



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL SO₂
COMO AGENTE CORROSIVO EN
ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

LUIS ALBERTO MARTÍNEZ MARTÍNEZ

DIRECTOR DE TESIS

M.C. FRANCISCO SÁNCHEZ PÉREZ

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE

2015



DEDICATORIA

A mis padres Ma. Antonia Martínez y Félix Ángel por su apoyo y confianza incondicional a lo largo de mi vida, aun en los momentos siempre dándome lo mejor de sí mismos.

A mis hermanos: Luis Ángel y Félix Antonio por su compañía.

A mis amigos:

Andrés Hernández, Jonathan Bocardo, Paul Sierra, Miguel Reyes, Fromencio Guzmán, Josué Pérez, Juan Pérez, Daniel Martínez. Por ser mis segunda familia, unos hermanos que me han brindado su confianza en momentos difíciles, con quienes eh tenido agradables vivencias durante la carrera y en la vida misma. Gracias por su apoyo.

Quienes a pesar de la distancia me han mostrado el apoyo incondicional en momentos difíciles, por sus consejos y regaños: Flor García, Ixchel Hernández, Gerardo Portillo, Ismael Rosales, Edith, Luz Flena, Lorena Hernández, Rosalba Cruz. Julio Cesar Victoria.

A los compañeros de servicio social Rosario Bravo, Carlos Patiño, Elizabeth Manzano por su valioso apoyo en la elaboración de este trabajo, y por brindarme su amistad.

A mis primos, tíos y abuelos:

En especial a Cesar Francisco Martínez Rojas (q.e.p.d.) a pesar del poco tiempo que tuvimos, siempre ha estado presente en mi mente, y a Emmanuel Martínez Rojas por su gran apoyo en el momento más difícil de mi vida, por los consejos y vivencias, muchas gracias

Una mención especial al Dr. Plácido Gallegos Mares siendo como un segundo padre para mí, por estar pendiente de mí a lo largo de mi vida, gracias a él aún sigo en pie.

ÍNDICE

Introducción.	v
Objetivo	vi
CAPITULO 1	
1. El concreto armado y sus mecanismos de deterioro	1
1.1 Componentes principales	2
1.1.1 Cemento y Aditivos	3
1.1.2 Agregados	6
1.1.3 Relación agua/cemento	7
1.1.4 Curado	7
1.2 Concreto Armado	8
1.3 Acero de refuerzo	9
1.4 Condiciones de exposición	11
1.5 Tipos de atmósferas	12
1.5.1 Clasificación de las categorías de contaminación	16
1.5.2 Categorías de la corrosividad de la atmósfera	17
1.6 Deterioro del concreto reforzado	19
1.6.1 Corrosión por carbonatación del concreto	19
1.6.2 Corrosión por cloruros	21
1.6.3 Corrosión por Sulfatación (SO ₂)	23
CAPITULO 2	
2. Mecanismos de mantenimiento del concreto y métodos de protección del acero de refuerzo contra la corrosión.	28
2.1 Agrietamiento	31
2.1.1 Clasificación de grietas	32
2.2 Métodos de protección	33
2.3 Mantenimiento	36
2.4 Métodos de reparación	38
2.4.1 Métodos convencionales de reparación	38
2.4.2 Métodos no convencionales de reparación	39

CAPITULO 3	
3. Simulación acelerada por corrosión atmosférica en concreto reforzado	43
3.1 Factores de deterioro en el concreto.	44
3.1.1 Preparación de las probetas	46
3.1.2 Preparación del acero de refuerzo	47
3.1.3 Preparación del concreto	48
3.1.4 Conservación de las probetas	49
3.2 Selección y preparación de las soluciones	50
3.2.1 Soluciones	50
3.2.2 Preparación de las soluciones y equipo de trabajo	51
3.3 Métodos de simulación	52
3.4 Condiciones de exposición	52
3.5 Criterios de evaluación	56
3.5.1 Potencial de Corrosión	56
3.5.1.1 Procedimiento de medición de potencial	57
3.5.2 Influencia del SO ₂ en el concreto mediante el método de colorimetría	60
3.5.3 Métodos de apariencia	63
 CAPITULO 4	
Resultados y Conclusiones	65
4.1 Análisis de Resultados	65
4.2 Resultados obtenidos por el método de medición de potencial	67
4.3 Resultados obtenidos por el método de colorimetría	73
4.4 Resultados por el método de técnicas de apariencia.	76
4.5 Conclusiones	83
 REFERENCIAS	 86

AGRADECIMIENTOS

At la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por la formación profesional que me brindaron.

At la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales, por permitirme formar parte de su equipo de trabajo y apoyo incondicional para realizar el presente trabajo, sobre todo a los que forman parte del Laboratorio de Corrosión.

At M. en C. Francisco Sánchez Pérez por brindarme su apoyo y confianza en todo momento durante la realización del proyecto. Y por su gran apoyo en momentos difíciles de mi vida, ante todo por su amistad,

At Dr. Armando Ortiz Prado por su apoyo y consejos.

At mis sinodales: Dr. Armando Ortiz Prado, M.C. Francisco Sánchez Pérez, Dr. Arturo Barba Pingarrón, M.C. Juan Armando Ortiz Valera,

INTRODUCCIÓN

En la vida diaria podemos encontrar elementos que sufren deterioro por inclemencias ambientales tales como una lámina oxidada, un clavo, un auto, puentes edificios a punto de colapsar, una infinidad de metales están presentes en cada lugar formando parte importante de nuestro entorno. De lo que muy poco nos percatamos es que el hombre desarrolla un gran esfuerzo para evitar que los metales de uso industrial básicos para la sociedad se deterioren y vuelvan a su estado original (es decir, de metal combinado con algunos otros elementos activos tales como el oxígeno, azufre y cloro). La misma atmósfera, el agua del mar, salmueras, las soluciones ácidas, neutras o alcalinas y cientos de otros ambientes causan el retorno del metal hacia una forma más estable, similar a la de los minerales.

En muchos países no se da la importancia a las pérdidas económicas por este motivo, que surgen del incremento en los costos de medidas preventivas, mantenimiento, reparación, sustitución de piezas y/o elementos en mal estado. Se estima que las pérdidas por corrosión ascienden entre el 3.5 y 4.5% del PIB de un país de primer mundo (entre ellos están Estados Unidos, Japón y Gran Bretaña) [2]. Las primeras observaciones sobre la corrosión del acero en el concreto fueron hechas a principios del siglo XX principalmente en ambientes marinos y plantas químicas. Pero es hasta la segunda mitad del siglo pasado, cuando el estudio de la corrosión de los refuerzos metálicos internos en concreto ha llegado a ocupar un papel importante a nivel mundial, por la gran ocurrencia del problema en cierto tipo de estructuras y por lo elevado de los costos de reparación.

En México, de acuerdo con un reporte de daños de la Red Federal de Carreteras se informa que poco más de 6000 puentes presentan algún grado de deterioro por corrosión, ya sea por ataque de cloruros o por carbonatación del concreto, o una combinación de ambos. En el primer caso, la corrosión se reconoce porque se presenta de forma localizada (picaduras) y es generalmente característica en estructuras cercanas al mar. En cambio, la corrosión por efecto de la carbonatación del concreto se manifiesta de forma uniforme en el acero, y puede ocurrir en estructuras ubicadas en cualquier lugar geográfico [12].

En la actualidad existen diferentes metodologías para evaluar el deterioro por corrosión en el acero de refuerzo del concreto, principalmente por cloruros y carbonatación. Sin embargo, la influencia del SO_2 no ha sido tan estudiada, siendo unos de los gases de mayor repercusión en el deterioro de materiales, al estar presente en la lluvia ácida, ataca al concreto con mayor agresividad, aunado a la influencia de cloruros hace de esta combinación una de las más resistentes en cuanto a daño por corrosión en acero de refuerzo en estructuras de concreto.

Sin embargo, realizar estudios sobre corrosión en concreto conlleva mucho tiempo por lo que realizar simulaciones aceleradas reduce el tiempo de estudio y aporta información útil en esta rama. Cada investigación realizada tiene un enfoque determinado además de dejar pie a futuras investigaciones basadas en los resultados presentados anteriormente, con la finalidad de hacer variaciones en la metodología expuesta. Llevar a cabo una simulación acelerada de corrosión permite obtener resultados en menor tiempo y que también tienen validez.

La presente tesis pretende contribuir al mejor entendimiento de la corrosión del acero de refuerzo debida a la acción de cloruros y la influencia del SO_2 , mediante ensayos

acelerados por corrosión atmosférica considerando variables como temperatura, %HR, así como SO₂. Cabe mencionar que para estudiar el efecto de SO₂ los criterios de evaluación empleados son los que comúnmente se utilizan para estudiar el efecto de CO₂ con el fin de establecer la diferencia que hay en la agresividad de estos gases.

Además de contribuir con información respaldada acerca de la importancia y el efecto de la relación a/c en la formación de poros en el concreto, que determinará la penetración rápida o no del ion cloruro y de SO₂. También el efecto que tienen los gases tipo óxido nitroso y dióxido de azufre en un ambiente marino y un ambiente urbano en el acero de refuerzo.

Objetivo General: Determinar el efecto por corrosión que se presenta en aceros estructurales usados como refuerzo en estructuras de concreto, planteando metodologías para su evaluación.

Objetivos Particulares:

- Simular de forma acelerada el fenómeno de la corrosión atmosférica para la determinación de la corrosión de acuerdo a la penetración del gas inyectado en concreto reforzado.
- Analizar el efecto del SO₂ en el concreto reforzado mediante técnicas colorimétricas.
- Determinar la constante de sulfatación, de acuerdo al deterioro causado por SO₂
- Comparar el deterioro generado por SO₂ con respecto al CO₂, como elementos precursores de la corrosión en concreto reforzado, en función de la constante k.

CAPITULO 1

EL CONCRETO ARMADO Y SUS MECANISMOS DE DETERIORO.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos 50 años, el concreto se ha consolidado como el material de construcción más utilizado en el mundo, siendo la segunda sustancia después del agua más usada en la tierra. Actualmente se estima que el consumo anual de concreto por habitante en el mundo es de dos toneladas [2]. El concreto se fabrica en estado plástico, ya que todas las partículas de arena y grava quedan encerradas y en suspensión, por lo que la mezcla fluye como un líquido viscoso, sin segregarse ni desmoronarse durante el transporte y colocación, lo que obliga a utilizar moldes que lo sostengan mientras adquiere resistencia suficiente para que la estructura sea auto soportable [6].

Se define al concreto como una mezcla homogénea de tres componentes fundamentales, un aglutinante (el cemento), el agente activante del aglutinante (agua), y un conjunto de partículas minerales de diferentes tamaños ligadas por la pasta cementante, que son los agregados. Resulta conveniente e imprescindible la incorporación de otro componente del concreto llamado **aditivo**. La mezcla de los componentes del concreto crea una masa que puede ser moldeada con facilidad, pero poco a poco pierde esta característica hasta que se torna rígida, para convertirse finalmente en el material resistente conocido como concreto endurecido [1]

El concreto presenta un comportamiento típico de los materiales cerámicos, esto es, muy buena resistencia a la compresión pero muy escasa a la tracción. El concreto reforzado surge al unir el acero con el concreto gracias a la elevada adherencia entre ambos, lo que produce una correcta transferencia de propiedades mecánicas: buena resistencia a la tracción del primero y resistencia a la compresión del segundo. La utilización del acero embebido en concreto ofrece una gran mejora en cuanto a resistencias.

El acero en principio se encuentra protegido contra la corrosión, ya que cuando el cemento se hidrata libera hidróxido de calcio y éste, a su vez mezclado con la presencia de otras sales alcalinas, le transfiere al concreto un alto nivel de basicidad (pH cercano a 13). En tal medio, los primeros productos de la corrosión electrolítica forman óxido férrico, que crea una delgada película de recubrimiento sobre el acero y lo protege de corrosión. Sin embargo, bajo diversas circunstancias se puede dar lugar al ataque del acero y por lo tanto se podrá presentar la falla del concreto reforzado. El concreto armado se puede clasificar, como se muestra en la tabla 1.1 [2]. Sin embargo, el concreto reforzado ha resultado menos durable de lo que se pensaba inicialmente, ya que el acero se puede corroer cuando la alcalinidad del concreto disminuye o cuando los iones cloruro penetran hasta él.

Tabla 1.1 Clasificación del concreto [2]

CONCRETO	
ARMADO	Material compuesto de concreto y acero asociados de modo que forman un sólido único
REFORZADO	Material formado de concreto y acero de bajo carbono sin previo esfuerzo, que al momento de soportar el peso del concreto y las cargas de la estructura, desarrolla esfuerzos de tracción
PREESFORZADO	Material formado de concreto y acero de alta resistencia que es intencionalmente tensionado, para compensar los esfuerzos provocados por el peso del concreto y las cargas de la estructura.
PRETENSADO	Concreto en que el acero de refuerzo es puesto en tensión antes del colado del concreto, permitiendo el relajamiento del acero después del curado del concreto
POSTENSADO	Concreto en que el refuerzo de acero es puesto en tensión después del curado del concreto.

1.1 Componentes principales

El concreto es una mezcla endurecida del cemento, agua y agregados; la reacción entre el agua y el cemento toma lugar lentamente dando como resultado que las propiedades importantes, tales como la resistencia a la compresión y la permeabilidad cambien continuamente. El concreto, también llamado hormigón es una mezcla de dos componentes: pasta (compuestos finos) y agregados (compuestos gruesos). La pasta de concreto se compone de cemento, agua, aditivos y aire que se retiene al mezclar los componentes, o incluido intencionalmente.

1.1.1 Cemento y Aditivos

CEMENTO

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. El cemento es una mezcla de:

- Sulfato de Calcio di-hidratado (yeso)
- Óxido de Calcio (cal libre)
- Magnesia (periclasa)
- Clinker (es el producto de la fusión de la mezcla de caliza y arcilla a 1500 °C)

Todos estos compuesto se mezclan, produciendo nuevos compuestos, que son los principales componentes del cemento [3]:

- i. *Silicato Tricálcico* ($3CaO SiO_2$), el cual le confiere su resistencia inicial e influye directamente en el calor de hidratación
- ii. *Silicato Dicálcico* ($2CaO SiO_2$), el cual define la resistencia a largo plazo y no tiene tanta incidencia en el calor de hidratación
- iii. *Aluminato Tricálcico* ($3CaO Al_2O_3$), es un catalizador en la reacción de los silicatos y ocasiona un fraguado violento. Para retrasar este fenómeno, es preciso añadirle yeso durante la fabricación del cemento.
- iv. *Alumino-Ferrito Tetracálcico* ($Al_2O_3 Fe_2O_3 4CaO$), influye en la velocidad de hidratación y secundariamente en el calor de hidratación.
- v. *Componentes Menores*, óxidos de magnesio, potasio, sodio, manganeso y titanio

Existen diversos tipos de cemento, los cuales están especificados en la norma ASTM-C-150-99^a, los cuales se clasifican como:

- *Tipo I*, que es de uso general y sin propiedades especiales
- *Tipo II*, de moderado calor de hidratación y alguna resistencia al ataque de los sulfatos
- *Tipo III*, de resistencia temprana y elevado calor de hidratación
- *Tipo IV*, de bajo calor de hidratación
- *Tipo V*, de alta resistencia al ataque de sulfatos

El agua empleada en la mezcla debe de ser limpia, libre de aceites, ácidos, sales y materias orgánicas, para evitar que el concreto quede contaminado con algunos de estos productos y posteriormente comience a deteriorar el acero de refuerzo.

Los cementos se conocen por:

- A. Componentes básicos, que son los que definen el tipo de cemento.
- B. Resistencia mecánica a la compresión, que establece los valores mínimos y máximos en la clase resistente 20, 30 y 40
- C. Las características especiales de durabilidad ante agentes agresivos como sulfatos, agregados reactivos y calor de hidratación [4].

Tabla 1.2 Cemento Portland Compuesto 30R [17]

NOTACION	CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA INICIAL
Cemento Portland Compuesto	+ 30	+ R = CPC 30 R

Tabla 1.3 Cemento Portland Compuesto con característica especial [17]

NOTACION	CLASE RESISTENTE	RESISTENCIA INICIAL
Cemento Portland Compuesto	+ 30 + R	+ Resistente a Sulfatos = RS

Los diferentes tipos de cemento definidos por su composición son:

- *CPO* *Cemento Portland Ordinario*

- *CPP* *Cemento Portland Puzolánico*
- *CPC* *Cemento Portland Compuesto*
- *CPEG* *Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno*
- *CPS* *Cemento Portland con Humo de Sílice*
- *CEG* *Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno*

ADITIVOS

A diversas sustancias que se añaden para modificar las propiedades de fluidez, acelerar o retardar el fraguado, así como para incrementar la resistencia a la corrosión del refuerzo de acero, se les denomina aditivos. Estos elementos son adicionados en pequeñas cantidades y el uso es particular de acuerdo a la propiedad que se requiera. Por su naturaleza se clasifican en aditivos químicos y en aditivos minerales.

Aditivos Químicos

Los aditivos químicos son sustancias de naturaleza orgánica (resinas) e inorgánica, naturales o fabricados, que se incorporan a la mezcla antes o durante el mezclado y que por lo general son utilizados en porcentajes no mayores al 5 % en peso del cemento; con el objetivo de mejorar o modificar alguna o varias de las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como endurecido y por acción física, química, o físico-química. Son sustancias que también pueden utilizarse para compensar algunas limitaciones del material, y generalmente se encuentran como polvos, emulsiones o líquidos.

Las normas ASTM C-260-00 y C-1012/1017M-98 presentan especificaciones para estos aditivos. Los aditivos incorporadores de aire están estandarizados por la norma ATM-C-260-00; la norma ASTM-1017/1017M-98 incluye especificaciones para los aditivos químicos a ser utilizados en concretos bombeables, entre los que se incluyen los plastificantes y retardadores.

Tabla 1.4 Tipos de Aditivos [7]

TIPO DE ADITIVO	CARACTERISTICAS
Plastificantes	Permiten reducir la cantidad de agua en la mezcla, si se mantiene constante la cantidad de cemento, la resistencia del concreto aumenta. El periodo de efectividad de los aditivos plastificantes es limitado, entre ellos se tiene ácido cítrico, ácido glucónico y los lignosulfonatos.
Superplastificantes	Permiten reducir hasta 3 o 4 veces el agua a través del uso de plastificantes; esta reducción puede variar entre 20% y 25% del contenido total de agua. Algunos de estos tipos de aditivos son: naftalinas condensadas, mezclas de melaninas y sales de ácido naftalínico sulfúrico.
Incorporadores de aire	Se usan con objeto de añadir a la mezcla burbujas de aire uniformes, ya que favorece la resistencia del concreto al deterioro producido por el calor y heladas alternadas. Entre ellos se tiene: sales de la resina de la madera, detergentes sintéticos, sales de los ácidos de petróleo, ácidos resinosos y sus sales, etc.
Controladores de fraguado	Pueden ser acelerados o retardadores; los primeros incrementan la velocidad de fraguado. Los aditivos retardadores, incrementan el tiempo de reacción del cemento. Algunos químicos usados como controladores de fraguado son: cloruro de calcio, nitrato de calcio, carbonato de potasio, carbonato de sodio, sulfato de calcio, etc.

Aditivos Minerales

Entre los aditivos minerales se tienen principalmente: los aditivos naturales, cenizas volantes o fly ash, microsílíce o silica fume y escoria de la producción del acero. Las normas ASTM-C-618-99 y C-989-99 incluyen especificaciones en torno a ellos. Los aditivos minerales son materiales silíceos muy finos que son adicionados al concreto en cantidades grandes; su función es reaccionar con algunas sustancias producto de la hidratación del cemento que no contribuyen a mejorar la resistencia del concreto obteniendo otros compuestos que si incrementan dicha propiedad, se usan para [4]:

- ✓ Mejorar la trabajabilidad (propiedad del concreto que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de mezcla de concreto fresco) del concreto
- ✓ Reducir el agrietamiento por el calor de hidratación
- ✓ Mejorar la durabilidad del concreto a los ataques químicos
- ✓ Reducir su potencial de corrosión
- ✓ Producir concretos de alta resistencia

1.1.2 Agregados

Los agregados son de gran importancia en el concreto, ya que la resistencia de éste depende de la buena calidad de los agregados, además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del concreto. Se consideraban como materiales inertes, aunque se sabe que sus propiedades físicas y químicas influyen en el comportamiento del material compuesto final. Algunos agregados reaccionan con los álcalis del cemento especialmente los agregados silicios y los agregados carbonatados.

Los primeros cuando poseen óxidos de silicio en sus formas inestables reaccionan con los hidróxidos alcalinos del cemento, produciéndose un gel que aumenta de volumen a medida que absorbe agua con lo que origina presiones internas en el concreto con la consiguiente expansión, agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento. Además, le proporcionan al concreto mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad [19].

La alternativa más común en la fabricación de concreto de buena calidad, es obtener agregados que entren, en dos rangos de tamaño. La división principal se hace entre el agregado fino (arena) cuyo tamaño no es mayor de 5 [mm] y el agregado grueso (grava) que comprende material mayor a 5 [mm].

1.1.3 Relación agua/cemento (a/c)

La relación a/c es la cantidad de agua utilizada con respecto al peso o volumen de cemento; su importancia radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua estará más compacta, por lo que tendrá menor cantidad de poros interconectados (que son permeables a líquidos y gases) en donde se aloje la humedad y facilite la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión; lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por lo tanto mayor porosidad y mayor permeabilidad. Esto es de gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto los elementos soporte (como el oxígeno) como los agentes iniciadores (ion cloruro) del ataque corrosivo, pueden difundir hacia el acero a través de la masa de concreto.

1.1.4 Curado

Cuando se mezcla cemento con agua, tiene lugar una reacción química; esta reacción llamada hidratación es la que hace que el cemento, y por lo tanto el concreto se endurezca y después desarrolle resistencia. Este desarrollo de resistencia se observa sólo si el concreto se mantiene húmedo y a temperatura favorable, especialmente durante los primeros días. El proceso de curado se realiza con el fin de prevenir la evaporación del agua en el concreto, manteniendo la humedad para que se lleve a cabo satisfactoriamente la hidratación de los materiales cementantes y el endurecimiento apropiado del concreto. El propósito es mantener el concreto saturado, esto con el fin de que los productos de hidratación del cemento llenen los espacios de la pasta fresca que al principio estaban llenos de agua.

El concreto que ha sido correctamente curado es superior en muchos aspectos: no solo es más resistente y durable ante los ataques químicos, sino que es más resistente al desgaste y más impermeable; por añadidura, es menos probable que lo dañen heladas y golpes

accidentales que reciba. El tiempo que el concreto debe protegerse contra la pérdida de humedad depende del tipo de cemento, de las proporciones de la mezcla, de la resistencia necesaria, del tamaño y la forma de la masa del concreto, del tiempo y de las futuras propiedades de exposición [17].

1.2 Concreto Armado

El concreto armado es un material compuesto de concreto y acero asociados de modo que forman un sólido único. Frente a otros materiales como el acero, la madera, etc., el concreto armado presenta las siguientes ventajas y desventajas [1]:

Ventajas.

- ✓ Es durable a lo largo del tiempo y no requiere de una gran inversión para su mantenimiento
- ✓ Tiene gran resistencia a la compresión en comparación con otros materiales
- ✓ Es resistente al efecto del agua
- ✓ Se le puede dar la forma que uno desee haciendo uso del encofrado adecuado
- ✓ En fuegos de intensidad media, el concreto armado sufre daños superficiales si se provee un adecuado recubrimiento al acero. Es más resistente al fuego que la madera y el acero estructural.
- ✓ Le confiere un carácter monolítico a sus estructuras lo que les permite resistir más eficientemente las cargas laterales de viento o sismo.
- ✓ Su gran rigidez y masa evitan problemas de vibraciones en las estructuras erigidas con él.
- ✓ En la mayoría de los lugares, es el material más económico
- ✓ Por su gran peso propio, la influencia de las variaciones de cargas variables es menor.

Desventajas.

- ⊕ Tiene poca resistencia a la tracción, aproximadamente la décima parte de su resistencia a la compresión.
- ⊕ Requiere de encofrado lo cual implica su habilitación, vaciado, espera hasta que el concreto alcance la resistencia requerida y desencofrado, con el tiempo que estas operaciones implican. El costo de encofrado puede alcanzar entre un tercio y dos tercios del costo total de mano de obra.
- ⊕ Su relación resistencia a la compresión versus peso está muy por debajo que la correspondiente al acero, el cual es más eficiente cuando se trata de cubrir grandes lugares. El concreto requiere mayores secciones y por ende el peso propio es una carga muy importante en el diseño.
- ⊕ Requiere de un permanente control de calidad, pues esta se ve afectada por las operaciones de mezcla, colocación, curado, etc.

- ⊕ Presenta deformaciones variables con el tiempo. Bajo cargas sostenidas, las deflexiones en los elementos se incrementan con el tiempo.

1.3 Acero de Refuerzo

El acero usado en la industria de la construcción es el llamado acero estructural y existe hoy en día una amplia gama de aceros estructurales, en donde las características mecánicas controladas cuidadosamente son:

- resistencia a la tensión
- ductilidad
- tenacidad
- soldabilidad

Antiguamente el acero para refuerzo se limitaba solo al de bajo-medio carbono (0.2-0.45%); para después utilizar varillas de refuerzo de alta resistencia. Esto se logró, incrementando el contenido de carbono en el acero o introduciendo dureza mecánica por torcido o estirado. A finales de los años cincuenta aparecieron en el mercado los aceros de alta resistencia y baja aleación, los cuales reúnen las propiedades mecánicas de los aceros de alto contenido de carbono, con las propiedades de los aceros de bajo carbono [2].

El acero para reforzar concreto se utiliza en distintas formas. La más común es la barra o varilla corrugada que se fabrica de acero laminado en caliente; los diámetros usuales de las barras producidas en México varían de $\frac{1}{4}$ de pulg. a $1\frac{1}{2}$ pulg. (Algunos productores han fabricado varillas corrugadas de $\frac{5}{16}$ de pulg, $\frac{5}{32}$ de pulg y $\frac{3}{16}$ de pulg.) En otros países se usan diámetros aun mayores. Generalmente el tipo de acero se caracteriza por el límite o esfuerzo de fluencia; este límite se aprecia claramente en las curvas esfuerzo-deformación de barras laminadas en caliente (figura 1.1). El acero trabajado en frío no tiene un límite de fluencia bien definido (figura 1.2). En este caso, el límite de fluencia suele definirse trazando una paralela a la parte recta de la curva esfuerzo-deformación desde un valor de la deformación unitaria de 0.0002; la intersección de esta paralela con la curva define el límite de fluencia.

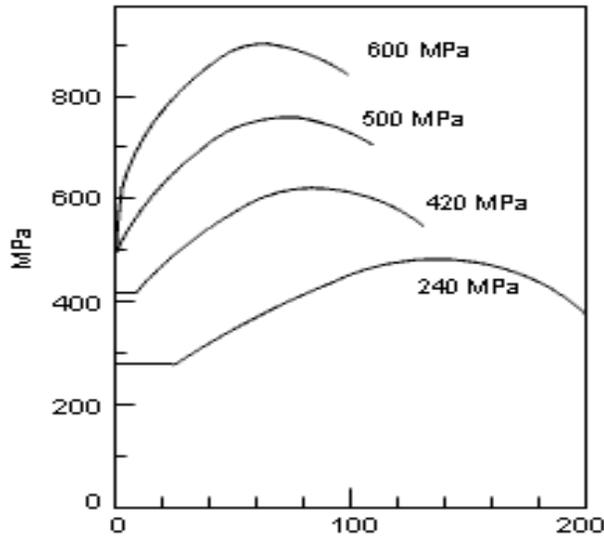


Figura 1.1 Curvas esfuerzo-deformación de aceros laminados en caliente para barras de refuerzo de fabricación europea [32]

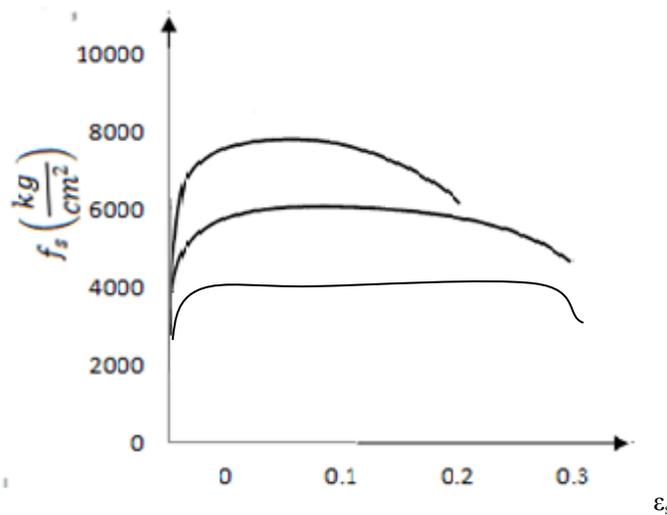


Figura 1.2 Curvas esfuerzo-deformación de aceros trabajados en frío para barras de refuerzo de fabricación europea [6]

El acero que se emplea en estructuras preesforzadas es de resistencia francamente superior a la de los aceros descritos anteriormente. Su resistencia última varía entre 14,000 y $22000 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$, y su límite de fluencia, definido por el esfuerzo correspondiente a una deformación permanente de 0.002, entre 12,000 y $19000 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$. Una propiedad importante que debe tenerse en cuenta en refuerzos con detalles soldados es la soldabilidad. La soldadura de aceros trabajados en frío debe hacerse con cuidado. Otra propiedad importante es la facilidad de doblado, que es una medida indirecta de ductilidad [6].

1.4 Condiciones de Exposición

Las causas externas de carácter no estructural que suelen afectar la durabilidad de una estructura de concreto, son consecuencia principalmente de sus condiciones de exposición y servicio. Las condiciones de exposición se refieren básicamente a las del medio ambiente y el medio de contacto con el concreto en el sitio, mientras que las de servicio son inherentes a las funciones operativas de cada estructura en particular.

Medio Ambiente

La temperatura y la humedad son características ambientales cuyas magnitudes y variaciones pueden afectar la obtención de propiedades y el desempeño del concreto en sus diferentes modalidades y etapas, desde recién mezclado hasta completamente endurecido.

Medio de Contacto

El concreto en la estructura puede tener contacto permanente, cíclico o eventual con diversos medios, dependiendo de aspectos tales como la localización, tipo y funciones de la estructura y de su posición dentro de ésta. No necesariamente todos los medios de contacto ejercen acciones que afectan la durabilidad del concreto, ni tampoco un mismo medio debe juzgarse siempre igual. Más bien lo que procede es identificar los agentes que pueden dañar al concreto, evaluar el grado de concentración en que son dañinos y cuantificar su existencia en el medio de contacto. A continuación se muestran diferentes medios de contacto a los cuales puede estar sujeta una estructura:

- Suelo y agua freática
- Aguas superficiales
- Agua de mar
- Aguas residuales
- Salmueras
- Aire atmosférico
- Sustancia químicas

1.5 Tipos de Atmósferas

Recordando que el fenómeno de la corrosión atmosférica en términos generales se da mediante la interacción de un material y el medio ambiente donde está expuesto; un entendimiento del medio ambiente y los factores que afectan la corrosión son importantes para entender dicho fenómeno. Entender el medio ambiente nos ayuda a determinar qué factores contribuyen en la actividad corrosiva, y con frecuencia conduce a la identificación de métodos apropiados de control de la corrosión. Las exposiciones en atmósferas

naturales son clasificadas dentro de cuatro tipos con el propósito de entender su efecto en la corrosión. Se asume que todas esas atmósferas están compuestas por una mezcla de oxígeno (aprox. 20%) y nitrógeno (aprox. 78%).

Los contaminantes gaseosos y sólidos potencian el efecto corrosivo de los factores meteorológicos. Así, el proceso de corrosión depende fundamentalmente de la humedad relativa del aire y de los contaminantes presentes en el mismo. El cloruro de sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO_2) son los principales contaminantes corrosivos en la atmósfera. El primero es un contaminante "natural" y llega a la atmósfera proveniente del mar (atmósfera marina). El SO_2 se encuentra en el aire, y es originado principalmente por la combustión de combustibles fósiles. Los niveles más altos de contaminación sulfurosa se registran en las áreas industriales (atmósfera industrial) y en las grandes ciudades (atmósfera urbana).

En el caso de la presencia de cloruros, más allá de unos pocos cientos de metros del borde del mar, la salinidad y la velocidad de corrosión suelen decaer ostensiblemente. La humedad relativa es importante en el grado de corrosión atmosférica. El hierro desnudo corroe a baja velocidad tanto en zonas urbanas, industriales con una humedad relativa (HR) ambiente menor de 70%. La humedad crítica está asociada con la naturaleza higroscópica del sólido contaminante presente, como la de los productos de corrosión. Sus valores oscilan entre el 50 y el 70% en el acero, cobre, níquel y zinc.

Mientras que el oxígeno presente en la atmósfera natural es importante en corrosión atmosférica, este permanece prácticamente constante. Son otros materiales de la atmósfera los que varían considerablemente y que deben ser propiamente identificados para entender la corrosión atmosférica. La corrosión ocurre a mucha mayor velocidad cuando las superficies están húmedas que cuando están libres de agua líquida. No solo es importante la cantidad de lluvia, sino también es importante su distribución con el tiempo y el tiempo requerido de secado [12].

Atmósfera Rural

Las atmósferas rurales no contienen los fuertes compuestos químicos encontrados en atmósferas industriales o las sales que caracterizan la atmósfera marina. Sin embargo, puede haber polvos agresivos y gases. Los polvos pueden ser orgánicos o inorgánicos. Una amplia variedad de químicos inorgánicos son empleados en actividades agrícolas; estos incluyen fertilizantes, abonos, herbicidas, insecticidas y fungicidas. Muchos de esos compuestos son corrosivos y algunos son higroscópicos. Materiales orgánicos incluyen abonos y residuos de cosechas (Fig. 1.3).

El abono es usualmente ácido; recubrimientos de este tipo de compuestos incrementará el tiempo de mojado de las superficies. El amoníaco del abono o fertilizantes, puede ser también ser agresivo. El cobre y sus aleaciones son particularmente susceptibles a corrosión por compuestos de amoníaco. Una alta temperatura ambiente, luz de sol intensa y arena

movida por el viento son comunes en un ambiente árido y pueden ser factores significantes en la corrosión de los materiales.



FIGURA 1.3 Región típica de una atmósfera rural [23]

Atmósfera Tropical

Las atmósferas tropicales se caracterizan por altas humedades relativas y una intensa luz solar (Fig. 1.4). Durante la noche, hay largos períodos donde ocurre la condensación. En áreas escondidas, esta condensación puede persistir por largos tiempos, y aún de manera continua. [7].



FIGURA 1.4 Región de una típica atmósfera tropical [24]

Atmósfera Urbana

Es similar a la rural pero con la diferencia de que presenta una combustión más intensa y también combustión de vehículos automotores. Aquí los contaminantes típicos son el bióxido de azufre, partículas suspendidas, aumento de bióxido de carbono y óxido de nitrógeno (Fig. 1.5).



FIGURA 1.5 Atmosfera Urbana de la Ciudad de México [25]

Atmósfera Industrial

Es una de las más perjudiciales ya que tiene mayores concentraciones de bióxido de azufre, cloruros, fosfatos, óxidos de nitrógeno y otras emisiones industriales, las cuales combinadas con precipitaciones o rocío forman líquidos altamente corrosivos (Fig. 1.6).



FIGURA 1.6 Atmósfera Industrial en la Ciudad de México [26]

Atmósfera Marina

Se caracteriza por tener alta concentración de sales, básicamente cloruros que se depositan en los materiales desde el mar a través de los vientos (Fig. 1.7). Esta cantidad de sales es más perjudicial cerca de la orilla del mar donde el aire transporta grandes cantidades de sal influyendo también la dirección y velocidad del viento [2].



FIGURA 1.7 Región típica de una atmósfera marina

1.5.1 Clasificación de las categorías de contaminación

Las categorías que se consideran están definidas para la contaminación de la atmósfera por SO_2 y aerosoles de agua de mar (ISO 1992^a). Estos tipos de contaminantes son representativos de atmósferas tales como: rural, urbana, industrial y marina. Los otros tipos de contaminantes se consideran añadidos (por ejemplo, NO_x en atmósferas urbanas e industriales). La clasificación de la contaminación debida al dióxido de azufre para atmósferas exteriores se presenta en la tabla 1.5.

La clasificación de la contaminación por pulverización o aerosoles salinos que se propone en la tabla 1.6 representada por el nivel de NaCl , tiene que ver con atmósferas exteriores en ambientes marinos; la situación geográfica y las condiciones climáticas pueden cambiar la distancia afectada por la salinidad tierra adentro [18].

Tabla 1.5 Clasificación de la contaminación por sustancias sulfurosas representadas por el nivel de SO_2 . [18]

Velocidad de deposición $SO_2 \left[\frac{mg}{m^2 \text{ día}} \right]$	Concentración SO_2 $\left[\frac{mg}{m^3} \text{ o ppm} \right]$	Categoría
<10	<0.012	P_0
>10-35	0.012-0.04	P_1
>35-80	0.04-0.0	P_2
>80-200	0.09-0.025	P_3

Observaciones:

- i. Las cantidades de SO_2 determinadas por deposición, P_d , o volumétrica, P_v , son equivalentes a efectos de clasificación.
- ii. La velocidad de deposición de SO_2 y la concentración representan un promedio anual.
- iii. Cualquier concentración inferior a P_0 se considera no importante desde el punto de vista de la corrosión.
- iv. Una contaminación por encima de P_3 se considera extrema y es típica de determinados microclimas.

Tabla 1.6 Clasificación de la contaminación por aerosoles salinos representados por el NaCl. [18]

Velocidad deposición NaCl $\left[\frac{mg}{m^2 \text{ día}} \right]$	Categoría
<5	S_0
5-100	S_1
100-500	S_2
500-1500	S_3

Observaciones:

- i. La clasificación anterior está basada en la determinación de la velocidad de deposición de cloruros por el método de la candela húmeda
- ii. Los resultados obtenidos por la aplicación de diferentes métodos para la determinación del contenido salino de la atmósfera no son siempre directamente comparables ni convertibles
- iii. La porción más significativa de la contaminación es la causada por el NaCl, siendo la restante debida a $MgCl_2$, KCl y otros constituyentes del agua de mar.
- iv. La concentración de NaCl está expresada como promedio anual
- v. Las velocidades de deposición inferiores a S_0 se consideran no importantes para el ataque corrosivo
- vi. Grados de contaminación por encima de S_3 se consideran extremos
- vii. Los aerosoles salinos dependen fuertemente de las variables que influyen en el transporte de las partículas salinas tierra adentro, tales como la dirección del viento, velocidad, topografía local,

1.5.2 Categorías de la corrosividad de la atmósfera

La corrosividad de la atmósfera se divide en 5 grupos, como se indica en la Tabla 1.7 (ISO 1992^a)

Tabla 1.7 Categorías de la corrosividad de la atmósfera. [18]

Categoría	Corrosividad
1	Muy baja
2	Baja
3	Media
4	Alta
5	Muy Alta

Uno de los factores que incrementa la intensidad del fenómeno corrosivo en la atmósfera es la composición química de la misma. El bióxido de azufre (SO₂) y el cloruro de sodio (NaCl), son los agentes corrosivos más comunes y significativos de la atmósfera, aunque las partículas y el ácido sulfhídrico (H₂S) en casos particulares también son importantes. El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar, mientras que lejos de éste, la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el contaminante principal por su frecuencia e incidencia sobre el proceso corrosivo el SO₂ proveniente del quemado de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre. Desde hace tiempo, el Grupo de Trabajo 4 del Comité Técnico 156 de la International Standards Organization (ISO) viene trabajando en la elaboración de normas que permitan clasificar las atmósferas desde el punto de vista de la corrosividad. El fin ha sido establecer guías simplificadas y de fácil utilización, que aparecieron como normas ISO 9223 y 9224 (ISO 1987, 1989).

Con relación a la clasificación de la corrosividad atmosférica, ISO 9223 establece cinco categorías (Tabla 1.8), para cada uno de los cuatro metales estructurales típicos (acero al carbono, zinc, cobre y aluminio). Esta misma norma establece para las atmósferas diferentes categorías en cuanto a tiempo de humectación y a concentración de dióxido de azufre y cloruros (Tablas 1.9 a 1.11) [18].

Tabla 1.8 Categorías de agresividad de la atmósfera. [18]

Categoría de agresividad	Acero* $\left[\frac{\mu\text{mm}}{\text{año}}\right]$	Zinc* $\left[\frac{\mu\text{mm}}{\text{año}}\right]$	Cobre* $\left[\frac{\mu\text{mm}}{\text{año}}\right]$	Aluminio* $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^2\text{año}}\right]$	Corrosividad
C1	≤ 1.3	≤ 0.1	≤ 0.1	Desp.	Muy baja
C2	$> 1.3 \leq 25$	$> 0.1 \leq 0.7$	$> 0.1 \leq 0.6$	≤ 0.6	Baja
C3	$> 25 \leq 50$	$> 0.7 \leq 2.1$	$> 0.6 \leq 1.3$	$> 0.6 \leq 2$	Media
C4	$> 50 \leq 80$	$> 2.1 \leq 4.2$	$> 1.3 \leq 2.8$	$> 2 \leq 5$	Alta
C5	$> 80 \leq 200$	$> 4.2 \leq 8.4$	$> 2.8 \leq 5.6$	$> 5 \leq 10$	Muy alta

*Se refiere a la pérdida de masa

Tabla 1.9 Clasificación por el tiempo de humectación. [18]

Categoría	Horas/Año	%Año
T1	$\tau < 10$	$\tau < 0.1$
T2	$10 \leq \tau \leq 250$	$0.1 \leq \tau \leq 3$
T3	$250 \leq \tau \leq 2500$	$3 \leq \tau \leq 30$
T4	$2500 \leq \tau \leq 5500$	$30 \leq \tau \leq 60$
T5	$\tau > 5500$	$\tau > 60$

1.6 Deterioro del Concreto Reforzado.

El concreto es un material discontinuo, duro y de alta densidad. El concreto simple, sin refuerzo, es resistente a la compresión, pero es débil en tracción, lo que limita sus aplicaciones como material estructural. Para resistir cargas de tracción se emplea refuerzo de acero, generalmente en forma de barras, colocado en las zonas en donde se prevé que se desarrollarán tensiones bajo las acciones de servicio. El acero restringe el desarrollo de las grietas originadas por la poca resistencia a la tensión del concreto. El uso del refuerzo no está limitado a la finalidad anterior; también se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir las deformaciones debidas a cargas de larga duración y para proporcionar confinamiento lateral al concreto, lo que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión [11].

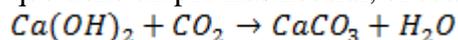
Las estructuras de grandes ciudades, costas, puentes, etc., están reforzadas interiormente con varillas de acero las cuales se cubren de concreto (mezcla de cemento Portland, arena, agua y agregado de pH alto, aproximadamente 12). Debido a su propia constitución, contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados, siendo por tanto permeable a líquidos y gases. Esto es de una gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, pues tanto el oxígeno como el agua pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto.

El deterioro del acero de refuerzo del concreto se puede llevar a efecto por diferentes fenómenos:

- a) Fractura localizada de la película de pasivación por iones cloruro
- b) Carbonatación. Decrecimiento del pH, lo que produce una pérdida de la pasivación; esto se puede deber a la lixiviación producida por agua (lluvia, nieve) la cual disuelve y elimina al hidróxido de calcio. También se puede presentar un intercambio iónico (iones Mg, amonio, sulfato, oxidrilo) entre los componentes de la pasta y el medio ambiente, reacciones que dan lugar a la formación de componentes solubles en el agua, la cual los va retirando del concreto.
- c) Sulfatación. La acción del SO_2 actúa sobre la superficie del acero de refuerzo, llevando a cabo un ataque localizado desde afuera hacia adentro del concreto.

1.6.1 Corrosión por Carbonatación

La carbonatación en el concreto está dada por la modificación del pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH (fuertemente alcalino) a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral, el cual se representa como:



El concreto protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión; esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Por las condiciones de proceso, la carbonatación se presenta como un frente paralelo a la superficie del material, el cual se desplaza en dirección perpendicular. El frente de avance de la carbonatación se puede determinar a través de la aplicación de sustancias orgánicas (fenolftaleína). [8]

El método tradicional para monitorear la carbonatación del concreto está basado en el método colorimétrico utilizando el indicador de fenolftaleína. La solución normalmente es preparada mediante una proporción de polvo de fenolftaleína diluida en alcohol y agua: A este respecto el método RILEM CPC-18 recomienda una solución de 1% de fenolftaleína y 70% etanol. El cambio de pH es detectado mediante la aplicación de la solución sobre un corte fresco de concreto, la coloración violeta o morado indica un concreto sin carbonatación (como se muestra en la figura 1.8). Se ha reportado (Berke, NS. and Schiessl, P., 1988) que el mínimo valor de pH requerido para mantener la capa pasiva del acero embebido en el concreto es de 11.5.

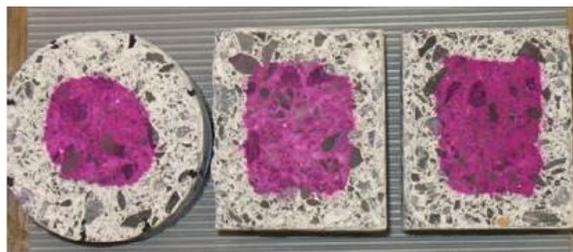


Figura 1.8 Método colorimétrico aplicado a prismas y cilindros [12]

Por otro lado, diversos valores de viraje de la fenolftaleína que han sido reportados, (Parrot, L. J., 1987) mencionan que el cambio de coloración se da en el rango de 8.3 a 10 de pH, por otro lado Miller, J.B. (1996) detectó que el cambio de coloración se da a un pH de 11 con una solución preparada con 1% de fenolftaleína y 96% de etanol. No obstante, diversos estudios han demostrado que la carbonatación no es un fenómeno instantáneo sino gradual; es decir, aún cuando la fenolftaleína evidencia un cambio de pH a un tiempo determinado, la disminución del pH continúa aún por debajo del valor de viraje del indicador.

El tiempo de iniciación de la corrosión inducida por carbonatación es igual al tiempo que le toma al frente carbonatable alcanzar el acero; dicho período puede variar dependiendo de diversos factores propios de la estructura y del medio ambiente. La corrosión causada por

carbonatación ocurre más rápidamente cuando el recubrimiento del acero es muy pequeño. También el avance del frente de carbonatación se acelera cuando la reserva de álcalis es baja, esto es muy común que ocurra en concretos con bajos contenidos de cemento o fabricados con puzolanas. Asimismo, se ha observado que los ciclos de humedecimiento y secado del concreto pueden acelerar la carbonatación.

La velocidad de carbonatación del concreto tiende a disminuir con el tiempo debido a que los carbonatos precipitados en la zona superficial dificultan la difusión del CO₂ a mayor profundidad. Se han propuesto diferentes modelos para describir la velocidad de carbonatación, no obstante el modelo más empleado para evaluar dicho parámetro está basado en la siguiente expresión matemática:

$$d = kt^{\frac{1}{n}}$$

donde “d” es la profundidad de carbonatación (mm) y “t” el tiempo (años), cuando el exponente “n” es igual a 2, entonces la tendencia es una forma parabólica:

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

El coeficiente k (mm/año^{1/2}) es considerado como una medida de la velocidad de carbonatación para concretos expuestos en condiciones medioambientales de servicio (Bertolini L. et al., 2004), dentro del factor k están implícitas todas las características intrínsecas del concreto y condiciones de exposición [12].

1.6.2 Corrosión por Cloruros

Los cloruros provienen de sales inorgánicas que abundan en la naturaleza; y por eso, suelen encontrarse en el concreto desde la formación de la pasta de cemento. La presencia excesiva de cloruros en el concreto se puede originar por vía interna y externa.

Vía interna: es cuando los cloruros han sido adicionados a la pasta desde la fabricación del concreto, al estar contenidos en el agua empleada para formar la pasta; en los agregados o con algún aditivo.

Vía externa: es cuando los cloruros se encuentran en el medio ambiente que está en contacto con la estructura (suelo, agua, aire) y penetran en el concreto a través de fisuras o por difusión.

Por ejemplo, cuando la estructura de concreto está en contacto frecuente con agua que contenga iones de cloruro (agua de mar), a través de la propia porosidad del concreto puede llegar a las varillas de acero. En este momento se inicia la corrosión del acero. La herrumbre que se va formando como resultado del proceso de corrosión en el acero, por una parte disminuye la sección original de la varilla, y por otra, hace perder la adherencia inicial y deseada entre el acero y el concreto. El óxido de hierro formado (herrumbre) ocupa un volumen aproximadamente cuatro veces mayor que el acero sin corroer [9].

A medida que se va formando herrumbre por la corrosión del acero, ésta ejerce una gran presión sobre el concreto que lo rodea. Las fuerzas son de tal magnitud dentro del concreto que provocan grietas que lo fragilizan, perdiendo éste sus buenas propiedades mecánicas; el

proceso continua hasta que la herrumbre llega a aparecer en la superficie del concreto y se pueden observar las estructuras "manchadas". Los cloruros existen en dos formas básicas como cloruros libre y cloruros enlazados, los primeros representan elementos móviles en solución, mientras que los segundos representan iones relativamente fijos que interactúan con la pasta del cemento.

De acuerdo con el modelo de Tutti (1982) el proceso de corrosión puede ser diferenciado claramente mediante dos períodos. En primer lugar, se tiene un proceso de iniciación el cual corresponde con el tiempo que tarda la carbonatación y/o los cloruros en provocar la despasivación. Posteriormente, se inicia el período de propagación donde propiamente el acero se corroe hasta llegar a un deterioro inaceptable de seguridad, funcionalidad o estética de la estructura. La corrosión progresiva del acero de refuerzo no solo es un daño en si mismo del metal, si no que se traduce también en un deterioro irreversible del concreto donde la manifestación principal es el agrietamiento y desprendimiento del material. En la figura 1.9 y 1.10, se muestran esas etapas [12].

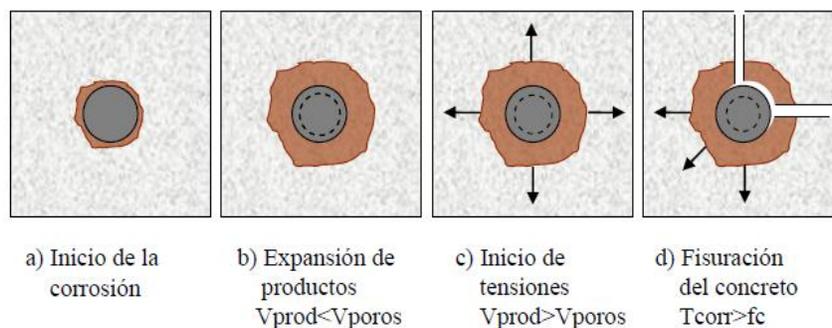


Figura 1.9 Proceso de fisuración del concreto (Weyers, R, 1998)

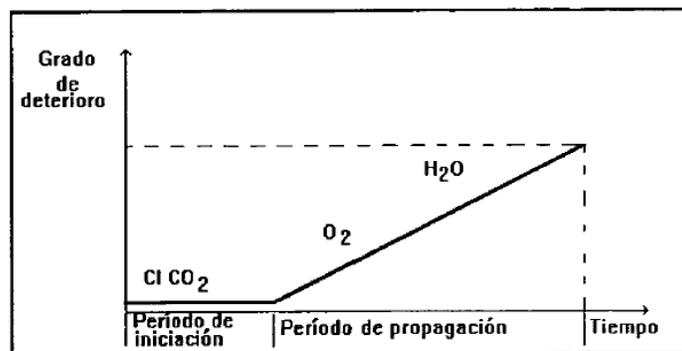


Figura 1.10 Tiempo de vida útil de una estructura

Los efectos de los cloruros sobre la corrosión son:

- Incrementan la conductividad de la mezcla, lo cual permite el movimiento de los iones hidroxilo (OH^-) entre el cátodo y el ánodo.

- Formación de ácido clorhídrico, lo cual produce el deterioro en la película de pasivación. Esto se presenta en el caso de que el grado de concentración de cloruros sea muy grande.

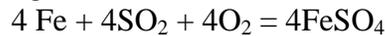
1.6.3 Corrosión por Sulfatación (SO₂)

Estudios previos manifiestan que el deterioro por concentraciones altas de dióxido de azufre (SO₂), se presenta de forma más rápida en este tipo de elementos (concreto reforzado), considerando que la herrumbre se formaba más rápidamente durante ciertas estaciones del año, dónde el contenido de SO₂ era elevado, aun considerando que la presencia en volumen de dicho contaminante es pequeño (1 molécula de dióxido de azufre permite la formación de 15 a 40 moléculas de herrumbre, de acuerdo a la estación).

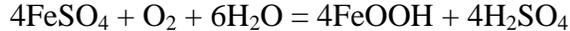
Al respecto del proceso cíclico de formación de herrumbre por dióxido de azufre, algunos autores [30], haciendo referencia a Evans y Taylor, explican la presencia de dos mecanismos:

- *Ciclo de Regeneración Ácida*

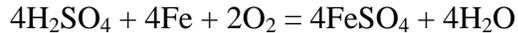
La humedad y el dióxido de azufre son absorbidos en la superficie metálica y con ello tiene lugar el proceso de oxidación electroquímica del dióxido de azufre en presencia del oxígeno disuelto.



El sulfato ferroso formado, reacciona con más oxígeno, que oxida el Hierro (II) a Hierro (III), formando óxido de Hierro (III) y ácido sulfúrico.



El ácido sulfúrico ataca al hierro y forma más sulfato ferroso, el cual es oxidado de acuerdo con el paso anterior y se repite el ciclo.

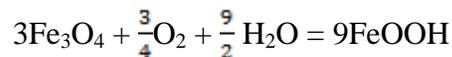


La presencia de sulfato sobre la superficie metálica, tiende a la formación de Sulfato de Hierro (II) hidratado (FeSO₄ · 4H₂O). Cuando se acumula sobre la superficie metálica suficiente producto de corrosión, principalmente sulfato ferroso y óxido, las condiciones son favorables para que exista un intercambio electroquímico en la celda Fe/FeSO₄/FeOOH

- *Ciclo Electroquímico*

Es una oxidación anódica del metal con liberación de dos electrones. Fe = Fe²⁺ + 2e⁻ (Reducción catódica de la herrumbre a magnetita, utilizando los dos electrones liberados en la primera semirreacción). Esto ocurre cuando la velocidad de difusión del oxígeno hasta la superficie del metal es muy lenta, sobre todo cuando existe una capa gruesa de electrolito sobre la superficie.

En una etapa posterior la magnetita (Fe₃O₄) será rápidamente convertida en herrumbre.



Con este mecanismo se incrementa la cantidad de óxido y la velocidad de corrosión y corresponde con los estudios de la estructura de la capa de producto de corrosión sobre el acero, donde se observa en las capas más internas sobre la

superficie metálica la magnetita (Fe_3O_4) de color negro. En la última reacción se forman 9 moléculas de FeOOH en lugar de las 8 que intervienen en la reacción anterior, por lo que se produce una ganancia neta de una molécula de herrumbre debido a la entrada del ión Fe^{2+} . La cantidad usada de este ión es igual a la producida en la reacción anódica. Estos cambios fueron demostrados experimentalmente por Evans [21].

En términos generales, los iones sulfato reaccionan con los aluminatos cálcico hidratados del clinker de cemento portland formando la sal de Candlot o Etringita, que es muy poco soluble en agua y provoca un gran aumento de volumen del orden del 250% en relación a los reactivos iniciales (Figura 1.11). Esta expansión produce grandes tensiones internas que, por lo general, no pueden ser absorbidas por el material y desencadena una serie de fisuras y desprendimientos superficiales de material.

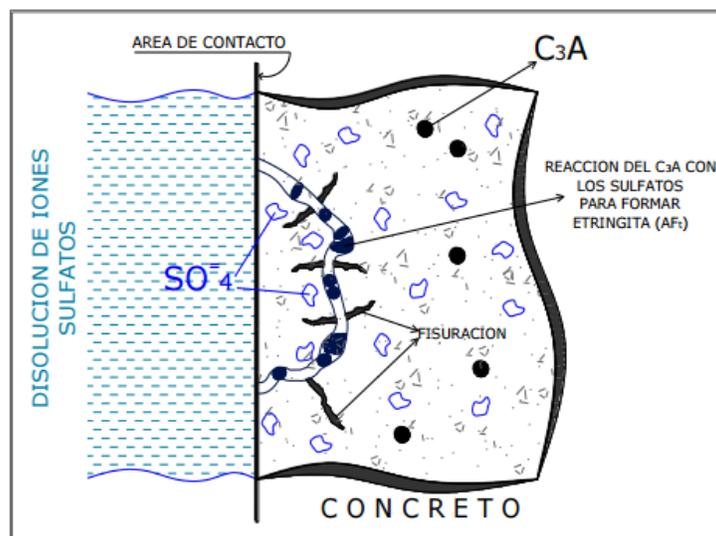


Figura 1.11 Acción de los sulfatos [22]

Se pueden distinguir 3 tipos de etringita (sulfoaluminato de calcio hidratado):

- Primaria, que no produce daños
- Secundaria, que se produce por una recristalización de etringita primaria
- Diferida (DEF), que produce daños por expansión conocidos como degradación por formación de etringita (Figura 1.12).

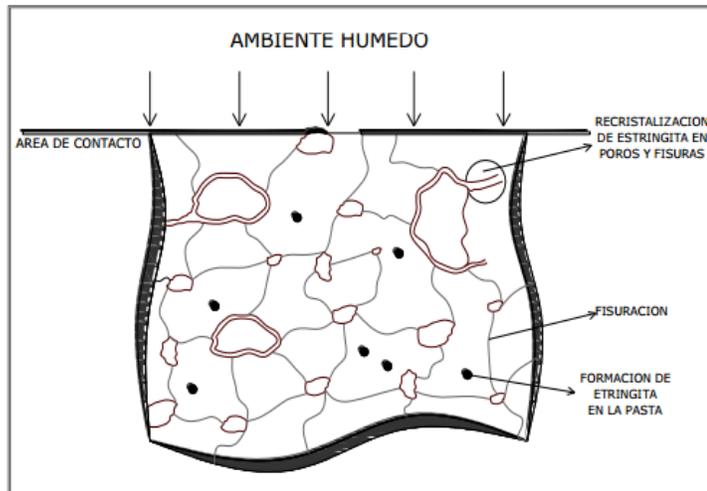


Figura 1.12 Expansión de la etringita diferida en el mortero

Este último tipo de etringita suele estar asociada al curado a altas temperaturas ya que por encima de 65°C se produce una disolución de la etringita que provocaría expansiones en su recristalización.

De los mecanismos de degradación sin lugar a dudas los más complicados por entender son los de carácter químico, debido a que no sólo es necesario entender el comportamiento del concreto como material único, sino también, la relación de este con el acero que lo refuerza y con los diferentes ambientes a que está sujeto. Enumerar cada una de las sustancias o medios que no son compatibles con el concreto es una labor muy amplia, y contempla un sin número de variables. Un gran número de procesos destructivos debidos a la formación de sales se puede relacionar con la agresividad de los sulfatos.

El ion sulfato causante de la degradación del concreto puede estar presente en el suelo o en el agua subterránea o freáticas, en soluciones acuosas de ácido sulfúrico o en formas de sales, sulfatos que son identificados como anión SO_4 . Las sales de sulfatos dañinas al concreto están presentes principalmente en suelos selenitosos con yeso y en aguas freáticas de estos mismos suelos, cabe hacer mención que el agua de mar aparte de contener sales de sulfatos está compuesta de otras sales cuyo trabajo químico en conjunto, así como la exposición la hacen ser de mediana a severamente dañina.

En ambientes húmedos el azufre normalmente está presente en forma de compuestos orgánicos. Sulfatos que pueden ser fácilmente disueltos en el suelo, mientras que el azufre combinado en forma de compuestos inorgánicos ofrece una mayor resistencia a ser disuelto y es transformado gradualmente en sulfatos. Esta transformación de azufre orgánico en sulfato requiere de la descomposición del nitrógeno contenido en las albúminas, en los nitratos, incrementando así la acidez del suelo. De acuerdo a las investigaciones realizadas en diferentes países el uso de abonos artificiales y el estiércol aumentan en forma importante el contenido de sulfatos en el suelo, aunado a esto, el cultivo del suelo promueve la ventilación del suelo con lo que a ciertas profundidades se incrementan la oxidación del azufre en grandes extensiones, motivo por el cual en suelos cultivados las concentraciones de sulfatos pueden aumentar hasta en un 100%, respecto a suelos no cultivados.

La contaminación con sulfatos de origen fecal puede ocurrir por todas partes, con lo que la agresividad del suelo y las aguas freáticas se puede deber a la contaminación de diferentes

sustancias. Cuando se lleva a cabo la construcción de una nueva obra en un terreno cultivado es necesario realizar un estudio profundo sobre el contenido de sulfatos en el suelo, así como el agua subterránea que pudiera llegar a tener contacto con el concreto.

Por otro lado en las zonas industriales así como en las zonas urbanas la combustión de carbón o gasolinas con una cierta cantidad de azufre liberará dióxido de azufre que en presencia de oxígeno y humedad forman el ácido sulfúrico. Un defecto indirecto del humo cargado de dióxido de azufre se hace presente en las ciudades donde las eflorescencias (salitre), y la degradación de ciertas fachadas son debidas frecuentemente a la formación de yeso y a la adherencia de polvos como cenizas, particulares de carbón, etc. [22]. Las aguas de lluvia, en particular las lluvias ácidas pueden contener sulfatos en forma de ácido sulfúrico, el cual ataca la superficie del concreto endurecido así como el concreto plástico [31].

El deterioro del concreto por ataque de cloruros y sulfatación conlleva grandes gastos en la economía de un país, por lo que es importante conocer los mecanismos de mantenimiento a las estructuras de concreto con algún daño causado por corrosión. Además de en algunos casos se debe de proteger al acero de refuerzo para evitar o retardar su deterioro. En el siguiente capítulo se muestran algunos métodos de mantenimiento al concreto y protección al acero de refuerzo.

CAPITULO 2

MECANISMOS DE MANTENIMIENTO DEL CONCRETO Y MÉTODOS DE PROTECCIÓN DEL ACERO DE REFUERZO CONTRA LA CORROSIÓN.

Existen dos procedimientos principales para construir estructuras de concreto; la primera es cuando los elementos estructurales se forman en su posición definitiva, por lo que se dice que la estructura ha sido colada en el lugar. Si se fabrican en un lugar distinto al de su posición definitiva en la estructura, el procedimiento recibe el nombre de prefabricación. Con el primer procedimiento se obliga a una determinada secuencia de operaciones, es decir, para iniciar cada etapa es necesario esperar a que haya concluido la anterior, por lo que se eleva el costo. Mientras que con el segundo procedimiento se economiza, ya que se pueden realizar simultáneamente varias etapas de construcción, pero se presenta el problema de desarrollar conexiones efectivas entre los elementos

En elementos de concreto reforzado es necesario que exista adherencia entre el concreto y las barras de refuerzo, de manera que ambos materiales estén íntimamente ligados entre sí; la adherencia tiene su origen en los siguientes fenómenos:

- a) Adhesión de naturaleza química entre el acero y el concreto
- b) Fricción entre la barra y el concreto, que se desarrolla al tender a deslizar la primera
- c) Apoyo directo de las corrugaciones de las barras sobre el concreto que los rodea

El uso de varillas corrugadas mejora sensiblemente la adherencia, con lo que se reducen los agrietamientos. Siendo estos factores de suma importancia en el deterioro del acero de refuerzo, ya que al presentarse grietas o una mala adherencia entre el acero y el concreto, se deja al acero expuesto a la corrosión. La corrosión se presenta como un proceso de oxidación en el cual el acero reacciona y forma compuestos porosos y de mayor volumen, que provocan daños en el concreto [11].

El desempeño de una estructura de concreto depende tanto de las características internas de este material como de las condiciones del medio que lo rodea y principalmente de las interacciones entre estos dos elementos. De esta interacción se determina la durabilidad de una estructura, que para el caso del concreto, dependerá de características propias como estabilidad volumétrica, resistencia a la penetración de cloruros, impermeabilidad. Adicional a estas propiedades existen otras características que pueden disminuir la durabilidad del concreto, por ejemplo una alta relación agua/cemento, poco tiempo de curado, alto desarrollo de calor de hidratación (esto implica mayor porosidad), altas variaciones volumétricas en función del clima y agrietamiento del concreto [10].

En el medio ambiente existen diversos factores que pueden causar corrosión en el acero o promover las condiciones para que ésta se inicie (Figura 2.1). El tipo de corrosión depende del medio en el que se desarrolla [10].

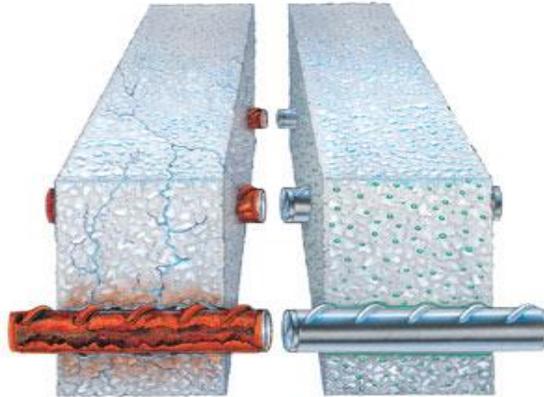


Figura 2.1 Corrosión en el acero de refuerzo [25]

Debido a que la corrosión en el concreto reforzado es un fenómeno electroquímico es posible estudiarla con métodos tales como:

- Inspección visual (Figura 2.2)
- Media celda
- Resistencia a la polarización lineal
- Impedancia electroquímica
- Ruido electroquímico

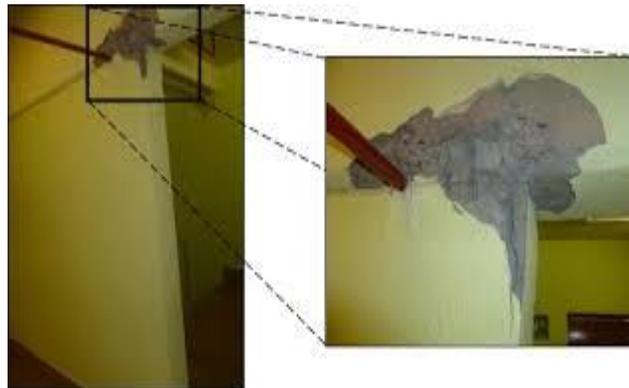


Figura 2.2 Inspección Visual de una estructura de concreto deteriorada [26]

La selección de las técnicas en un estudio específico depende del tipo de corrosión y de consideraciones económicas. Sin embargo, debido a la complejidad del fenómeno en estudio es necesario llevar a cabo por lo menos dos de las pruebas anteriores. [10] Los factores que intervienen en el deterioro del acero de refuerzo del concreto se pueden asociar con los presentados en la tabla 2.1:

Tabla 2.1 Factores que intervienen en el deterioro del acero de refuerzo [2]

A) Concreto	B) Características del material de refuerzo	C) Medio Ambiente
<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad (relación agua/cemento, cemento/arena, compactación y curado) • Porosidad • Espesor del recubrimiento • Homogeneidad del recubrimiento • Tipo de cemento • Agregados • Colocación del concreto 	<ul style="list-style-type: none"> • Condición superficial • Composición y microestructura del material • Estado de solicitaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Humedad relativa • Contaminantes presentes (CO₂, SO₄, Cl, O₂) • Corrientes parásitas • Efecto de organismos vivos (corrosión o degradación biológica)

2.1 Agrietamiento

Debido a la baja resistencia a la tracción del concreto, los elementos de este material tienden a agrietarse. Son diversas las causas que conducen al agrietamiento del concreto, siendo las fundamentales las deformaciones debidas a cambios volumétricos. Los cambios volumétricos ocasionados por variaciones en la temperatura y por contracción producen esfuerzos de tracción en los elementos estructurales cuando existe algún tipo de restricción; cuando estos esfuerzos son superiores a los que soporta el concreto se presentan agrietamientos (Figura 2.3).

Estos agrietamientos pueden controlarse ya sea por medio de refuerzo apropiadamente distribuido, generalmente especificado por los reglamentos con bases empíricas o ya sea disponiendo juntas de control que hacen que el agrietamiento aparezca en lugares definidos

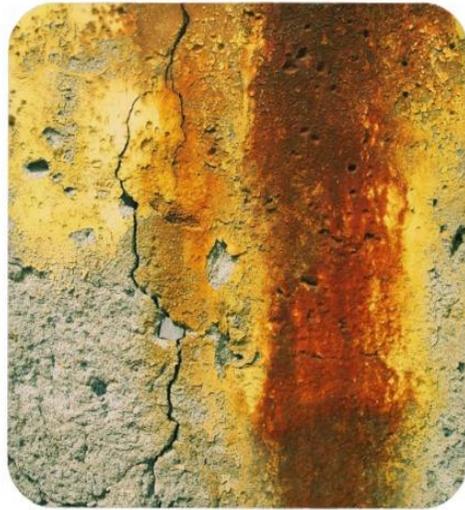


Figura 2.3 Concreto deteriorado debido al agrietamiento [26].

2.1.1 Clasificación de grietas

En lo que se refiere a la clasificación de las grietas en el concreto, se tienen diferentes propuestas, por lo que en la tabla 2.2 se resumen algunas de ellas.

Tabla 2.2 Clasificación de las grietas en el concreto [10]

CLASIFICACION	OBSERVACION
Ubicación ⁺	<ul style="list-style-type: none"> ⊕ Aisladas ⊕ A través del mortero ⊕ A través de los agregados
Profundidad ⁺⁺	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Superficial ➤ Poco profundas ➤ Profundas ➤ Grietas que atraviesan
Dirección ⁺⁺	<ul style="list-style-type: none"> • En mapas o con patrones • Individuales continuas • Alrededor de los agregados • En concreto fresco
Individuales (aisladas)⁺⁺⁺	Presentes en la interfase pasta-agregado y son estables bajo carga constante
Combinadas ⁺⁺⁺	<p>Grietas individuales conectadas por grietas a través del mortero, pueden ser de 2 tipos:</p> <p><i>Tipo I:</i> Dos grietas en la interfase conectadas por una grieta en el mortero, pero son estables.</p> <p><i>Tipo II:</i> Al menos dos grietas aisladas y dos y dos grietas en el mortero, son inestables</p>

⁺Blakely 1955

⁺⁺Crack in concrete causes and prevention

⁺⁺⁺Carrasquillo 1981

Tomadas de Hearn, 2001

2.2 Métodos de Protección

El concreto armado es un material compuesto de concreto y acero asociados de modo que forman un sólido único. Existen diversas medidas para limitar el daño que puede sufrir el acero de refuerzo, entre otras se puede mencionar:

- Reparación del concreto dañado
- Modificación del medio ambiente
- Modificación de las condiciones internas del concreto
- Formación de una barrera entre el concreto y el medio exterior

- Formación de una barrera entre el acero de refuerzo y el concreto
- Aplicación de protección catódica
- Empleando materiales más resistentes a la corrosión para las barras de refuerzo

Para que el concreto funcione adecuadamente como protector del acero de refuerzo, debe también poseer un espesor adecuado; de tal forma que en las condiciones ambientales en la que se encuentre expuesto, la velocidad de penetración de los agentes corrosivos sea congruente con la vida útil de la estructura. La primera etapa en la lucha para evitar el deterioro del concreto se da a través de evitar el acceso de aire con sus respectivos agentes corrosivos (SO_2 , CO , CO_2 y O_2). La eficiencia del concreto como elemento protector depende de su permeabilidad, integridad y espesor.

➤ **Protección del Concreto**

El recubrimiento debe mantener aislado al concreto del medio externo corrosivo, lo cual se puede lograr mediante:

- Películas Poliméricas*; la más usual es el polietileno, aunque el inconveniente es que el espesor suele ser grande, dejando a la superficie inhabilitada para funciones en las que el acabado superficial es importante.
- Recubrimientos por Película*; es similar al de un impermeabilizante de superficies. Los materiales más utilizados son las resinas epóxicas.
- Protección por sellado*; ideal para superficies en donde se busca aislar al acero de refuerzo de posibles daños por corrosión.

➤ **Protección al Acero de Refuerzo**

Es mediante recubrimientos especiales; éstos pueden ser:

- Metálicos*; entre los recubrimientos metálicos se distinguen 2 tipos:
 - Aquellos que se efectúan con metales más activos que el acero, como son el zinc y el cadmio, con los cuales al presentarse el fenómeno corrosivo se ataca el metal de recubrimiento al funcionar anódico con relación al acero.
 - Los recubrimientos con metales más nobles que el acero, como el cobre y el níquel; cuya eficacia en la protección del acero depende de la integridad del recubrimiento metálico.
- No Metálicos*; el recubrimiento no metálico más empleado para proteger al acero de refuerzo contra la corrosión consiste en aplicar resinas epóxicas en forma de polvo, que se adhiere electrostáticamente a las varillas perfectamente limpias y previamente calentadas.[8]

➤ Protección Catódica

La protección catódica del acero de refuerzo ha sido utilizada desde la década de 1980; es particularmente aplicada en los casos donde la corrosión es debida al ataque por cloruros. El principio de la protección catódica se basa en llevar el potencial del acero hacia valores más negativos, reduciendo de esta forma la diferencia de potencial entre sitios anódicos y catódicos. Para la aplicación de la protección catódica, existen dos métodos, estos son:

- *Por ánodos de sacrificio*; en este caso, un metal más activo (ánodo) es conectado al refuerzo funcionando el recubrimiento de concreto como un medio electrolítico (ver figura 2.4). De esta forma la corrosión toma lugar en el ánodo y no en el refuerzo [12]

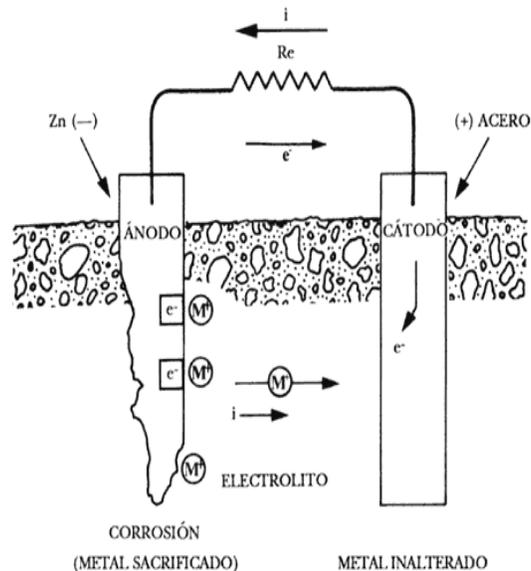


FIGURA 2.4 Mecanismo de protección catódica por ánodo de sacrificio [9]

- *Por corriente impresa*; un ánodo inerte se conecta al refuerzo y la corriente directa es aplicada cambiando el potencial hacia valores catódicos (ver Figura 2.5)

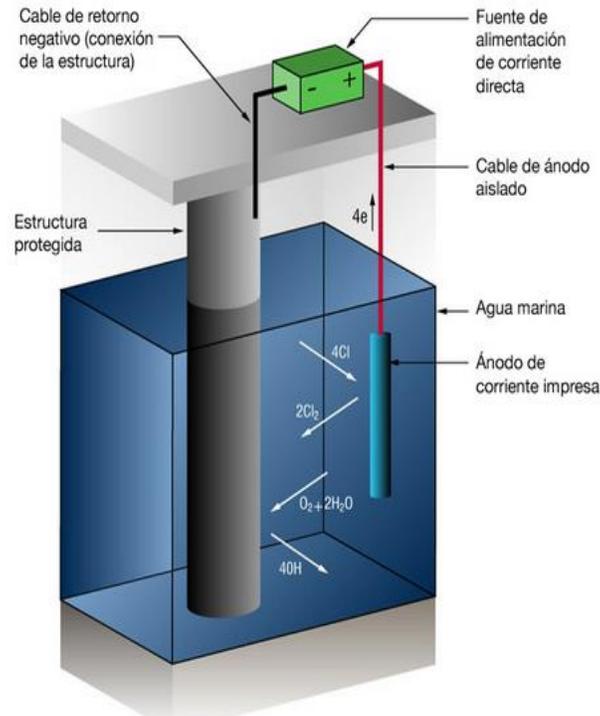


FIGURA 2.5 Protección catódica por corriente impresa [29]

➤ **Protección por Aditivos**

Existen también sustancias que se le agregan al concreto desde su elaboración (aditivos), con el fin de proteger al acero de refuerzo de la corrosión. Estos tipos de aditivos se pueden separar en dos clases:

1. *Neutralizadores de Corrosión*; son compuestos químicos inorgánicos que al estar en el concreto neutralizan la reacción química que existe entre el acero de refuerzo y el medio que lo rodea.
2. *Reductores de permeabilidad*; a fin de incrementar la capacidad del concreto para oponerse a la penetración de los agentes corrosivos, es posible considerar también el uso de dos tipos de aditivos:
 - a) Reductores de agua; el efecto que se persigue es el de reducir la relación agua/cemento, que es el medio más práctico de regular la porosidad y la permeabilidad del concreto al agua y al aire
 - b) Polvos minerales con propiedades puzolánicas; se busca aprovechar la aptitud de las puzolanas para modificar la estructura porosa de la pasta de cemento hidratada, reduciendo el tamaño de los poros, logrando así una disminución de la permeabilidad del concreto.

➤ **Protección contra ácidos**

Ya que los componentes del cemento son solubles en ácidos, deben preverse medidas de protección en la fabricación de concretos que deben de resistir la acción de dichos ácidos. El agua que contiene dichos ácidos libres, es fácil de reconocer, porque su valor de pH es menor a 7, aunque no sean dañinas para el concreto mientras su pH sea mayor a 6. Sin embargo, agua con pH menor a 7 puede ser perjudicial para las armaduras, por lo que la protección en este caso es necesaria. La mayoría del agua ácida disuelve la pasta endurecida del cemento, aumentando su poder disolvente al disminuir el valor de pH.

La actividad de los ácidos contenidos en agua, tanto del subsuelo como de otros orígenes, debe ser estimada de acuerdo con las normas y recomendaciones de los diferentes países, normas en las cuales se prescriben o recomiendan las medidas protectoras a adoptar [14]

2.3 Mantenimiento

Haciendo una analogía con los seres vivos, se puede decir que las estructuras de concreto experimentan unas fases en el tiempo que son asimilables; dichas etapas son:

- Planeación y diseño
- Construcción
- Uso u operación
- Deterioro
- Degradación o fatiga del material
- Colapso de la estructura

Todos estos puntos tienen mucha relación con el medio ambiente en donde se encuentre la estructura de concreto, continuando con la analogía con los seres vivos, para evitar enfermedades, en este caso a partir del deterioro, se puede agravar la situación, pudiendo llegar hasta el colapso de la misma. Por lo que será necesario realizar un mantenimiento a las estructuras. El método principal con el cual se puede evitar la continuación del deterioro del concreto, es el método preventivo, el cual se muestra en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Pasos del Método Preventivo [5]

EVALUACIÓN DE DANOS	
Inspección Visual	Tiene como objetivo descubrir cualquier alteración o manifestación aparente en la superficie expuesta de la estructura, que pueda ser relacionada con una posible corrosión de las varillas del acero de refuerzo, esto en particular para aquellas que se encuentran cercanas a la superficie
Valoración del Deterioro	Cuando la corrosión de las varillas avanzada, el aumento del volumen hace que el concreto de recubrimiento se desprenda del acero de refuerzo en el sitio corroído, produciendo un efecto de delaminación en el concreto que puede ser detectado por simple percusión a lo largo de las varillas
Determinación del Espesor de Concreto	Se realiza mediante un equipo que genera un campo magnético, que en proximidad del acero, experimenta distorsiones, situación que permite determinar la distancia existente entre la superficie exterior del concreto y el acero de refuerzo.
Valoración de Carbonatación	Se lleva a cabo con un aparato llamado "Pachómetro", el cual crea un campo magnético que en proximidad con acero experimenta distorsiones permitiendo saber la distancia entre la parte del concreto y el acero
Valoración de Cloruros Inducidos	Básicamente consiste en la determinación de cloruros contenidos en el concreto. Dichos niveles de cloruros se determinan por la solubilidad de estos en agua o ácido.
Por Medición de Voltaje	El objetivo de esta prueba es saber si el acero de refuerzo está dentro o fuera de la etapa de pasivación o bien se encuentra en un estado activo que las hace susceptibles a la corrosión.

2.4 Métodos de Reparación

Aunque muchas obras de concreto son o han sido diseñadas y construidas bajo criterios de durabilidad, también es cierto que existen ambientes altamente agresivos que provocan la degradación prematura de estas estructuras. Por ello, es necesario tomar acciones para recuperar y garantizar la vida de servicio

Es importante resaltar que el mantenimiento y rehabilitación con métodos convencionales permite cumplir en menor grado con criterios de sustentabilidad, puesto que conllevan a la utilización de nuevos materiales. A diferencia de los métodos no convencionales (Técnicas electroquímicas) de intervención, los cuales cumplen en un sentido más amplio con el concepto de sustentabilidad puesto que no requieren de una sustitución de materiales. Es preciso señalar que la aplicación oportuna y preventiva permite alcanzar una mayor eficiencia de las técnicas electroquímicas [12]

2.4.1 Métodos Convencionales de Reparación

Los métodos tradicionales para proteger y reparar estructuras de concreto han sido ampliamente utilizados por varias décadas, incluso su uso tiene vigencia debido a los bajos costos que representan.

⊕ Reemplazos de Concreto

Este tipo de reparación consiste básicamente en la sustitución del concreto deteriorado por concreto nuevo. Este método se debe hacer de forma inmediata a la eliminación de aquellas regiones de material deteriorado, se considera que el material se deberá limpiar hasta llegar a la superficie de concreto que no ha sufrido deterioro.

⊕ Aleaciones

Las aleaciones no deben presentar corrosión aún cuando exista la presencia de cloruros y de la propia carbonatación del material. Se ha optado por el empleo de aceros inoxidable austeníticos, en particular 304 y 316. Los casos de aplicación de estos son mínimos y se circunscriben a situaciones donde:

- i. Existe una elevada concentración de cloruros
- ii. Estructuras construidas sobre el mar
- iii. Estructuras en las que se espera una larga vida de servicio

El uso de acero inoxidable no sólo representa una forma en la que se podrá evitar la corrosión del acero, garantizando así la confiabilidad de la estructura, sino que al no formarse óxidos (existe un aumento de volumen) se evita también el que exista alguna tendencia del concreto a fracturarse, manteniéndose la integridad de la unión concreto-material de refuerzo.

2.4.2 Métodos No Convencionales de Reparación

La aplicación de las técnicas electroquímicas (TE) como métodos no convencionales de reparación y mantenimiento han despertado gran interés en el campo de la ingeniería; sin embargo, algunos de estos avances solo han podido ser incluidos en reglamentos y normas de carácter local y regional. Actualmente existe un claro consenso de que solo hay dos y en algunos casos tres técnicas (protección catódica, extracción electroquímica de cloruros y re-alkalinización) capaces de controlar o disminuir hasta un nivel despreciable la corrosión del acero de refuerzo.

Las TE son capaces de detener o retrasar los procesos anódicos o catódicos de la corrosión mediante la polarización del acero y por los cambios químicos del concreto. Dichas técnicas involucran la aplicación de campos eléctricos al sistema acero-concreto, el arreglo (Figura 2.6) consiste en colocar en la superficie del concreto un metal conductor denominado ánodo, conectado éste a su vez a la polaridad positiva de una fuente de corriente directa, mientras que el polo negativo se conecta al acero de refuerzo. El flujo de corriente en la celda propiciará condiciones físicas y químicas que facilitarán el reestablecimiento de la pasividad del acero.

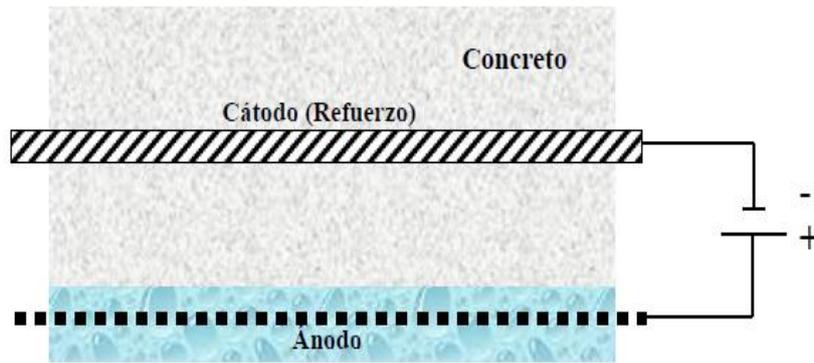


Figura 2.6 Celda electroquímica básica utilizada en las Técnicas electroquímicas (González, 2010)

En el caso de las TE no es necesario remover grandes cantidades de recubrimiento de concreto, solo será suficiente con resanar desconchamientos y agrietamientos localizados. De acuerdo con lo anterior, es posible deducir que los mayores beneficios económicos de las TE se obtienen cuando las intervenciones se llevan a cabo antes de que el daño se extienda por todo el elemento estructural, es decir de manera preventiva [12]

Extracción electroquímica de Cloruros.

Esta técnica es utilizada en estructuras en las que se ha determinado que existe contaminación por cloruros. Consiste en extraer por medios electroquímicos los iones cloruro que han penetrado en el concreto, esto a través de la aplicación de corriente directa entre un ánodo y el acero de refuerzo que actúa como cátodo. Estos métodos se recomiendan para estructuras sin acero pre o post tensado y cuyo deterioro del concreto sea limitado. Al igual que en la protección catódica, es necesario un preciso control de la corriente aplicada, ya que si esta excede la magnitud requerida, se producirá reducción de la resistencia, reblandecimiento de la pasta de concreto alrededor de las barras de refuerzo y fracturas en el concreto (Figura 2.7)

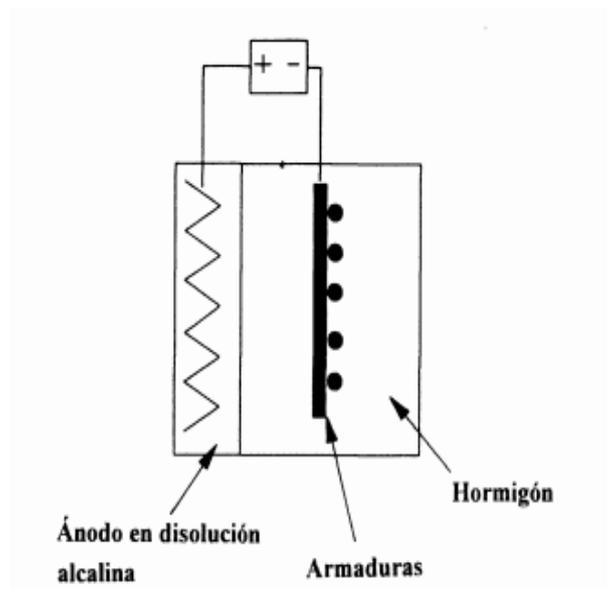


Figura 2.7 Esquema de funcionamiento de la técnica de extracción electroquímica de cloruros (Bertolini Luca, et al.,)

Re-alkalinización.

Este tipo de restauración consiste en devolverle al concreto su grado de alcalinidad perdida por efecto de la carbonatación. Este método es similar a la extracción electroquímica de cloruros, pues también se aplica una corriente directa entre el acero y un ánodo externo. En este caso el electrolito usado es una solución de carbonato de sodio. En este proceso las densidades de corriente son significativamente mayores a las requeridas por la protección catódica [8]. En la Figura 2.7 se muestra esquemáticamente.

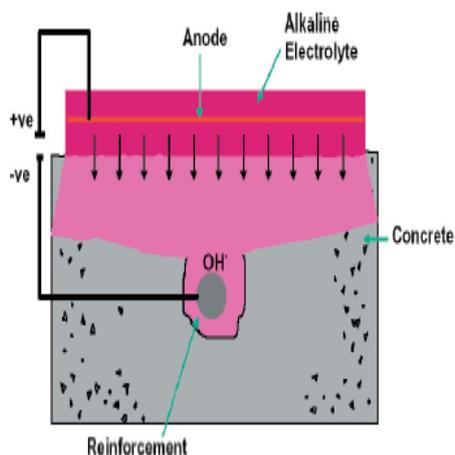


Figura 2.7 Representación esquemática de la Re-alkalinización (Sika-Vector corrosión technologies, 2003)

Protección Catódica.

La protección catódica interviene en el proceso de corrosión; para detener la corrosión, esta intervención debe ser al nivel apropiado y debe ser continua. El sistema de protección catódica es medido periódicamente para determinar el nivel de protección que está siendo logrado y asegurar la continuidad de la protección como sea posible. Es también importante mantener adecuados registros de esas inspecciones. En algunos casos, estos registros son requeridos por acuerdos regulatorios. En cualquier caso, los registros son usados en la conciliación de problemas en el sistema, ya que las tendencias dentro de un sistema son con frecuencia características de ciertos tipos de problemas del mismo. Esta sección dará un idea general de la mediciones que son realizadas durante un monitoreo de rutina en un sistema de protección catódica.

El control de eficiencia de ésta técnica está basado normalmente en el valor de potencial alcanzado durante la aplicación. Es importante reconocer que no existe un potencial fijo de inmunidad puesto que éste valor depende de diversas variables, dentro de las que destacan el contenido de cloruros, pH del concreto y tipo de cemento. La cantidad de despolarización es el criterio mayormente utilizado para evaluar la eficiencia de la técnica. Las condiciones de prevención y protección en este caso se alcanzan cuando el potencial decae menos de 100 [mV] dentro de un período de tiempo de 4 a 24 horas medido inmediatamente (0.1 a 1 segundo) después de interrumpir el circuito (NACE ESTANDAR RP0290-90).

El potencial alcanzado durante la aplicación es también un criterio normalmente utilizado para evaluar el grado de protección [12]. En el caso de estructuras de concreto reforzado expuestas a la atmósfera, la cantidad de polarización en las primeras 24 horas deberá ser como mínimo de 100 [mV].

Conociendo el tipo de daño en cualquier estructura de concreto, será posible optar por uno de los mecanismos de mantenimiento antes mencionados. Pero si el daño es tal que empieza a llegar al acero de refuerzo, con los mecanismos de protección se tomara a criterio del analista cual es el adecuado. Por lo que, en este proyecto se optó por emplear 3 métodos de evaluación en especímenes cilíndricos de concreto.

CAPITULO 3

SIMULACIÓN ACELERADA DEL DETERIORO ATMOSFÉRICO DEL CONCRETO REFORZADO.

Con el paso de los años, el uso del concreto reforzado empleado en la infraestructura se ha generalizado, sus aplicaciones van desde muy pequeñas construcciones (casas) hasta estructuras de grandes dimensiones (puentes, edificio, etc.). Las estructuras de concreto reforzado tienen ciertas características, derivadas de los procedimientos usados en su construcción, que las distinguen de las estructuras de otros materiales; pero este material estructural presenta deterioro bajo diferentes factores. En la práctica del diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado, el recubrimiento del acero es habitualmente regido por criterios establecidos en normas y reglamentos de uso local.

Sin embargo, de acuerdo con la experiencia de muchas obras realizadas en México, es muy frecuente encontrar recubrimientos de concreto que distan por mucho de los códigos vigentes, incluso existen casos críticos en donde el acero queda expuesto a la intemperie. El incremento en la proporción de infraestructura de concreto armado que muestra signos de deterioro ocasionados por el ambiente al que está expuesta, ha llamado la atención de diversas autoridades gubernamentales e instituciones de México, como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), entre otras, que han planteado la necesidad de predecir la disminución de resistencia y su probabilidad de falla asociada a esta degradación.

Muchos de los colapsos de estructuras en servicio reportados en países industrializados como los Estados Unidos, Japón y algunos de Europa, se atribuyeron a la degradación de la resistencia de diseño de la estructura, producida por agentes ambientales. La corrosión del acero de refuerzo se está convirtiendo rápidamente en el mayor problema a través del mundo. Puentes, estructuras marinas, edificios y otras estructuras de concreto están siendo dañadas seriamente por la corrosión. Esta patología es consecuencia de la pérdida de pasivación debida a la carbonatación y/o de una elevada concentración de iones cloruro, originando altos costos de reparación y mantenimiento, además de que las edificaciones sufren deterioros prematuros y constituyen un factor de inseguridad para los usuarios [15].

En la actualidad, existe un reconocimiento de que ninguna simulación puede definir exactamente todas las propiedades de un material; pero se afirma que una simulación bien elaborada puede proporcionar información respecto a muchas aplicaciones de éste. Debido a que ninguna simulación de corrosión puede predecir la conducta de un material en cada una de las condiciones de corrosión posibles a las que puede estar expuesto, es necesario que al realizarse una corrosión simulada se sometan a una serie de pruebas que representen los diferentes tipos de atmósferas (marino-industrial, urbana e industrial). Cabe mencionar que dichas pruebas son aproximadas y no absolutamente exactas, aun cuando se disponga de todos los detalles posibles relacionados con la exposición [2].

3.1 Factores de deterioro en el concreto

La trascendencia del fenómeno de corrosión justifica la búsqueda continua de relaciones, empíricas o teóricas, entre velocidad de penetración de agentes agresivos al interior del concreto y los factores atmosféricos, meteorológicos y químicos del ambiente de exposición [9]. En el informe del comité del ACI-201 (1982), se menciona que la permeabilidad del concreto es un factor importante que interviene en el proceso de corrosión de los materiales ahogados en él, y es un factor determinante en la vida útil del mismo concreto. Un concreto de baja permeabilidad tiene una conductividad eléctrica menor, se opone a la absorción de sales y proporciona una barrera contra la entrada de oxígeno.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a la compresión, al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ion cloruro. La porosidad del concreto es sin duda un factor de gran importancia en este fenómeno, ya que la penetración será tanto más rápida cuanto mayor sea la porosidad del recubrimiento. De esta forma, las bajas relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, significaran cierta garantía de lenta difusividad de los cloruros [15].

Los factores anteriormente mencionados son de gran importancia en el desarrollo de estudios específicos para evaluar la durabilidad de concreto en ambiente marino. Al respecto, se han realizado diversos estudios en ambientes simulados y naturales, en los que se han encontrado diferentes valores tanto en el contenido crítico de cloruros para iniciar la pérdida de pasivación del acero, como en el comportamiento de la concentración superficial. En la tabla 3.1 se muestran algunos resultados de estudios realizados en ambiente marino, natural y simulado.

Tabla 3.1 Estudios en concreto expuesto a ambiente marino, natural y simulado [3]

AÑO	PRIMER AUTOR	TIPO DE ESTUDIO	DATOS	CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL (C _s)	CONTENIDO CRÍTICO DE Cl ⁻ (C _{th})	COEFICIENTE DE DIFUSIÓN (D)
1994	Mustafa	Exposición Natural OPC (Prisma Cúbico)	Cont Cl < 0.376 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ T _{exp} máx : 1 año	Variable	1.3 $\left[\frac{kg}{m^3}\right] = 0.4\%_{pp}$	Variable
1996	Basheer	Laboratorio (Vigas)	T _{exp} máx : 2 años	0.0008 $\left[\frac{mol}{cm^2}\right]$ 2.8 $\left[\frac{kg}{m^3_{conc}}\right]$	0.7 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ Concreto	Variable $D = f\left(\frac{w}{c, t}\right)$
1996	Thomas	Exposición Natural (Prisma Rectangular)	T _{exp} máx : 4 años Influencia: FA	ND	0.7% FA = 0 0.7% FA = 30 0.7% FA = 50 %Cl _{tot, ppccem}	ND
2001	Castro	Natural OPC (cilindros)	T _{exp} máx : 2 años	Variable	ND	Variable
	De	Natural OPC		Interpretación	De perfiles	De cloruros

	Rincón Pazzini	(corazones) Natural OPC (corazones)	Edad : 33 años	Interpretación	De perfiles	De cloruros
2002	Mohamme		Edad : 10 años	2.5% Cl _{tot} ppcem (OPC)	0.4% _{ppcem}	75 $\left[\frac{mm^2}{año} \right]$ OPC D Constante
2002	Burm	Laboratorio OPC (prismas)	Modelado de Cl ⁻ a 20 años. Fases sólida y acuosa	Incrementa con el tiempo	0.05% _{ppconcreto}	$D_e = 2 \times 10^{-12} \left[\frac{m^2}{s} \right]$
2006	Hastie	Natural (Blocks) Aditivo Microsilica 600	Edad : 5 y 8 años	Constante	0.4 – 0.5% _{ppcem}	Variable

Notaciones:

T-exp=tiempo de exposición; *FA*=Fly Ash; *ppcem*=por masa de cementante; *ND*= No determinado; *max*=máximo; %Cl_{tot} ppcem =% cloruros totales por peso de cemento. Fuente de autores en literatura consultada.

Las investigaciones relacionadas con la corrosión de armaduras han sido amplias en los últimos diez años, pero han estado especialmente enfocadas:

- Al estudio de las causas y mecanismos de deterioro.
- Al desarrollo de técnicas electroquímicas de evaluación y control (tanto en laboratorio como *in situ*)
- Al empleo de métodos de protección.

Recientemente se planteó la necesidad de cuantificar la vida útil de estructuras afectadas por corrosión, por lo que en los últimos años se ha ido centrando el interés en la búsqueda de modelos que permitan predecir la vida útil de estructuras en servicio no deterioradas o estimar la futura en el caso de nuevas, influyendo desde la fase de proyecto [16].

3.1.1 Preparación de las Probetas

En este proyecto se estudia el deterioro del acero de refuerzo ocasionado principalmente por el ion cloruro (Cl⁻) y el dióxido de azufre (SO₂). Los elementos estructurales evaluados son probetas cilíndricas, elaboradas de acuerdo con el procedimiento descrito en el código ACI Comité 211.1 (1991) y empleando una relación de dosificación 1:3:3. Los datos de la composición química del cemento utilizado en el concreto se presentan en la tabla 3.2

Tabla 3.2 Composición química del cemento [2]

CEMENTO	Composición Química, %						Composición de los compuestos, %			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CPC gris Portland TIPO1	21.4	5.2	2.3	65.4	2.8	2.9	60	21	11	8

Los moldes utilizados para la fabricación de las probetas fueron de PVC de acuerdo a la norma ASTM C-31 (elaborando probetas más pequeñas en cuanto a las medidas establecidas en la norma pero válidas para emplearse en laboratorio por ser más fáciles de manipular. Además de que el diámetro del cilindro utilizado debe ser como mínimo 3 veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso empleado en el concreto) cuyas dimensiones son:

$$\varnothing = 75 \text{ [mm]}$$

$$h = 150 \text{ [mm]}$$

Teniendo en cuenta, diámetro y altura de las probetas, el volumen de cada probeta es:

$$V_{\text{probeta}} = \frac{\pi}{4} \varnothing^2 h$$

$$V_{\text{probeta}} = 5.938788 \times 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

La masa unitaria del cemento es de $1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y el volumen suelto de 1 saco de cemento (50kg) = 0.04 m^3

Al tener el volumen suelto del cemento, se parte de ello para calcular la cantidad (en kg) de cemento y agregados para elaborar el concreto de acuerdo al procedimiento del Código ACI Comité 211.1 del cual se elaboran 4 probetas; posteriormente se empleará el mismo procedimiento del código para una dosificación de materiales 1:3:3. Estas cantidades se presentan en las tablas 3.3 y 3.4.

Tabla 3.3 Concreto elaborado de acuerdo con el procedimiento descrito en el código ACI Comité 211.1

A/C=0.59 Rel. Compresión de 200 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right]$	Para 1 m³ (cantidad en kg)	1 Probeta (cantidad en kg)	4 Probetas (cantidad en kg)
CEMENTO	306.77	0.1821	0.7284
AGUA	181	0.10749	0.42996
GRAVA	869.4	0.5163	2.0652
ARENA	803.32	0.477	1.908
FESTEGRAL	9	0.00534	0.02256

Tabla 3.4 Concreto elaborado de acuerdo con el procedimiento descrito en el código ACI Comité 211.1 con dosificación de materiales 1:3:3

A/C=0.63 Rel. Compresión de 200 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right]$	Para 1 m³ (cantidad en kg y m³)	1 Probeta (cantidad en kg)	4 Probetas (cantidad en kg)
CEMENTO	300	0.1781	0.712
AGUA	189	0.112	0.448
GRAVA	0.72 m ³	0.351	1.4
ARENA	0.72 m ³	0.351	1.4
FESTEGRAL	9	0.00534	0.02136

3.1.2 Preparación del acero de refuerzo

Normalmente para estructuras de edificios y casas en donde no se requiere ningún tipo de acero especial se ocupa acero AISI 1020 a 1035. El acero de refuerzo (Figura 3.1) en estructuras de concreto más utilizado en México suele ser la varilla corrugada del N° 3 grado G42 (clasificado según norma NMX-B-032) cuyo diámetro nominal es de 9.5 mm y una longitud de 15 cm [12]. Antes de que los electrodos de trabajo (acero de refuerzo) sean embebidos en el concreto, estos tendrán una previa preparación, son decapados en una solución de ácido sulfúrico para eliminar residuos grasos.



Figura 3.1 Varilla de acero

Durante el decapado, el ácido penetra hasta la capa de FeO a través de los poros y fisuras de la herrumbre, y de esta manera la disolución del FeO en el ácido da por resultado el desprendimiento de las capas superficiales de la herrumbre. Se ha puesto de manifiesto que en el decapado con ácido sulfúrico, la cantidad de herrumbre eliminado por desprendimiento es, en comparación con la cantidad eliminada por disolución química, mayor en el caso del ácido sulfúrico que en el caso del ácido clorhídrico. Este es un factor que tiende a provocar una mayor economía de ácido cuando se emplea el primero de los citados.

3.1.3 Preparación del concreto

Para la preparación de la mezcla y vaciado, se empleó el procedimiento de una investigación previa [2]. La forma de las probetas durante su elaboración se muestra en las figuras 3.2 y 3.3



Figura 3.2 Probetas después del vaciado de la mezcla



Figura 3.3 Forma final de las probetas después de haber sido desmoldadas.

3.1.4 Conservación de las Probetas

Las probetas se desmoldaron 48 horas después, para someterse al curado en agua con cal al 10%; esto con el fin de mantener al concreto hidratado en todo momento, para así proporcionar al concreto las características para las cuales fue diseñado (Figura 3.4). El curado tiene una gran influencia sobre las propiedades del concreto endurecido como lo son la durabilidad, resistencia, hermeticidad, resistencia a la abrasión, estabilidad volumétrica, resistencia a la congelación, al deshielo y a las sales para descongelar [2]. Además de asegurar el desarrollo de resistencia en el cuerpo del concreto, el curado apropiado proporciona a la delgada capa expuesta de éste, una propiedad de “cubierta endurecida” que aumenta considerablemente su buen aspecto durante mucho tiempo, cuando está a la intemperie y su resistencia al desgaste. En todos los aspectos, un concreto bien curado es un mejor concreto [17].



Figura 3.4 Probetas antes de ser sometidas al curado. Las 4 de la izquierda corresponden a una relación a/c de 0.63, las 4 de la derecha tienen una relación a/c de 0.59

3.2 Selección y preparación de las soluciones

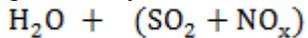
Debido a que los agentes atmosféricos corrosivos más importantes en el deterioro del concreto son el ión cloruro (Cl^-), y el dióxido de azufre (SO_2), además de que el objetivo del presente trabajo es conocer la influencia de estos en el concreto, tomando como referencia investigaciones previas [2] las soluciones empleadas se prepararon con los siguientes solutos:

- i. NaCl con grado de pureza al 100% (grado reactivo), esto para simular la influencia del ión cloruro
- ii. SO₂ y NO_x gaseoso para la estimulación de la sulfatación en la estructura

3.2.1 Soluciones

Para la solución con la cual se simuló la influencia del ión cloruro en el concreto se utilizó el cloruro de sodio (NaCl), el cual es muy barato y fácil de conseguir. Además, la utilización de éste soluto en combinación con agua, asemeja casi en su totalidad al agua de mar, en donde la concentración de cloruro de sodio es de 2.69%. En la actualidad existen referencias de ensayos acelerados de corrosión en materiales metálicos, en donde se ha comprobado que metales atacados con soluciones de NaCl al 3.0% molar, se garantiza una aceleración de corrosión satisfactoria y en las cuales, también se ha comprobado que un aumento de concentración molar no acelera más la corrosión.

Para la solución acuosa que simuló la influencia del dióxido de azufre en el concreto (SO₂) y óxido nitroso (NO_x) y con la cual se buscó sulfatar la estructura de concreto, se optó por saturar agua con el gas SO₂ y NO_x esto es:



Esto se logró inyectando tanto SO₂ como NO_x de manera constante, en la cámara de atmósfera controlada [2], obteniendo de esta manera una solución saturada de ácido sulfúrico, en donde la función de la cámara sellada se justifica debido a la eliminación en forma de gas del SO₂.

3.2.2 Preparación de las soluciones y equipo de trabajo

La preparación de las soluciones que simularon la presencia del ión Cl⁻, se llevó a cabo inyectado durante todo el ensayo la disolución de NaCl (al 3.5 %) en agua destilada. Cabe mencionar que para mantener la solución con presencia de NaCl en las probetas, esta se cambiaba cada 48 horas y la sulfatación del concreto se simuló inyectando SO₂ de forma constante (durante todo el ensayo). El material equipo empleado para la simulación fue:

- Electrodo de referencia (Er): Cu/CuSO₄
- Cámara de atmósfera controlada (para la sulfatación)
- Recipientes de plástico transparentes (para verter la solución salina)
- Tanque con óxido nitroso (N₂O)
- Tanque con dióxido de azufre (SO₂)
- Multímetro
- Cables caimán-caimán

Cabe mencionar que el electrodo de referencia anterior puede ser sustituido por un electrodo de calomel o del tipo plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), el cual es más resistente a la contaminación durante mediciones en soluciones acuosas. En este proyecto se empleó el electrodo de referencia Cu/CuSO₄, que fue de elaboración propia (Figura 3.5).

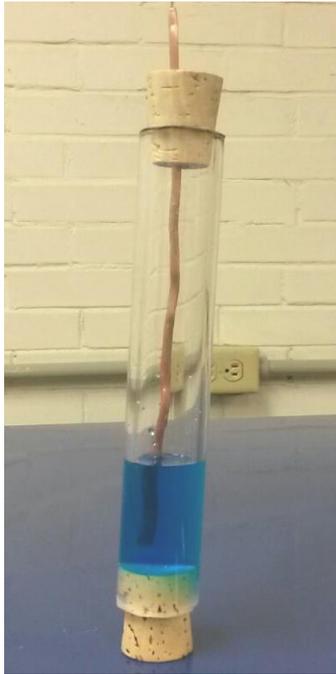


Figura 3.5 Electrodo de Referencia Cu/CuSO₄

3.3 Métodos de simulación

De una manera muy general y en función del objetivo perseguido, los ensayos de corrosión se pueden englobar en dos grandes categorías:

1. *Simulación de corrosión a largo plazo*. Son llamados así debido a que el medio de exposición es la naturaleza misma y por lo cual, el tiempo necesario para la obtención de resultados es muy largo.
2. *Simulación acelerada (corrosión acelerada)*. En donde se busca desarrollar métodos de laboratorio que no requieran tiempos tan grandes para la obtención de resultados.

De estos grupos de ensayos mencionados el más indicado para el presente proyecto es el de corrosión acelerada [2]. Este tipo de ensayos se puede clasificar en cuatro grupos:

- I. Ensayos rápidos por incremento de la superficie de reacción
- II. Ensayos acelerados mediante el incremento de la presión de cristalización
- III. Ensayos acelerados por incremento de la concentración de la solución agresiva
- IV. Ensayos rápidos por aumento de la temperatura de la solución agresiva

En este caso los ensayos seleccionados fueron el 3 y el 4, tomados como referencia de estudios de simulación acelerada realizados previamente [2].

3.4 Condiciones de Exposición

La severidad del daño causado a los materiales estructurales bajo ensayos acelerados de corrosión depende de varios factores como lo son:

- ⊕ Permeabilidad del concreto
 - ⊕ Composición química
 - ⊕ Medio corrosivo de exposición
 - ⊕ Condición de exposición
-

En cuanto al último caso, tales condiciones de exposición son las siguientes:

- *Control de la temperatura*
- *Inmersión Total*
- *Inmersión Parcial*
- *Inmersión intermitente*
- *Atmósferas Húmedas*

En la tabla 3.5, se muestran los tiempos de curado en las probetas así como el arreglo para la simulación de corrosión correspondiente.

Tabla 3.5. Selección de las probetas para simulación de corrosión.

CORROSIÓN POR SULFATACION				
PROBETA	MEZCLA	SOLUCION	GASES	TIEMPO DE CURADO
1	0.63	AGUA DESTILADA	Sin	20 DIAS
2	0.59	AGUA DESTILADA	sin	20 DIAS
3	0.63	AGUA DESTILADA	con	50 DIAS
4	0.59	AGUA DESTILADA	con	50 DIAS

CORROSIÓN POR CLORUROS				
PROBETA	MEZCLA	SOLUCION	GASES	TIEMPO DE CURADO
1	0.63	SAL 3%	Si	20 DIAS
2	0.59	SAL 3%	Si	20 DIAS
3	0.63	SAL 3%	No	50 DIAS
4	0.59	SAL 3%	No	50 DIAS

Por lo que en este proyecto, al emplear la cámara de simulación de corrosión atmosférica, las condiciones de trabajo son:

Probetas sometidas a simulación de corrosión por sulfatación

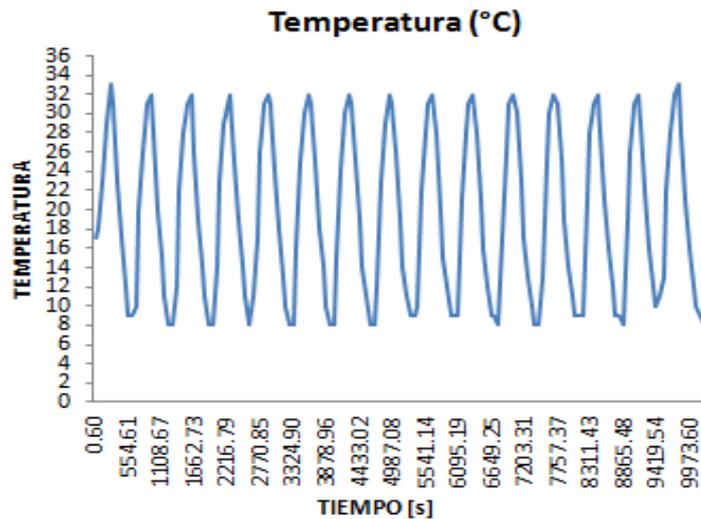
- Primera Etapa

La inducción de la sulfatación consistió en someter al grupo de probetas en una cámara de ambiental cuyas concentraciones de SO₂ dependerán de las características de cada equipo del laboratorio respectivo [12]. Para la experimentación se utiliza una concentración de SO₂ del 10%, y una humedad relativa del 65% y 30 °C. Como se indica en la tabla 3.5, las probetas se introdujeron a la cámara a diferentes tiempos de curado y diferente dosificación a/c. El acomodo de las probetas se muestra en la figura 3.6

Dentro de la cámara, se programaban ciclos, indicando las condiciones trabajo para todo el ensayo (Tabla 3.5b) la humedad relativa iba cambiando conforme la temperatura variaba; cabe mencionar que tanto la temperatura máxima como la temperatura mínima se mantuvieron constantes durante un lapso con la finalidad de asemejar más esta simulación a un ensayo puesto en condiciones normales (a la intemperie). Las temperaturas de trabajo cambiaban de acuerdo al avance del ensayo, como se muestra en la siguiente gráfica 3.1

Tabla 3.5. Condiciones de trabajo en cada ciclo.

PROBETAS			GRUPO I		
$T_{m\acute{a}x}$ [°C]	$T_{m\acute{i}n}$ [°C]	$T_{c\acute{o}n}$	Cantidad de SO ₂ por ciclo	Cantidad de N ₂ O por ciclo	Tiempo de inyección de gases por ciclo [s]
40	7	3 min	0ppm	0ppm	10
PROBETAS			GRUPO II		
$T_{m\acute{a}x}$ [°C]	$T_{m\acute{i}n}$ [°C]	$T_{c\acute{o}n}$	Cantidad de SO ₂ por ciclo	Cantidad de NO por ciclo	
40	7	3 min	15ppm	12ppm	10



Gráfica 3.1 Temperaturas durante el ensayo.

En esta primera etapa, se tomaron 2 probetas de cada relación a/c, para ser sometidas en la cámara atmosférica con las condiciones anteriormente mencionadas. Dos son inmersas parcialmente en solución salina al 3.5% y las restantes quedan únicamente con el rocío de agua que se produce dentro de la cámara. Las probetas fueron sometidas a 210 ciclos de simulación en la cámara, una vez transcurrido dicho periodo, fueron retiradas de la cámara para realizar los criterios de corrosión seleccionados.

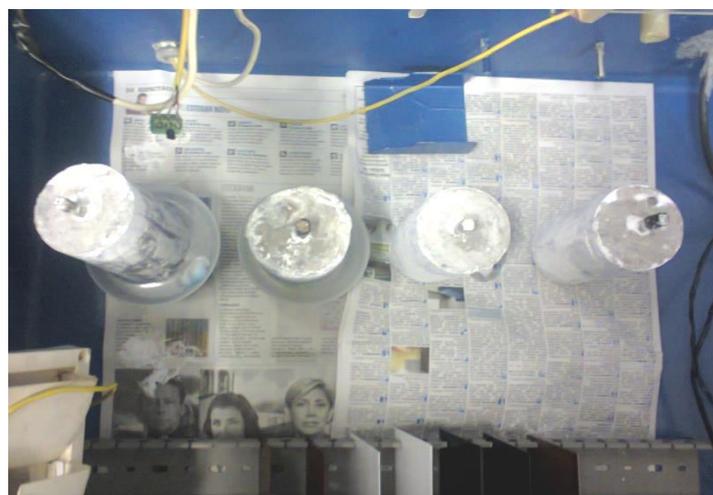


Figura 3.6 Acomodo de las probetas dentro de la cámara para ensayos acelerados de corrosión.

- Segunda Etapa

Como se muestra en la tabla 3.5, las probetas se dividieron en 2 grupos, cada una con un determinado tiempo de curado, con el fin de observar la diferencia de deterioro presente a diferentes tiempos de curado. Las 4 probetas restantes (Figura 3.7) se introdujeron en la cámara al finalizar el periodo de simulación de las anteriores, con las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa. Para que la sulfatación se hiciera más rápida y evidente en el concreto, los gases empleados fueron óxido nitroso (N_2O) y dióxido de azufre (SO_2) a una concentración de 15ppm.

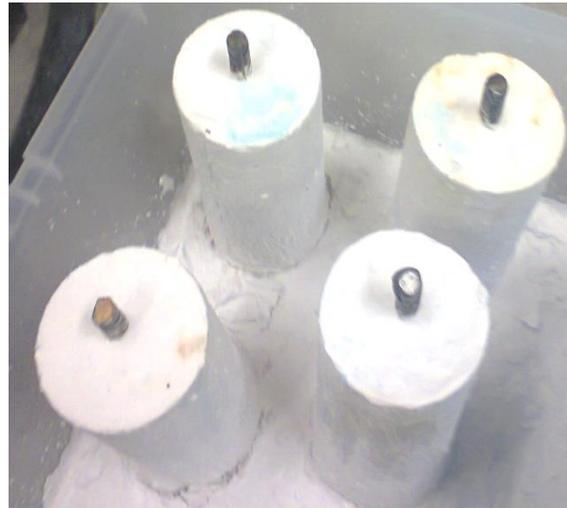


Figura 3.7 Probetas empleadas en la segunda etapa del proyecto

Probetas sometidas a simulación de corrosión por cloruros

- Primera Etapa

Superado el tiempo de curado (Tabla 3.6), los especímenes deben ser inmersos parcialmente (10 cm de profundidad) en una solución acuosa al 3.5% de NaCl dentro de los recipientes de plástico, como se muestra en la figura 3.6. Una vez que las probetas se acomodaron dentro de la cámara esta se selló completamente para evitar fugas y comenzó a correr la prueba.

- Segunda Etapa

Se utilizaron las mismas condiciones de trabajo que en el caso anterior, cabe mencionar que aquí el ataque fue más agresivo por la presencia de la solución salina aunada a la inyección de los gases durante toda la simulación.

3.5 Criterios de evaluación

Hasta antes de mediados del siglo XX las técnicas utilizadas para localizar las áreas de corrosión en el concreto eran la inspección visual y la inspección in situ; esto implicaba el uso de un martillo, pero con estas técnicas era muy fácil no encontrar áreas con corrosión incipiente. En épocas recientes, el continuo y periódico monitoreo de la corrosión está basado principalmente en mediciones

electroquímicas del potencial de corrosión, E_{corr} y de la densidad de corriente de corrosión, i_{corr} . En donde la primera está relacionada con la probabilidad de que el acero de refuerzo sufra corrosión activa, y la segunda proporciona información relacionada con la velocidad de corrosión.

Las estructuras que presentan daños por corrosión del acero de refuerzo normalmente son inspeccionadas con el fin de identificar el origen y la magnitud del problema. Una vez que se ha cuantificado el deterioro, se proponen y ejecutan procedimientos de reparación encaminados en alcanzar la expectativa de vida de servicio programada, y en el mejor de los casos aumentar la vida útil. Para encontrar la solución óptima de reparación y evitar mayores problemas de corrosión en el futuro, es necesario concentrarse en la identificación del problema mediante medición de parámetros que describan objetivamente la magnitud del daño [12]. En este proyecto se optó por tomar en cuenta la medición del potencial de corrosión, influencia del SO_2 en el concreto mediante método de colorimetría (indicador de fenolftaleína), y el método de apariencia (o inspección visual)

3.5.1 Potencial de corrosión

La medición del potencial electroquímico (mapeo de potenciales de corrosión) permite identificar las zonas activas y pasivas del acero dentro del concreto. Actualmente, esta técnica es la única reconocida mediante normas para identificar el estado de corrosión del acero de refuerzo [12]. El método es convenientemente aplicado para materiales (por ejemplo aceros inoxidables, aleaciones base níquel titanio, acero de refuerzo, entre otros) que deben su resistencia a la corrosión, a la presencia y conservación de una película superficial protectora, la cual los hace pasivos en muchos medios. Cuando la pasividad se pierde, su potencial cambia drásticamente. El cambio es suficientemente grande (0.5 Volts) para ser medido y para enmascarar cambios de potencial más pequeños que tienen origen en fluctuaciones de temperatura y pH, entre otros parámetros.

Las áreas donde hay corrosión son identificadas por medio de potenciales muy negativos, mientras que en zonas donde no hay corrosión los valores son menos negativos. Esta técnica proporciona información cualitativa sobre el riesgo de corrosión, las mediciones son obtenidas midiendo la diferencia de potencial entre la varilla y un electrodo de referencia; dichos electrodos de referencia son:

- ⊕ Calomel (Hg_2Cl_2) saturado
- ⊕ Cloruro de plata saturado
- ⊕ Cobre/sulfato de cobre

Como se mencionó anteriormente, para este proyecto fue empleado el electrodo de referencia Cobre/Sulfato de cobre, tanto para las probetas sometidas a corrosión por carbonatación como las que fueron sometidas a corrosión por cloruros.

3.5.1.1 Procedimiento de medición de potencial.

Para determinar los potenciales durante los ensayos acelerados de corrosión, se utilizó la norma ASTM C-876-87, en la cual se consideran los siguientes pasos:

- i. Seleccionar la probeta de trabajo en la cual se realizaran las mediciones, teniendo libre acceso al electrodo de trabajo y verificando que exista continuidad eléctrica del acero al momento de efectuar las mediciones.
 - ii. Limpiar la superficie del acero a evaluar, la cual tendrá una conexión del multímetro (-).
 - iii. Efectuar la conexión del electrodo de referencia Cu/CuSO_4 , al positivo del multímetro (+)
 - iv. Sumergir el electrodo de referencia en la solución acuosa, efectuar la medida de potencial y registrarla.
-

El electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre que se ocupa tiende a contaminarse con mucha facilidad al estar sumergido en medios acuosos durante su utilización, se recomiendan dos cosas:

- 1) Limpiar perfectamente bien la barra de cobre del electrodo de referencia durante cada medición, esto con la finalidad de evitar variaciones de potenciales durante las mediciones y sus respectivos registros
- 2) Utilizar un electrodo de calomel o del tipo plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), el cual es más resistente a la contaminación en medios acuosos.

Para mediciones *in situ* se recomienda seguir los pasos anteriores, con la diferencia de que si el electrodo de trabajo (acero de refuerzo) no está con libre acceso para su medición, deberá perforarse la estructura hasta descubrir el acero. Una vez localizado el acero y habiéndose cerciorado que existe continuidad eléctrica, la medición de potencial se realizará colocando sobre la superficie del concreto una esponja plana delgada, previamente humedecida para mejorar el contacto electrodo-hormigón. Colocar el electrodo sobre la esponja, efectuar y registrar la medida (Figura 3.8) [2].

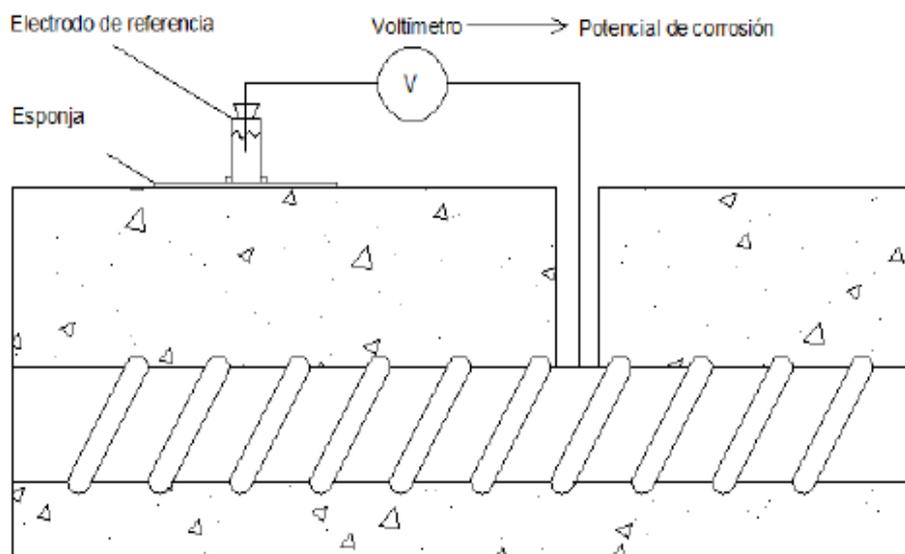


Figura 3.8 Diagrama esquemático, en donde se muestra la medición de potencial in situ.

En este proyecto se empleó la medición de potencial para 4 probetas, *in situ*, ya que éstas permanecieron expuestas al ambiente simulado dentro de la cámara de corrosión sin estar sumergidas en ningún medio acuoso. Por lo que para medir su potencial, se empleó una esponja húmeda como se indicó anteriormente para asegurar la continuidad eléctrica.

El procedimiento estándar ASTM C-876 propone ciertos límites (Tabla 3.6) que establecen el grado de corrosión del acero (referenciados vs. CSE), sin embargo, y puesto que el potencial está afectado por la humedad, espesor del recubrimiento, grado de carbonatación, contenido de cloruros, etc., se recomienda correlacionar los valores obtenidos con experiencias previas de pruebas similares de laboratorio y campo, asimismo es preferible acompañar estas mediciones con otros parámetros [12]. En este proyecto se acompañó con la medición de profundidad de carbonatación y apariencia.

Los valores de potencial indicados en la Tabla 3.6 están asociados al diagrama de Pourbaix, el cual indica cuando el acero está en estado pasivo o en proceso corrosivo. Esto se logra con solo utilizar dos factores del proceso corrosivo: pH del medio acuoso y potencial del acero (Figura 3.9) [2]. Cabe mencionar que el concreto con su ambiente altamente alcalino tiene un pH de 12 a 13, lo cual protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. En el concreto nuevo que tiene un pH de 12 a 13, se requieren aproximadamente de 7,000 a 8,000 partes por millón (ppm) de cloruros para comenzar la corrosión del acero ahogado.

Sin embargo, si el pH baja a un rango de 10 a 11, el umbral de cloruro para la corrosión es significativamente menor -100 ppm o menos-. Por esta razón, una investigación de la condición para la mayoría de las estructuras de concreto en proceso de corrosión debe siempre incluir un análisis de la profundidad de sulfatación. Utilizando la solución de fenolftaleína sobre el concreto, las áreas no sulfatadas del concreto no cambiarán de color, mientras que las áreas con un pH mayor de 9 a 9.5 adquirirán un color rosa intenso [20].

Tabla 3.6 Criterio de evaluación de potenciales del acero de refuerzo en concreto Vs $Cu/CuSO_4$ [2]

pH del Concreto	Potencial (E) en Volts	Riesgo de daño
+13 - +16	$E > -0.8$ $-0.8 > E > -1.2$ $E < -1.2$	Pasivación Muy alta probabilidad de corrosión Inmunidad
+9 - +12	$E > -0.6$ $-0.6 > E > -0.7$ $E < -0.7$	Pasivación Muy alta probabilidad de corrosión Inmunidad
+6 - +8	$E > -0.2$ $-0.2 > E > -0.6$ $E < -0.6$	Pasivación Muy alta probabilidad de corrosión Inmunidad
+4 - +6	$E > +0.3$ $+0.3 > E > -0.6$ $E < -0.6$	Pasivación Muy alta probabilidad de corrosión Inmunidad
+2 - +4	$E > +0.4$ $+0.4 > E > -0.6$ $E < -0.6$	Pasivación Muy alta probabilidad de corrosión Inmunidad
-2 - +2	$E > -0.6$ $E < -0.6$	Corrosión Inminente Inmunidad

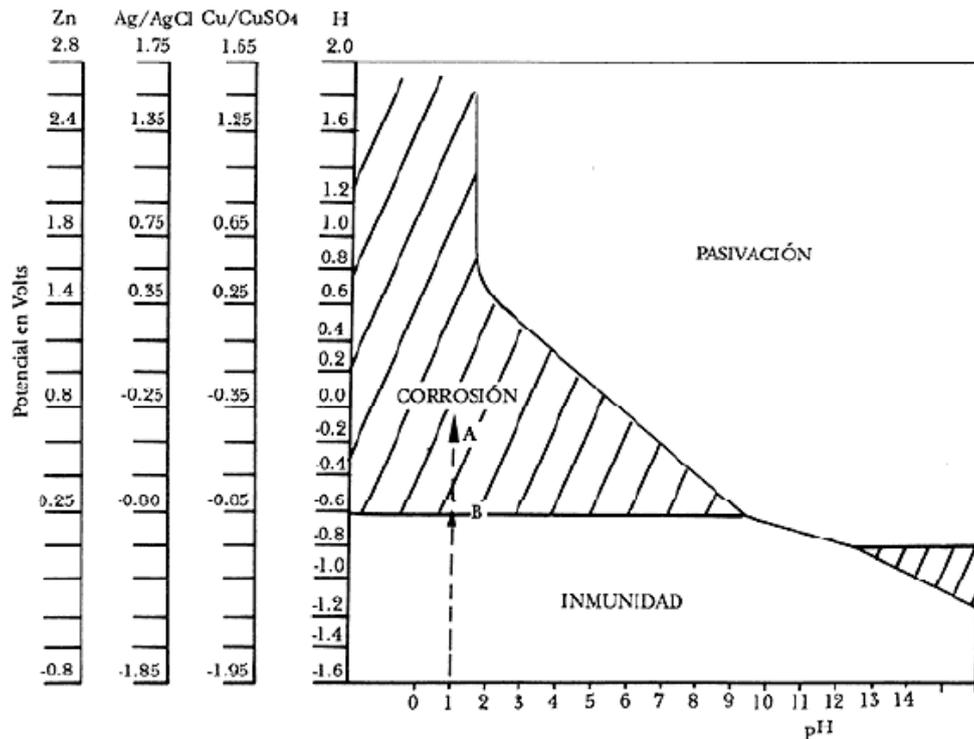


Figura 3.9 Diagrama de Pourbaix, muestra el comportamiento de potencial del acero de refuerzo (comparándolo con 3 electrodos de referencia diferentes) Vs pH [Genescá J., 1987]

3.5.2 Influencia del SO₂ en el concreto mediante el método de colorimetría.

Para hacer un análisis del efecto del SO₂ se mencionó que se utilizarían método de evaluación por carbonatación, al ser gases presentes en la atmósfera aunado a la amplia cantidad de estudios realizados por efecto de carbonatación, se decidió emplear algunos métodos pero con la influencia de SO₂ obteniendo los parámetros requeridos. En el presente proyecto se pretende estudiar el efecto del ión cloruro y el SO₂ en el concreto, por lo que las 8 probetas después de transcurrido el respectivo tiempo de simulación acelerada se determino el avance de sulfatación para cada una de ellas.

Al salir de la cámara, cada una de las probetas se dividió en 3 partes, como se muestra en la figura 3.8 para ser cortadas posteriormente.

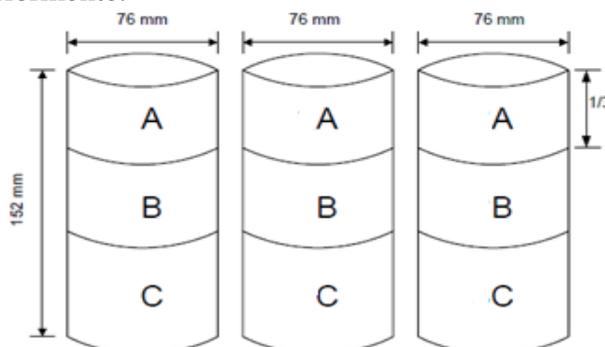


Figura 3.8 Las probetas son divididas en 3 partes iguales para ser cortadas posteriormente.

Para que el acero de refuerzo del concreto no sufriera contaminación por un agente externo al ser cortadas, se empleó un esmeril empotrado en una base firme para realizar los cortes en seco (figura 3.9), cabe mencionar que en esta parte solo se cortó el concreto, la varilla se cortó después con segueta.



Figura 3.9 Muestra cómo se realizo el corte seccional a cada probeta

Al realizar movimientos giratorios a las probetas durante el corte, la forma final se muestra en la figura 3.10



Figura 3.10 Vista final de las probetas después de cortarlas con el esmeril

Comúnmente para visualizar el avance de SO_2 en el concreto se emplea el método de colorimetría (indicador de fenolftaleína), en este caso fue utilizado para ver el efecto del SO_2 en el concreto. El indicador de fenolftaleína para medir el pH en cortes frescos de concreto ha sido ampliamente usado para identificar la profundidad de carbonatación, el cambio de coloración a violeta es indicativo de un valor de pH superior a 9. Sin embargo, un valor de pH igual a 9 puede dejar el acero en una condición favorable para la pérdida de pasivación.

Como complemento del método de colorimetría, se puede determinar una constante, k , generalmente para carbonatación, pero se aplico en este caso para sulfatación. La constante k depende básicamente de 4 parámetros:

- ✓ La concentración de SO₂ en el aire.
- ✓ La permeabilidad del hormigón de recubrimiento.
- ✓ La humedad relativa del hormigón de recubrimiento (que depende de la humedad relativa ambiente y en parte, de la calidad del material).
- ✓ El contenido de CaO en la pasta de cemento hidratada del recubrimiento (que depende del contenido de cemento en el concreto, de su grado de hidratación y del tipo de cemento).

La profundidad de sulfatación es la distancia promedio d_k (medida en mm) de la superficie externa del concreto al eje de la región donde inicia la coloración violeta (por efecto del indicador químico). Normalmente en la práctica, el frente tiene una trayectoria irregular, por lo tanto el valor promedio y máximo (d_{kmax}). En estudios recientes (Chang, H. F. 2006) se ha encontrado que el valor del pH de la solución de poro es sensible con el grado de sulfatación, por ejemplo se encontró que usando el indicador de fenoltaleína para un pH = 9 el concreto presentaba un 50 % de sulfatación y cuando el pH = 7.5 el grado de carbonatación alcanzado era el 100 %. La tabla 3.7 muestra la calidad del concreto en función de k (Castro P. et al, 2001) [12], es necesario mencionar que estos valores de la constante son a criterio propio ya que no necesariamente en base a este resultado es posible determinar la calidad del concreto, al depender de varios factores, como lo son las condiciones de exposición, tipo de cemento, temperatura, etc.

Tomando en cuenta los criterios para evaluación por carbonatación, en el presente proyecto se evalúan el efecto del SO₂, calculando los parámetros especificados mediante la técnica de colorimetría para determinar la influencia del SO₂ en el concreto.

Tabla 3.7 Calidad del concreto en función de la constante de sulfatación (Castro P. et al, 2001)

	CONCRETO POBRE	CONCRETO REGULAR	BUEN CONCRETO
$k [mm \text{ año}^{\frac{1}{2}}]$	>9	9>k>6	<6

3.5.3 Métodos de apariencia

En este caso, hablando de la inspección visual, se pretende identificar los siguientes aspectos en la estructura:

- i. Si la corrosión se está produciendo actualmente o no
- ii. En el caso de que la corrosión se esté produciendo actualmente, cual es el daño que ésta ha producido

Los elementos que determinaran la calificación final de la estructura, se basa en:

- a. El tipo de elemento estructural
- b. La agresividad ambiental
- c. El nivel de daño

Tomando en cuenta a los daños por corrosión de las estructuras de concreto se pueden detectar tres tipos:

- *Manchas debidas a los productos de corrosión:* se debe indicar en la inspección su extensión y su nivel de corrosión apreciable.
- *Fisuras debidas a la corrosión de las armaduras:* las fisuras serán por lo general paralelas a las armaduras afectadas, por lo tanto serán fácilmente identificables y distinguibles de las producidas por comportamiento mecánico.
- *Pérdida del recubrimiento en algunas zonas:* cuando la corrosión se ha desarrollado durante mucho tiempo, la presión de los óxidos hace fisurar el recubrimiento. Su localización suele ser común en las zonas de compresión de los elementos o en las zonas inferiores.

Para este criterio de evaluación se emplearon fotografías de las probetas antes, durante y después de la simulación acelerada dentro de la cámara, con el fin de tener una comparativa y avance de la corrosión en el acero de refuerzo. Una vez finalizada la simulación acelerada tanto para el grupo I como para el grupo II, los resultados obtenidos se muestran en el siguiente capítulo.



CAPITULO 4

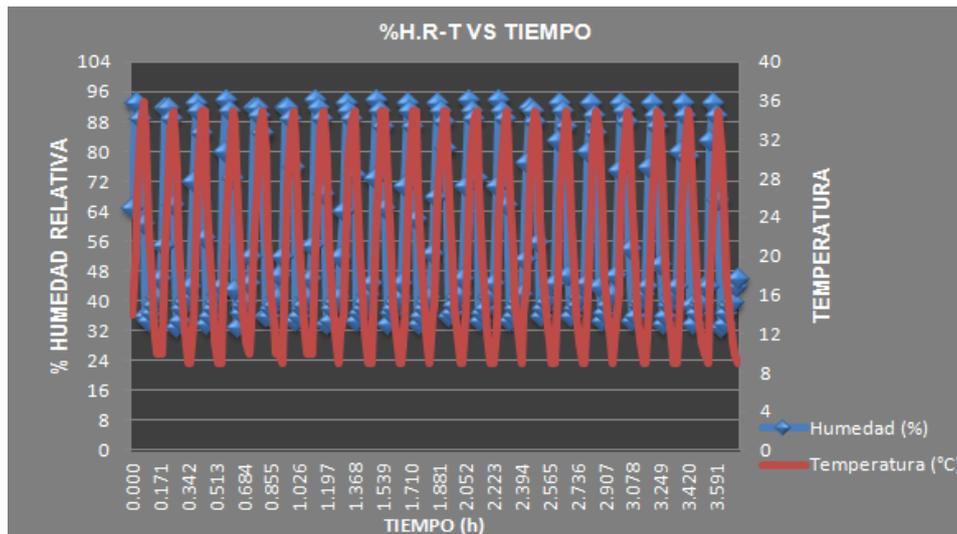
RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

4.1 Análisis de Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos del proceso experimental de simulación acelerada realizado a probetas de concreto armado sometido a dos medios atmosféricos corrosivos.

- i. En la primera parte se muestran los valores de potenciales registrados para cada una de las probetas de concreto armado durante los 210 ciclos de ensayo. Como se mencionó, las probetas fueron divididas en 2 grupos, el primer grupo corresponde a ensayos realizados con humedad y temperatura, dichos valores de potencial se presentan en la tabla 4.1. El segundo grupo fue sometido a las mismas condiciones y también con concentraciones de gases acorde a la norma mexicana de salud (NOM-022-SSA1-2010 y NOM-023-SSA1-1993) que indica los niveles permisibles en la atmósfera para el ser humano, los potenciales de dichas probetas se registran en la tabla 4.2. Además se presentan las gráficas, las cuales muestran el desempeño de las probetas durante el ensayo, el cual se refleja en el cambio de potencial respecto al tiempo.
- ii. En la segunda parte se presenta mostrando el desempeño con imágenes, el efecto del SO₂ (sulfatación) en las probetas, mediante criterios de evaluación para efecto del CO₂, como el método de colorimetría (fenolftaleína) aunado a la determinación de la constante k obtenida a partir del cambio de coloración en los cortes realizados a las probetas. La Tabla 4.3 muestra estos valores de la constante que corresponden a las probetas del grupo 1, la tabla 4.2 muestra lo correspondiente a las probetas del grupo 2
- iii. También se presenta un comparativo de deterioro de las probetas con misma relación a/c pero sometidas a diferente tiempo de curado y condiciones de ensayo.

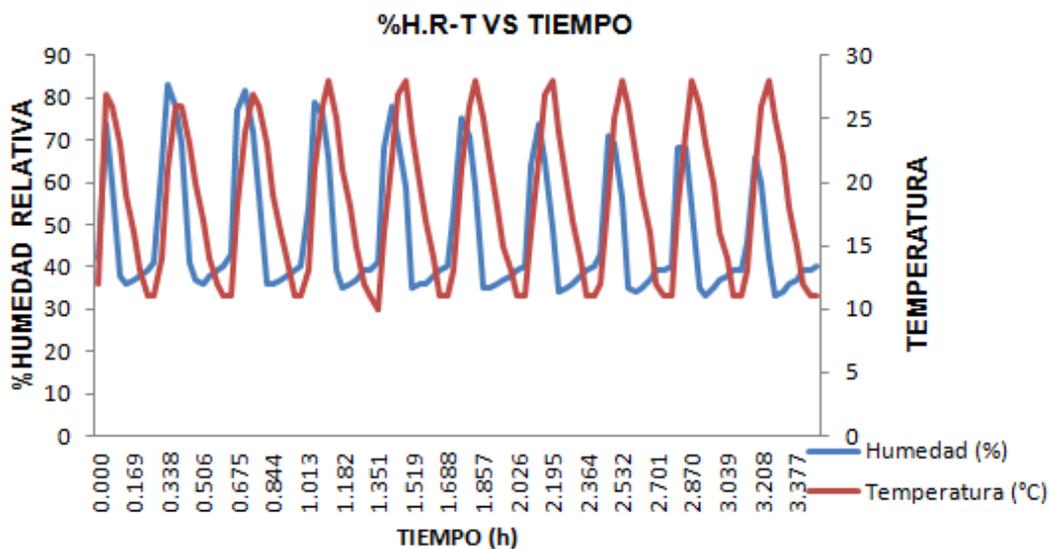
Se realizaron ensayos acelerados en la cámara atmosférica para evaluar el comportamiento del acero de refuerzo en el concreto, llevando a cabo un registro de la humedad relativa y temperatura durante todo el ensayo del grupo 1 (gráfica 4.1), mientras que para el grupo 2, se registraron humedad relativa, temperatura y concentración de gases dentro de la cámara durante todo el ensayo.



Gráfica 4.1 Humedad Relativa y Temperatura correspondiente al grupo I

Para la segunda etapa de ensayos, se registraron los datos de humedad relativa, temperatura e inyección de gases durante todos los ciclos, con las siguientes observaciones:

- Se inyectan 15 ppm de SO_2 y N_2O , durante 10 segundos cada que comienza un ciclo



Gráfica 4.2 Humedad Relativa y Temperatura correspondiente al grupo 2 (con gases)

4.2 Resultados obtenidos por el método de medición de potencial

Estos se presentan en dos partes, en la primera se presentan los valores de potencial obtenidos de las primeras 4 probetas (Tabla 4.1). Debido a los gases empleados para la simulación, la cámara de corrosión acelerada no podía estar abriéndose tanto por seguridad, por lo que las tomas de potencial se llevaron a cabo durante determinado número de ciclos, por lo que el número de datos obtenidos es menor comparado con las primeras cuatro probetas. Cada probeta tiene su respectivo gráfico de variación de potencial.

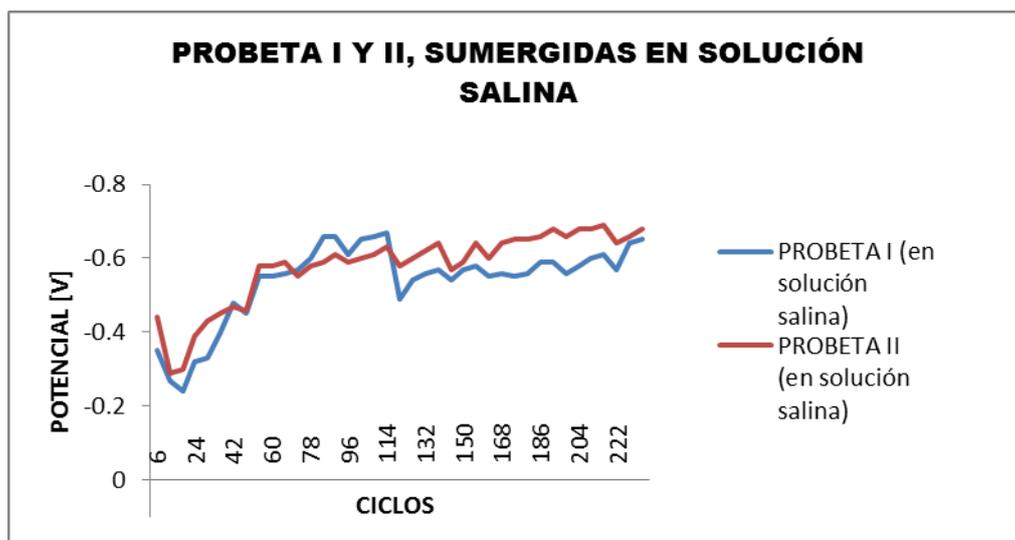
En ambas tablas, la primera columna corresponde al número de ciclo en el cual se tomaron las lecturas de potencial, la segunda columna tiene los valores correspondientes a la probeta I (tabla 4.1) y probeta IB (Tabla 4.2) que tienen una relación $a/c= 0.63$ ambas en inmersión parcial en solución salina. La tercera columna corresponde a los potenciales registrados en la probeta II (Tabla 4.1) y probeta IIB (Tabla 4.2) también en inmersión parcial en solución salina con relación $a/c= 0.59$. En la cuarta columna se registran los potenciales de las probetas III (Tabla 4.1) y la probeta IIIB (tabla 4.2) con una relación $a/c= 0.63$; la quinta columna presenta los potenciales de las probetas IV (Tabla 4.1) y probeta IVB (Tabla 4.2) con una relación $a/c= 0.59$.

Tabla 4.1 Valor de potencial en las primeras 4 probetas

CICLOS	POTENCIAL [V] PROBETA I. A/C=0.63 (en solución salina)	POTENCIAL [V] PROBETA II . A/C=0.59 (en solución salina)	POTENCIAL [V] PROBETA III. A/C=0.63	POTENCIAL [V] PROBETA IV . A/C=0.59
6	-0.35	-0.44	-0.32	-0.27
12	-0.27	-0.29	-0.34	-0.32
18	-0.24	-0.3	-0.35	-0.33
24	-0.32	-0.39	-0.35	-0.35
30	-0.33	-0.43	-0.44	-0.35
36	-0.4	-0.45	-0.45	-0.37
42	-0.48	-0.47	-0.47	-0.38
48	-0.45	-0.46	-0.46	-0.39
54	-0.55	-0.58	-0.49	-0.42
60	-0.55	-0.58	-0.52	-0.43
66	-0.56	-0.59	-0.51	-0.42
72	-0.57	-0.55	-0.50	-0.43
78	-0.6	-0.58	-0.50	-0.44
84	-0.66	-0.59	-0.51	-0.47
90	-0.66	-0.61	-0.52	-0.44
96	-0.61	-0.59	-0.51	-0.48
102	-0.65	-0.60	-0.52	-0.49
108	-0.66	-0.61	-0.53	-0.49
114	-0.67	-0.63	-0.53	-0.45
120	-0.49	-0.58	-0.49	-0.46
126	-0.54	-0.60	-0.52	-0.48
132	-0.56	-0.62	-0.56	-0.50
138	-0.57	-0.64	-0.57	-0.46
144	-0.54	-0.57	-0.50	-0.51
150	-0.57	-0.59	-0.53	-0.52
156	-0.58	-0.64	-0.56	-0.47
162	-0.55	-0.60	-0.50	-0.51
168	-0.56	-0.64	-0.52	-0.51
174	-0.55	-0.65	-0.54	-0.54
180	-0.56	-0.65	-0.56	-0.56
186	-0.59	-0.66	-0.56	-0.58
192	-0.59	-0.68	-0.58	-0.56
198	-0.56	-0.66	-0.56	-0.58
204	-0.58	-0.68	-0.58	-0.58
210	-0.60	-0.68	-0.60	-0.59
216	-0.61	-0.69	-0.60	-0.59
222	-0.57	-0.64	-0.56	-0.60
228	-0.64	-0.66	-0.62	-0.62
234	-0.65	-0.68	-0.63	-0.61

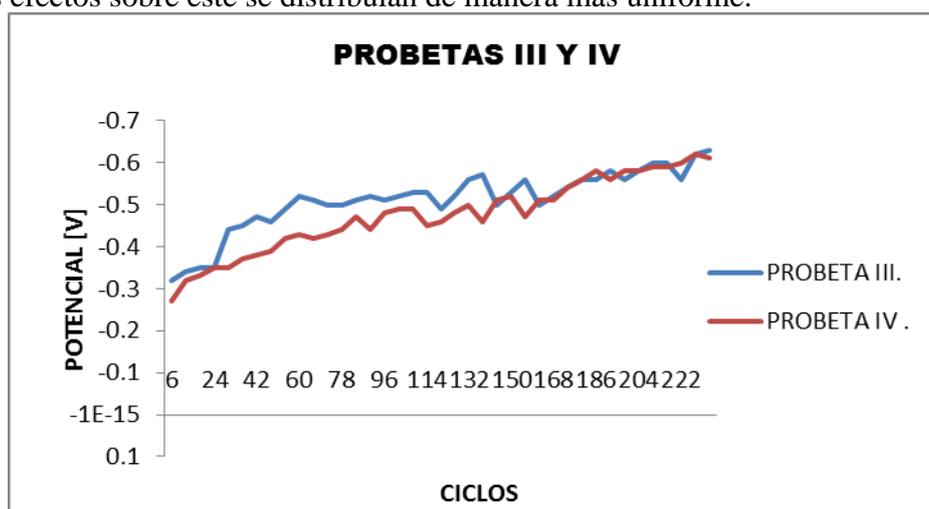
Como se puede notar, los potenciales en todas las probetas tienden a ir en aumento al avanzar los ciclos, mostrando que las probetas inmersas en la solución salina presentaban valores de potenciales más altos que las otras, la probeta II registro el potencial más alto con un valor de -0.69 [v] en el ciclo 216 lo cual indica que ya presenta corrosión el acero de refuerzo y esto se corrobora con el método de apariencia pero por el momento no presenta mayores riesgos de penetración al concreto, mientras que la probeta I también inmersa en solución salina tuvo un $E_{m\acute{a}x} = -0.66$ alcanzado en los ciclos 84, 90 y 108, manteniendo algunas variaciones en los demás ciclos, esto debido a errores en la toma de lecturas en cuanto a la saturación de la solución del electrodo de referencia (esto se presento en todas las probetas)

Las probetas III y IV que permanecieron dentro de la cámara recibiendo el rocío del humidificador y los cambios de humedad relativa y temperatura presentaron potenciales menores que las primeras probetas, la probeta III tiene un $E_{m\acute{a}x} = -0.63$ registrado en el ciclo 234 y la probeta IV registro un $E_{m\acute{a}x} = -0.62$ en el ciclo 228 lo cual indica que ya inicio el proceso corrosivo en el acero de refuerzo, es notorio que a partir del ciclo 162 estas 2 probetas registran potenciales muy similares hasta el final de los ensayos.



Gráfica 4.3a Potencial probeta I y 2 en solución salina

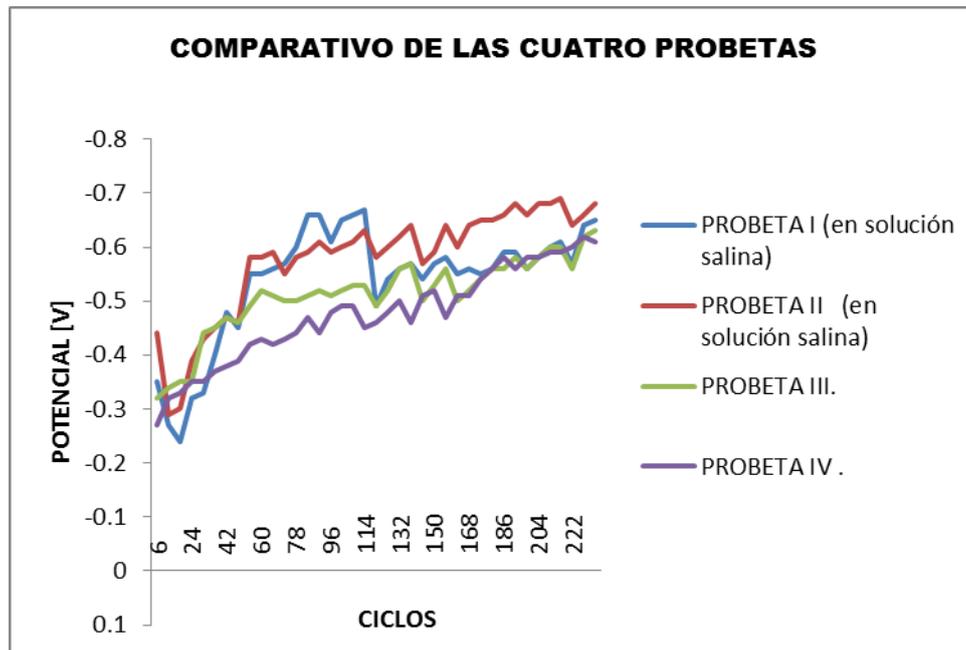
La probeta I gráficamente muestra muchas variaciones de potencial a lo largo del ensayo, mostrando incrementos y decrementos que, a partir del ciclo 120 comenzó a tener un comportamiento ascendente, mostrando indicios de corrosión en el acero de refuerzo que sale de la probeta. La probeta II también tuvo variaciones que no fueron tan marcadas como en la otra. Parte de esto se debió a la colocación dentro de la cámara y la dirección del humidificador, al estar a mayor distancia la probeta II, los efectos sobre este se distribuían de manera más uniforme.



Gráfica 4.3b Probeta 3 y 4, solo agua

El comportamiento de estas probetas fue similar, no presentan picos tan pronunciados entre las lecturas de potencial, habiendo puntos en los cuales registran mismos potenciales, tal es el caso del

ciclo 168, 186, 216, al final la probeta III es la que mayor potencial registro, recordando que estas probetas no tuvieron una inmersión en solución salina.



Gráfica 4.3c Comparativo del potencial en las cuatro probetas

Se observa como en los primeros 42 ciclos las probetas I, II y III mantenían potenciales cercanos, estando por debajo de ellos la probeta IV (que se encontraba más alejada del humificador). A partir del ciclo 186, la probeta II mantuvo un potencial por encima de las otras 3 que mantenían valores similares hasta casi el final de los ensayos, en donde la probeta I subió ligeramente. Dejando en claro que las probetas inmersas en solución salina (I y II) sufrían un poco más de deterioro ya que el medio fue más agresivo, concentrándose el deterioro en la parte saliente de la varilla. Al final, todas las probetas registraron potenciales por encima de 0.6 [V] dejando claro que se encuentra en una zona de corrosión.

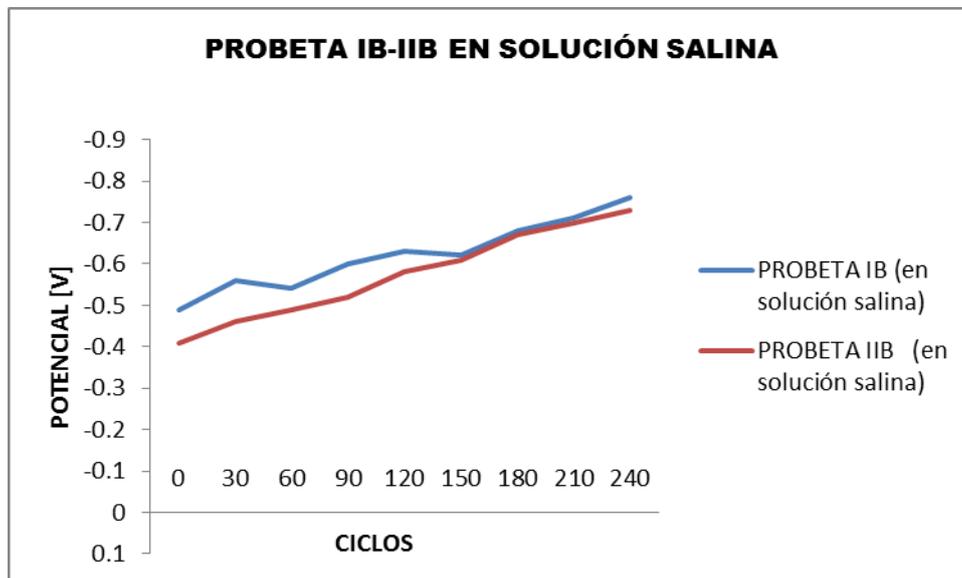
Referente a la segunda etapa de pruebas, la medición de potencial se registra en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Valor de potencial en las probetas grupo 2, con inyección de gases

CICLOS	PROBETA IB. A/C=0.63 (en solución salina)	PROBETA IIB. A/C=0.59 (en solución salina)	PROBETA IIIB. A/C=0.63	PROBETA IVB. A/C=0.59
0	-0.49	-0.41	-0.38	-0.41
30	-0.56	-0.46	-0.42	-0.46
60	-0.54	-0.49	-0.48	-0.48
90	-0.60	-0.52	-0.46	-0.52
120	-0.63	-0.58	-0.53	-0.55
150	-0.62	-0.61	-0.57	-0.58
180	-0.68	-0.67	-0.61	-0.63
210	-0.71	-0.70	-0.64	-0.66
240	-0.76	-0.73	-0.67	-0.68

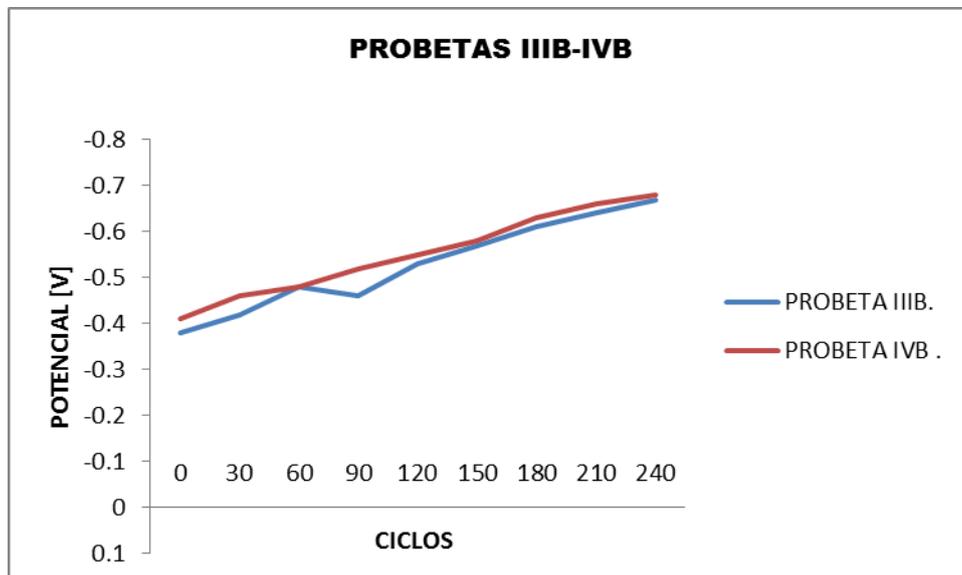
El potencial de todas las probetas aumento poco a poco conforme avanzaban los ciclos, registrando un $E_{m\acute{a}x} = 0.76$ [V] en el ciclo 240 para la probeta IB, que en términos generales fue la que mayores potenciales registro. Las probetas inmersas en solución salina registraron potenciales por encima de 0.7 [V], ya que al tener los gases y aunado a la solución salina el medio simulado fue más agresivo

dando como resultado un deterioro más acelerado de la varilla de acero de refuerzo. Es de notar que hasta el ciclo 180 fue cuando todas las probetas superaron potencial de 0.6 [V] pasando de un estado pasivo a una inminente corrosión.



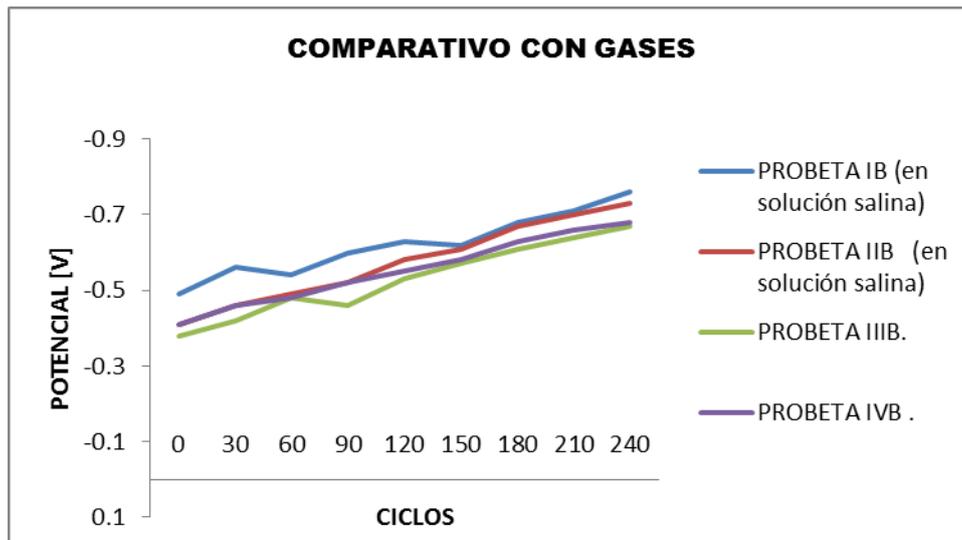
Gráfica 4.4a Probeta IB-IIB en solución salina y con inyección de gases.

El comportamiento del potencial en la probeta IIB tiende a ser lineal, a pesar de ello registró potenciales un poco por debajo de la IB. Al final como se verá con fotografías más adelante, la probeta IB fue la que más deterioro visible tenía en la varilla, y esto se puede ver reflejado en los potenciales.



Gráfica 4.4b Probeta IIIB-IVB con inyección de gases.

Las probetas presentan un comportamiento similar sin tanta variación de potencial, registrando valores muy cercanos a partir del ciclo 140, registrando al final potenciales cercanos a 0.7 [V] pero visiblemente presentan un deterioro considerable en a varilla.



Gráfica 4.4c Comparativo del potencial en las cuatro probetas

Los potenciales a lo largo del ensayo no tuvieron tanta diferencia entre las 4 probetas, cercano al ciclo 60, las últimas tres probetas registraron potenciales casi iguales (de 0.69 a 0.72 [v]). Es notorio que las probetas inmersas en solución salina mantuvieron un comportamiento casi parejo a partir del ciclo 160 aproximadamente, pero las otras 2 lo tuvieron desde el ciclo 120.

4.3 Resultados obtenidos por el método de colorimetría.

Como se mencionó en el apartado 3.5.2, para conocer la influencia del SO_2 en el concreto armado, se utilizó la profundidad de sulfatación, mediante el método de colorimetría (usando fenolftaleína), tanto para las probetas expuestas a ciclos de humedad y temperatura, como a las expuestas a ciclos con las 2 variables mencionadas y también con gases.



FIGURA 4.3 Muestra el cambio de coloración en las secciones que fueron cortadas las probetas, estas corresponden a la probeta I y II (inmersas en solución salina)

También se muestra en la figura 4.2, el cambio de coloración en las probetas III y IV él cual tiende a ser heterogéneo y variable

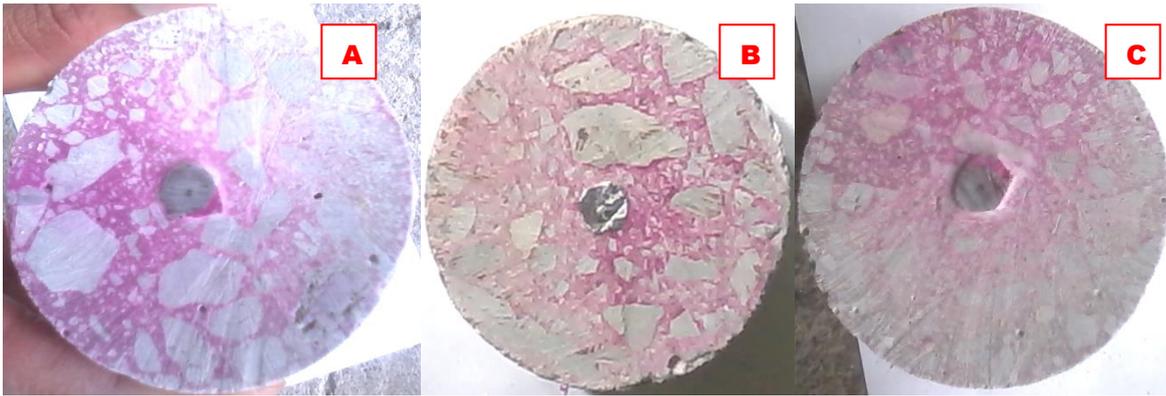


FIGURA 4.2 Cambio de coloración en las secciones que fueron cortadas las probetas, corresponden a la probeta III y IV

Como se puede observar, la coloración violeta es tenue en los 6 casos dando pie a indicar que la penetración de contaminantes hacia el interior del concreto en breve afectara al acero de refuerzo, en este caso el ion cloruro, y no es uniforme en toda el área. Éste también tiende hacia un solo lado, por lo que en la Tabla 4.3 se muestra el valor de la constante k, cabe mencionar que para cada probeta se determinó dicha constante en cada sección y al final se sacó un promedio para cada probeta

Tabla 4.3. Constantes de sulfatación, probetas sometidas a ciclos de humedad y temperatura

		$k \left[\frac{mm}{año} \right]$	$k_{promedio} \left[\frac{mm}{año} \right]$
PROBETA I	A	11.8946	12.5586
	B	10.2539	
	C	15.5274	
PROBETA II	A	13.2422	14.4239
	B	14.0625	
	C	15.9669	
PROBETA III	A	16.7579	21.0157
	B	21.8263	
	C	24.436	
PROBETA IV	A	15.5567	17.4415
	B	19.042	
	C	17.7247	

Tomando como referencia la tabla 3.7, al tener en términos generales una constante $k > 9$, se dice que se tiene un concreto pobre, en base a este criterio. Pero como se observa en las imágenes, la varilla no ha sufrido deterioro en la parte interna del concreto, recordando que la constante depende de la profundidad de carbonatación, ésta es variable. Parece un poco contradictorio, pero a pesar de que la coloración es tenue y los valores de k son mayores a 9, en realidad el concreto aun sirve como protección contra la corrosión al acero de refuerzo. Como en el caso anterior, ahora para las probetas sometidas a ciclos de humedad, temperatura y gases, se muestran en las figuras 4.3

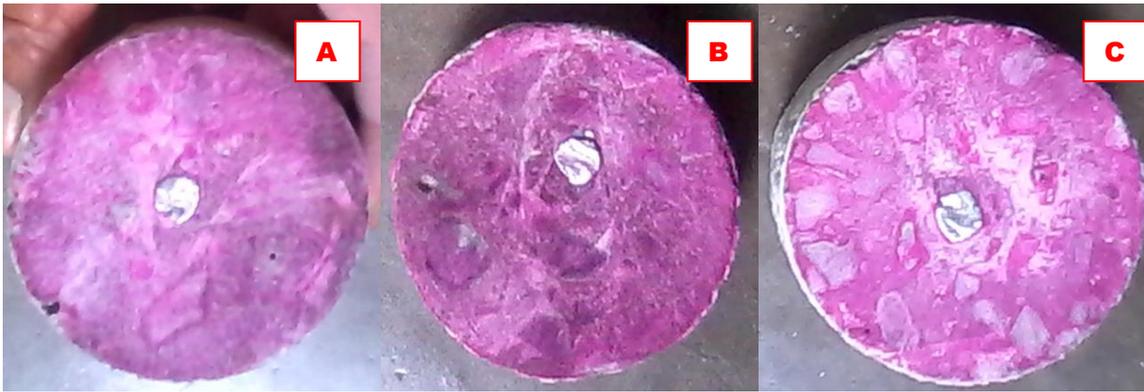


FIGURA 4.3 Cambio de coloración en las secciones que fueron cortadas las probetas, estas corresponden a la probeta IB y IIB (inmersas en solución salina)

En los tres casos y a pesar de estar en inmersión en solución salina, la coloración con el indicador de fenolftaleína es un violeta intenso y es uniforme en toda la superficie lo cual indica un valor de pH entre 9 y 10, en estas condiciones no se presenta avance del SO₂ al interior del concreto, y esto se puede ver también en la varilla, a su alrededor no presenta deterioro (parte protegida por el concreto).

Tabla 4.4. Constantes de sulfatación, probetas sometidas a ciclos de humedad, temperatura y gases

		$k \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right]$	$k_{\text{promedio}} \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right]$
PROBETA IB	A	5.8008	4.8633
	B	4.3945	
	C	4.3945	
PROBETA IIB	A	6.7383	5.9570
	B	4.9805	
	C	6.1523	
PROBETA IIIB	A	6.5918	5.712
	B	5.7129	
	C	4.8346	
PROBETA IVB	A	6.4453	5.6152
	B	4.8340	
	C	5.5664	

Los valores de k, registrados en promedio son menores a 6, y tomando el criterio de la tabla 3.7, se dice que se tiene un buen concreto, resistente a la acción de procesos corrosivos. Cabe mencionar que la obtención de las constantes en las 8 probetas no son suficientes para establecer la calidad del concreto, es necesario complementarlo con los otros 2 criterios de evaluación implementados en este proyecto. Esto se complementa con la inspección visual, por lo que en una primera instancia podría sugerirse que la protección que ofrece el concreto al acero de refuerzo es buena.

Retomando lo obtenido por el método de medición de potencial y el de profundidad de sulfatación, de acuerdo a la figura 3.9, que es el diagrama de Pourbaix, nos encontramos en la frontera entre la zona de inmunidad llegando a la corrosión del acero de refuerzo.

4.4 Resultados obtenidos por el método de técnicas de apariencia.

Antes de comenzar los ensayos, las probetas correspondientes al grupo 1 (I, II, III, IV) presentaban un poco de porosidad y el acero de refuerzo que salía tenía un poco de deterioro, casi imperceptible, como se muestra en la figura 4.4.



FIGURA 4.4 Probetas del grupo 1, antes de iniciar los ensayos, de izquierda a derecha están en el siguiente orden, I, II, III, IV, recordando que las probetas II y II están sumergidas parcialmente en solución salina al 3.5%.

Una vez transcurridos alrededor de 150 ciclos, las varillas de refuerzo que salían de las probetas comenzaban a presentar deterioro, herrumbre, algunas en mayor grado que otras, como se muestra en la figura 4.5.



FIGURA 4.5 Deterioro de las varillas de refuerzo a los 150 ciclos de ensayo, con humedad y temperatura.

Como se puede observar las probetas I y II que están inmersas en la solución salina, son las que más deterioro presentan, puntualmente en la varilla de refuerzo, en la zona de contacto con el concreto, dicho fenómeno se presenta aún más en la probeta II ya que la herrumbre se empieza a esparcir en el área circundante, en forma de manchas. La varilla de acero de la probeta I, presenta herrumbre sin que esta por el momento afecte toda el área, mientras que las probetas III y IV presentan deterioro en menor grado que las otras 2 en la varilla, en toda la demás estructura permanecen libres de deterioro. Al momento de terminar los ensayos (234 ciclos) en la primera parte de pruebas se nota el avance de deterioro en las varillas de las cuatro probetas (Figura 4.6)

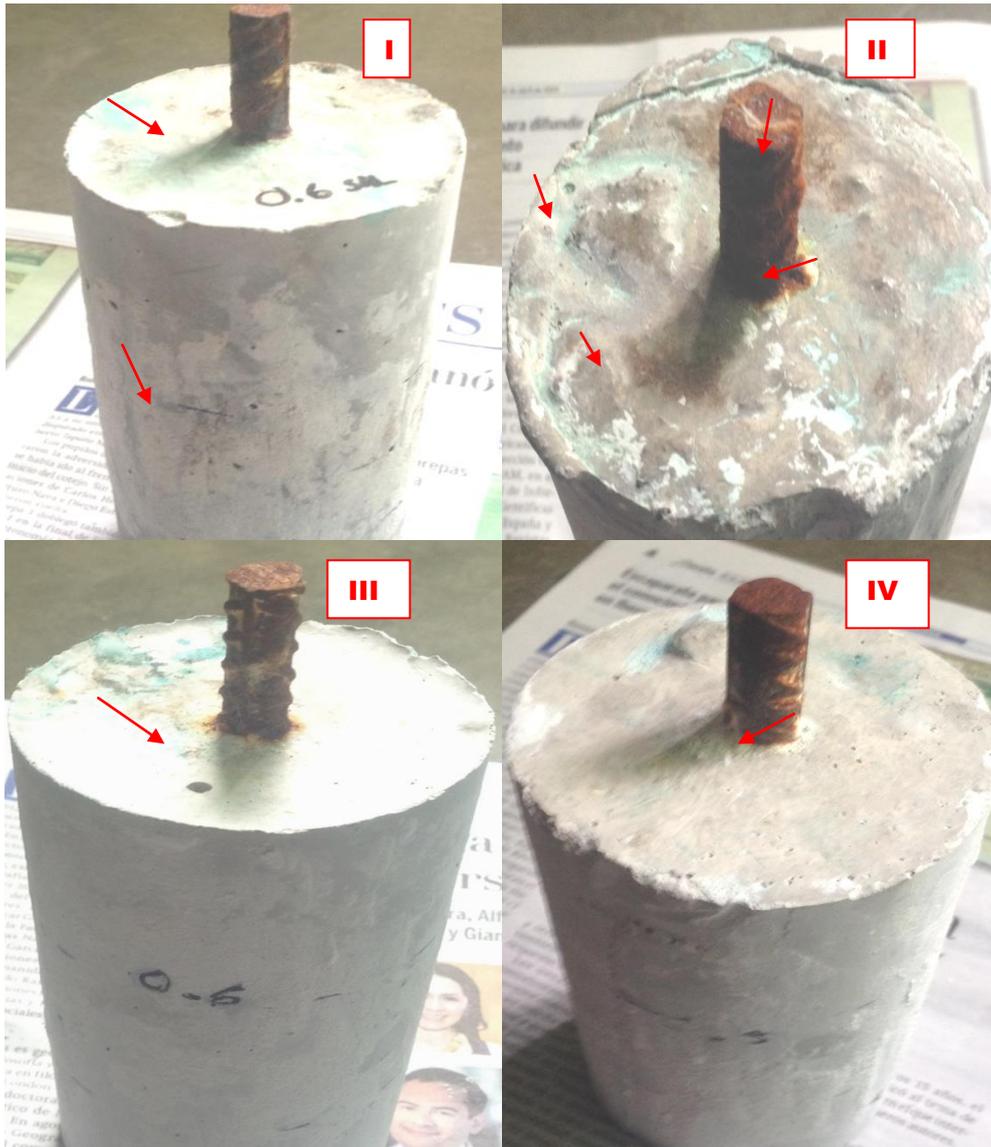


FIGURA 4.6 Probetas grupo 1 al finalizar los ensayos de simulación acelerada de corrosión.

Las probetas que mayor deterioro presentaron fueron aquellas que se encontraban inmersas en la solución salina (probeta I y II), tal y como se indica con las flechas en la figura 4.6 , la I muestra un poco de manchas en la zona donde llegaba la solución salina, es decir como si fuera el máximo de una marea. Igualmente en la frontera entre el concreto y el acero de refuerzo, que es donde se concentra el mayor deterioro, se observa un pequeño círculo alrededor de la varilla, presentándose en las 4 varillas. La probeta II es la de mayor deterioro, además del acero de refuerzo, en toda el área superior muestra manchas de herrumbre producido por la varilla.

Esto da indicios claros de que poco a poco la herrumbre va penetrando en el concreto a través de los poros, sin que esto por el momento afecte internamente en un grado alto la durabilidad.

Para la segunda etapa, las probetas del grupo 2, no presentaban problema alguno antes de comenzar los ensayos ya incluyendo la inyección de gases como se mencionó en el capítulo anterior, como se muestra en la figura 4.7. Al llegar a los 160 ciclos, el deterioro del acero de refuerzo se hace notorio, además de que empieza a afectar el concreto armado (Figura 4.8)

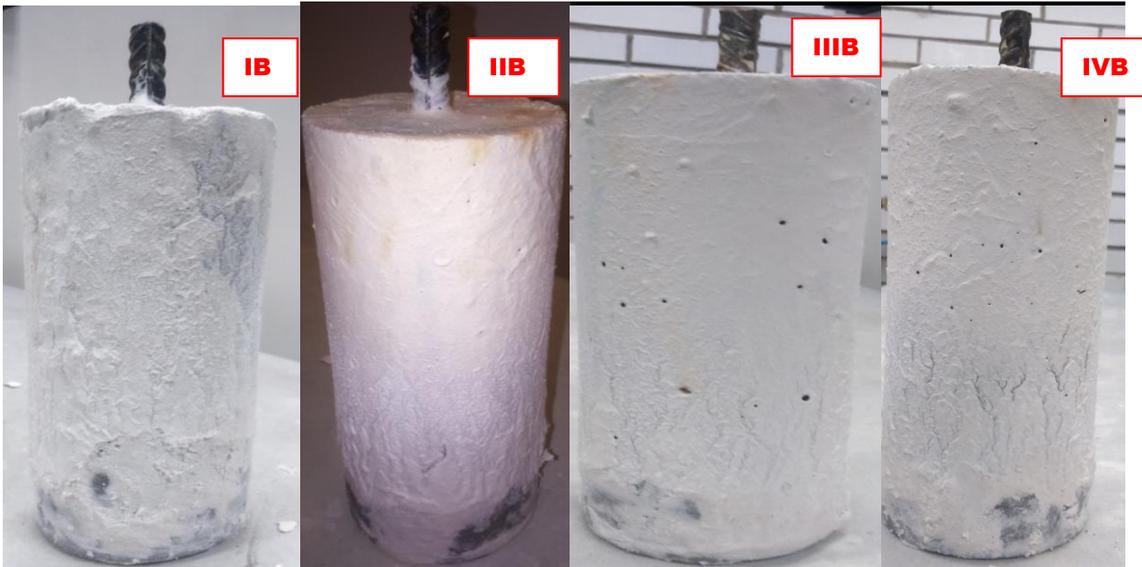


FIGURA 4.7 Probetas grupo 2 antes de iniciar los ensayos de simulación acelerada de corrosión.



FIGURA 4.8 Probetas del grupo 2, con alrededor de 170 ciclos de ensayo de corrosión acelerada.

Al llevar poco más de la mitad del ensayo con la presencia de gases en la cámara, el concreto armado presenta deterioro en la parte superior de las 4 probetas, además de que la herrumbre formada en las varillas ya es muy notoria, dando indicios de una corrosión localizada. Como la varilla va sufriendo deterioro, comienza a desprender óxidos que van penetrando poco a poco al concreto a través de los poros, y esto tiende a mostrar un cambio de coloración (amarillo oscuro) en las zonas afectadas. Al cumplir con 240 ciclos las probetas fueron retiradas de la cámara, su apariencia final se muestra en la figura 4.9

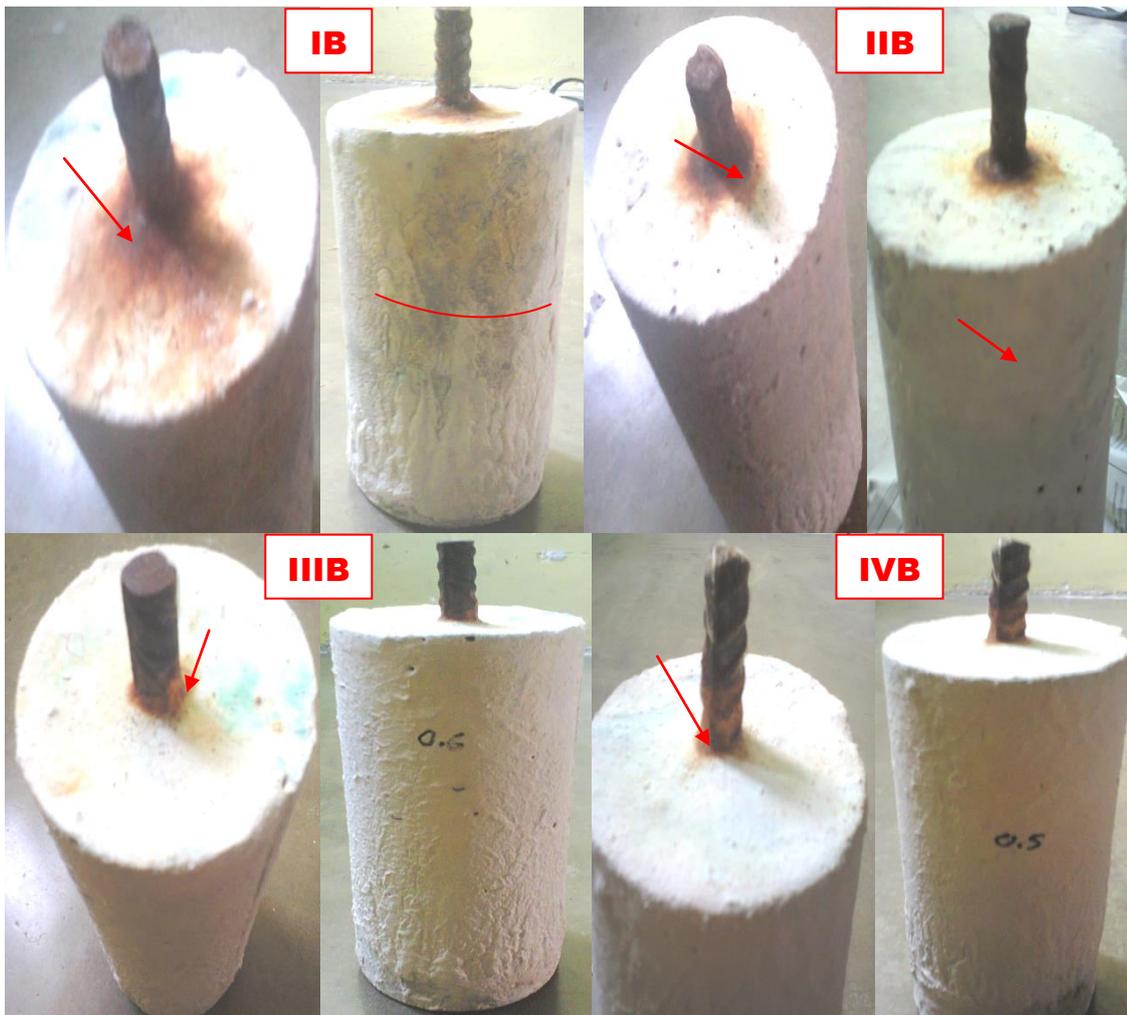


FIGURA 4.9 Probetas del grupo 2, al finalizar la simulación acelerada, las flechas indican la formación de herrumbre y manchas en el concreto

Al finalizar los ensayos con los gases, la probeta IB es la que más efectos de deterioro tiene en comparación con las otras, ya que los óxidos desprendidos de la varilla se han esparcido en más zonas de la probeta como se indica en las flechas (muestra las manchas presentes), es decir, en la parte externa de la probeta estos óxidos han comenzado a penetrar a través de los poros, esto también se hace presente en la probeta IIB aunque en menor medida. Mientras que las probetas IIIB y IVB presentan un deterioro notable en la varilla, provocando la formación de herrumbre alrededor de la misma de aproximadamente 3mm pero sin expandirse en más zonas del concreto.

Tomando como referencia lo obtenido por el apartado 4.3, al momento de cortar las probetas, el acero de refuerzo no presenta formación visible de herrumbre alrededor de la misma en cada una de las secciones, esto fue igual en todas las probetas, lo que demuestra que la presencia de sulfatación al interior del concreto es casi nula, producto de que el concreto no ha sufrido aparente daño.

Como se presentaron en este proyecto 2 tipos diferentes de relación a/c y las probetas se sometieron a ensayos con tiempos de curado diferente, además de que los realizados en cámara de atmósfera controlada para corrosión acelerada fueron iguales en cuanto a las condiciones de humedad relativa y temperatura, ingresando sólo en la segunda etapa los gases. En la Figura 4.10 se presenta el comparativo de las probetas con la misma relación a/c pero a diferente tiempo de curado, es decir, el resultado final después de los ensayos.



FIGURA 4.10 Comparativo del deterioro del acero de refuerzo en las probetas con misma relación agua-cemento

Es notorio que el grado de deterioro en las varillas es mayor en las probetas del grupo 2, esto es más evidente aún con la formación de óxidos alrededor de la varilla, ya que se presenta en mayor medida en éstas. La apariencia final de las 8 probetas cambio más en las últimas, debido a la presencia de los gases, que en contacto con agua, hicieron el medio más agresivo con el contacto, ya que un gas con agua forma ácidos. Es decir, el ataque por sulfatación es más evidente, ya que este comienza desde afuera hacia adentro, mostrándose claramente en las varillas del grupo 2, que son las que más deterioro presentaron sobre todo las que estaban inmersas en solución salina. Sin embargo, estos no penetraron al interior del concreto, es decir, se presentaba poca porosidad en el concreto por lo que la varilla al interior del concreto no presentaba deterioro.

Tomando los cambios de coloración en el concreto al aplicar la fenolftaleína, si hubo mayor diferencia, ya que en las probetas del grupo I el cambio de coloración presentaba un color violeta tenue y no era uniforme en toda la superficie, mientras que en el grupo 2, el color fue violeta intenso y se presentó de manera más uniforme. Recordando que el cambio de coloración indica un concreto no sulfatado, es posible concluir que el concreto elaborado aparenta una buena barrera para los procesos de sulfatación. Pero cabe mencionar que la orientación, rotación de las probetas y dirección del viento (roció) dentro de la cámara fue importante en los resultados de sulfatación. Es importante mencionar que también el tiempo de curado contribuyó a mejorar la calidad del concreto, en este caso, las probetas con 50 días de curado en solución con cal, no presentaron mayor penetración del ión cloruro y SO_2

4.5 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Hoy en día existen diferentes metodologías y materiales utilizados para la prevención y reparación del acero de refuerzo deteriorado por corrosión. Cada investigación realizada tiene un enfoque determinado además de dar lugar a futuras investigaciones basadas en los resultados presentados anteriormente, con la finalidad de hacer variaciones en la metodología expuesta. Llevar a cabo una simulación acelerada de corrosión permite obtener resultados en menor tiempo y que también tienen validez.

El objetivo de esta tesis fue determinar el efecto que por corrosión se presenta en aceros de bajo contenido de carbono, como refuerzo en estructuras de concreto planteando metodologías para su evaluación. De acuerdo al estado del arte y revisión bibliográfica realizada existen diferentes metodologías de evaluación, optando por 3, las cuales fueron la medición de potencial, método de colorimetría (para influencia del SO₂ en el concreto) y apariencia. En general estas tres son las más utilizadas en campo y laboratorio, presentando variaciones en cuanto a tipo de cemento, agregados, atmosfera, etc., pero solo emplean una o 2 en un mismo ensayo.

En consecuencia, no se tiene documentada ninguna investigación con las 3 metodologías mencionadas y tampoco aplicadas a 2 tipos de atmósferas; pero lo más importante es que en este trabajo se estudia la influencia del SO₂ en el concreto armado, que en general no ha sido estudiado ampliamente como los otros. También como resultado de la revisión documental, se identificaron parámetros que influyen en la corrosión por sulfatación y por cloruros, el criterio de elección para el análisis de éstos se basó en el respaldo teórico y experimental que existe actualmente sobre ellos, solo se amplió y profundizó más. Los parámetros abordados fueron los siguientes:

- ✓ Efecto de la relación a/c en la formación de poros en el concreto, que determinara la penetración rápida o no de ion cloruro y SO₂.
- ✓ Efecto de gases tipo industrial óxido nitroso y dióxido de azufre en un ambiente marino y un ambiente urbano

De acuerdo a los resultados y análisis obtenidos de los ensayos realizados, se desprenden las siguientes conclusiones que pretenden aportar elementos que ayuden a ser más fácil de entender la corrosión por sulfatación y por cloruros en estructuras de concreto.

- La forma cilíndrica de las probetas fue adecuada para lograr una penetración homogénea de los gases y el ion cloruro.
 - El concreto mantuvo protegido internamente al acero de refuerzo de los procesos corrosivos. Muestra de ello es que el ataque por sulfatación no afectó al acero (el deterioro va desde afuera hacia adentro, comenzando el deterioro en el acero que sale del concreto). Por otra parte, el ataque de cloruros va desde adentro hacia afuera y no causó daño en el concreto.
 - La selección de relación a/c resultó ser buena en ambos casos, combinado con el del tipo de cemento e impermeabilizante (festegral) utilizado, ya que se obtuvo concreto de buena calidad aunado al tiempo de curado que se le dio.
 - El decapado de las varillas contribuyó para visualizar de mejor manera el deterioro de la misma, en la parte que sale del concreto, ya que internamente no presentaba corrosión visible.
-

- En general la corrosión se localizó en la parte superior de la varilla, mostrando algunas afectaciones en la superficie superior del concreto, con un avance muy lento, hacia el interior del concreto.
 - Durante la etapa de inducción de los gases, en específico del SO₂, se encontró que la constante k estaba en un rango de 4.8 a 5.9, siendo en promedio 3 veces menor a la constante obtenida en las probetas que no tuvieron la influencia de los mismos, observando que el SO₂ penetra a través de los poros de forma gradual expandiéndose hacia la superficie circundante y costados, mientras que el CO₂ va directamente al interior, parte central.
 - A lo largo de los ensayos, y respaldados con imágenes se encontró que el agua marina sintética (solución salina al 3.5%) con gases tipo industrial, hacen un medio más agresivo para el concreto, provocando una corrosión más rápida del acero, localizándose principalmente en la parte superior y lateral de las probetas, ya que al interactuar los gases contaminantes de este tipo de atmósfera con agua, se generan ácidos, que por ende tienden a ser más peligrosos para cualquier superficie u objeto, en este caso para las varillas.
 - En las probetas inmersas parcialmente en solución salina se llega a un deterioro más visible en menor tiempo, comparado con aquellas que estuvieron “sin ion cloruro”
 - La concentración de gases inyectados durante la simulación fue la adecuada para lograr un deterioro gradual del acero y concreto. Además de estar apegado a la norma mexicana de salud (NOM-022-SSA1-2010 y NOM-023-SSA1-1993) se estableció la simulación adecuada de los 2 ambientes propuestos.
 - Los ciclos de simulación acelerada programados resultaron satisfactorios para simular perfectamente la atmósfera Rural- Urbana y Marino-Industrial
-

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS PARA INVESTIGACIONES FUTURAS.

La presente tesis aporta información relacionada con el proceso de deterioro por corrosión mediante sulfatación en estructuras de concreto, así como el comportamiento de parámetros en metodologías de evaluación, sin embargo se propone continuar con líneas de investigación que complementen y fortalezcan las contribuciones del presente.

- ⊕ *Complementar con la RAE (Re-alcalinización Electroquímica) en concretos carbonatados parcialmente que se encuentren en la etapa de iniciación.*
 - ⊕ *Evaluar la pasivación del acero. Se propone llevar a cabo este estudio empleando la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica*
 - ⊕ *Realizar una extracción electroquímica de cloruros.*
-

REFERENCIAS

- [1] E, Teodoro, *Diseño de Estructuras de Concreto Armado*, Pontificia Universidad Católica del Perú, Fondo Editorial 2005, pp 8-17
 - [2] Gamboa L, Gonzalo, *Propuesta de Simulación Acelerada del Deterioro de Concreto Armado por Factores Atmosféricos*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, 2002
 - [3] Pérez L., Tezozomoc, *Estudio de la Cinética de corrosión del Refuerzo de Acero Embebido en Concreto en Diferentes Condiciones de Exposición en Ambiente Marino*, Tesis de Doctorado, Facultad de Química, 2000
 - [4] <http://www.imcyc.com>
 - [5] González, Federico, *Manual de Supervisión de Obras de Concreto*, Editorial Limusa, Segunda Edición, México 2004, pp. 30-35
 - [6] González C. Oscar, *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*, Cuarta Edición, México Limusa 2005.
 - [7] NACE, *Curso de Corrosión Básico*, 2004
 - [8] Cerrud S. Sara, *Corrosión y Protección*, Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2003
 - [9] Genescá, Joan, *Más allá de la Herrumbre II*, Fondo de Cultura Económica, Primera Edición, 1987
 - [10] Guzmán G. Omar, *Influencia del agrietamiento del concreto en la corrosión del acero de refuerzo*, Tesis de Maestría, IPN 2008
 - [11] González Cuevas Oscar, *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*, Editorial Limusa, México, Cuarta Edición, 2005.
 - [12] González Díaz Francisco, *Realcalinización Electroquímica del Concreto Reforzado Carbonatado: Una Opción de Prevención contra la Corrosión*, Tesis de Doctorado, UANL-UNIVERSITÉ PAUL SABATIER, 2010
 - [13] Genescá, Joan, *Más allá de la Herrumbre III*, Fondo de Cultura Económica, Primera Edición, 1987
 - [14] Biczok Imre, *Corrosión y Protección del Hormigón*, URMO Ediciones, Sexta Edición, España 1981
 - [15] Juárez L., *Durabilidad del Concreto en Ambiente Marino*, CIIDIR Unidad Oaxaca, IPN., México 2010.
 - [16] Vera, R. - Delgado, D. - Villarroel, M. - Palma, G. Carvajal, A. M., *DURACON: Influencia de la Acción del Medio Ambiente en la Durabilidad del Concreto. Resultados Preliminares de Chile*, Revista de la Construcción, Volumen 7 No 2 – 2008
 - [17] CEMEX Concretos, *Manual del Constructor*.
 - [18] Genésca J, *Calibración de la Agresividad de la Atmósfera del Suroeste de la Ciudad de México*, Revista Int. de Contaminación Ambiental, 8(2), 81-90, 1992
 - [19] Gutiérrez de López Libia, *El Concreto y Otros Materiales para la Construcción*, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Primera Edición, 2003, pp. 17
 - [20] Montani Rick, *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Revista Construcción y Tecnología, 2000
 - [21] Echeverría C, Rodríguez Pérez J, Echeverría Boán, González B. Azael, *Corrosión atmosférica del acero en la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”*, Cuba, 2003
 - [22] Bernal C. Jesús, *Durabilidad en estructuras de concreto armado, localizadas frente a la costa*, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería UNAM, 2009
 - [23] <http://fuerza.com.mx/2014/02/19>
 - [24] <http://www.teorema.com.mx/biodiversidad/ecosistemas>
 - [25] <http://energíadebate.com/transporte-y-sustentabilidad>
 - [26] <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad-metrópoli/2014>
-

- [27] <http://rbconspro.wordpress.com>
 - [28] <http://www.fortaingenieria.com>
 - [29] <http://www.cathodicprotection101.com/protección-catodica.htm>

 - [30] Gómez Lorenzo, J., Estudio corrosivo sobre cuatro metales en estaciones cubanas del proyecto MICAT. Ciudad Habana. 183 h. Tesis en Ciencias Técnicas, Cuba, 1999.
 - [31] Cottier C. Juan, *El Concreto Bajo la Influencia de los Sulfatos*, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC), 2009.
 - [32] <http://www.ingenierocivilinfo.com/2010/10/propiedades-del-acero.html>
-