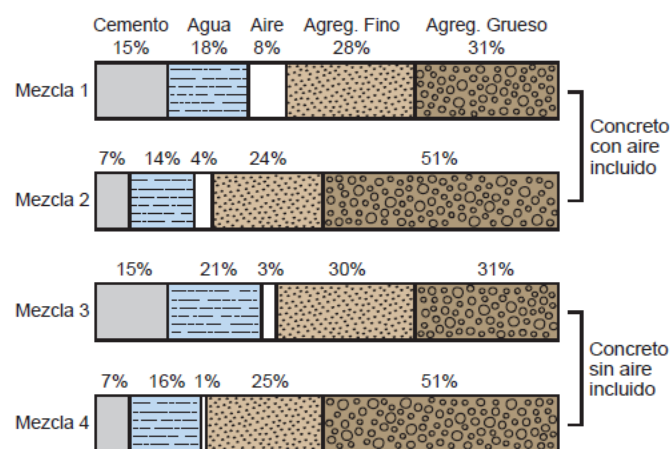


Figura 1. Variación de las proporciones utilizadas en concreto en proporción al volumen total de la mezcla.

Fuente:(Kosmatka, 2004).

4.1.1.2 Acero

El acero utilizado comúnmente como refuerzo es el acero al carbono por su fácil acceso y precio, la composición química de este se presenta a continuación en la tabla 1. Tiene un acabado corrugado y está formado por una aleación de hierro, carbono y otros elementos en

menor proporción (Alcantara Gonzalez, 2018), sus propiedades mecánicas como la ductilidad, dureza, resistencia a la tracción, entre otras, dependen de las proporciones de estas sustancias (Sánchez Borda, 2018). El acabado corrugado del acero tiene un papel fundamental en la adherencia que tiene este con el hormigón.

Tabla 1. Composición química del acero de refuerzo

Elemento	Composición (%) grado A 250 (EFRX)
Manganeso	0,835 ± 0,013
Fósforo	0,016 ± 0,006
Azufre	0,024 ± 0,004
Hierro	98,658 ± 0,122
Silicio	0,443 ± 0,016
aluminio	0,023 ± 0,017

Fuente:(Yesid Peña et al., 2011)

4.1.1.3 Concreto y acero de refuerzo

El hormigón reforzado es un material compuesto que se obtiene al combinar la pasta de concreto con estructuras de acero que quedan en su interior, dándole características mecánicas como flexibilidad que son útiles para las distintas aplicaciones que se le otorguen.

El concreto reforzado tiene un amplio rango de aplicación, desde la construcción de edificaciones, puentes, carreteras, hasta tuberías (Traversa, 2012). La estructura de refuerzo o armadura está construida en acero corrugado, el cual le proporcionara al hormigón resistencia a la tracción entre otras características (Jaramillo, 2019). Como se había mencionado anteriormente los concretos tienen un pH elevado y es esta propiedad que mantiene la pasividad en las armaduras metálicas en su interior logrando protegerlas y aumentar su durabilidad (Lowińska-Kluge & Błaszczynskin, 2012), sin embargo, es posible la penetración de forma difusiva de sustancias como el oxígeno, la humedad y cloruros que resultan agresivas para los aceros y generan un deterioro en las estructuras del hormigón (Fernando, 2013).

4.2 CORROSIÓN

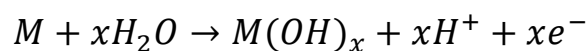
4.2.1 Mecanismos de corrosión

La corrosión de los materiales metálicos se fundamenta en las reacciones de óxido-reducción, en este tipo de reacciones hay un flujo de electrones provocando que el metal se disuelve en el ánodo oxidándose, mientras el cátodo se reduce (rashmi, 2014). Este proceso ocurre porque los metales tienden a volver a su estado termodinámico más estable como óxidos, que es como se les encuentra naturalmente (McCafferty, 2010). Para que este fenómeno ocurra se necesitan ciertas condiciones específicas que lo favorecen el proceso como altas temperaturas, humedad, el uso de distintos metales que están en contacto en una misma operación, la acidez de las sustancias y otro tipo de factores que pueden afectar la integridad de estos metales originando la corrosión (Geraghty, 2011).

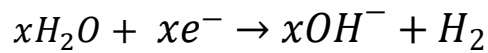
Existen dos tipos de corrosión que pueden ocurrir, el primero es la que ocurre cuando los metales están expuestos a altas temperaturas u oxidación a alta temperatura y el segundo es la corrosión acuosa en la que la característica principal es la presencia de un electrolito. Según estos tipos de corrosión existe un mecanismo para cada uno estos casos y pueden ser químicos o electroquímicos (Luciano et al., 2018).

4.2.1.1 Corrosión electroquímica.

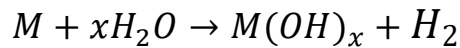
Este mecanismo se da cuando los metales se encuentran en ambientes húmedos en presencia de un electrolito como puente para el transporte de los iones (ECCA, 2011). Ocurren dos reacciones, la oxidación se da en el ánodo en el que el metal libera electrones, es decir la corriente saldrá de este hacia el electrolito y la reducción se presenta en el cátodo que toma los electrones provenientes del ánodo, en este caso la corriente ingresa a este desde el electrolito (Ohtsuka et al., 2018). Suponiendo el electrolito como agua y estando expuestos a la atmósfera las reacciones ocurridas en el ánodo y el cátodo serían las mostradas a continuación en las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente (McCafferty, 2010).



ecuación 1



ecuación 2



ecuación 3

la corrosión puede presentarse en puntos específicos del metal o en toda su superficie, por tanto, puede ser generalizada o localizada.

4.2.1.1.1 Corrosión generalizada.

Este tipo de corrosión se presenta en toda la superficie del metal casi de forma homogénea, es de las más agresivas para el material, pero al presentarse en todo el metal es de fácil detección y prevención (Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.1.1.2 Corrosión localizada.

A diferencia de la generalizada esta se presenta en puntos específicos del material y por consiguiente es muy difícil su proceso de detección, existes distintos tipos de corrosión localizada (Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.1.1.2.1 Corrosión galvánica

Para que ocurra se requiere del contacto entre distintos metales ya sea de forma física mediante un puente eléctrico. En este tipo de corrosión es el material con un potencial electroquímico inferior el que se corroe (ECCA, 2011). En la tabla 2 se muestran los potenciales electroquímicos de distintos metales a continuación.

Tabla 2. Serie de potencial electroquímico de metales

Activo o Anódico	Magnesio
	Aleaciones de magnesio
	Zinc
	Acero galvanizado
	Aluminio 1100
	Aluminio 2024
	Acero
	Hierro dulce (forjado)
	Hierro colado (fundido)
	Acero inoxidable 13% Cr, tipo 410 (activo)

Acero inoxidable 18 - 8, tipo 304 (activo)
Soldaduras de plomo - estaño
Plomo
Estaño
Metal Muntz
Bronce al Manganeso
Latón naval
Níquel (activo)
Aleación 76 Ni - 16 Cr - 7 Fe (activo)
Aleación 60 Ni - 30 Mo - 6 Fe (1Mn)
Latón amarillo
Latón admiralty
Latón rojo
Cobre
Bronce al silicio
Cuproníquel 70 - 30
Bronce G
Soldadura de plata
Níquel (pasivo)
Aleación 76 Ni - 16 Cr - 7 Fe (pasivo)
Acero inoxidable 18 - 8, tipo 304 (pasivo)
Plata
Grafito
Oro
Noble o Catódico
Platino

Fuente: (Mendez Perez, 2016)

4.2.1.1.2.2 *Corrosión por picadura*

El pitting como comúnmente se le conoce a este tipo de corrosión se produce en metales que se encuentran en estado de pasivación, para ello, debe generarse una acumulación de agentes oxidantes que alteren el pH del medio deteriorando así la capa pasiva protectora (Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.1.1.2.3 *Corrosión por fisuras*

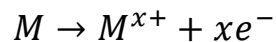
Esta corrosión se da en pequeñas zonas en las que el oxígeno tiene una menor concentración en relación al resto de la superficie del metal, estas pequeñas zonas adquieren el comportamiento de ánodos y producen la corrosión (Salazar-Jiménez, 2015).

4.2.1.1.2.4 Corrosión por cavitación

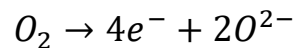
Para que exista este fenómeno es necesario el transporte de líquidos en sistemas pasivados, la variación en la presión de estos sistemas provocara la formación de burbujas de aire chocaran con el material debilitándolo para generar zonas propensas a corroerse.

4.2.1.2 Corrosión química.

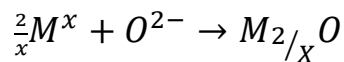
En este mecanismo el metal se encuentra expuesto a ambientes con temperaturas superiores a 100°C por lo que en la superficie del metal no hay humedad que permita una reacción electroquímica, sin embargo, siguen ocurriendo reacciones anódicas y catódicas (Ecuaciones 4y 5) que formaran óxidos, por esto se le conoce también con el nombre de oxidación a alta temperatura (McCafferty, 2010). Al no haber un puente electrolítico que una los sitios anódicos con los catódicos estos deben encontrarse muy cercanos para que se den las respectivas reacciones mostradas a continuación y ocurrirá en presencia del oxígeno gaseoso (Ohtsuka et al., 2018).



ecuación 4



ecuación 5



ecuación 6

4.3 MECANISMOS Y PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA CORROSIÓN EN CONCRETO REFORZADO.

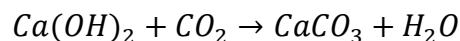
4.3.1 Mecanismos de corrosión en el acero de refuerzo

Para que se presente la corrosión en el acero del concreto reforzado, es necesario que la pasividad del concreto sea vulnerada eliminando la protección que este ofrece al acero, se sabe que esta pasividad en el acero ocurre en el proceso de secado del concreto en el que se forma una capa de óxido protectora que se mantiene intacta principalmente por pH del concreto, y

que se debe a la presencia de sustancias alcalinas en el (Tomadin, 2019). Dependiendo del medio al que este expuesto el hormigón la pasividad se disminuye o desaparece, las principales causas son la carbonatación y la contaminación por cloruros, esto ocurre cuando estas sustancias agresivas logran difundirse en el concreto hasta alcanzar el acero.

4.3.1.1 Carbonatación o mecanismo de reacción ácida

Es un proceso que ocurre lentamente desde el exterior de la estructura hasta su interior (Köliö et al., 2017), en el curado del concreto se forman poros por la evaporación del agua, estos poros permiten que el dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra en la atmósfera avance a través de ellos y en su trayecto reaccione con las moléculas de hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) que se formaron de la reacción de los silicatos de calcio y el agua en el proceso de mezcla del concreto (Licor, 2016; Ramirez Lagunilla, 2016). La reacción entre el dióxido de carbono y el hidróxido de calcio produce carbonato de calcio (ver Ecuación 7). En el transcurso de la reacción se disminuye la cantidad de hidróxidos que son responsables del pH elevado del concreto, haciendo que éste disminuya hasta destruir la capa de óxido protectora del acero y disminuyendo la pasividad del mismo. Con la inexistencia de esta capa se hace más propensa la corrosión del material (Vidaud, 2012).



ecuación 7

4.3.1.2 Contaminación por cloruros

Este fenómeno se produce cuando iones cloruro entran en contacto con el concreto al estar en disolución como en el agua de mar, estos iones se difunden por los poros del concreto hasta llegar al acero rompiendo con la pasividad de zonas específicas que permiten la formación de zonas anódicas y catódicas, provocando que el acero se corra por el mecanismo electroquímico (Pietro Pedferri, 2018). Esta corrosión genera óxidos de hierro el cual aumenta el volumen interno en la estructura (ver figura 2.) dando lugar a tensiones y descascaramiento del concreto sobre las barras de acero, así como a una reducción significativa del área de la sección transversal de las varillas (Verma et al., 2013).

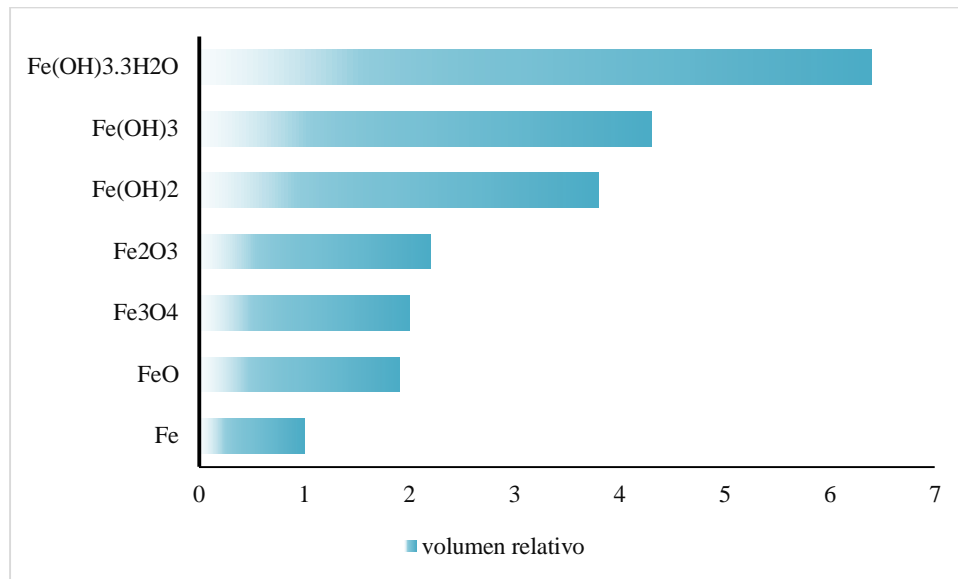


Figure 2. Volumen relativo de los productos de corrosión respecto al Fe.

Fuente:(Nóvoa, 2013)

4.3.2 Factores que aceleran la corrosión

Existen factores que se encuentran asociados al ambiente o zona climática que logran promover los procesos corrosivos del acero en el concreto reforzado, las variaciones climáticas son causantes en muchas ocasiones de la presencia de estos factores (Wang et al., 2012), en la tabla 4 se evidencian las implicaciones que generan estos cambios. Los factores que aceleran el fenómeno de corrosión en las estructuras de hormigón armado se describen a continuación.

4.3.2.1 Humedad

La presencia de agua en el hormigón puede servir como puente electrolítico y como solvente para muchos iones contaminantes en el ambiente que se logran difundir a través de los poros del hormigón por tal motivo la humedad es fundamental para que ocurra la corrosión, en este caso las zonas con alto contenido de humedad en el ambiente son aceleradoras del proceso de corrosión (Picos, 2014).

4.3.2.2 Temperatura

La temperatura cumple un papel importante en los procesos corrosivos, su aumento es proporcional al incremento de la velocidad de las cinéticas de corrosión, además de acelerar el

transporte de iones y moléculas en los poros del hormigón. El aumento de la temperatura en el ambiente funciona como un acelerador en la velocidad de corrosión.

4.3.2.3 pH

El pH normal del hormigón es de aproximadamente 13 y se encarga de darle la propiedad de pasivar las varillas de acero en su interior, una reducción del mismo provoca la pérdida de protección y lo volverá propenso a corroerse.

4.3.2.4 Aire

En el aire se transportan muchos agentes que al entrar en contacto con la humedad en los poros del hormigón son disueltos a través de este y pueden reaccionar cambiando propiedades como el pH y de esta forma promover la generación de corrosión en las armaduras de acero.

4.3.2.5 Concentración de iones cloruros

Los iones cloruros representan una de las principales causas de corrosión en el concreto, al estar disueltas funcionan como medio electrolítico y pueden formar sales acidas que favorecen la corrosión sobre el metal.

4.3.2.5.1 Ambientes marinos

En las zonas costeras existe una gran concentración de sales disueltas provenientes del agua de mar (Jimenez Vazquez & Hernan Lozano, 2018) como se detalla en la tabla 3, y presentes en el aire lo que provoca que este ambiente resulte altamente agresivo para las estructuras de hormigón de refuerzo (Yesid Peña et al., 2011).

Tabla 3. Componentes del agua de mar

Componentes	Cantidad	Unidades
Cloruro de sodio	24	gramos
Cloruro de magnesio	5	gramos
Sulfato neutro de sodio	4	gramos

Cloruro de calcio	1,1	gramos
Cloruro de potasio	0,7	gramos
Bicarbonato de sodio	0,2	gramos
Bromuro de sodio	0,096	gramos
Ácido bórico	0,026	gramos
Cloruro de estroncio	0,024	gramos
Fluoruro de sodio	0,003	gramos
Agua destilada	1000	Mililitros
Salinidad aproximada	3,45%	-
		pH 7,9 - 8,3

Fuente: (biblioteca digital del ilce, 2018)

4.3.2.5.2 Climas fríos

En las zonas frías se presenta la necesidad de utilizar sales de deshielo en las infraestructuras viales como puentes y carreteras (Bastidas & Medina Sánchez, 2013), las cuales contienen iones cloruros que al difundirse y llegar al metal provocan la afectación directa de este.

Tabla 4. Consecuencias del cambio climático para las estructuras de concreto

Cambio climático	Implicaciones
Incremento de la concentración de carbón	La concentración elevada de carbono aumenta la profundidad de la carbonatación en el hormigón, lo que aumenta la probabilidad de que las estructuras de hormigón estén expuestas a la iniciación de la corrosión del refuerzo inducida por la carbonatación y al daño estructural
Cambio de temperatura	La temperatura elevada acelera la carbonatación, la penetración de cloruros y la velocidad de corrosión del refuerzo que exacerba el inicio de la corrosión y el daño estructural
Cambio de humedad	La humedad relativa más baja puede reducir o incluso detener la carbonatación y la penetración de cloruros en áreas con una HR promedio anual actualmente superior al 40-50%, mientras que el aumento de la humedad puede permitir la carbonatación y la penetración de cloruros en regiones donde ahora son insignificantes.

Fuente: (Wang et al., 2012)

4.4 MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN.

4.4.1 Inhibidores de corrosión (CI)

Los inhibidores de la corrosión son aditivos utilizados en una baja proporción al medio en el que se encuentra el metal a proteger con la característica de lograr retardar el proceso corrosivo en los metales (Luciano et al., 2018), estos inhibidores dependen del uso como se muestra en la tabla 5, además, es importante la cantidad que debe aplicarse entre otros factores.

Tabla 5. Inhibidores que son usados usualmente en ambientes industriales.

Ambiente		Inhibidor	Metal	Dosis
Aguas	Agua potable	Polifosfato	Fe, Zn, Cu, Al	5-10 ppm
		silicato	Fe	10-20 ppm
		Ca(OH) ₂	Fe, Zn, Cu	10 ppm
	Sistemas de enfriamiento	Ca(HCO ₃) ₂	Fe	10 ppm
		Cromatos	Fe, Zn, Cu	0,1%
		NaNO ₂	Fe	300-500 ppm
		Polifosfatos silicatos	Fe	10-20 ppm 20-40 ppm
Caldera	NaH ₂ PO ₄	Fe, Zn, Cu	10 ppm	
	Polifosfatos	Fe	10 ppm	
Circuitos de enfriamiento de motor	de	Na ₂ CrO ₄	Fe, Pb, Cu, Zn	0,1 – 1,0 %
		Nitritos	Fe	300-500 ppm
		Na ₂ SiO ₃	Fe	0,01%

	Salmuera y agua de mar		Zn	10 ppm
		Aminas cuaternarias	Fe	10-25 ppm
		NaNO ₂	Fe	0,5-3%
		NaNO ₂ + NaH ₂ PO ₄	Fe	0,5% + 10 ppm
Solución de decapado	Ácido sulfúrico	feniltiourea	Fe	0,003-0,01%
		ortotoluentiourea		
		mercaptanos		
		sulfuros		
	Ácido clorhídrico	Compuestos orgánicos con anillos N y N	Fe	100-200 ppm
		Hexametenetramina	Fe	5%
Ácido nítrico	Amina, tiourea	Fe		
	Aminas aromáticas	Cu		
Industria petrolera	Extracción	Varias aminas	Fe	100-500 ppm
	Refinamiento	Imidazolina y derivados	Fe	100-1000ppm
Concreto	Sales marinas de deshielo	CaNO ₂		10 Kg/L
		Aminas		1% versus peso del cemento
		Alcanolaminas		
		Sales de carboxilato		

Fuente: (Luciano et al., 2018)

En el caso del concreto reforzado estos aditivos generalmente se agregan al inicio a la mezcla del concreto fresco y posteriormente cumplir su función de mantener pasivo al acero en el interior de la estructura con el fin de aumentar la vida útil del hormigón armado retardando la corrosión (Hidalgo Parra, 2016).

4.4.2 Protección catódica (CP)

La protección catódica es una técnica electroquímica que permite prevenir la corrosión de los metales, para ello emplea la disminución del potencial del metal convirtiéndolo en una zona catódica para que sea menos propenso a corroerse. Este tipo de corrosión emplea dos técnicas según que son la utilización de ánodos de sacrificio y la corriente impresa (P. Pedferri, 2018).

4.4.2.1 Ánodos de sacrificio

En este tipo de protección se conecta o se une a la estructura metálica que se debe proteger otro metal que posea un potencial de corrosión menor al metal de la estructura, de esta forma el metal de potencial más negativo actuará como ánodo y por tanto se corroerá en lugar del metal de la estructura (Mendez Perez, 2016).

4.4.2.2 Corriente impresa

En este caso se conecta a el metal un flujo continuo de corriente evitando que el metal actúe como una fuente de corriente que pueda iniciar la corrosión sobre el mismo (Prefactibilidad, 2018). En el caso del hormigón armado la protección catódica se utiliza para prevenir la corrosión por contaminación de cloruros evitando que sobre el metal se formen al tiempo zonas anódicas y catódicas que provoquen la corrosión (Aperador Chaparro et al., 2012).

4.4.3 Capas de Recubrimientos

Los recubrimientos son capas de un material distinto al que se desea recubrir generalmente resinas, metales y polímeros, mejorando la resistencia a la corrosión de dicho material, funciona como una barrera protectora que evita que el material entre en contacto directo con el medio agresivo del que se le quiere proteger. Para el hormigón armado estos recubrimientos pueden ser aplicados de dos formas, sobre la superficie del metal o sobre la superficie del hormigón.

4.4.3.1 Recubrimientos en el metal

Para poder realizar una correcta aplicación de la capa protectora sea resina, metal (galvanización) o polímero es necesario que la superficie de las barras de acero este previamente desecada, esto evitara que contaminantes como polvo o aceites impidan la homogeneidad y adherencia del recubrimiento sobre el metal, este recubrimiento funciona como barrera protectora de las barras de metal antes los ambientes agresivos del medio en el que se encuentran (Daniyal & Akhtar, 2020).

4.4.3.2 Recubrimientos en el hormigón

El sistema hormigón refuerzo es muy eficiente porque las barras de acero mejoran las propiedades mecánicas de la estructura mientras el hormigón sirve como protección al acero, sin embargo, la permeabilidad y porosidad del hormigón hacen que el sistema se debilite a causa de agentes agresivos que logran penetrar y corroer las barras de acero. Tratar la superficie del hormigón recubriéndola impide que estos agentes contaminantes ingresen a la estructura y alcancen el acero embebido en ella (Daniyal & Akhtar, 2020).

4.4.4 Realcalinización electroquímica

Esta técnica consiste en restaurar la alcalinidad del hormigón restableciendo la pasividad en el acero al generar los iones hidroxilos que reaccionaron en el proceso de carbonatación mediante la hidrólisis del agua (Aguilar Villarreal, 2013). Para la aplicación de esta técnica es necesario inducir una corriente eléctrica que produzca reacciones catódicas en presencia de una sustancia electrolítica logrando aumentar el pH de la zona afectada en el proceso de corrosión (Manrique, 2011).

4.4.5 Extracción electroquímica del cloro (ECE)

La extracción electroquímica del cloro se realiza en presencia de una sustancia electrolítica con la ayuda de un campo eléctrico ubicado en el exterior de la estructura, debido a la carga de los iones de cloro estos se transportan o migran fuera de la estructura, además que similar a la realcalinización se producen iones hidroxilos que ayudan a restaurar la pasividad de armadura (Aguilar Villarreal, 2013).

5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

5.1 MITIGACIÓN Y PROTECCIÓN

5.1.1 INHIBIDORES

El uso de inhibidores de corrosión se ha convertido en una de las alternativas más viables para reducir el riesgo de corrosión en las estructuras de hormigón armado.

Los inhibidores naturales han mostrado ser una alternativa en su aplicación al concreto reforzado al ser no contaminantes y lograr prevenir la corrosión, se han realizado ensayos con distintos materiales como el estudio de gel de aloe vera por los autores (Herrera Hernandez et al., 2015), en el que se logra evidenciar en la figura 3 que en la muestra tratada con gel y posteriormente expuesta no existe corrosión, mientras en la muestra sin tratar se logra observar que ha sido afectada por el medio agresivo.

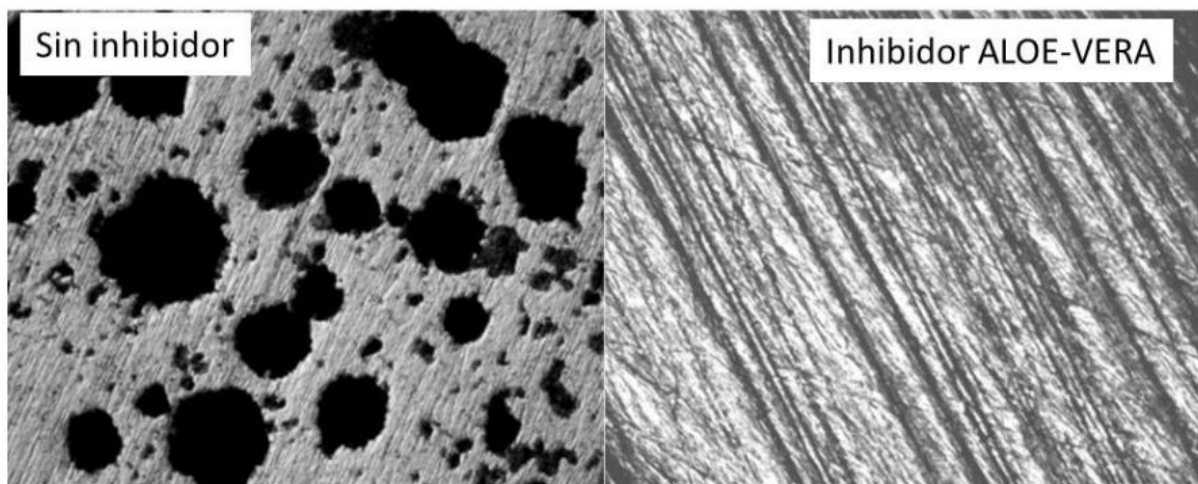


Figure 3. Fig. 7: Micrografías ópticas del acero de refuerzo (REBAR) a 5X después de las pruebas de corrosión EIS en 1M HCl sin inhibidor y con moléculas de ALOE-VERA como inhibidor de la corrosión.

Fuente: (Herrera Hernandez et al., 2015)

Otros autores como (Palanisamy et al., 2016) han estudiado la implementación del árbol de trupillo (*Prosopis juliflora*) como inhibidor verde de la corrosión obteniendo resultados positivos al formarse una película protectora sobre el refuerzo de acero.

La utilización y el estudio de inhibidores que disminuyan la afectación ambiental en su uso en estas estructuras es lo que se busca actualmente como lo hemos evidenciado en los anteriores estudios, poder implementar este tipo de sustancias brinda una nueva oportunidad de avance para este material de construcción.

5.1.2 Protección combinada

La combinación de métodos de protección para las estructuras puede aumentar la efectividad como es el caso de los autores (Climent et al., 2018) quienes estudiaron el uso de protección anódica y extracción electroquímica de cloruros con un mismo ánodo, logran mostrar la reducción del contenido de cloruros con un primer tratamiento de extracción electroquímica de dichos iones como se evidencia en la figura 4, también mostraron resultados en la figura 5 del uso de un segundo tratamiento, en este caso, la protección catódica es significativa en la reducción de los iones en comparación a las muestras en donde no se combinan los métodos. Esta disminución en el contenido de iones cloruro por la combinación de los dos métodos alcanza un porcentaje del 20%.

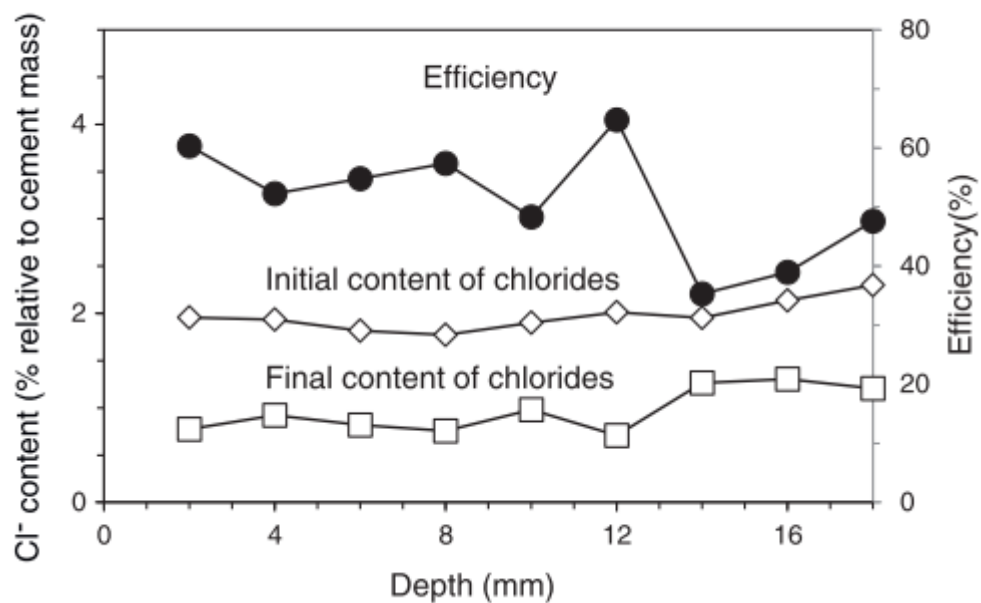


Figure 4. Perfiles de concentración de cloruro antes de ECE (inicial) y después de ECE (final) y eficiencias locales del proceso de extracción. Detalles ECE: densidad de corriente: $2 \text{ A} / \text{m}^2$, densidad de carga: $1,5 \text{ MC} / \text{m}^2$, ambos relacionados con la superficie de hormigón visto.

Fuente: (Climent et al., 2018)

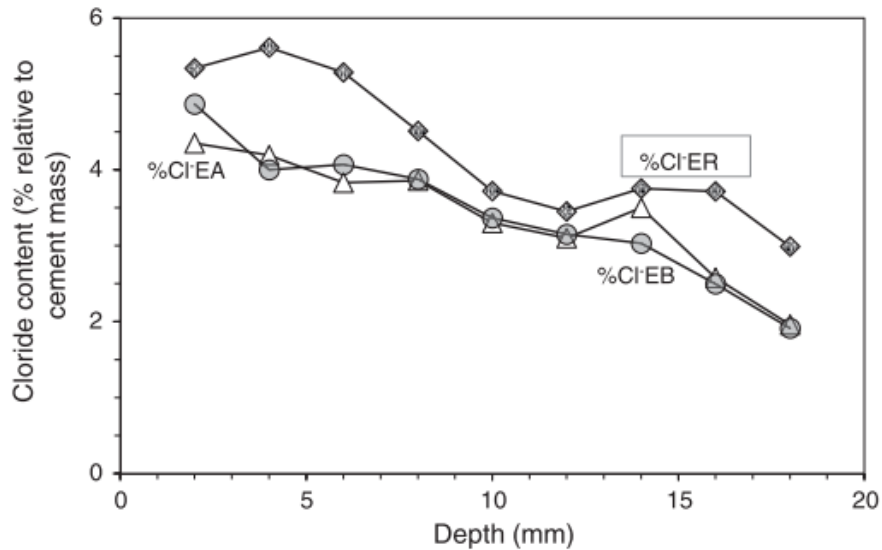


Figure 5. Perfiles de contenido de Cl^- en muestras tratadas previamente con ECE y después con CP (EA), con ECE y después de CPre (EB), y en la muestra de referencia solo tratada con ECE (ER), todas ellas sometidas al proceso de contaminación por Cl^- , después de ECE y primera fase de CP o CPre (24 semanas).

Fuente: (Climent et al., 2018)

La combinación de métodos de protección es una alternativa que muestra buenos resultados y que podría implementarse de forma efectiva, aunque se deben tener en cuenta otros factores como el económico, porque al utilizar más métodos, aunque aumente la protección aumenta el costo de su implementación.

5.2 ELEMENTOS QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN

La zona climática y las condiciones atmosféricas son parámetros que logran afectar las estructuras de concreto reforzado, los autores (Köliö et al., 2017) basados en esto plantearon un modelo de predicción de la tasa de corrosión que pueden alcanzar estas estructuras teniendo en cuenta variables como la precipitación, la humedad, la velocidad y dirección del viento, temperatura del aire y la radiación solar.

5.3 FACTORES DE IMPACTO

5.3.1 Durabilidad de las estructuras

la vida útil de las estructuras, así como su correcto funcionamiento son características fundamentales que se deben tener en cuenta en la implementación de estructuras de concreto reforzado, en el caso de la corrosión esta afecta directamente la integridad física de este material provocando fallas estructurales importantes. Muchos autores como (Muñoz Salinas & Mendoza, 2012) estudian la integridad y vida útil del concreto de refuerzo comparando las normas que lo rigen en cada país para de esta forma reforzar conocimientos en el mantenimiento de dichas estructuras.

5.3.2 Económico

La corrosión de las estructuras de concreto es uno de los factores más influyentes en cuanto al aspecto económico debido a costos de mantenimiento, autores como (Rodriguez-rodriguez & Castañeda-valdéz, 2014) muestran que existen pérdidas directas e indirectas ocasionadas por el fenómeno de la corrosión de las estructuras, además, lograron cuantificar las pérdidas directas como se observa en la figura 6, además de analizar que los costos de prevención resultan mucho menores a los de mantenimiento de dichas estructuras.

Obras	Distancia desde el mar sin efecto de apantallamiento (m)	Espesor de recubrimiento de hormigón	Costo de los trabajos de reparación		Total
			CUP	CUC	
Círculo Social Obrero: Félix Elmusa, La Habana.	40	20 a 30 mm	48 828,07	40 565,64	89 393,71
Marina Tarará, La Habana	10	20 mm	28 643,93	21 592,32	50 236,25
Base Náutica. Marina Hemingway, La Habana	10	20 a 30 mm	14 716,85	6 173,03	20 889,88
Hotel Las Terrazas, La Habana	50	20 a 30 mm Valores de porcentaje de porosidad capilar entre 18 y 21%	300 650,33	176 786,15	477 444,48
Hotel El viejo y el mar, La Habana.	50	20 mm	34 229,35	25 695,60	66 764,26
Puente de Bacunayagua, Mayabeque.	-	20 mm	723 633,87	889 330,41	1 612 864,29
Hotel Isla del Sur, Cayo Largo.	20	20 a 30 mm.	123 215,59	65 504,49	188 720,07
Palacio de Valle, Cienfuegos.	50	20 a 30 mm.	106 419,04	61 070,86	167 489,90
Totales			1 380 337,03	1 286 718,50	2 667 055,53

Figure 6. Costos de los trabajos de reparación parcial ejecutados en el año 2012 en varias estructuras deterioradas por el fenómeno.

Fuente: (Rodríguez-rodríguez & Castañeda-valdéz, 2014)

Aunque la vida útil de las estructuras se reduce esto es algo que se tiene en cuenta desde un inicio en los proyectos, aunque puede variar un poco lo que al final se refleja en un gasto económico. Por otro lado, el impacto económico no solo se refleja en el mantenimiento de las estructuras sino también en la inversión en estudios para mejorar los distintos métodos utilizados y la implementación de nuevos, todo esto es lo que permite el avance en este tipo de tecnologías.

6. CONCLUSIONES

Se encontró que el fenómeno de la corrosión en las estructuras de hormigón armado se debe principalmente a dos mecanismos de corrosión (Contaminación por cloruros y carbonatación), este proceso afecta la integridad de las estructuras por la aparición de grietas y descascaramiento, además de la disminución de la resistencia a la tracción al reducirse el área de la sección transversal de las armaduras al corroerse, disminuyendo la vida útil de las estructuras. El estudio de la corrosión en este tipo de materiales es importante ya que su demanda es alta y se ha implementado como material de construcción en casi todos los lugares en donde exista infraestructura, este tipo de uso hace que el hormigón armado se encuentre expuesto a factores influyentes en su deterioro como las zonas costeras, las zonas frías y los ambientes con alto contenido de humedad.

Actualmente existen diversos métodos que se emplean para prevenir y mitigar la corrosión de las estructuras que abarcan la industria de la construcción e ingeniería, en las cuales se adelantan estudios que buscan mejorar las características y resistencia de las mismas debido al alto costo de mantenimiento e impacto ambiental que conllevan, de este modo, los estudios actuales se enfocan en encontrar alternativas medioambientales y las que permitan tomar una acción preventiva en lugar de una acción reactiva ante los procesos corrosivos. Se encontró que el impacto principal es el factor económico, que se refleja en costos por mantenimiento y replazo de las estructuras, las cuales pueden aumentar el riesgo de falla de las mismas por acción del debilitamiento de su integridad.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para futuros trabajos se recomienda analizar los métodos de detección de la corrosión que son actualmente utilizados, así como el estudio a detalle de los métodos utilizados para mitigar y prevenir la corrosión en estas estructuras.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar Villarreal, J. C. (2013). INFLUENCIA DEL DETERIORO POR CORROSION DEL ACERO SOBRE LA REALCALINIZACION DEL CONCRETO REFORZADO CARBONATADO. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Alcantara Gonzalez, J. (2018). *CORROSIÓN ATMOSFÉRICA MARINA DE*

ACEROS AL CARBONO MEMORIA. 1–577.

- Aperador Chaparro, W., Delgado Tobón, A. E., & Bautista Ruiz, J. H. (2012). APLICACIÓN DE PROTECCIÓN CATÓDICA EN EL LABORATORIO A LOS MORTEROS DE ESCORIA ACTIVADA ALCALINAMENTE Y AL PORTLAND ORDINARIO SOMETIDOS A UN AMBIENTE MARINO. *Ingeniería y Universidad*, 16(1), 77–94.
- Bastidas, D. M., & Medina Sánchez, E. (2013). *ARMADURAS DE ACERO INOXIDABLE*.
- biblioteca digital del ilce. (2018). *COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA DE MAR*. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/>
- Climent, M. Á., Carmona, J., & Garcés, P. (2018). APPLICATION OF COMBINED ELECTROCHEMICAL TREATMENTS TO REINFORCED CONCRETE: ELECTROCHEMICAL CHLORIDE EXTRACTION PLUS CATHODIC PROTECTION. *Hormigón y Acero*, 69, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2018.05.003>
- Daniyal, M., & Akhtar, S. (2020). CORROSION ASSESSMENT AND CONTROL TECHNIQUES FOR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: A REVIEW. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s41024-019-0067-3>
- ECCA. (2011). *The Basics of Corrosion Technical paper Contents Introduction*.
- Fernando, M. (2013). MECANISMOS DE BIODETERIORO DEL CONCRETO REFORZADO. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Geraghty, B. (2011). *CORROSION AND MATERIAL DEGRADATION COST-BENEFIT ANALYSIS*. 4(1), 3–4.
- Herrera Hernandez, H., Franco Tronco, M. I., Miranda Hernandez, J. G., Hernandez Sanchez, E., Espinoza Vazquez, A., & Fajardo, G. (2015). ALOE-VERA GEL AS POTENTIAL CORROSION INHIBITOR FOR CONCRETE STEEL REINFORCEMENT. *Avances en Ciencias e*

Ingeniería, 6(3), 9–23.

Hidalgo Parra, F. J. (2016). *INHIBIDORES DE CORROSION Y SU IMPACTO SOBRE LA DURABILIDAD EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGON ARMADO*. August.

Jaramillo, G. (2019). Manual de Materiales de construcción. *Colección*, 1–115.

Jimenez Vazquez, K. E., & Hernan Lozano, O. (2018). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE SULFATOS Y CLORUROS EN EL DETERIORO DE ESTRUCTURAS EN CONCRETO EN ZONAS COSTERAS DEL ATLÁNTICO COLOMBIANO KEVIN*.

Khazanov, L. (2012). GALVANIZING - THE MAIN METHOD OF PROTECTING STEEL FROM CORROSION. *Metallurgist*, 55(11–12), 946–948. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9527-6>

Köliö, A., Pakkala, T. A., Hohti, H., Laukkarinen, A., Lahdensivu, J., Mattila, J., & Pentti, M. (2017). THE CORROSION RATE IN REINFORCED CONCRETE FACADES EXPOSED TO OUTDOOR ENVIRONMENT. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0920-7>

Kosmatka, S. H. K. W. et al. (2004). DISEÑO Y CONTROL DE MEZCLAS DE CONCRETO. En *Journal of Experimental Botany* (Vol. 62, Número 8). https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto_-_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland_Cement_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53

Lahiri, A. K. (2017). CHAPTER 8 MATERIAL DEGRADATION. En *Applied Metallurgy and Corrosion Control* (Número i). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4684-1>

Licor, A. (2016). *EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN EN HORMIGONES*

- ELABORADOS CON CEMENTO DE BAJO CARBONO LC3*. 93.
<https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/7393>
- Lowińska-Kluge, A., & Błaszczyński, T. (2012). THE INFLUENCE OF INTERNAL CORROSION ON THE DURABILITY OF CONCRETE. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(2), 219–227.
<https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.03.002>
- Luciano, L., maria pia, P., & Pedefferri, P. (2018). *CORROSION SCIENCE AND ENGINEERING*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97625-9_1
- Manrique, B. A. (2011). *EVALUACIÓN DE LA REALCALINIZACIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO CARBONATADO: DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO POSTRATAMIENTO*.
<http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080223862.PDF>
- McCafferty, E. (2010). INTRODUCTION TO CORROSION SCIENCE. En *Introduction to Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0455-3>
- Mendez Perez, A. (2016). *PROTECCIÓN CATÓDICA: ANÓDOS DE SACRIFICIO*. 1–41.
- Mo, S., Luo, H. Q., & Li, N. B. (2016). PLANT EXTRACTS AS “GREEN” CORROSION INHIBITORS FOR STEEL IN SULPHURIC ACID. *Chemical Papers*, 70(9), 1131–1143. <https://doi.org/10.1515/chempap-2016-0055>
- Moreno, M. T. (2019). *INTRODUCCIÓN A LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN*. 1–32.
- Moya, B. V., José Antonio, L. J., & Luis Bañón, B. (2012). APUNTES DE HORMIGÓN ARMADO. *Apuntes De Hormigon Armado*, 1–277.
- Muñoz Salinas, F., & Mendoza, C. (2012). LA DURABILIDAD EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO DESDE LA PERSPECTIVA DE LA NORMA ESPAÑOLA PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO. *Concreto y cemento: Investigación y desarrollo*, 4(1), 63–

- Nóvoa, X. R. (2013). PASIVIDAD DE LOS ACEROS INOXIDABLES EN HORMIGÓN. *CEDINOX*.
- Ohtsuka, T., Nishikata, A., Sakairi, M., & Fushimi, K. (2018). *ELECTROCHEMISTRY FOR CORROSION FUNDAMENTALS*. <http://www.springer.com/series/8898>
- Palanisamy, S. P., Maheswaran, G., Kamal, C., & Venkatesh, G. (2016). PROSOPIS JULIFLORA—A GREEN CORROSION INHIBITOR FOR REINFORCED STEEL IN CONCRETE. *Research on Chemical Intermediates*, 42(12), 7823–7840. <https://doi.org/10.1007/s11164-016-2564-1>
- Pedefferri, P. (2018). *CATHODIC AND ANODIC PROTECTION*. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8845-6_12
- Pedefferri, Pietro. (2018). *Corrosion in Concrete*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97625-9_23
- Picos, M. del C. (2014). *DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN ARMADO*. 116.
- Prefactibilidad, E. D. E. (2018). *PRODUCCIÓN DE ÁNODOS DE GRAFITO PARA PROTECCIÓN CATÓDICA*.
- Ramirez Lagunilla, L. R. (2016). *BASE DE DATOS DE HORMIGONES VC. ANÁLISIS DE LA ECO-EFICIENCIA*. 4(1), 64–75.
- rashmi, V. (2014). CORROSION. *gale, May*, 5742.
- Rendon Diaz, L. E. (2017). *CONCRETE DURABILITY*.
- Rodriguez-rodriguez, M., & Castañeda-valdéz, A. (2014). LAS PÉRDIDAS ECONÓMICAS CAUSADAS POR EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN ATMOSFÉRICA DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN EL HORMIGÓN ARMADO. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, 45, 52–59.
- Salazar-Jiménez, J. A. (2015). INTRODUCCIÓN AL FENÓMENO DE CORROSIÓN: TIPOS, FACTORES QUE INFLUYEN Y CONTROL PARA LA PROTECCIÓN DE MATERIALES (NOTA TÉCNICA). *Revista*

- Tecnología en Marcha*, 28(3), 127. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i3.2417>
- Saltos, M., Palmas, J., Bermeo, G., & Franco, E. (2020). ETAPAS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN PARA CONSTRUCCIONES CIVILES. *July*.
- Sánchez Borda, V. A. (2018). ANÁLISIS DE LAS VARIACIONES EN LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS EN BARRAS DE ACERO CORRUGADO NANOESTRUCTURADO PARA REFUERZO EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO VIVIAN. *Journal of Linguistics*, 3(2), 139–157. <https://doi.org/10.18041/2382-3240/saber.2010v5n1.2536>
- Stupenengo, F. (2011). *MATERIALES Y MATERIAS PRIMAS*.
- Tomadin, O. S. (2019). *DURABILIDAD. ATAQUE POR SULFATOS*.
- Traversa, L. P. (2012). DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO. En *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Número 9).
- Verma, S. K., Bhadauria, S. S., & Akhtar, S. (2013). EVALUATING EFFECT OF CHLORIDE ATTACK AND CONCRETE COVER ON THE PROBABILITY OF CORROSION. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 7(4), 379–390. <https://doi.org/10.1007/s11709-013-0223-9>
- Victorio, hernández balat. (2018). *MECÁNICA ESTRUCTURAL APLICADA*.
- Vidaud, E. (2012). LA CARBONATACIÓN EN EL CONCRETO REFORZADO. *Revista CYTC*, 00, 20–23.
- Wang, X., Stewart, M. G., & Nguyen, M. (2012). IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON CORROSION AND DAMAGE TO CONCRETE INFRASTRUCTURE IN AUSTRALIA. *Climatic Change*, 110(3–4), 941–957. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0124-7>
- Yesid Peña, D. B., Estupiñán, H. D., Vásquez, C. Q., & Mejía Ch, E. (2011). DETERMINACIÓN DE LA DESPASIVACIÓN EN VARILLAS DE ACERO DE REFUERZO EN SOLUCIÓN PORO DE AGUA DE MAR POR MEDIO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS DETERMINATION

OF DESPASIVATION IN REINFORCING STEEL RODS EXPOSED TO
PORE SEAWATER SOLUTION BY USING THE ELECTROCHEMICA.
Prospect, 9(1), 13–20.

9. ANEXOS