

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**"DESEMPEÑO DE MÉTODOS CONVENCIONALES Y EMERGENTES
UTILIZADOS PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO POR
CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO INDUCIDO POR
CLORUROS"**

POR

ADÁN MEDINA REYES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN**

FEBRERO, 2019

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**"DESEMPEÑO DE MÉTODOS CONVENCIONALES Y EMERGENTES
UTILIZADOS PARA LA PREVENCIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN
DEL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO INDUCIDO POR CLORUROS"**

POR

ADÁN MEDINA REYES

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. GERARDO DEL JESÚS FAJARDO SAN MIGUEL**

**CO-DIRECTOR
DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA**

FEBRERO, 2019

Dedicatoria

A dios:

Por darme la oportunidad y la salud para llegar hasta este día y por protegerme durante este camino.

A mis abuelos:

Por ser las mejores personas que he conocido, su apoyo incondicional y por toda la alegría que me dieron durante el tiempo que estuvieron conmigo.

A mis padres:

Gregorio y Eva por todo el amor, trabajo y sacrificio brindado durante estos años. Gracias a ustedes he logrado llegar hasta este momento, para mí es un privilegio ser su hijo.

A mis hermanos:

Gregorio, Eva, Yuliana, Antonio y Rolando por su apoyo y cariño que siempre me han brindado, sin el cual no hubiera podido llegar hasta el día de hoy.

Agradecimientos

A mis amigos y compañeros de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Al CONACYT por la baca de maestría N° 819527 otorgada, con la cual solventé mis estudios de maestría, así como la extensión de beca otorgada para culminar este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, así como a la Facultad de Ingeniería Civil, por haberme dado la oportunidad de ser parte del programa de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

A mi director de tesis el Dr. Gerardo del Jesús Fajardo San Miguel, por la confianza, paciencia, consejos, correcciones y dedicación durante todo este tiempo.

Al Dr. Alejandro Duran Herrera, mi codirector de tesis y jefe del departamento de Tecnología del Concreto, por sus consejos y por haber facilitado material y herramientas del laboratorio del que él está a cargo. De la misma manera agradezco el apoyo brindado por el personal técnico que labora en este laboratorio.

Al los Doctores Antonio Zaldívar Cadena y Ismael Flores Vivián por brindarme el apoyo para la realización de mi proyecto de investigación en las instalaciones del laboratorio de Investigación de Materiales de Construcción. También quiero agradecer al Técnico Gumaro Tovar y a la M.C Aurora Soto por su apoyo durante todo el desarrollo experimental de mi trabajo, así como por su confianza, consejos y amistad.

A la empresa SUNANDA por la donación del aditivo Inhibidor de la corrosión.

A los académicos y administrativos de la Facultad de Ingeniería Civil que entre todos ellos colaboraron al término de este trabajo. En especial a los profesores de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción.

Al laboratorio de Eco-materiales de la Facultad de Ingeniería Civil por su apoyo en la realización de diferentes ensayos.

Índice

Índice de figuras	vii
Índice de tablas	x
Introducción.....	1
Hipótesis.....	4
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
Justificación.....	6
CAPÍTULO 1: Generalidades	8
1.1 Concreto con Acero Embebido	9
1.2 Durabilidad del Concreto con Acero Embebido.....	13
1.2.1 Indicadores de Durabilidad	16
1.3 Deterioro del Concreto con Acero de Refuerzo.....	21
1.3.1 Mecanismos de Transporte	24
1.3.1 Naturaleza Porosa del Concreto	26
1.3.2 Técnicas Electroquímicas para Estimar el Estado de Corrosión del Acero Embebido en Concreto	27
1.5 Métodos de Protección Contra la Corrosión del Acero de Refuerzo.....	31
1.5.1 Inhibidores de Corrosión	31
1.5.2 Tratamientos Superficiales en Concreto	33
CAPÍTULO II: Antecedentes.....	35
2.1 Uso de tratamientos superficiales en concreto endurecido	36
2.2 Uso de aditivos inhibidores de corrosión.....	43
CAPÍTULO III: Procedimiento Experimental.....	49
3.1 Materiales	50

3.1.1 Cemento.....	50
3.1.2 Agregados.....	51
3.1.3 Aditivos.....	51
3.1.4 Nanosílice	53
3.1.5 Sellador para concreto endurecido.....	54
3.1.6 Impermeabilizante	54
3.1.6 Acero.....	54
3.2 Compatibilidad de los aditivos y cemento	55
3.3 Diseño de mezclas de concreto	56
3.4 Fabricación de especímenes	57
3.4.1 Especímenes para caracterización de matrices cementantes	57
3.4.2 Especímenes para inducción de deterioro acelerado por ciclos de humectación y secado.....	60
3.5 Pruebas para evaluación de efecto de los métodos de prevención en la matriz cementante	63
3.5.1 Ángulo de contacto.....	63
3.5.2 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)	64
3.5.3 Florescencia de Rayos X (FRX)	65
3.5.4 Difracción de Rayos X (DRX).....	66
3.6 Ambiente de Exposición	66
3.7 Pruebas electroquímicas	67
3.7.2 Potencial de corrosión.....	68
3.7.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)	68
3.7.2 Resistencia a la polarización lineal (RPL)	69
3.8 Pruebas para determinar la influencia de los métodos en la matriz cementante y el acero	70

3.8.1 Perfil de cloruros	70
3.8.2 Pérdida de masa del acero por el método gravimétrico	72
CAPÍTULO IV: Análisis y Discusión de Resultados.....	74
4.2 Caracterización mecánica y de durabilidad de los concretos propuestos 78	
4.2.1 Resistencia a la compresión.....	78
4.2.2 Porosidad Accesible al agua	79
4.2.3 Resistividad Eléctrica.....	79
4.2.4 Permeabilidad rápida a ion cloruro	80
4.3 Seguimiento electroquímico	81
4.3.1 Matriz cementante con relación a/c de 0.7	82
4.3.2 Matriz cementante con relación a/c de 0.3	91
4.4 Ángulo de contacto.....	97
4.5 Morfología de la matriz cementante en presencia del aditivo inhibidor de corrosión.....	99
4.5 Evaluación de pérdida de masa	102
CAPÍTULO V: Conclusiones y Recomendaciones	104
5.1 Conclusiones.....	105
5.2 Recomendaciones.....	107
Referencias	109

Índice de figuras

Figura 1. Render del Nuevo Aeropuerto Internacional de México, cancelado actualmente.....	9
Figura 2. Puente de la confederación, Canadá.....	14
Figura 3. Configuración para del experimento para calcular el coeficiente de migración de cloruros en un estado no estacionario.	18
Figura 4. Factores que incrementan el daño por corrosión en el tiempo.....	24
Figura 5. Configuración esquemática para medidas electroquímicas en estructuras de concreto reforzado.	30
<i>Figura 6. Espectro IR del aditivo inhibidor de corrosión.</i>	53
Figura 7. Difractograma de rayos X de las NS ($2\theta = 10$ a 60°).....	53
Figura 8. Configuración de espécimen para evaluación del desempeño de los métodos de prevención.....	61
Figura 9. Ejemplo de ángulo de contacto de agua obtenido.	64
Figura 10. Especímenes en el ambiente de exposición, A humectación y B secado.	67
Figura 11. X_{\max} obtenida a través del diagrama de Nyquist.....	69
Figura 12. Esquema de obtención de muestras para la construcción de perfil de cloruros.....	71
Figura 13 Escurrimiento de la pasta a diferentes dosis de aditivo.....	75
Figura 14. A) potenciales de corrosión y B) Velocidad de corrosión durante la experimentación, a/c= 0.7	82

Figura 15. Resistividad eléctrica del concreto con los diferentes tratamientos, a/c=0.7.....	84
Figura 16, Perfil de cloruros de las mezclas tratadas con relación a/c de 0.7, Z1=0-5mm, Z2=5-10mm, Z3=10-15mm y Z4=15-20mm de profundidad.....	86
Figura 17. Perfil de cloruros de las mezclas tratadas con relación a/c de 0.7 a una misma edad de ensaye, Z1=0-5mm, Z2=5-10mm, Z3=10-15mm y Z4=15-20mm de profundidad.....	88
Figura 18. Seguimiento de Xmax de especímenes de MC y NS.....	90
Figura 19. potenciales de corrosión y B, Velocidad de corrosión durante la experimentación, a/c= 0.3.....	92
Figura 20. Resistividad eléctrica de la mezcla control con relación a/c de 0.3.....	93
Figura 21. Perfil de cloruros de las mezclas tratadas con relación a/c de 0.3, Z1=0-5mm, Z2=5-10mm, Z3=10-15mm y Z4=15-20mm de profundidad.....	94
Figura 22. Seguimiento de la hidrofobicidad en los concretos con (TS).....	97
Figura 23. Ángulo de contacto de los diferentes especímenes, después de la activación.....	99
Figura 24. Micrografías de la microestructura de las muestras, A) matriz cementante con la incorporación del aditivo IC antes de ser expuesta al ambiente de deterioro, B) Matriz cementante con la incorporación del aditivo IC después de ser expuesta al ambiente de deterioro, C) matriz cementante de referencia antes de ser expuesta al ambiente de deterioro, D) matriz cementante de referencia después de ser expuesta al ambiente de deterioro.	100
Figura 25. EDS de las muestras con y sin aditivo IC después de la exposición al ambiente de deterioro. A, sin aditivo IC y B, con aditivo IC.....	101

Figura 26. Pérdida de masa del acero determinado por diferentes métodos. 103

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones para concreto utilizado en diferentes estructuras del NAIM, datos obtenidos de CompraNet [*]	10
Tabla 2. Relación a/mc máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición.....	11
Tabla 3. Valores de coeficiente de migración de cloruros, para diferentes calidades de concretos.....	18
Tabla 4. Relación entre carga que pasa y permeabilidad del concreto.....	19
Tabla 5. Relación entre la resistividad y la probabilidad de corrosión NMX-C514.	20
Tabla 6. Mecanismos de transporte en concreto y parámetros característicos.....	26
Tabla 7. Análisis químico del cemento y pérdida por ignición, en porcentaje, NMX-C-151.	50
Tabla 8. Propiedades físicas de los agregados, ASTM C127, 128.	51
Tabla 9. Proporcionamiento de mezclas de concreto propuestas (kg/m ³ , ACI 211, PCA).....	56
Tabla 10. Relación entre la resistividad y la probabilidad de corrosión, NMX-C514.	59
Tabla 11. Relación entre carga que pasa y permeabilidad del concreto. ASTM 1202.	60
Tabla 12. Condición de corrosión relacionada con las mediciones del potencial de media celda.....	68
Tabla 13. Densidad de corriente de corrosión vs condición del acero [68].	70

Tabla 14. Propiedades en estado fresco y endurecido de la pasta con los diferentes aditivos	77
Tabla 15. Resistencia compresión de las mezclas de concreto, 28 días.	78
Tabla 16. Porosidad accesible al agua de las mezclas de concreto, 28 días.....	79
Tabla 17. Resistividad eléctrica de las mezclas de concreto, 28 días.....	80
Tabla 18. Permeabilidad rápida a ion cloruro de las mezclas de concreto.	81
Tabla 19. Pérdida de peso del acero, determinado por diferentes métodos.	102

Introducción

El pilar en la infraestructura de las sociedades modernas son las estructuras de concreto con acero embebido (CAE). Esto se debe a que es considerado un material económico, así como durable si se compara con otros materiales de construcción. Para que este material sea clasificado como durable, debe ser capaz de resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro que perturbe su forma original, calidad y utilidad cuando es expuesto a un entorno de servicio deseado [1]. Pero como todos los materiales, el CAE es propenso a deteriorarse, pudiendo suceder en un lapso corto o largo. Dentro de los deterioros, frecuentemente se encuentra la corrosión del acero embebido, causada principalmente por el ingreso dióxido de carbono (CO_2) y/o cloruros (Cl^-) [2]. Dentro del concreto, el acero se encuentra en un estado pasivo, esto a consecuencia de la naturaleza alcalina del concreto ($\text{pH} > 12$). Además, el concreto brinda una barrera física, lo que impide que el acero esté en contacto directo con el ambiente. Pero cuando estos agentes llegan hasta donde se encuentra el acero perturban esta pasividad y se inicia la corrosión. El ingreso de estos agentes puede ser de forma rápida o lenta, esto depende principalmente de la permeabilidad del concreto [3]. Teniendo ésta una estrecha relación con la relación agua-cemento (A/C) y al mismo tiempo con las especificaciones físicas, mecánicas y de durabilidad del concreto consideradas en el proyecto ejecutivo.

La constante preocupación por la corrosión del acero de refuerzo ha dado lugar a numerosas investigaciones en todo el mundo. Algunas enfocadas a entender los mecanismos que generan la degradación y otras orientadas a establecer métodos

o técnicas que permitan proteger el acero de refuerzo directa o indirectamente [4].

Gracias a estos estudios, hoy en día podemos encontrar diferentes productos que tienen como objetivo prevenir este tipo de deterioro. Entre ellos se puede mencionar, aquellos que son comerciales como los inhibidores de corrosión (IC) y los tratamientos superficiales para concreto endurecido; así como los que se encuentran en desarrollo, como aquellos que usan nanomateriales para incrementar la durabilidad del CAE [5]. En este sentido se sabe que el concreto tiene un mayor gradiente hidráulico durante los primeros días después de la fabricación [6], además, de demandar agua para continuar el desarrollo de la hidratación (agua de curado). Por lo que se propone usar este mecanismo para ingresar nano sílice amorfa dispersa en el agua de curado. Cuando ésta entre en contacto con el hidróxido de calcio forme silicatos de calcio hidratados. El peso usado de nano sílice estará en función del peso del agua utilizada para curar el concreto. Esta ha sido probada en morteros con resultados favorables, pero no se ha probado en concretos. Además, se sabe que una alta permeabilidad facilita el ingreso de sustancias dentro de la matriz cementante mientras que lo contrario sucede cuando la permeabilidad es baja. Esto podría ser un obstáculo para el uso de este nanomaterial en concretos con ciertas características. Por lo que es importante evaluar el desempeño, en concretos con permeabilidades diferentes. A esta forma de introducir la nano sílice se le llamará en este documento como método emergente.

Los dos factores más importantes en la durabilidad son el ambiente de exposición y los requerimientos estructurales, ya que es posible encontrar en un mismo

ambiente de deterioro, elementos de concreto con diferentes requisitos estructurales. Por ejemplo, a medida que la resistencia a compresión del concreto aumenta, es muy probable que la permeabilidad disminuya y la durabilidad del mismo se vea favorecida. De ahí la importancia de realizar un buen proporcionamiento y una adecuada selección de los materiales constituyentes. La correcta combinación de estos factores propiciará una mayor durabilidad del concreto con acero de refuerzo. Hoy en día se ha estudiado y demostrado la efectividad de productos comerciales y emergentes para incrementar el tiempo de inicio de la corrosión [7,8], siendo uno de los factores a considerar.

No obstante, es importante conocer la efectividad de los diferentes productos usados para incrementar la durabilidad los CAE, no sólo involucrando el ambiente de exposición. Además, es necesario considerar los requisitos estructurales del mismo, ya que un cambio en la especificación estructural podría repercutir en el desempeño de los diferentes métodos propuestos. Asimismo, se puede analizar el efecto que tienen diversos métodos de protección cuando se exponen a un mismo ambiente de deterioro. El desempeño que puede mostrar cada uno de ellos permitirá contribuir a identificar un dominio de efectividad entre cada uno de ellos. Esto ayudaría a seleccionar un adecuado método de protección para el acero embebido en concreto.

Hipótesis

Los métodos de prevención contra la corrosión inducida por cloruros, como es la adición de nano sílice durante el curado, un aditivo inhibidor de corrosión, un sellador y un impermeabilizante modificarán la velocidad de transporte de cloruros dentro de los concretos propuestos, por lo que el tiempo inicio de la corrosión del acero embebido incrementará.

Objetivo General

Evaluar la influencia de los métodos de prevención en el tiempo de inicio de la corrosión del acero embebido en concretos con diferente permeabilidad cuando se someten a un proceso de deterioro por corrosión inducida por cloruros.

Objetivos Específicos

1. Diseñar dos matrices cementantes con características de durabilidad diferentes.
2. Inducir la corrosión del acero embebido mediante un proceso acelerado de ciclos de humectación y secado.
3. Caracterizar electroquímicamente el sistema acero-concreto después de 28 días de curado estándar, mediante la medición de potencial de corrosión, velocidad de corrosión y resistividad eléctrica.
4. Evaluar el efecto de los diferentes métodos de protección en la cantidad de cloruros presentes en la matriz cementante a diferentes edades de ensaye.
5. Evaluar el desempeño de los métodos propuestos para retrasar el inicio de la corrosión del acero de refuerzo.

Justificación

El incremento en el tiempo de inicio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto se ha logrado mediante la aplicación o introducción de diferentes productos sobre el concreto. Algunos, orientados a desarrollar matrices cementantes más duraderas, otros a reforzar la barrera física que ejerce el concreto. Otros más, se orientan a proteger el acero de refuerzo y otros ejercen una protección sinérgica, protegiendo el acero y reforzando la barrera física. Entre los métodos que han demostrado tener mejor desempeño al incrementar el tiempo de inicio de la corrosión, encontramos a los tratamientos superficiales y a los aditivos inhibidores de corrosión. Aunque éstos resultan ser eficientes, pocas veces son evaluados simultáneamente y bajo las mismas condiciones. Además, no es común que se evalúen en concretos con propiedades de durabilidad diferentes. Dichas propiedades podrían repercutir en el desempeño de los diferentes métodos de prevención. Por ejemplo, los mecanismos de transporte dependen en gran medida de la permeabilidad. Si ésta se modifica a consecuencia de la incorporación de algún método de prevención, puede repercutir en la termodinámica y la cinética de corrosión del acero embebido. Además, algunos productos solo pueden ingresar hasta cierta profundidad, dependiendo principalmente de la permeabilidad del concreto. Si el ingreso de los diferentes productos solamente es superficial, el reforzamiento en la barrera física podría ser despreciable. De aquí la importancia de evaluar la influencia de la permeabilidad en el desempeño de diferentes métodos de protección. Es así, que el propósito que tiene esta investigación es evaluar el desempeño de un inhibidor de corrosión, y tres tratamientos superficiales en

incrementar el tiempo de inicio de la corrosión del acero en concretos con diferentes propiedades de durabilidad. Estos métodos se usarán por separado en los diferentes concretos propuestos. Se expondrán a un mismo ambiente de deterioro acelerado. Asimismo, se dará un seguimiento a los potenciales y las velocidades de corrosión. Para finalmente cuantificar la cantidad de cloruros presente en la matriz ceméntate a diferentes edades.

CAPÍTULO 1:

Generalidades

CAPITULO I

En este capítulo se presenta información relacionada a la industria de la construcción y en particular al concreto con acero de refuerzo o embebido. Su fabricación, la evaluación de propiedades mecánicas y de durabilidad, así como los mecanismos de deterioro y la forma en que se pueden mejorar las propiedades de durabilidad.

1.1 Concreto con Acero Embebido

Actualmente el desarrollo de un país tiene una estrecha relación con la infraestructura existente y la que está por desarrollarse. Por ejemplo, México contempló recursos por 7.7 billones de pesos en el Programa Nacional de Infraestructura entre 2014 y 2018. Dichos recursos estuvieron distribuidos en comunicaciones y transportes, desarrollo agrario territorial y urbano, energía, hidráulico, salud y turismo [9]. Dentro del presupuesto se contempló la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) obra cancelada actualmente, figura 1.



Figura 1. Render del Nuevo Aeropuerto Internacional de México, cancelado actualmente.

CAPITULO I

Siendo esté uno de los primeros proyectos de infraestructura del país, en el cual se contempló evaluar el concreto usado por indicadores de durabilidad antes de ser colocado en obra, ya que el suelo donde se construía contiene una alta concentración de sales, principalmente cloruros y sulfatos, siendo importantes agentes de deterioro para la estructura de CAE [10]. La tabla 1 muestra algunos de los requisitos mecánicos y de durabilidad del concreto solicitados en para esta obra.

Tabla 1. Especificaciones para concreto utilizado en diferentes estructuras del NAIM, datos obtenidos de CompraNet.*

Propiedad	Norma	Tubería para drenaje	Cimentación	Sistema de precarga	Túneles de servicio
Resistencia a compresión kg/cm ²	NMX C 083	500	400	600	600
Relación a/mc	---	<0.4	<0.35	<0.4	<0.4
Coeficiente de permeabilidad al agua m/sx10 ⁻¹²	Publicación científica	8	---	8	8
Permeabilidad a cloruros	ASTM C1202	1000	<500	<1000	<1000
Coeficiente de migración de cloruros, m ² /sx10 ⁻¹²	NT Build 492	---	1.5	---	---
Coeficiente de difusión de cloruros, mm ² /año	ASTM C1556	---	---	12	12
Contracción por secado, x10 ⁻⁶ m	NMX C 173	---	<450	<600	<600
Gradiente térmico	---	---	<20	---	---

*Fuente: <https://compranet.funcionpublica.gob.mx/web/login.html>

CAPITULO I

Para el caso de algunas zonas del mundo, el diseño de concreto actual se basa principalmente en aspectos como un recubrimiento mínimo, la cantidad y tipo de agregados, la relación a/c, el contenido y tipo de cemento, la cantidad, la incorporación de puzolanas y el uso de diferentes tipos de aditivos; cómo se puede observar en las diferentes guías de diseño de mezclas de concreto (PCA, por sus siglas en inglés) y el ACI 211.1. En la tabla 2 se puede observar la relación a/mc recomendada para algunos ambientes de exposición [11].

Tabla 2. Relación a/mc máxima y resistencia de diseño mínima para varias condiciones de exposición.

Condición de exposición	Relación a/mc máxima	Resistencia a compresión de diseño mínima kg/cm ² (MPa)
Concreto protegido de la exposición a congelación-deshielo, a la aplicación de sales de deshielo o de sustancias agresivas	Elija la relación a/c basándose en la resistencia, trabajabilidad y requisitos de acabado	Elija la resistencia basándose en los requisitos estructurales
Concreto que se pretende que tenga baja permeabilidad cuando es expuesto al agua	0.50	280 (28)
Concreto expuesto a congelación-deshielo	0.45	320 (31)
Para protección contra la corrosión del refuerzo (armadura) del concreto expuesto a cloruro de las sales.	0.40	350 (35)

Pero las sugerencias descritas por guías actuales no proporcionan información sobre la resistencia que oponen los diferentes concretos al ingreso de agentes de deterioro. Además, se ha demostrado que el uso de diferentes materiales ayuda a

CAPITULO I

incrementar significativamente la resistencia al ingreso de agentes de deterioro. Asimismo, el uso de otros materiales y la optimización de los existentes reducen la huella de carbono. Dentro de ellos se encuentra: a) la optimización de la cantidad de agregados; b) el uso de aditivos, reductores de agua, inhibidores de corrosión, entre otros; c) el uso de polvo de caliza; y d) el empleo de materiales suplementarios. Asimismo, requiere que se cuiden diferentes detallen durante la construcción. Como es el control de la temperatura, una adecuada compactación, protección del concreto fresco y el curado del mismo, éstos se detallan en las especificaciones de cada proyecto [12], con el fin de que la vida útil del concreto incremente. La vida útil se puede definir de diferentes maneras, a continuación, se muestran algunas definiciones.

El comité ACI 365 define la vida útil de las estructuras como: “el periodo de tiempo después de la instalación, en el que el desempeño de la estructura cumple con los valores mínimos de mantenimiento”.

Mientras que el manual DURAR propone una definición para el concepto de vida útil de una estructura: “es el periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto, es decir seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento”. Por lo tanto, si una estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades, sobre pasaría el periodo de su vida útil.

La ASTM E632 describe la vida útil como “el periodo de tiempo después de la construcción, en el que todas sus propiedades esenciales alcanzan o superan un valor mínimo aceptable con un mantenimiento aceptable”.

CAPITULO I

Lo que define el tiempo o el final de la vida útil puede ser una reducción en la capacidad estructural o algún otro parámetro como puede ser la estética. Consecuentemente el fin de la vida útil depende del tipo de estructura. En algunos casos, cuando se pierde el 20% de la capacidad estructural el elemento puede seguir siendo aceptable. Mientras, que para otros elementos cuando se reduce en un 5% la capacidad estructural, este ya no es aceptado, por lo que su vida útil llega a su fin. Por lo que es importante conocer el impacto de la corrosión en las propiedades mecánicas de la estructura [3].

1.2 Durabilidad del Concreto con Acero Embebido

La durabilidad puede definirse como la capacidad del material para resistir la acción de la intemperie, el ataque químico, abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro que perturbe su forma original, calidad y utilidad cuando es expuesto a un entorno de servicio deseado [13]. Está, comienza desde el diseño arquitectónico, involucrando la acústica y el detalle de la estructura, evitando que estos sean propensos a deterioro, e incluir la adecuada selección materiales constituyentes [14]. Además, de los métodos de protección contra el deterioro, si se tiene cuidado en este último aspecto, los costos de mantenimiento podrían reducirse significativamente.

Hoy en día es posible diseñar estructuras de CAE con una vida útil de más de 100 años. Como es el caso del puente de La Confederación en Canadá que conecta el continente con la isla del Príncipe Eduardo, véase figura 2. Se terminó de construir en 1997 y tiene proyectada una vida útil de 100 años. Para su construcción se requirió más de 520000 yardas cúbicas de concreto (397569 m³ de concreto). El

CAPITULO I

concreto se evaluó mediante pruebas de durabilidad como son; hielo y deshielo, penetración de sulfatos, difusión de cloruros, reactividad álcali/agregado, etc. [15].



Figura 2. Puente de la confederación, Canadá.

Este puente es un ejemplo de cómo debe ser planeada cualquier obra de Ingeniería Civil. Ya que, desde la planeación y hasta la construcción, se cuidaron los aspectos de los materiales y los procesos constructivos.

Caso contrario, cuando a consecuencia de errores de diseño, construcción, la exposición a sustancias nocivas del medio ambiente y la falta de un mantenimiento adecuado, la durabilidad de este material puede reducirse substancialmente [16].

Por lo que es importante entender el rol del concreto y del acero en la durabilidad del material. Como se mencionó anteriormente, existen diferentes guías, recomendaciones, y en algunos casos, hasta normas para incrementar la durabilidad del CAE. Pero estas guías y normas han sido desarrolladas por experiencia local y a menudo son conservadoras. Por lo que inhiben la innovación, ya que los nuevos materiales y métodos no son considerados. Hoy en día la

CAPITULO I

industria de la construcción está bien familiarizada con los proporcionamientos de un concreto normal, pero no con uno que tenga como objetivo ser más durable [17].

Entre los muchos factores que han sido reportados en la literatura, la corrosión del acero embebido se ha convertido en la causa más común de fallo en estructuras de concreto [18]. Afecta el desempeño estructural y tiene impactos económicos que son puntos clave para determinar la rentabilidad de cualquier proyecto [19]. Por ejemplo, algunos estudios realizados por diferentes organizaciones señalan que entre el 2 y el 5% del producto interno bruto (PIB) de un país es destinado a atacar problemas por corrosión [20,21]. Esta puede iniciar por ataque físico, químico y/o biológico, siendo causado principalmente por la carbonatación o inducida por cloruros [22]. Aunque, no causan problemas de seguridad inmediatos, el deterioro crece gradualmente y es un peligro potencial para la estructura [23]. Estos agentes de deterioro ingresan por la red de poros del concreto hasta donde se encuentra en acero y eventualmente inicia la corrosión.

Por lo que es importante entender que cada estructura es diferente ya sea por sus requisitos estructurales o por el ambiente de exposición. Debido a ello, el criterio de durabilidad se basa en la especificación de un periodo de servicio deseado antes de que la probabilidad de corrosión exceda un umbral. Para calcular la probabilidad, es necesario realizar un análisis de durabilidad, donde, se combinan diferentes calidades de concreto y recubrimientos. Aunado a esto, la probabilidad de corrosión puede calcularse matemáticamente mediante la segunda ley de difusión de Fick (modificada) y una simulación de Montecarlo.

CAPITULO I

Uno de los datos más importantes de estos algoritmos es la difusividad de los cloruros, reflejando la resistencia del concreto al ingreso de cloruros. Una manera de reducir este coeficiente es reducir la relación agua cemento (a/c). Aunque, se ha demostrado que es más eficiente el uso de materiales suplementarios. Por ejemplo, cuando se reduce la relación a/c de 0.50 a 0.40 con solo Cemento Portland Ordinario (CPO), la difusividad reduce en un factor de dos o tres. Mientras que cuando se incorporan escoria de alto horno, ceniza volante o humo de sílice en la misma relación a/c, la difusividad se reduce en un factor de hasta de veinte.

Es importante mencionar, que son solo recomendaciones iniciales para realizar los trabajos de construcción. Por lo que es necesario tomar muestras durante y después de terminar la construcción, con el fin de realizar un nuevo análisis de durabilidad, pero con datos más reales [24]. Para conocer el efecto de los diferentes concretos propuestos, es necesario realizar diferentes ensayos orientados a predecir el comportamiento futuro.

1.2.1 Indicadores de Durabilidad

Para poder estimar el comportamiento de una estructura de CAE es necesario medir diferentes propiedades en el concreto. Estas dependen del ambiente al que van a estar sometidas durante su vida útil de servicio, para aquellas que van estar expuestas a cloruros podemos encontrar: la determinación del coeficiente de migración de cloruros (NT BUILD 492), la permeabilidad rápida a ion cloruro (ASTM C1202), la resistividad eléctrica del concreto (NMX-C-514) y la porosidad accesible al agua.

CAPITULO I

La determinación del coeficiente de migración de cloruros es un ensayo semidestructivo, se ensayan especímenes de 10 cm de diámetro y con altura de 5 cm, estas probetas se colocan en una solución de NaOH (solución anódica) y en una solución de NaCl (solución catódica). En la figura 3 se observa la configuración del equipo necesario para la realización de esta prueba. Se aplica un voltaje de entre 30-60 V (depende de la calidad de la pasta) para impulsar la migración de iones Cl⁻ de la solución catódica a la anódica. Una vez que se terminó el ensayo se desmonta el equipo y se mide el frente de cloruros en los especímenes (penetración de cloruros y se utiliza la ecuación 1 para determinar el coeficiente [25].

Donde:

D_{nssm} es el coeficiente de migración de cloruros no estacionario, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

T es el promedio de la temperatura inicial y final de la solución anódica, °C.

U es el valor absoluto del voltaje aplicado, V.

L es el ancho del espécimen, mm.

t es el tiempo en el que se llevó a cabo la prueba, hrs.

X_d es el promedio de las distancias medidas de la penetración de cloruros.

CAPITULO I

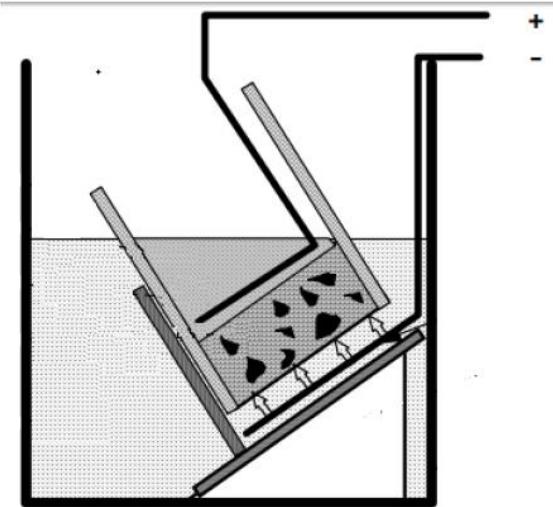


Figura 3. Configuración para del experimento para calcular el coeficiente de migración de cloruros en un estado no estacionario.

En la tabla 3 se muestran valores de coeficientes de migración de cloruros para distinguir concretos con calidades diferentes.

Tabla 3. Valores de coeficiente de migración de cloruros, para diferentes calidades de concretos.

Coeficiente de Migración (Dnssm) X 10 ⁻¹² m ² /s	Resistencia al ingreso de cloruros
> 15	Baja
10 - 15	Moderada
5 - 10	Alta
2.5 - 5	Muy alta
<2.5	Extremadamente alta

Para el caso de la permeabilidad rápida a ion cloruro (ASTM C1202), en esta prueba se determina la conductancia eléctrica del concreto. Esta puede relacionarse con la resistencia a la penetración de iones cloro, la prueba consiste en cuantificar la cantidad de corriente que pasa a través del especímen. Para esto, se usa un campo eléctrico, de un lado tenemos hidróxido de sodio (NaOH) y por el otro cloruro de

CAPITULO I

sodio (NaCl). Se aplica un voltaje de 60 V durante 6 horas y se cuantifica la carga final acumulada (coulombs). La tabla 4 muestra distinciones sobre la calidad de los concretos con este ensayo.

Tabla 4. Relación entre carga que pasa y permeabilidad del concreto.

Carga que pasa (Coulombs)	Permeabilidad al ion cloruro
>4000	Alta
4000-2000	Moderada
2000-1000	Baja
1000-100	Muy baja
<100	Despreciable

La resistividad eléctrica del concreto es un parámetro importante el cual nos permite conocer el estado de las estructuras de concreto. Donde la resistividad es la manera de medir la capacidad de una corriente eléctrica para fluir dentro de un material y, por lo tanto, es un indicador de las propiedades de transferencia de masa del material. En concreto, es usada como una medida de la capacidad para resistir el ingreso de cloruros. Este ensayo puede ser usado en laboratorio como en campo para caracterizar concretos o compararlos (TC RILEM154EMC). El enfoque inicial de esta técnica fue para evaluar la corrosión del acero embebido. La corrosión depende principalmente del ingreso de cloruros y del grado de humedad, estos factores influyen en las propiedades eléctricas del concreto.

Hoy en día se puede usar para medir otras características del concreto como puede ser el comparar concretos y observar cambios en el. Dentro de las formas en la que se mide la resistividad del concreto encontramos el método de 4 puntos y el método que involucra el acero de refuerzo como un electrodo [26,27]. Estas técnicas son

CAPITULO I

confiables para estimar la calidad de un concreto, pero no evaluan el efecto de la matriz cementante en la termodinámica y cinética de corrosión del acero embebido, por lo que es necesario usar otras técnicas que nos den más información sobre dicha calidad. La tabla 5 muestra distinciones sobre la calidad de los concretos con este ensayo.

Tabla 5. Relación entre la resistividad y la probabilidad de corrosión NMX-C514.

Resistividad kΩ-cm	Probabilidad de corrosión
>100-200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo.
50-100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo.
10-50	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes sea rápido.
<10	El concreto tiene una porosidad excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero sea extremadamente rápido

Con la prueba de porosidad accesible al agua se determina la cantidad de agua que puede ingresar al sistema a través de la red de poros interconectada del concreto. El umbral estipulado para decir que un concreto pasa de tener una porosidad baja a una alta es de 10%.

CAPITULO I

Algunos autores proponen que el inicio de la corrosión es un indicador cuantitativo de la vida útil del concreto. Esta depende de la velocidad de ingreso de agentes de deterioro al concreto. Puede ser descrita por dos etapas: 1) inicio y 2) propagación de la corrosión. La primera corresponde al proceso donde los agentes de deterioro ingresan por la red de poros hasta donde se encuentra el acero provocando la despasivación. La segunda comienza posterior a la activación del inicio de la corrosión, en el caso del ingreso de los iones cloro es después de que la concentración de cloruros en la superficie del acero alcanza un umbral (cantidad de Cl⁻ necesarios para despasivar el acero).

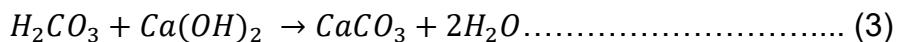
Estas etapas se han estudiado para predecir la vida útil de las estructuras existentes y diseñar estructuras más durables, así como ampliar su vida a través de estrategias efectivas de mantenimiento. Existen dos mecanismos de transporte de agentes considerados como los más importantes: la difusión y la absorción. La absorción ocurre principalmente en las capas superficiales del concreto cuando este se somete a ciclos de humectación y secado, lo que afecta la superficie expuesta entre 10 y 20 mm, después de esta zona el mecanismo que domina es el de difusión [28]. Estos mecanismos dependen principalmente del ambiente al que se van a exponer las estructuras de CAE.

1.3 Deterioro del Concreto con Acero de Refuerzo

La exposición a ambientes químicos provoca generalmente un daño al concreto, estos pueden ser ácidos, o iones como el sulfato. Sin embargo, una de las causas principales de deterioro en estructuras de CAE es la corrosión del acero. Siendo causada principalmente por dos factores 1) la carbonatación y 2) el ataque por iones

CAPITULO I

cloro. La primera es el resultado de la interacción del gas de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera con el hidróxido de calcio del concreto. Cuando entran en contacto, el CO_2 se disuelve en forma de ácido. Esta reacción neutraliza la solución de poro y forma carbonato de calcio, las reacciones de este fenómeno se muestran en la ecuación 2 y 3.



Donde inicialmente la solución de poro tiene un pH de entre 12 y 13, esto gracias a la presencia de álcalis. Pero cuando sucede la carbonatación, el pH en la zona circundante del acero se reduce a un valor inferior a 9, provocando una despasivación generalizada.

Para el caso del ataque por cloruros, estos pueden estar presentes en los materiales constituyentes del concreto (cemento, agua, agregados, aditivos y/o adiciones) o bien en el ambiente de exposición (principalmente ambiente marino). La velocidad de ingreso de los cloruros puede determinarse con la segunda ley de Fick. Aunque, en la sección expuesta el ambiente el mecanismo inicial es de absorción y después de varios centímetros es de difusión. Dentro de concreto se hace la distinción entre cloruros ligados químicamente, libres y los totales. Los que están ligados químicamente son aquellos que se han enlazado con alguna sustancia dentro del concreto. Los cloruros libres son aquellos que continúan viajando por la red de poros y pueden despasivar la corrosión. Mientras que los totales son la sumatoria de los mencionados anteriormente [29].

CAPITULO I

Además, existen mecanismos que disminuyen la velocidad de ingreso, como son: la formación de cloroaluminatos (a mayor cantidad de C₃A más Cl⁻ se ligan) y la absorción de Cl⁻ en las paredes de los poros. Cuando estos llegan hasta donde se encuentra el acero, atacan la capa pasiva provocando una corrosión por picadura (localizada). Estos actúan inicialmente catalizadores de la corrosión, es decir no se descomponen en el proceso y permiten que el proceso de corrosión avance rápidamente.

Pero, para que esto suceda es necesario alcanzar una concentración crítica de cloruros (umbral de cloruros), algunas estimaciones indican que este valor es de 0.6% de cloruros por peso de cemento. La velocidad de ingreso de los cloruros y del CO₂ dependen principalmente de la permeabilidad del concreto y el mecanismo de transporte, además es importante tomar en cuenta que un mayor espesor incrementa el tiempo en que llegan al acero [30]. Aunque éste, es un valor importante en este deterioro, también, debemos de tomar en cuenta que es de vital importancia las características de la capa pasiva en el umbral de cloruros, el tipo de cemento usado y el potencial de reposo. En la figura 4 se presentan los factores que incrementan el daño por corrosión causado por cloruros en la etapa de iniciación y de propagación [3].

CAPITULO I

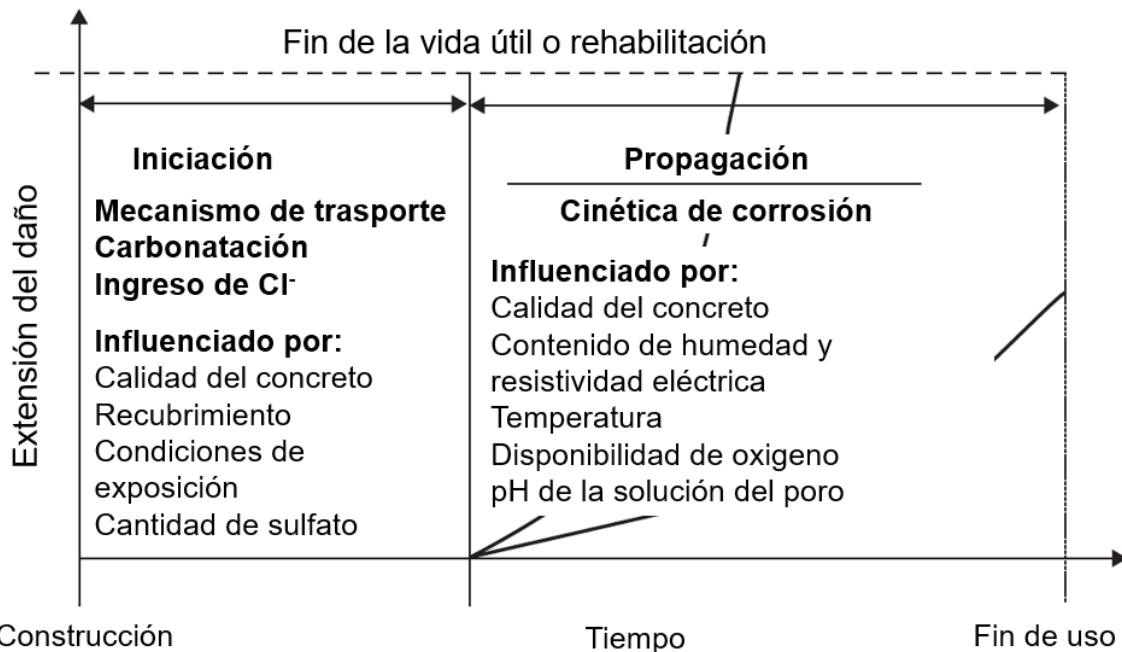


Figura 4. Factores que incrementan el daño por corrosión en el tiempo.

1.3.1 Mecanismos de Transporte

El transporte de gases (O_2 , CO_2), agua y iones (cloruros, Cl^-) en el concreto es posible a través de grietas y por la red de poros del concreto. El movimiento puede ser causado por diferentes fuerzas, como son:

- Difusión (gases y iones), el transporte es impulsado por la diferencia de concentración de cloruros. El movimiento es de la zona de mayor concentración a la de menor concentración.
- Permeación (gases y líquidos), el transporte es impulsado por la diferencia de presión hidráulica. El movimiento es de la zona de mayor presión hacia la de menor presión, si se encuentran defectos y grietas este movimiento puede ser muy rápido.

CAPITULO I

- Migración (iones), el transporte es impulsado por una diferencia de potencial eléctrico. El movimiento es de la zona de mayor potencial hacia la zona de menor potencial.
- Convección (líquidos, gases), el transporte es impulsado por la diferencia de humedad. El movimiento es de la zona de mayor humedad a la de menor humedad

Difusión y permeación son los mecanismos de transporte de agentes de deterioro más importantes. La permeación es más eficiente si el concreto se encuentra seco, mientras que el coeficiente de difusión aumenta con el contenido de humedad (mayor movimiento de iones en poros llenos de agua), mientras que disminuye para gases. En la tabla 6 se detallan los parámetros característicos de estos mecanismos. El movimiento del agua y del cloruro es preferencial hacia la zona donde el agua puede evaporarse. Por lo tanto, cuando el agua se evapora los cloruros permanecen en la zona más cercana a la superficie del concreto [3,31]. Además, es importante entender cómo se puede modificar la red de poros del concreto.

CAPITULO I

Tabla 6. Mecanismos de transporte en concreto y parámetros característicos.

Mecanismo de transporte	Fuerza Motriz	Coeficiente de transporte	Símbolo (unidad)
Succión capilar	Fuerza capilar	Coeficiente de absorción de agua y coeficiente de penetración de agua	$W_A: (g/m^2S^{0.5})$ $W_E: (m/s^{0.5})$
Difusión de iones y gases	Gradiente de concentración y diferencia de presión parcial	Coeficiente de difusión	$D: (cm^2/s)$
Migración, flujo de agua y gas	Campo eléctrico y diferencia de presión absoluta	Coeficiente de permeabilidad y de Darcy Movilidad de ion	$K_p: (m^2)$ $K_D: (m^2/s)$ $U_i: (cm^2/Vs)$ (t_b)

1.3.1 Naturaleza Porosa del Concreto

Durante los últimos años el enfoque en la investigación de materiales base cemento portland ha sido la microestructura dado que gobierna las propiedades mecánicas y de durabilidad. Está compuesta principalmente por silicatos de calcio hidratados, hidróxido de calcio, etringita y monosulfatos, además de, contar con una red de poros interconectada. Teniendo diferentes características como es el tamaño y la distribución de poro [32], por lo que se dice que el concreto es un material permeable. La permeabilidad en concreto puede definirse como la facilidad con la que medios externos como son líquidos, gases, iones y otros contaminantes pueden penetrarlo. Es considerada como una de las propiedades que más efecto tiene en

CAPITULO I

la durabilidad del concreto. A una permeabilidad baja, el movimiento de agentes es lento, y es rápido cuando es alta. Existen tres factores que influyen en la permeabilidad: 1) los relacionados a la estructura original del concreto como es, la relación a/c, los aditivos y las adiciones minerales; 2) los que afectan el desarrollo de la estructura del poro como es, las condiciones de curado, la edad y la actividad del cementante; y por último, 3) las condiciones de penetración, como es, el tiempo y composición química del medio de penetración o el mecanismo de transporte [33].

1.3.2 Técnicas Electroquímicas para Estimar el Estado de Corrosión del Acero Embebido en Concreto

Existen diferentes métodos para monitorear el acero de embebido en concreto. El método a usar dependerá del tipo de estructura, es decir, nuevas, existentes o si son estructuras en reparación; y de factores como es importancia de la estructura, causa de la corrosión, disponibilidad de instalación de equipos y los costos. A continuación, se mencionan algunos métodos;

- Resistencia a la polarización (R_p), esta puede ser medida mediante la resistencia a la polarización lineal (RPL), la espectroscopía de impedancia (EIS) y la medición del pulso galvanostático (MPG).
- Potenciales de corrosión (E_{corr}): pueden ser medidos con electrodos móviles o permanentes.
- Resistividad del concreto (ρ): usando la medición de la resistividad de 4 electrodos o con un anillo instrumentado.
- Concentración de cloruros. Se puede analizar con especímenes de concreto (corazones).

CAPITULO I

La tendencia de cualquier metal a reaccionar con un ambiente está indicada por el potencial que desarrolla en contacto con el ambiente. En las estructuras de concreto reforzado, el concreto actúa como un electrolito y el acero desarrolla un potencial en función del entorno. Este puede variar en función del tipo de adiciones minerales con el que el concreto fue elaborado. El principio de esta técnica es la medición del potencial de corrosión de la barra de refuerzo con respecto a un electrodo de referencia estándar. Según la ASTM C876, éste puede ser el electrodo de calomel saturado (ECS), el electrodo de cobre/sulfato de cobre (CSE), el electrodo de plata/cloruro de plata, etc. Además, las mediciones de potenciales están afectadas por distintos factores, como es la polarización por difusión limitada de oxígeno, la porosidad del concreto y la presencia de capas altamente resistivas [34]. Esta técnica es solamente termodinámica, es decir, sólo establece la probabilidad de que el proceso de corrosión esté ocurriendo, pero no indica la velocidad con la que ocurre [35]. Por lo que las mediciones de potencial de corrosión deben complementarse con otros métodos. Además, se sabe que la presencia de cloruros en la zona interfacial del acero vuelve más negativos los potenciales de corrosión [36].

La medición de R_p mediante métodos electroquímicos permite el cálculo de la velocidad de corrosión como sigue;

Donde R_p = Resistencia a la polarización ($k\Omega \cdot cm^2$)

I_{corr} = densidad de corriente de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

CAPITULO I

B = Constante del sistema (mV)

La resistencia a la polarización es la pendiente de la densidad de corriente-potencial. La constante B es la relación entre la pendiente anódica y catódica, con un valor de 26 mV para un estado activo y 52 mV para un estado pasivo. Como se describió anteriormente se puede determinar usando la RPL. En esta, se mide el potencial de equilibrio del acero ξ ($\xi = \xi_{corr} \pm 5\text{mV}$ y $\pm 10\text{ mV}$) y se aplica un voltaje para polarizarlo. Después de algunos minutos se mide la corriente resultante. La resistencia de polarización efectiva R_{peff} debe ser compensada por la resistencia óhmica del concreto. Esta puede ser determinada por un ensayo de impedancia, la figura 6 muestra el esquema básico para la ejecución de esta técnica. Para aplicar la técnica de EIS, la configuración de medición es similar a la de LPR. Se aplica una señal de voltaje en corriente alterna (CA) en un rango de frecuencia de varios mHz a aproximadamente 100 kHz y se mide la corriente resultante. Al analizar el espectro de impedancia, se puede determinar la resistencia óhmica del concreto o la resistencia a la polarización. Una desventaja de este método es el tiempo que tarda para realizar una medición, por lo que su uso en estructuras reales es bajo.

CAPITULO I

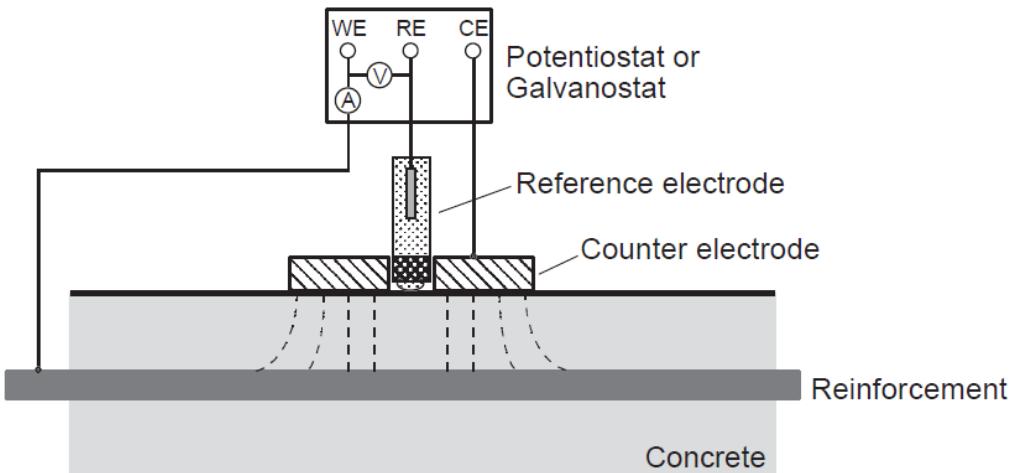


Figura 5. Configuración esquemática para medidas electroquímicas en estructuras de concreto reforzado.

La resistividad del concreto es un parámetro importante, con el que podemos estimar el estado del acero de refuerzo. Se puede medir de diferentes maneras, ya sea por corriente directa (CD) o corriente alterna (CA). Sin embargo, con las mediciones de voltaje de CD se deben considerar los efectos de polarización en los electrodos, lo que puede crear incertidumbre en los resultados. Mediante el uso de voltaje de CA, los potenciales de polarización en los electrodos desaparecen. La impedancia y el desplazamiento de fase resultante dependen de la frecuencia del voltaje aplicado. La medición de los espectros de impedancia se utiliza para caracterizar el comportamiento dieléctrico de los materiales base cemento. Idealmente, las mediciones de resistividad del concreto deben realizarse con frecuencias dentro del rango de 10 a 100 kHz. Además, también se pueden hacer mediciones de resistividad el método de 4 electrodos de acuerdo a Wenner. Para esto se aplica una CA en los electrodos del extremo, mientras que los internos miden la caída del voltaje conduciendo a la resistencia eléctrica. La ventaja de este método es la eliminación de posibles procesos en los electrodos y la resistividad del

CAPITULO I

concreto se puede determinar desde la superficie. La información sobre la resistividad del concreto en diferentes profundidades se logra mediante la variación en la separación de los electrodos. Las dificultades frecuentes con este método son el contacto de los electrodos en el concreto con esponjas húmedas, las capas de alta impedancia y una distribución de humedad no homogénea en el concreto [3].

1.5 Métodos de Protección Contra la Corrosión del Acero de Refuerzo

1.5.1 Inhibidores de Corrosión

La prevención de la corrosión se puede lograr desde la etapa de diseño, es decir proponiendo un concreto de buena calidad con un recubrimiento adecuado, adoptando métodos de prevención adicionales cuando las condiciones ambientales de la estructura son severas y se requieren una vida útil muy larga [37]. Los problemas de corrosión como los citados ha puesto en juego una multitud de métodos que han sido y son objeto de estudio y evaluación. Algunos dirigen su acción protectora hacia el acero, tratando de conferirle una pasividad que lo inmunice frente a los agentes y medios corrosivos. Otros tratan de actuar sobre el concreto o dentro de él, dotándole de cualidades que lo hagan impermeable o resistente a la penetración y el ataque de los agentes que propician el deterioro. [38]. Dentro de los métodos más eficientes para incrementar el tiempo de inicio de la corrosión del acero embebido podemos encontrar aquellos que actúan en el acero como es la protección catódica y el uso de barras resistentes a corrosión y los que actúan en el concreto como son las pinturas, recubrimientos y los aditivos inhibidores de corrosión [39].

CAPITULO I

Los inhibidores de corrosión son sustancias que, cuando se añaden a un medio, disminuyen o ralentizan la velocidad de ataque al metal. Pueden dividirse en tres tipos: anódicos, catódicos y mixtos; dependiendo, si interfieren con la reacción de corrosión preferentemente en los sitios anódicos o catódicos o si ambos están involucrados. Estos pueden incluir materiales que mitiguen la corrosión del refuerzo mediante uno de los siguientes mecanismos: (a) formación de capas de barrera; (b) oxidación por pasivación de la superficie; y (c) influir en el medio ambiente en contacto con el metal. Para ser un inhibidor eficaz de la corrosión, se debe cumplir los siguientes requisitos:

1. Las moléculas deben poseer fuertes propiedades aceptoras o donantes de electrones o ambas.
2. La solubilidad debe ser tal que se produzca una saturación rápida de la superficie sin ser lixiviada fácilmente.
3. Inducir la polarización de los respectivos electrodos a valores de corriente relativamente bajos.
4. Ser compatible con el sistema previsto de modo que no se produzcan efectos secundarios adversos.
5. Ser efectivo al pH y a la temperatura del ambiente en el cual va a ser utilizado [40].

La mayoría de los aditivos inhibidores comerciales son mezclas de composiciones desconocidas que podrían modificarse sin previo aviso, haciendo que incluso los experimentos de laboratorio sean difíciles [41]. Además, son materiales que pueden usarse en el concreto durante su fabricación o una vez que este ya endureció.

CAPITULO I

Aunque también podemos encontrar otros métodos de protección que no interactúan con el acero de refuerzo como son los tratamientos superficiales.

1.5.2 Tratamientos Superficiales en Concreto

Los recubrimientos en la superficie de concreto son uno de los métodos más utilizados para el control de la corrosión del acero [42]. Es posible distinguir cuatro clases principales de tratamientos superficiales para concreto: revestimientos orgánicos que forman una película continua, tratamientos hidrófobos que recubren la superficie de los poros, tratamientos que llenan los poros capilares y las capas cementosas. Tienen dos efectos en el concreto que son reducir la permeabilidad a agentes de deterioro y disminuir el contenido de agua en el concreto, disminuyendo la conductividad eléctrica y la velocidad en que se da la corrosión. Los recubrimientos orgánicos comúnmente se usan para bloquear la penetración de dióxido de carbono o de iones cloruro, formando una película polimérica continua sobre una superficie del concreto de espesor de 0.1 a 1 mm. Estos se basan en diversos tipos de polímeros (por ejemplo, acrilato, poliuretano y epóxicos), pigmentos y aditivos y su eficacia está relacionada con el contenido de poros o defectos. Los revestimientos cementosos forman una capa de baja permeabilidad y espesor de unos pocos milímetros, típicamente inferior a 10 mm. [43]. Los diferentes métodos existentes demuestran un incremento en el tiempo de inicio de la corrosión o lo ralentizan, esto puede ser demostrado usando diferentes técnicas y determinado ciertos parámetros de medición.

En el caso del presente trabajo se denominará métodos convencionales a aquellos productos que son usados frecuentemente en la industria de la construcción y

CAPITULO I

métodos emergentes a aquellos que se encuentran en etapa de desarrollo. Con el fin de distinguir entre lo que ya se ha estudiado con lo que aún se encuentran en desarrollo.

CAPÍTULO II:

Antecedentes

CAPÍTULO II

2.1 Uso de tratamientos superficiales en concreto endurecido

Actualmente, el desarrollo en la infraestructura a nivel mundial es construida en su mayoría con CAE. Pero, así como el número de estructuras crece, también lo hace la preocupación por su durabilidad, principalmente la asociada con la corrosión del acero embebido. Dentro de los métodos más efectivos para mitigar este problema, encontramos a los tratamientos superficiales y los aditivos inhibidores de corrosión [39]. A continuación, se hace una breve descripción de diferentes trabajos relacionados con estos métodos de protección haciendo énfasis en los mecanismos de transporte de agentes de deterioro y su efecto en la termodinámica y la cinética de corrosión del acero de refuerzo.

Con el fin de evaluar la velocidad con la que los cloruros penetran el concreto cuando se usan diferentes tratamientos superficiales, Medeiros y colaboradores [44], fabricaron especímenes de concreto con una relación a/c de 0.52 y una resistencia a compresión de 32 MPa a 28 días. Los tratamientos usados fueron basados en silano/siloxanos (dispersos en agua o en solventes orgánicos), un acrílico y un recubrimiento a base de poliuretano, así como algunas mezclas de ellos. Los resultados obtenidos indicaron que, todos los tratamientos redujeron la absorción de agua capilar en un rango de 73 y 98% (mínimo y máximo, respectivamente). Además, se observó una disminución en el coeficiente de difusión de cloruros independientemente del tratamiento aplicado. Con estos resultados se puede decir que la cantidad de agua y los agentes de deterioro presentes en el sistema disminuyen, cuando son sometidos a condiciones de ensaye como las que se mencionan en la investigación.

CAPÍTULO II

En una investigación realizada por Baltazar y colaboradores [45] se evaluó la eficiencia de tratamientos superficiales base silicato para incrementar la resistencia del concreto contra el ingreso de agentes de deterioro; además de evaluar la influencia de las características de la superficie y la humedad del mismo. Para lograr esto, se elaboraron especímenes de concreto con relación agua-cemento de 0.40 y 0.70. Encontrándose, que el tratamiento penetró a una mayor profundidad en el concreto con relación a/c de 0.7 debido a su elevada porosidad. Además, independientemente de las propiedades del concreto y de la condición de la superficie los tratamientos fueron efectivos en disminuir la permeabilidad al agua. No obstante, las muestras que mostraron un mejor desempeño fueron las fabricadas con la relación a/c de 0.4, aunque esto es probablemente debido a la calidad del concreto inicial.

En una investigación realizada por Hou y colaboradores [46] se estudió la reactividad puzolánica de nano sílice y se comparó con la del humo de sílice. Estos materiales fueron usados por separado y se adicionaron durante el mezclado. Adicionalmente, la nanosílice se utilizó como tratamiento superficial en el concreto endurecido. Se encontró que los productos de reacción de la nanosílice son más compactos que las del humo de sílice; y que el uso de la nano sílice como tratamiento superficial en concreto endurecido reduce la permeabilidad. Por lo que su uso de nanosílice como tratamiento superficial sobre el concreto en estado endurecido podría ser beneficioso para la durabilidad del concreto.

En otra investigación realizada por Hou y colaboradores [47], se evaluó el efecto en las propiedades de transporte del concreto de un tratamiento aplicado durante el

CAPÍTULO II

curado usando nanosílice coloidal y su precursor, tetraetoxisilano (TEOS). Para lograr esto, se elaboraron especímenes de concreto con relaciones a/c de 0.26, 0.38, 0.6 y 1. Ellos encontraron que el uso de ambos tratamientos resultó efectivo para disminuir la absorción de agua y la transmisión de vapor en los distintos concretos propuestos. La reducción en las propiedades de transporte de los concretos tratados con nanosílice fue atribuido, principalmente, al bloqueo de poros más grandes que 0.1 μm ; mientras que el TEOS disminuye el tamaño y el volumen total de poros, cuando éstos tienen dimensiones iniciales menores a 0.1 μm .

Levi y colaboradores [48] evaluaron la protección de tres tratamientos superficiales poliméricos aplicados en concreto endurecido con diferentes propiedades. Dos fueron tratamientos comerciales (silano/siloxano), mientras que el tercero es un producto que aún está siendo estudiado (poliuretano ionomérico base macromonómero perfluorado). Para esto, se propusieron dos mezclas de concreto de alto desempeño, con relación agua-material cementante (a/mc) de 0.33; y tiempos de curado de 2 o hasta 16 meses. A una de ellas se le adicionó un 15% de humo de sílice en relación al peso del cemento utilizado. Encontrándose que, todos los tratamientos reducen la cantidad de agua que absorbe el concreto. Además, el tratamiento base siloxano permite la evaporización del agua, con resultados similares a la del concreto no tratado. También se observó que la absorción de agua y la evaporación fue menor en el concreto con más tiempo de curado. Así mismo, todos los recubrimientos redujeron la cantidad de cloruros presentes en los primeros 12mm de profundidad del espesor del concreto, siendo las muestras tratadas con siloxano las que mostraron el mejor desempeño.

CAPÍTULO II

En una investigación realizada por Zhao [49] se evaluó el desempeño de seis tratamientos superficiales de diferente naturaleza, incluyendo los recubrimientos, penetrantes y los de uso múltiple (silanos/siloxanos, acrílicos, mezcla de silicato-acrílico, resina epólica, poliuretano y silanos). Con el fin de evaluar el desempeño en superficies de concreto diferentes, se propusieron relaciones a/c de 0.68, 0.63 y 0.47. Se fabricaron especímenes para evaluar la difusión de cloruros, la capacidad de paso de carga y la absorción de agua. Se encontró que los concretos con tratamientos que incluyen resina epólica y poliuretano reducen de mejor manera la penetración de cloruros y la permeabilidad al aire en comparación con los tratamientos penetrantes. Además, el desempeño a largo plazo fue mejor en los tratamientos con silanos, bajo las condiciones de exposición de esta investigación (ciclos de humectación y secado). Sin embargo, es necesario llevar a cabo más estudios para evaluar la longevidad de los diferentes tratamientos.

Fabio Bolzoni y colaboradores [50] evaluaron la eficiencia de tres recubrimientos superficiales (recubrimientos cementantes orgánicos y poliméricos) para incrementar el tiempo de inicio de la corrosión en concretos con acero de refuerzo con relación a/c de 0.55 y 0.65. El deterioro fue acelerado utilizando ciclos de humectación (cloruro de sodio al 3.5%) y secado. El mejor desempeño en cuanto a difusión de cloruros y porosidad se encontró cuando se utilizaron los recubrimientos orgánicos. Aunque, el mejor desempeño en cuanto a incrementar el tiempo de inicio de la corrosión se encontró cuando se utilizaron los cementantes poliméricos modificados.

CAPÍTULO II

Brenna y colaboradores [43] evaluaron la eficiencia de cuatro recubrimientos comerciales para concreto, un polímero modificado con cemento y tres recubrimientos elastoméricos. Se evaluó el tiempo de inicio de la corrosión del acero inducida por cloruro mediante ciclos de humectación (solución con 5% de NaCl) y secado. Para esto se fabricaron especímenes de concreto con relaciones a/c de 0.55 y 0.65. Encontrándose que el revestimiento a base de cemento retarda la penetración de cloruros en el concreto, probablemente debido a que actúa como una barrera física adicional. Además, las técnicas electroquímicas mostraron que, el uso de recubrimientos resulta benéfico no solo por el incremento en el tiempo de inicio de la corrosión, si no, que la velocidad de corrosión es inferior una vez despasivado el acero. No obstante, después del inicio de la corrosión, la velocidad de corrosión es inferior en presencia de los revestimientos, debido a su capacidad para reducir la entrada de agua en el concreto.

Sadati y colaboradores [51] evaluaron el desempeño de cinco recubrimientos superficiales para incrementar la resistencia al ingreso de agentes de deterioro. Para esto se elaboraron especímenes de concreto con una relación a/c de 0.5 y que fueron expuestos hasta 88 meses en un suelo marino. Encontrándose que el uso de recubrimientos superficiales reduce la cantidad de cloruros presentes a diferente profundidad, independientemente de la edad de ensayo. Además, se encontró un aumento en la concentración de cloruros en las muestras tratadas con los recubrimientos. Se concluyó que el uso de éstos incrementa el tiempo de inicio de la corrosión, pero también, se sugiere que el desempeño está en función del tiempo, y conforme avanza, la eficiencia disminuye.

CAPÍTULO II

En una investigación de Li y colaboradores [52] se evaluó el desempeño de cuatro tratamientos superficiales comerciales para concreto endurecido para incrementar la resistencia al ingreso de cloruros. Para esto, se fabricaron especímenes de concreto con relación a/c de 0.6. Dos de los recubrimientos fueron orgánicos que forman una película sobre el concreto (pintura epoxi de vidrio y pintura de poliuretano), y los dos restantes son penetrantes (uno por cristalización y el otro repelente al agua base silano). Se encontró que los tratamientos que forman película presentaron una mayor resistencia a la penetración de cloruros si se compara con los penetrantes. Pero al igual que la investigación de Sadati [51] se observó que conforme pasa el tiempo la eficiencia de los recubrimientos disminuye, esto a consecuencia del tiempo de exposición a cloruros. Cuando este tipo de recubrimientos son expuestos a la humedad por tiempos prolongados, la adherencia del recubrimiento con el concreto se pierde. Mientras que el desempeño de los penetrantes sufre de una degradación menor.

Además, podemos encontrar en la literatura información sobre nuevas investigaciones que incorporan nuevos materiales para incrementar la durabilidad del concreto con acero de refuerzo. O bien, aquellos que usan los mismos materiales, pero modifican su forma, tamaño, arreglo o bien cambian en la forma de incorporarlos en el concreto.

En este sentido, en un trabajo realizado por Khaloo y colaboradores [53] se evaluó el efecto de incorporar nano-SiO₂, en diferente cantidad y con distinta superficie específica, en concretos de alto desempeño. Para ello, se elaboraron especímenes de concreto con relación a/c de 0.35 y 0.25. A los que se les realizaron pruebas

CAPÍTULO II

mecánicas, de durabilidad y microestructurales. Se obtuvo un mejor desempeño mecánico cuando se utilizaron nanopartículas más grandes en matrices cementantes de 0.25 comparado con la de 0.35. Sin embargo, las nanopartículas más finas incrementaron la resistividad eléctrica a edades tempranas comparada con las mezclas con nanopartículas más gruesas. Mientras, en los ensayos de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP) se pudo observar una estructura de poros más fina cuando se usaron nanopartículas más grandes. Por lo que el efecto de estos tipos de nanopartículas en concreto reforzado deberá de estudiarse con mayor profundidad.

En un estudio realizado por Li y colaboradores [54] se evaluó el efecto de incorporar nanopartículas de SiO_2 y TiO_2 funcionalizadas en diferentes dosificaciones en recubrimientos para concreto (poliuretano, epóxico y caucho clorado); con el objetivo de crear una superficie hidrofóbica en la superficie del concreto y reforzar la resistencia al ingreso de agua. Los tratamientos fueron aplicados en un solo tipo de concreto. Una vez aplicados los recubrimientos, se midió el ángulo de contacto y la absorción de agua. Se encontró que las dos nanopartículas incrementan el ángulo de contacto en 23.4% para nano- SiO_2 y 17.5% para nano- TiO_2 . Pero, conforme se incrementa la dosis de nanopartículas el ángulo de contacto comienza a disminuir. Asimismo, se encontró que la absorción al agua se reduce 17.8% para nano- SiO_2 y 13.2% para nano- TiO_2 . Además, se encontró que a mayor ángulo de contacto menor absorción de agua.

En un trabajo realizado por Izarra [55] se evaluó el uso de diferentes nanopartículas de $\text{SiO}_2\text{-CH}$ con tamaño de entre 90 y 600 nm (funcionalizadas) dispersas en aceite

CAPÍTULO II

(usado como desmoldante) con el objetivo de que se depositen y logren hidrofobicidad en la superficie del mortero. Las nanopartículas se sintetizaron, cambiando la relación molar entre los precursores (TEOS/MTES de 0.66 a 0.50). Se encontró un ángulo de contacto mayor a 145° con buena distribución sobre la superficie del mortero cuando se usó la relación molar de 0.6 de TEOS/MTES. Mientras que cuando la relación molar fue de 0.50 de TEOS/MTES no se obtuvo un buen desempeño. También se observó un incremento en la resistencia al ingreso de agua, mientras que la resistencia a compresión no se ve afectada por la incorporación de las nanopartículas. Por lo que la incorporación de estas nanopartículas podría ser beneficiosa para incrementar la vida útil de servicio del concreto.

2.2 Uso de aditivos inhibidores de corrosión

Además de los tratamientos superficiales, los aditivos inhibidores de la corrosión (IC) también han sido investigados. En ellos se puede distinguir entre los que se usan como un ingrediente desde la mezcla del concreto y los que se pueden usar cuando el concreto ya se encuentra endurecido (aditivos IC de migración). A continuación, se presenta una revisión bibliográfica de trabajos con diferentes aditivos inhibidores de corrosión.

En un estudio realizado por Sánchez y colaboradores [56] se evaluó el efecto de aditivos inhibidores de corrosión en ambientes simulados. Los especímenes de acero fueron sumergidos en una solución conteniendo el aditivo IC y posteriormente fueron introducidos en un medio con agentes agresivos (solución con un pH de 8 conteniendo cloruros). Se encontró que el mecanismo de inhibición está relacionado

CAPÍTULO II

con la composición del aditivo, asimismo, este depende del ambiente de exposición y la forma de aplicación. Además, en un medio con alta concentración de Cl^- , el aditivo no es suficientemente eficiente para proteger al acero de la corrosión.

Østnor y colaboradores [57] evaluaron el desempeño de diferentes aditivos inhibidores anódicos (nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)$), nitrito de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$) y nitrito de potasio (KNO_2)) en especímenes de concreto con relación a/c de 0.47. Se expusieron durante 4 años en diferentes ambientes marinos: en zona de marea marina, sobre un techo y en condiciones de 38°C y 90% de HR. Se encontró que, la adición de entre 3-4% de nitrato de calcio y nitrito de calcio es suficiente para proteger contra la corrosión al acero embebido en concreto. Es importante remarcar que, en este trabajo, no se evaluó el efecto que pudiera tener la calidad del concreto en el desempeño de los inhibidores estudiados.

En una investigación realizada por Ormellese y colaboradores [58], se evaluó el desempeño de tres inhibidores de corrosión orgánicos comerciales en la prevención de la corrosión inducida por los cloruros. Los aditivos se añadieron al concreto en la dosis sugerida por el fabricante, la relación a/c fue de 0.5. Se encontró, que todos los inhibidores tienen la capacidad de retrasar el inicio de la corrosión. Además, los inhibidores orgánicos forman compuestos complejos en los poros, por lo que la penetración de cloruros se reduce, pero la velocidad de corrosión no resultó afectada. Sin embargo, en este artículo no se propone la comparación de los aditivos en concretos con propiedades de durabilidad diferentes, siendo éste un factor importante en la cantidad y velocidad con la que los cloruros causan daño.

CAPÍTULO II

En otro estudio de Trépanier y colaboradores [59] se evaluó el desempeño de diferentes aditivos inhibidores de corrosión (nitrito de calcio, inhibidor orgánico y alanolamina). Para esto, se elaboraron especímenes de concreto con acero de relación a/c de 0.5 y 0.7. Encontrándose que, todos incrementan ligeramente el tiempo de inicio de la corrosión, pero el que tiene mayor efecto es el de nitrito de calcio. Además, la efectividad de los inhibidores fue mejor en los concretos con relación a/c de 0.5.

En otro estudio realizado por Okeniyi [60] se evaluó el efecto del empleo de diferentes concentraciones de $C_{10}H_{18}N_2Na_2O_{10}$ (sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético) sobre el acero embebido en especímenes de concreto con una relación a/c de 0.49. Dos ambientes de exposición fueron utilizados: uno salino ($NaCl$) y uno ácido (H_2SO_4). Se encontró que este compuesto es más eficiente en ambientes ricos en $NaCl$ a cualquier concentración. Además, Se observó que todas las concentraciones propuestas de este inhibidor expuestas a $NaCl$ tuvieron una eficiencia superior al 99%. Mientras, que en los especímenes expuestos a H_2SO_4 a una concentración de aditivo de 0.4% la eficiencia fue de 92%.

En otra investigación realizada por Al-Sodani y colaboradores [61], el desempeño de tres aditivos inhibidores de corrosión, dos a base nitrito de calcio y el tercero base aminoalcohol fueron evaluados en tres soluciones sintéticas de poro de concreto. La primera se contaminó con cloruros, la segunda y tercera con sulfatos (500 y 2000 ppm de sulfatos, respectivamente). Se encontró que cuando se aumenta la cantidad de sulfatos, el potencial de corrosión se vuelve más negativo independientemente del aditivo usado. Todos los inhibidores de corrosión

CAPÍTULO II

disminuyen la velocidad de corrosión sin importar el medio de exposición, pero la eficiencia disminuye cuando se incrementa la cantidad de sulfatos en el medio.

En otra investigación realizada por Bolzoni y colaboradores [62] se analizó el desempeño de 9 aditivos inhibidores de corrosión: 2 aminas, 4 aminoácidos y 3 compuestos de carboxilatos. Los aditivos se evaluaron en soluciones sintéticas de poro y en especímenes de concreto (a/c de 0.6, contaminado con Cl^-). El acero en cada medio se monitoreó usando técnicas electroquímicas. En la solución de poro, se encontró que los diferentes aditivos mejoran la resistencia a la corrosión, pero el mejor desempeño lo obtuvieron los compuestos de carboxilato, seguido de los aminoácidos y el de menor desempeño fue para las aminas. Por su parte, los resultados en concreto mostraron que todos los aditivos son efectivos para retrasar el inicio de la corrosión.

En otro trabajo, Fazayel [63] estudió el efecto de diferentes inhibidores de corrosión, derivados de copolímeros de policarboxilato en una solución sintética simulando un concreto normal. La solución se contaminó con diferentes cantidades de Cl^- . Los aditivos IC se dosificaron en diferente cantidad y el acero fue evaluado mediante diferentes pruebas electroquímicas incluyendo la espectroscopía de impedancia. Se encontró que los diferentes aditivos IC protegen la superficie del acero de la corrosión. Asimismo, la cantidad óptima de aditivo inhibidor de corrosión cambia con la concentración de Cl^- presente en la solución de poro. Aunque, su efecto en concretos no se ha estudiado y se desconoce sus efectos en un ambiente más real al que podría sufrir una estructura.

CAPÍTULO II

En otro trabajo, Zheng y colaboradores [64] evaluaron el efecto de un aditivo IC de migración base aminoalcohol, como tratamiento superficial para concreto endurecido. El aditivo IC se aplicó a la edad de 28 días sobre la superficie de especímenes de concreto fabricado con relaciones a/c de 0.4, 0.5, 0.6. Se realizaron mediciones de la absorción de agua, la penetración de cloruros y el avance de la carbonatación. Se encontró que la aplicación del IC mejoró la resistencia al ingreso de agua, cloruros y CO₂ independientemente de la relación a/c. Asimismo, se observó que el desempeño del aditivo IC disminuye con el incremento de la relación a/c. Además, a diferencia de otros tratamientos superficiales, este no forma una película sobre el concreto, sino que modifica la microestructura del concreto, lo que podría limitar el efecto a los primeros milímetros de la capa superficial del concreto. Por lo que este factor podría considerarse para su uso en diferentes estructuras de concreto.

En la revisión bibliográfica presentada, es posible distinguir trabajos donde sólo se evalúa el efecto de los diferentes compuestos (nanopartículas dispersas en soluciones diferentes) en los tratamientos superficiales del concreto en la permeabilidad del concreto. En muchos casos se concluye que el uso de ciertas sustancias mejora la resistencia al ingreso de los agentes de deterioro. En la mayoría de los casos solo se evalúa el efecto sobre la matriz cementante, por lo que el efecto en el acero embebido no ha sido claramente definido.

En otros trabajos, sólo se evaluó el efecto de las sustancias en la termodinámica y cinética de corrosión, sin cuantificar el efecto de las condiciones iniciales de los concretos, siendo esta una propiedad importante en la velocidad de ingreso de

CAPÍTULO II

agentes de deterioro. También en estos trabajos se concluye en cuanto al mejor desempeño en función de la relación a/c. Pero en la mayoría de estos trabajos no se realizó alguna prueba de durabilidad (permeabilidad). Por lo que no se puede decir si los concretos evaluados contaron con propiedades iniciales de durabilidad diferente.

Finalmente, en los trabajos con aditivos inhibidores de corrosión, principalmente se evaluó la termodinámica y cinética de corrosión. Así también, se dio un seguimiento electroquímico hasta la despasivación del acero. En algunos trabajos se concluye en función de la relación a/c. Sin embargo, la calidad inicial del concreto no es reportada, por lo que no se conoce si esto podría repercutir cuando se solicitan concretos con una calidad diferente. Además, se sabe que la permeabilidad es una característica por la cual no solo los agentes de deterioro pueden ingresar, sino que también algunos de los métodos de prevención pueden incrementar la resistencia al ingreso de agentes de deterioro.

CAPÍTULO III:

Procedimiento

Experimental

CAPÍTULO III

3.1 Materiales

3.1.1 Cemento

Según la NMX-C-414 es un cemento portland ordinario (CPO) de clase resistente de 40 MPa a 28 días. La composición química elemental, mediante fluorescencia de rayos X (FRX) fue determinada con un equipo instrumental PANAlitycal modelo EPSILON 3-XL. Los resultados se muestran en la tabla 7, incluyendo la pérdida por ignición (PPI, NMX-C-151).

Tabla 7, Análisis químico del cemento y pérdida por ignición, en porcentaje, NMX-C-151.

Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	PPI
0.17	0.85	3.68	22.20	8.86	1.18	60.76	0.221	1.79	3.26

Se observa que el contenido de SO₃ es más alto a lo establecido en la NMX-C-414-ONNCCE-2014, siendo 4% el máximo permitido. Esto podría causar problemas de pérdida rápida de trabajabilidad en el concreto fresco. En el concreto endurecido puede formarse en exceso de etringita, que podría expandirse y originar microgrietas en el concreto [65], lo que puede acelerar el ingreso de agentes de deterioro. El exceso de SO₃ puede atribuirse al uso de combustibles ricos en sulfatos durante la producción del Clinker.

También, se determinó la densidad del cemento mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM C188. Se usó un frasco de Chetelier y Keroseno libre de agua de densidad de 0.73 g/ml a 23 ± 2°C y se obtuvo una densidad de 2.97 g/cm³. Para

CAPÍTULO III

la distribución de tamaño de partícula (DTP) del cemento, se utilizó la técnica de difracción de rayos láser, con ayuda de un analizador de partícula Tri-láser MICROTRAC modelo S3500. El tamaño promedio obtenido fue entre 10 y 20 μm .

3.1.2 Agregados

La grava con tamaño máximo del agregado (TMA) de 20mm y arena del # 4, ambos de origen calizo de la región de Nuevo León, las propiedades físicas se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Propiedades físicas de los agregados, ASTM C127, 128.

Material	Densidad SSS (g/cm ²)	Absorción (%)	PVVS (kg/m ³)
Grava	2.70	0.64	1649
Arena	2.69	0.54	---

3.1.3 Aditivos

Se utilizaron de dos clases, un superplastificante y un inhibidor de corrosión.

- Superplastificante, se usó para lograr un revestimiento de 14 ± 2 cm en cada concreto propuesto, es de la marca Eucomex y clase F según la ASTM C494. Para conocer la cantidad de agua presente el aditivo, se colocó una cantidad de 100 gramos de aditivo en un recipiente. Después se introdujo en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se dejó durante 24 horas. La diferencia de peso (50.3 % del peso del aditivo inicial) se consideró como agua de reacción en las diferentes mezclas utilizadas. Además, el peso restante se consideró como agregado fino en las diferentes mezclas. Esto, con el objetivo de obtener el mismo

CAPÍTULO III

volumen en los concretos propuestos y evitar que el agua del aditivo tenga un efecto en la relación a/c de los concretos propuestos.

- El aditivo inhibidor de la corrosión (IC) es de la marca SUNADA con nombre comercial POLYALK CP 293+, el cual ofrece una protección anódica y catódica (según datos del fabricante), la dosis recomendada es de 600 ml/m³ de concreto. A este aditivo se le realizó un ensayo de Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (EITF). Esta técnica fue usada con el objetivo de conocer el compuesto primordial presente en el aditivo inhibidor de corrosión. Para esto se utilizó un equipo Thermo Electron Nicolet 380, el intervalo de medición fue de 400 a 4000 cm⁻¹. En la figura 6, se muestra el espectro de infrarrojo (IR) del aditivo inhibidor de corrosión. Se observan bandas de absorción de mayor intensidad presentes en el intervalo característico de aminas. Las aminas están presentes en algunos de los aditivos inhibidores orgánicos multifuncionales reportados en la literatura [66].

CAPÍTULO III

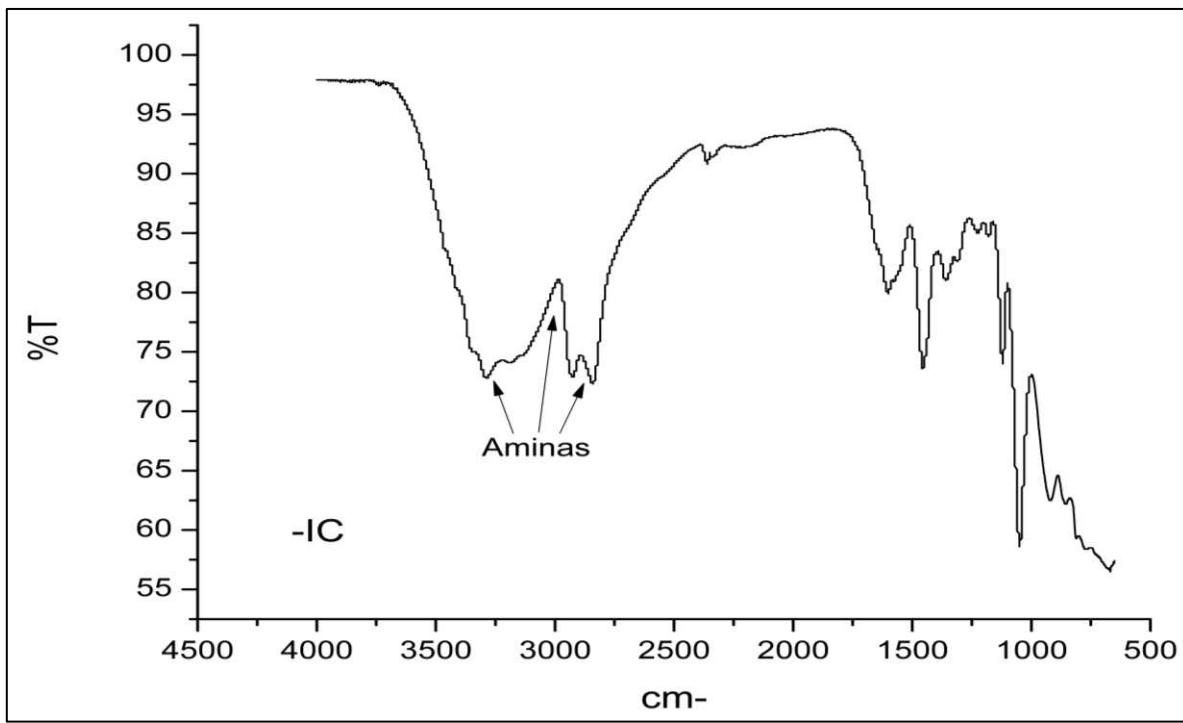


Figura 6. Espectro IR del aditivo inhibidor de corrosión.

3.1.4 Nanosílice

Como se mencionó anteriormente, en el método emergente se utilizarán nanopartículas base silicio las cuales tienen un tamaño promedio de entre 20 y 30 nm, con característica amorfía como se observa en el difractograma de la figura 7.

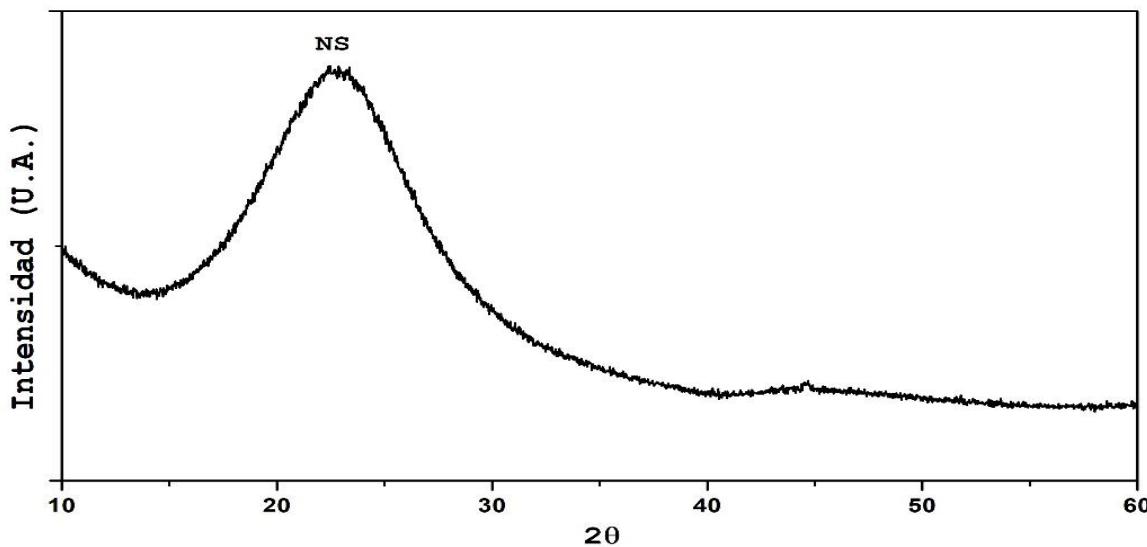


Figura 7. Difractograma de rayos X de las NS ($2\theta = 10$ a 60°)

CAPÍTULO III

Para la preparación del tratamiento, se calienta el agua (destilada) necesaria para curar el concreto a 60°C durante 30 min. Luego se pesa la cantidad de nanopartículas (0.3% con respecto al peso del agua necesaria para el curado) y posteriormente, se molieron en el mortero de Ágata, para después adicionarse al agua. La dispersión se realizó con un agitador magnético a 550 rpm durante 60 min. Hasta que finalmente se vierte la dispersión (agua+nanopartículas) en el recipiente con los especímenes.

3.1.5 Sellador para concreto endurecido

Master Protec H185: es un tratamiento superficial (TS) comercial de la marca Basf, consistente en un sellador para concreto endurecido, tiene la función de repeler el agua y reducir la permeabilidad, la forma de aplicación se describirá más adelante.

3.1.6 Impermeabilizante

IMPAC 3000 (IP): es un impermeabilizante acrílico elastómero fibratado de la marca Impac, la forma de aplicación se describirá más adelante.

Para poder comparar los diferentes resultados obtenidos en la presente investigación se elaboraron especímenes de control y para esta mezcla se utilizó la nomenclatura de MC.

3.1.6 Acero

Se utilizó varilla corrugada grado 42, el cual tiene una fluencia nominal de 4200 kg/cm², con diámetro nominal de 0.95 cm (3/8 de pulgada). Con el objetivo de controlar el área expuesta (14.96 cm²), la varilla fue sometida a una preparación, el cual se describirá más adelante.

CAPÍTULO III

3.2 Compatibilidad de los aditivos y cemento

Con el fin de evaluar el efecto de los diferentes aditivos con el cemento mencionado anteriormente. Se elaboraron pastas de cemento con 1.40 kg de cemento y 0.53 litros de agua y una relación a/c de 0.38. Las mezclas se realizaron en una mezcladora Hobart que cumple con los requerimientos de la ASTM C305.

Primeramente, se determina el punto de saturación de la pasta con el aditivo superplastificante. Para lo que se realizaron diferentes mezclas con procedimiento de mezclado como sigue:

1. Se adiciona el agua de mezcla, el cemento y se deja reposar por 30 s.
2. Los materiales se mezclan a velocidad 1 por 4 minutos.
3. Al minuto 4, se incorpora el aditivo superplastificante sin detener la mezcladora y se continúa hasta el minuto 5.
4. Al minuto 5 se detiene el mezclado y se raspa la pasta de los alrededores y del fondo de las ollas, durante 30 s.
5. Finalmente, se deja mezclar por 3 minutos más, a velocidad 2.

Una vez encontrado el punto de saturación, se procede a fabricar diferentes pastas, 1) pasta control (MC), 2) pasta con el aditivo superplastificante en dosis del punto de saturación (MC+F), 3) pasta únicamente con aditivo inhibidor de la corrosión (MC+IC) y 4) pasta con aditivo superplastificante en dosis del punto de saturación y el inhibidor de la corrosión (MC+F+IC). El aditivo IC se incorporó después del aditivo superplastificante, las propiedades medidas fueron:

1. Retención de la extensibilidad (mini cono de revenimiento).

CAPÍTULO III

2. Contenido de aire (ASTM C138), fue calculado teóricamente con respecto al peso volumétrico medido.
3. Tiempos de fraguado (ASTM C191).
4. Resistencia a compresión (ASTM C109).

Con este procedimiento se determinó la compatibilidad entre los aditivos y el cemento.

3.3 Diseño de mezclas de concreto

Con el fin de evaluar el desempeño de los diferentes métodos de prevención contra el deterioro causado por corrosión del acero de refuerzo, se seleccionaron dos matrices cementantes con diferentes relaciones a/c de 0.3 y 0.7. En la tabla 9 se muestran los proporcionamientos utilizados. El revestimiento utilizado fue de 14 ± 2 cm, este requisito es muy solicitado en los concretos en la industria de la construcción.

Tabla 9. Proporcionamiento de mezclas de concreto propuestas (kg/m³, ACI 211, PCA).

Mezcla	a/c	Cemento	Grava	Arena	Agua	Aditivo F(ml)
MC1	0.3	520	944	804	156	936
MC2	0.7	220	1094	932	154	655

El procedimiento de mezclado fue como sigue:

1. Se incorpora la grava, arena y cemento en ese orden en la revolvedora, se tapa y se mezclan por 1 minuto.

CAPÍTULO III

2. Después del minuto 1 y hasta el minuto 4 se incorpora el agua de reacción y el aditivo superplastificante, cuando fue necesario se adicionó el aditivo IC, en este orden.
3. Del minuto 4 al 6 se apaga la revolvedora y la mezcla se deja reposar.
4. Finalmente, del minuto 6 al 9 se da un último mezclado.

Cuando ya se obtiene la consistencia deseada, el material se criba por una malla de $\frac{1}{2}$ pulgada. Esto con fin de lograr un tamaño máximo aceptado, ya que se propuso un recubrimiento de 2 cm.

3.4 Fabricación de especímenes

La elaboración de los concretos se llevó a cabo en el laboratorio de Tecnología del Concreto de la UANL en un cuarto mantenido a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Las pruebas que se midieron en concreto fresco fueron:

- Temperatura, ASTM C1064.
- Revenimiento, ASTM C143.
- Masa Unitaria, ASTM C138.
- Contenido de aire, método a presión, ASTM 138.

3.4.1 Especímenes para caracterización de matrices cementantes

Con el objetivo de asegurar que las mezclas de concreto cuenten con propiedades de durabilidad diferentes, se realizaron especímenes cilíndricos de 10X20 cm de concreto de acuerdo a la normativa ASTM C31. Se evaluaron la resistencia a compresión (ASTM C39), la porosidad accesible al agua (ASTM C642), la

CAPÍTULO III

resistividad eléctrica (método de Wenner) y la permeabilidad rápida a ion cloruro (ASTM C1202).

Resistencia a compresión, es una propiedad muy importante, de esta depende en gran medida los esfuerzos que un concreto pueda resistir durante su vida útil de servicio. Por ejemplo, para una misma estructura, la cimentación requiere una mayor resistencia a compresión que un concreto no estructural. El ensayo se realizó usando una máquina universal INSTRON modelo 600 DX de 60 toneladas de capacidad, la edad de ensayo fue a los 28 días.

La porosidad accesible al agua en el concreto sirve para determinar la cantidad de agua que puede ingresar por la red de poros interconectada. Se ha propuesto un valor de 10% como distinción entre baja y alta porosidad, la edad de ensayo fue a los 28 días.

Resistividad eléctrica en concreto, es usada como una medida de la capacidad para resistir el ingreso de cloruros. Inicialmente esta técnica fue para evaluar la corrosión del acero embebido, hoy en día se puede usar para comparar y observar cambios en él. Dentro de las formas en la que se mide la resistividad del concreto encontramos el método de 4 puntos (Wenner) [26,27]. La tabla 10 muestra distinciones sobre la calidad de los concretos con este ensayo, la edad de ensayo fue a los 28 días.

CAPÍTULO III

Tabla 10. Relación entre la resistividad y la probabilidad de corrosión, NMX-C514.

Resistividad kΩ·cm	Probabilidad de corrosión
> 100-200	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo.
50-100	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo.
10-50	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo que el transporte de agentes sea rápido.
< 10	El concreto tiene una porosidad excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero sea extremadamente rápido

La **permeabilidad rápida al ion cloruro** determina la conductancia eléctrica del concreto y puede relacionarse con la resistencia a la penetración de iones cloro. La prueba consiste en cuantificar la cantidad de corriente que pasa a través del especimen. Para esto se usa un campo eléctrico, de un lado se tiene hidróxido de sodio (NaOH) y por el otro cloruro de sodio (NaCl). Se aplica un voltaje de 60 V durante 6 horas y se cuantifica la carga final acumulada expresada en coulombs (C). La tabla 11 muestra las distinciones sobre la calidad de los concretos con este ensayo, la edad de ensayo fue a los 28 días.

CAPÍTULO III

Tabla 11. Relación entre carga que pasa y permeabilidad del concreto. ASTM 1202.

Carga que pasa (Coulombs)	Permeabilidad al ion cloruro
> 4000	Alta
4000-2000	Moderada
2000-1000	Baja
1000-100	Muy baja
< 100	Despreciable

3.4.2 Especímenes para inducción de deterioro acelerado por ciclos de humectación y secado

Para lograr el objetivo de esta investigación, se elaboraron especímenes con una configuración como la que se muestra en la figura 8. La barra de acero se preparó de acuerdo a la ASTM G1, delimitando un área de trabajo de 14.96 cm² en la sección media de la barra de acero. Cada método de prevención se aplicó por separado en especímenes con una configuración igual a la mostrada.

CAPÍTULO III

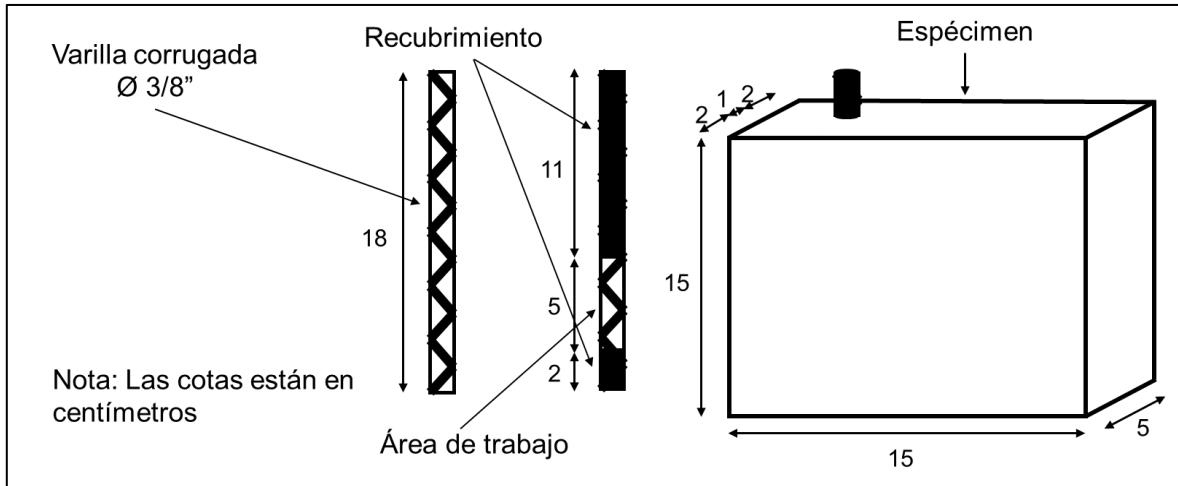


Figura 8. Configuración de espécimen para evaluación del desempeño de los métodos de prevención.

La preparación del acero fue como sigue:

- Se cortaron barras de acero con una longitud de 18 cm, se realizó una muesca para fijar un alambre de cobre.
- Se delimitó el área de trabajo (5 cm de longitud), colocándose una cinta con el objetivo de no pintar dicha zona.
- Se aplicaron dos capas de un revestimiento epóxico.
- Se retiró la cinta sobre el área de trabajo.
- Se verificó que existiera una continuidad entre el cable de cobre y la barra de acero.
- Finalmente, se colocó cinta de aislar sobre el recubrimiento epóxico.

Para el caso del aditivo inhibidor de la corrosión (IC), se adicionó durante la fabricación del concreto, después de la incorporación del aditivo superplastificante en la dosis recomendada por el fabricante. Los especímenes se curaron de manera estándar hasta la edad de exposición (35 días después de la fabricación).

CAPÍTULO III

Para la aplicación de Master Protec H185 (TS), los especímenes se curaron de manera estándar durante 28 días. Después de este tiempo, se retiraron del cuarto de curado y se pasaron al laboratorio en donde se aplicó el tratamiento de abajo hacia arriba con la ayuda de una brocha hasta que se obtuvo un escurrimiento del producto. Después de aplicar el tratamiento, los especímenes se dejaron en condiciones estándar de laboratorio hasta el inicio de la exposición (35 días después de la fabricación).

Para el caso del impermeabilizante (IP), los especímenes se curaron durante 28 días de manera estándar, después se aplicó una capa de IMPAC sello, sin diluir con una brocha sobre la superficie. Se dejó secar durante 3 horas en condiciones estándar de laboratorio, después se aplicó una capa de IMPAC 3000 con una brocha y se dejó secar por 8 horas. Posteriormente, se aplicó una segunda capa y se dejó secar en condiciones estándar de laboratorio hasta el tiempo de inicio de la exposición (35 días después de la fabricación).

Para el caso del tratamiento con nanopartículas de sílice (NS) dispersas en el agua de curado. Primeramente, se curaron de manera estándar durante 7 días. Esto se debe a que el tiempo mínimo normal en que una cimbra puede retirarse de un elemento recién colado es de 7 días. Después, los especímenes se colocaron en un recipiente de plástico y se vertió el tratamiento. Estos permanecieron sumergidos en el tratamiento durante 3 días. Posteriormente, se curaron de manera estándar hasta alcanzar una edad de 35 días (inicio de la exposición).

CAPÍTULO III

3.5 Pruebas para evaluación de efecto de los métodos de prevención en la matriz cementante

3.5.1 Ángulo de contacto

El tratamiento superficial TS, es un método de prevención, el cual según la ficha técnica modifica la superficie del concreto, haciéndolo hidrofóbico. Por lo que, para evaluar la eficiencia de dicho tratamiento se midió el ángulo de contacto de una gota de agua sobre la superficie del concreto 24 h después de la aplicación del tratamiento. Además, se evaluó el efecto que tuvo el medio de exposición en el ángulo de contacto, por lo que después de cada ciclo durante la exposición al medio agresivo el ángulo de contacto fue medido. Esto con el objetivo de observar el momento en el que la hidrofobicidad se pierde. La forma de evaluar el ángulo fue como sigue:

- El espécimen de concreto se coloca sobre una superficie horizontal.
- Con una pipeta de 1 ml se colocan 3 gotas distribuidas sobre el borde del espécimen
- Se coloca una cámara frente al espécimen a una distancia de 10 cm y se toman fotografías a las diferentes gotas sobre la superficie del concreto.
- Las fotografías fueron procesadas con el software Imagen J donde se determinó el ángulo de contacto de la gota con respecto a la horizontal.

Además, se evaluó el ángulo de contacto de una gota de agua sobre la superficie de los diferentes especímenes (con los métodos de prevención aplicados y expuestos). Esto con el objetivo de evaluar la influencia de los métodos sobre la superficie del concreto a largo plazo. El ensayo se realizó bajo las condiciones

CAPÍTULO III

descritas en la norma ASTM D5725. Cada una de las muestras se colocó en el portamuestra del equipo Drop Shape Analyser de la marca KRÜSS modelo DSA25 a 23°C. Seguidamente, se colocó una gota de agua inyectable (2 μ l) e inmediatamente se tomó una imagen. Después, se analizó con la ayuda del software ADVANCE versión 1.9.2.3 y se determinó el ángulo de contacto entre el líquido y la superficie (véase figura 9).

Se utilizaron estas dos formas de medir el ángulo de contacto, debió a que al inicio de la experimentación no se contaba con el equipo KRÜSS.

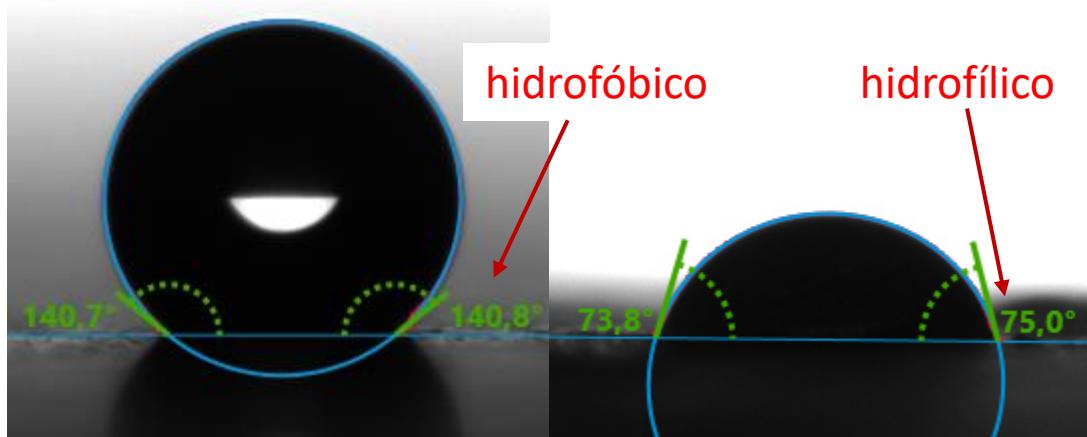


Figura 9. Ejemplo de ángulo de contacto de agua obtenido.

3.5.2 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

Esta técnica se usó para conocer la interacción entre diferentes fases dentro de los matrices cementantes y a diferentes edades. En esta investigación se quiso observar el efecto del aditivo inhibidor de corrosión dentro de la matriz cementante. Por lo que se observó la morfología de la matriz cementante antes y después de la exposición al ambiente de deterioro y se comparó con una muestra de concreto de la MC. La preparación de las muestras fue como sigue:

CAPÍTULO III

- Los especímenes se secaron en un horno durante 4 días a 40°C (temperatura durante los ciclos de secado).
- Se redujo la muestra con la ayuda de un cincel y martillo hasta que se obtuvieran dimensiones de 1x1x1 cm aproximadamente.
- Las muestras fueron recubiertas con oro paladio en una cámara de vacío DENTON VACUUM modelo DESK V hasta alcanzar un vacío de 0.05 torr.
- Las muestras se colocaron dentro de un equipo JOEL modelo JSM-6510LV (MEB) y se observó la morfología a diferentes magnificaciones.

Además, en algunas magnificaciones se realizó un análisis semicuantitativo y de distribución de elementos sobre la superficie, con la ayuda del detector de energía dispersiva (EDS).

3.5.3 Florescencia de Rayos X (FRX)

Con esta técnica se determinó la composición química elemental del cemento usado en este trabajo. Asimismo, se determinó la cantidad de cloruros presentes en diferentes muestras de concreto. Se utilizó un equipo PANalytical 3-Epsilon. La preparación de las muestras fue la siguiente:

- Para el caso de las muestras de concreto, los especímenes se secaron en un horno durante 4 días a 40°C (temperatura de secado durante los ciclos de secado).
- Se cortó cada sección de concreto (aproximadamente 5 mm de espesor).
- Cada sección se trituró con un molino de discos (Herzog) durante 2 minutos.
- Se pesaron 10g del polvo a analizar y 1g de cera CEREOX de la marca FLUXANA, los materiales se colocaron en un recipiente y se homogenizaron.

CAPÍTULO III

- Se coloca en una prensa Atlas, donde se aplicó una carga de 10 ton, hasta obtener la pastilla con las dimensiones requeridas.
- Finalmente, las pastillas se colocaron en el equipo de FRX y se determinó la composición química elemental.

3.5.4 Difracción de Rayos X (DRX)

Esta técnica se utilizó para determinar la composición de fase y la estructura cristalina de la Nano Sílice. El equipo utilizado fue el X PERT Pro MRD con radiación CuK α en el intervalo de $2\theta = 10$ a 60° .

3.6 Ambiente de Exposición

En condiciones naturales de exposición, el proceso de ingreso de cloruros dentro del concreto es lento. Por lo que se propuso acelerar el ingreso mediante ciclos de humectación y secado [7]. El tiempo de inicio de exposición para todos los especímenes fue a los 35 días después de la fabricación. La exposición constó de ciclos de 4 días de secado en una cámara ambiental a $40 \pm 5^\circ\text{C}$ y humedad relativa (HR) de $60 \pm 10\%$ y 3 días de humectación a 23°C en una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 5 % (véase figura 10).

CAPÍTULO III

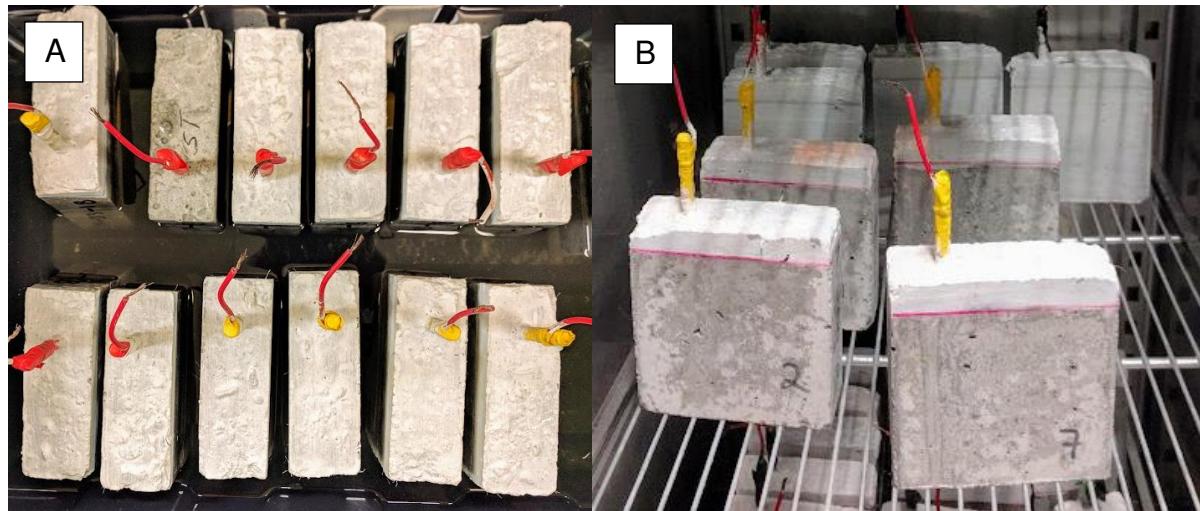


Figura 10. Especímenes en el ambiente de exposición, A humectación y B secado.

3.7 Pruebas electroquímicas

Con el objetivo de evaluar el estado del acero embebido en concreto se usaron técnicas electroquímicas no destructivas. Estas consisten en la aplicación de pequeñas señales de potencial y el registro de su respuesta en corriente. O bien la aplicación de corriente y registrar su respuesta en potencial. De cualquier manera, la interface se polariza y la respuesta es característica del sistema. Además, es importante conocer la rapidez de medición y la sensibilidad. Las técnicas electroquímicas realizadas a los diferentes especímenes fueron, el potencial de media celda (E_{corr}) conforme a la ASTM C876, la resistencia a la polarización lineal (RPL) y la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIE). Los parámetros de aplicación fueron de acuerdo a lo descrito en [67] usando una configuración de tres electrodos. El electrodo de referencia fue un electrodo saturado de calomel (ESC), el electrodo auxiliar fue una placa de acero inoxidable y el electrodo de trabajo fue el acero expuesto. Las pruebas fueron realizadas durante el último día de humectación.

CAPÍTULO III

3.7.2 Potencial de corrosión

Con esta técnica se determinó el potencial mixto del acero, el cual corresponde a la reacción anódica (oxidación) y catódica (reducción). El valor obtenido, indica la probabilidad de que el acero se encuentre en estado pasivo (sin degradación) o activo (con degradación). La tabla 12 muestra algunos intervalos que han sido definidos experimentalmente y que indican la probabilidad de corrosión del acero embebido respecto a distintos electrodos [68].

Tabla 12. Condición de corrosión relacionada con las mediciones del potencial de media celda.

mV vs CSE	mV vs SCE	Condición de corrosión
> -200	> -125	Baja (10% probabilidad)
-200 a -350	-126 a -275	Riesgo Moderado
< -350	< -276	Alta (<90% probabilidad)
< -500	< -426	Corrosión Severa

3.7.1 Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)

Esta técnica se usó para encontrar las propiedades dieléctricas del concreto, principalmente, la resistividad eléctrica. Esta se define como la resistencia que opone el concreto a que un flujo de corriente eléctrica pase a través de él. Es un indicador del grado de protección contra el ingreso de agentes de deterioro que el concreto brinda al acero.

CAPÍTULO III

El equipo utilizado fue un potenciómetro galvanostato marca VoltaLab modelo PGZ 301, conectado a una computadora. Los parámetros de aplicación de la prueba fueron los establecidos en [67], se aplicó una señal de frecuencia de 10 mHz a 100 kHz. Los resultados se graficaron en el diagrama de Nyquist, donde el valor de X_{max} (en el plano Z real) corresponde a la resistencia eléctrica aportada por el concreto (véase figura 11), se acepta que esta resistencia se encuentra en altas frecuencias (entre 100kHz a 10 Hz).

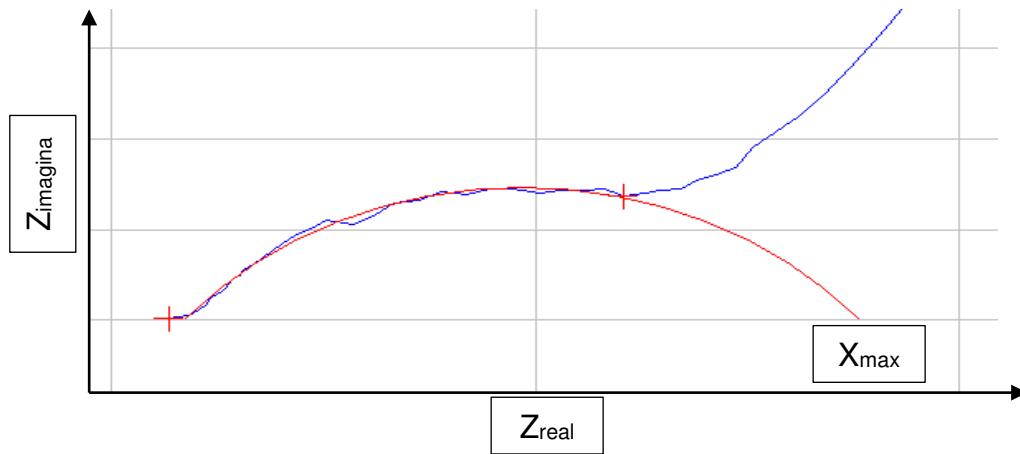


Figura 11. X_{max} obtenida a través del diagrama de Nyquist.

3.7.2 Resistencia a la polarización lineal (RPL)

Para realizar esta prueba se usó el mismo equipo que para la prueba de EIS, con la configuración de tres electrodos como se describe en [69]. Para la aplicación de la RPL, el electrodo de trabajo fue polarizado a ± 20 mV al potencial de corrosión y a una velocidad de barrido de 0.1 mV/s. Con esta técnica se pudo obtener el valor de R_p , con este valor fue posible obtener la densidad de corriente usando la ecuación 1.

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p} \dots \dots \dots (5)$$

CAPÍTULO III

Donde:

i_{corr} = densidad de corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$).

B = Constante de Stern and Geary (26 mV para el estado activo, 52 mV para el estado pasivo del acero).

R_p = Resistencia a la polarización (kohms*cm²).

En la tabla 13 se muestran criterios generales desarrollados en laboratorio sobre densidad de corriente y condición del acero.

Tabla 13. Densidad de corriente de corrosión vs condición del acero [68].

Velocidad de corrosión (icor, $\mu A/cm^2$)	Condición del acero
icorr < 0.1	Pasivo
icorr 0.1 – 0.5	Corrosión Baja
icorr 0.5 – 1	Corrosión Moderada
icorr > 1	Corrosión Alta

3.8 Pruebas para determinar la influencia de los métodos en la matriz cementante y el acero

Con el objetivo de obtener más información sobre el estado real del concreto y del acero después de la exposición al ambiente de deterioro. Se realizaron pruebas destructivas a diferentes edades de ensaye.

3.8.1 Perfil de cloruros

Con el fin de evaluar como los diferentes métodos de protección influyen en el transporte de cloruros. Se determinó la cantidad de cloruros totales en el tiempo de

CAPÍTULO III

inicio de la corrosión. Para realizar esta prueba se tomó en cuenta que los potenciales de corrosión fueran menores a -275mV y que la velocidad de corrosión fuera mayor a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ [70]. Una vez alcanzado este estado, se cortaron los especímenes, seccionando 4 zonas (Z_1 , Z_2 , Z_3 y Z_4) de 5 mm aproximadamente cada una (véase figura 12). Cada una se pulverizó con la ayuda del molino de anillos (2 min de molienda) y se determinó la cantidad de cloruros presentes en cada zona mediante FRX. Además, se determinó una edad de ensaye igual para todos los tratamientos (19 ciclos de exposición), con el fin de comparar la influencia de cada uno en el transporte de cloruros.

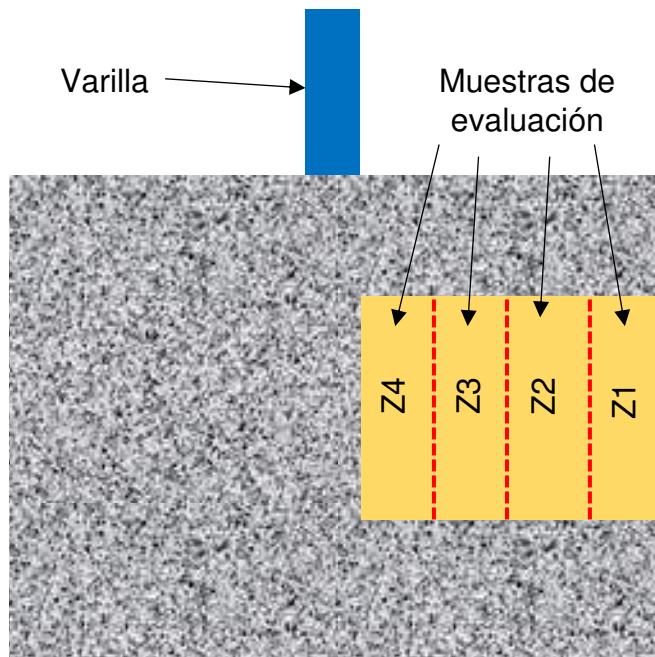


Figura 12. Esquema de obtención de muestras para la construcción de perfil de cloruros.

CAPÍTULO III

3.8.2 Pérdida de masa del acero por el método gravimétrico

Esta técnica se realizó para correlacionar los valores de velocidad de corrosión y la masa perdida del acero. El procedimiento de extracción del acero se describe a continuación:

- Los especímenes seleccionados son cortados por la mitad de las caras expuestas, sin tocar el acero embebido.
- Se retira cuidadosamente el acero y se retira el exceso de concreto sobre el metal.
- Se corta la sección de la varilla expuesta.
- Se retiran los productos de corrosión de acuerdo a la ASTM G1.
- Se remueven los óxidos con un cepillo de alambre.
- Se pesan los especímenes.

Además, se utilizó la ley de Faraday para calcular la pérdida de masa del acero y realizar una comparativa entre los diferentes métodos.

$$\frac{I*t}{F} = \frac{\Delta W}{W_m} \quad \dots \dots (6) \quad \text{O} \quad \Delta W_m = \frac{I_{corr}*A*t*W_m}{n*F} \dots \dots \dots (7)$$

Donde:

I = corriente eléctrica, A.

t = tiempo, s.

F = Constante de Faraday, 96 500 coulomb.

ΔW = pérdida de masa debido a la corrosión, g.

CAPÍTULO III

Wm = peso molecular del hierro, g/mol.

Z = valencia (electrones transferidos, 2).

CAPÍTULO IV: Análisis y Discusión de Resultados

CAPÍTULO IV

En este capítulo se muestran los resultados de compatibilidad entre aditivos y el cemento, los ensayos de durabilidad realizados a diferentes especímenes de concreto. Posteriormente los resultados de la caracterización electroquímica de los diferentes especímenes son abordados. Asimismo, se describirá la evaluación y discusión del seguimiento electroquímico y FRX, MEB, IR, ángulo de contacto, pérdida de masa de especímenes expuestos a un ambiente rico en Cl^- a diferentes edades de ensaye.

4.1 Análisis de la compatibilidad de los aditivos y el cemento

En la figura 13 se presentan los resultados de escurrimiento de pastas con diferentes dosificaciones de aditivo clase F. Es posible identificar el punto máximo de saturación de la pasta propuesta.

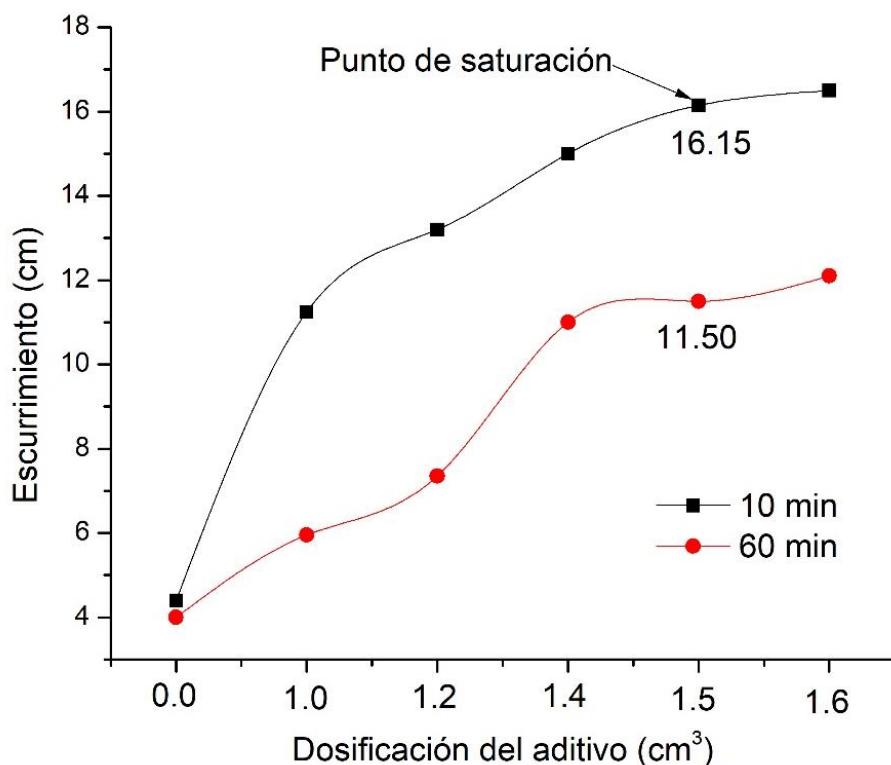


Figura 13 Escurrimiento de la pasta a diferentes dosis de aditivo.

CAPÍTULO IV

En el gráfico se observa un incremento en el escurrimiento inicial de la pasta conforme se adiciona el aditivo clase F. De la misma manera se incrementa la retención del escurrimiento a medida que la dosis de aditivo incrementa. También, se observa que en dosis de 1.5 y 1.6 cm³ no hay un gran incremento en el escurrimiento, como se observa en otras dosificaciones. Esto concuerda con algunos comportamientos reportados en la literatura [71]. Aunque el valor del escurrimiento es mayor cuando se dosifica 1.6 cm³ de aditivo, en esta pasta se observó segregación. Por lo que se determinó que el punto de saturación sería en dosis de 1.5 cm³ de aditivo. Además, los datos muestran que no se pierde trabajabilidad rápidamente con el aditivo, con lo que se puede decir que se puede usar el aditivo clase F en mezclas con este cemento. Recordando, que, en la caracterización del cemento, se encontró una cantidad de SO₃ mayor a lo permitido por la norma. Donde, uno de los problemas, sería la pérdida rápida de la trabajabilidad en estado fresco [65]. Con los resultados mostrados se puede decir que el uso de este aditivo es adecuado para el cemento propuesto, aunque aún falta observar el comportamiento cuando se utilice mezclado con otro aditivo, además de evaluar el desempeño en otras propiedades en estado fresco y endurecido.

Con la cantidad de aditivo para obtener el punto de saturación del cemento, se procedió a evaluar otras propiedades en estado fresco y endurecido de la pasta. Así como también el efecto del aditivo inhibidor de la corrosión y el comportamiento de ambos aditivos sobre la pasta, los resultados se muestran en la tabla 14.

CAPÍTULO IV

Tabla 14. Propiedades en estado fresco y endurecido de la pasta con los diferentes aditivos.

Mezcla	Resistencia a compresión (kgf/cm ² ASTM C109)	Contenido de aire (%), ASTM C138)	Escurrimiento (cm, mini cono)		Tiempos de Fraguado (h, ASTM C191)	
			10 min	60 min	Inicial	Final
MC	655	1.77	5.0	4.8	03:30	07:41
MC+F	742	1.68	15.5	12.65	05:26	09:26
MC+IC	646	1.83	4.1	4.0	03:28	08:33
MC+F+IC	762	1.81	12.75	10.45	05:54	09:20

En la tabla 10 se observa un incremento del 13 % en la resistencia a la compresión de la pasta cuando se incorpora el aditivo clase F a la pasta. Este comportamiento es atribuido a que los aditivos superplastificantes base policarboxilato, se adsorben en las superficies en las partículas de cemento lo que provoca una dispersión estérica de los grupos funcionales éter, de esta manera se obtiene un incremento en la fluidez y en la resistencia a compresión [72]. Mientras que cuando se incorporó el aditivo IC a la pasta, la resistencia a compresión no se afecta con respecto a la MC. Pero, cuando ambos aditivos son incorporados la resistencia a compresión se incrementa en un 16% con respecto a la MC. Por lo que se atribuye este incremento al aditivo clase F. También, se observa que la incorporación de los aditivos a la pasta, no afecta el contenido de aire en estado fresco. Cuando se incorpora el aditivo IC no se observó un efecto adverso en el escurrimiento. En los tiempos de

CAPÍTULO IV

fraguado se observó que al incorporar aditivo clase F se incrementa el tiempo de fraguado inicial y final en aproximadamente 2 horas. Este comportamiento no se observa cuando se incorpora el aditivo IC a la pasta, pero cuando están los dos aditivos se incrementa el tiempo de fraguado inicial y final en aproximadamente 2 horas. Por lo que, se puede concluir que el uso de los diferentes aditivos en el cemento no tiene efectos adversos en las propiedades determinadas aquí.

4.2 Caracterización mecánica y de durabilidad de los concretos propuestos

4.2.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de los concretos elaborados y curados de forma estándar se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Resistencia compresión de las mezclas de concreto, 28 días.

Mezcla	a/c	Resistencia a compresión, MPa, ASTM C39
MC1	0.3	52
MC2	0.7	23

La MC1 logró una resistencia a compresión 126 % más alta que la MC2 lo cual es atribuido a una menor relación a/c y a un mayor consumo de cemento. De acuerdo a la PCA, el requisito mínimo de resistencia a la compresión recomendada para brindar protección al elemento de concreto en diferentes ambientes de exposición es de 25 MPa con una relación a/c máxima de 0.55 [11]. Con esto se indica que la

CAPÍTULO IV

MC1 ofrecerá mayor protección contra el ingreso de agentes de deterioro que la MC2.

4.2.2 Porosidad Accesible al agua

Los resultados de porosidad accesible al agua realizada a los diferentes concretos se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Porosidad accesible al agua de las mezclas de concreto, 28 días.

Mezcla	a/c	Porosidad accesible al agua, % ASTM C642	Clasificación
MC1	0.3	3.19	Baja
MC2	0.7	12.31	Alta

La MC2 obtuvo una porosidad accesible de casi 4 veces más alta que la de la MC1. Por lo que la cantidad de agua que puede ingresar a la matriz de MC1 será menor, haciendo que el ingreso de Cl^- sea más lento. Por lo tanto, el tiempo necesario para alcanzar una misma concentración crítica de Cl^- será mayor.

4.2.3 Resistividad Eléctrica

En la tabla 17 se presentan los resultados de la resistividad eléctrica realizada a los diferentes concretos.

CAPÍTULO IV

Tabla 17. Resistividad eléctrica de las mezclas de concreto, 28 días.

Mezcla	a/c	Resistividad eléctrica, kΩ-cm, método de Wenner	Clasificación según NMX C514
MC1	0.3	15.53	Rápido
MC2	0.7	9.26	Extremadamente rápido

Como se mencionó anteriormente, esta propiedad es usada para medir la resistencia al ingreso de Cl^- , además se pueden comparar diferentes concretos. Por ejemplo, Morris y colaboradores [73] han propuesto algunos parámetros que relacionan el estado del acero y la resistividad. Además, la NMX C514 propone intervalos de resistividad y la velocidad de ingreso de agentes de deterioro. Cuando la resistividad es menor a 10 kΩ-cm, se indica que el concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, lo que permite que el transporte de agentes de deterioro hacia el acero embebido sea extremadamente rápido. Mientras que cuando la resistividad se encuentra en el intervalo de 10 a 50 kΩ-cm el concreto tiene una considerada porosidad interconectada, lo que permite que el transporte de agentes de deterioro sea rápido. Para este trabajo la resistividad en MC1 fue de 15.53 kΩ-cm a 28 días por lo que el transporte de agentes de deterioro será rápido y la resistividad de MC2 fue de 9.26 kΩ-cm a 28 días por lo que el trasporte de agentes de deterioro será extremadamente rápido.

4.2.4 Permeabilidad rápida a ion cloruro

En la tabla 18 se presentan los resultados de estajes de permeabilidad rápida a ion cloruro de los diferentes concretos.

CAPÍTULO IV

Tabla 18. Permeabilidad rápida a ion cloruro de las mezclas de concreto.

Mezcla a/c	Permeabilidad rápida a ion cloruro, Coulombs, ASTM C1202	Clasificación según ASTM 1202
MC1	0.3	1797
MC2	0.7	3913

Esta prueba mide la conductancia del concreto, ésta es correlacionada con la resistencia del espécimen a la penetración de iones cloro. El valor alcanzado por MC1 está clasificado por ASTM C1202 como permeabilidad baja. Mientras que el valor obtenido por la MC2 es clasificado como permeabilidad moderada, aunque el umbral entre moderado y alta es de 4000 Coulombs. Por lo que también se podrá considerar como una permeabilidad moderada-alta.

Como era de esperarse, cuando la relación a/c fue menor, la resistencia a la compresión incrementó, asimismo la permeabilidad al agua y iones cloro disminuyó, mientras que la resistividad eléctrica aumentó. Además, dentro de las clasificaciones sugeridas en cada prueba, los concretos propuestos fueron clasificados como de calidades diferentes. Por lo que, se puede concluir que la MC1 ofrece una mayor resistencia al ingreso de agentes de deterioro.

4.3 Seguimiento electroquímico

El acero en los diferentes sistemas propuestos en este trabajo se caracterizó electroquímicamente con el objetivo de determinar un conjunto de parámetros que permitan estimar el estado del acero embebido frente al mecanismo de deterioro

CAPÍTULO IV

provocado por cloruros. Con los datos obtenidos, se determinó el momento en el que el acero pasó de estar en un estado pasivo a un estado activo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas electroquímicas realizadas a los diferentes especímenes.

4.3.1 Matriz cementante con relación a/c de 0.7

La figura 14 muestra el seguimiento a través del tiempo de Ecorr y icorr del acero embebido en concreto y los diferentes métodos de prevención.

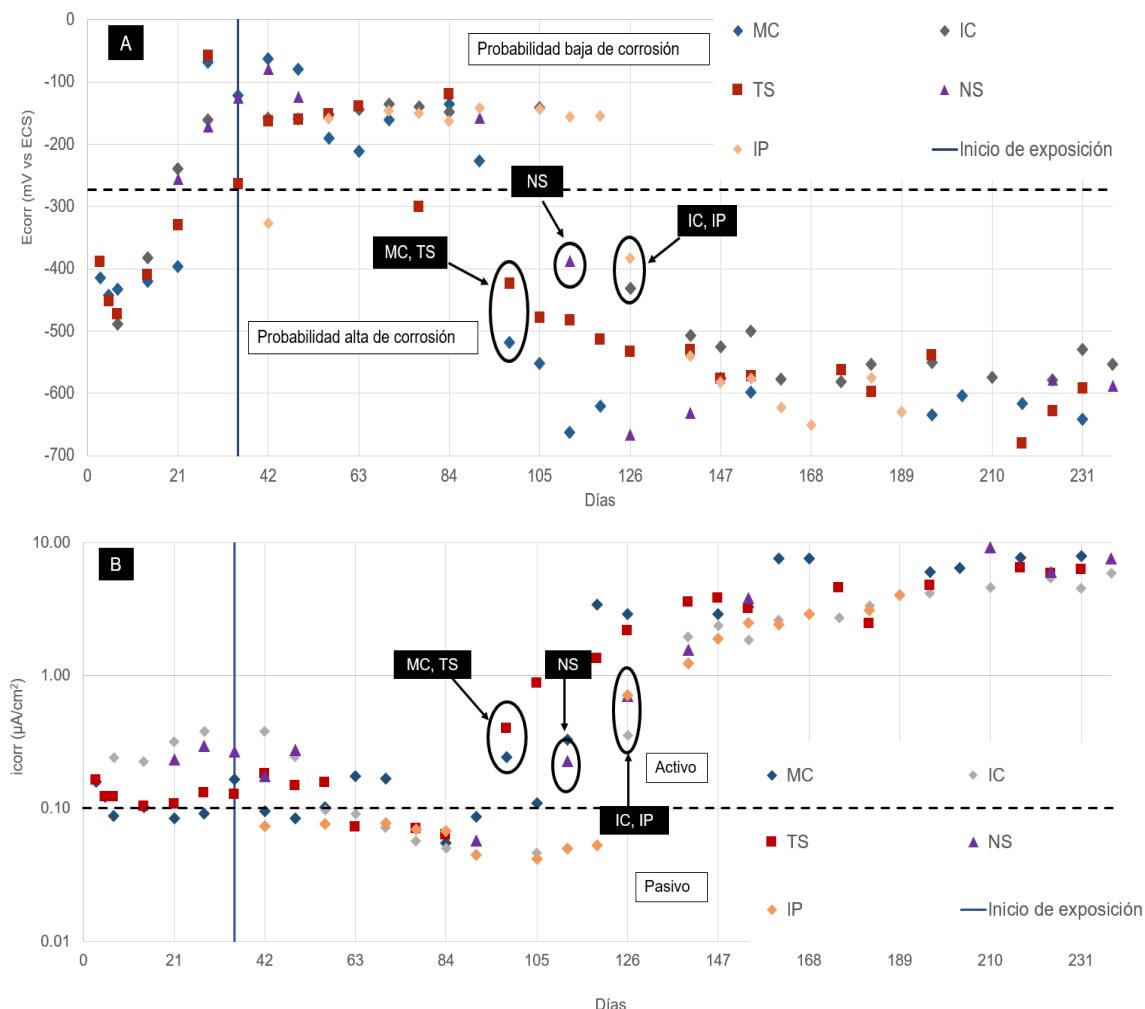


Figura 14. A) potenciales de corrosión y B) Velocidad de corrosión durante la experimentación, a/c= 0.7.

CAPÍTULO IV

En la figura 14 se observa que, en todos los casos, los Ecorr iniciaron en valores de aproximadamente -400 mV (activo), durante los primeros días este valor se hace más negativo. Pero conforme pasa el tiempo, se vuelven más positivos y a la edad de entre 21 y 28 días los Ecorr pasan de estar en un estado activo a uno pasivo. Entre la edad de 42 y 49 días los Ecorr se estabilizaron entre -100 y -200 mV. En el caso de la icorr, todas las velocidades comienzan en valores mayores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (activo). Conforme pasa el tiempo los valores de icorr pasan de estar en un estado activo a uno pasivo. Lo cual es un comportamiento normal, ya que puede ser atribuido a la formación de la capa pasiva sobre el acero [30].

A los 63 días de exposición en ciclos de humectación y secado, los especímenes de las mezclas de MC y TS mostraron valores de Ecorr más negativos que -275 mV y Icorr mayores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando que los especímenes se pasaron de estar en un estado pasivo a uno activo. Aunque el tratamiento TS no incrementó el tiempo de inicio de la corrosión, tampoco se observó un efecto adverso en el tiempo de inicio de la corrosión. Por su parte, los especímenes con los tratamientos IC, IP se activaron después de 91 días de exposición al ambiente de deterioro. Por lo que el tiempo de inicio de la corrosión se incrementó un 44% con respecto a la MC. Los especímenes con el tratamiento de NS se activaron después de 77 días de exposición al ambiente de deterioro. Lo que incrementó un 22% el tiempo de inicio de la corrosión con respecto a MC.

En la figura 14 también se observa que la icorr obtenida después de la activación del acero en los especímenes con IC es inferior a la obtenida con cualquiera de los otros tratamientos. Lo cual se puede atribuir a la protección catódica que brinda el

CAPÍTULO IV

aditivo IC al acero de refuerzo. Ya que se ha demostrado que cuando se han utilizado aditivos IC orgánicos catódicos dentro de una matriz cementante, la velocidad de corrosión después de la activación es menor que la de las mezcla control [41]. Siendo un factor importante en el uso de este aditivo, ya que según la ficha técnica ofrece protección anódica y catódica. Y en algunos casos, cuando se utilizan aditivos IC anódicos (nitritos de calcio principalmente) las icorr se incrementan en los especímenes que contiene dichos aditivos [74]. Lo que se puede atribuir a una dosificación incorrecta del aditivo o al incremento en umbral de cloruros. También se observó, que la icorr después de la despasivación en los especímenes con TS, NS y IP no tiene un efecto adverso, es decir los valores presentados son similares a la de la mezcla control.

En la figura 15 se muestra el seguimiento de la resistividad eléctrica (método de Wenner) de los especímenes de concreto con los diferentes tratamientos. La línea punteada en color negro corresponde al umbral entre diferentes calidades de concreto.

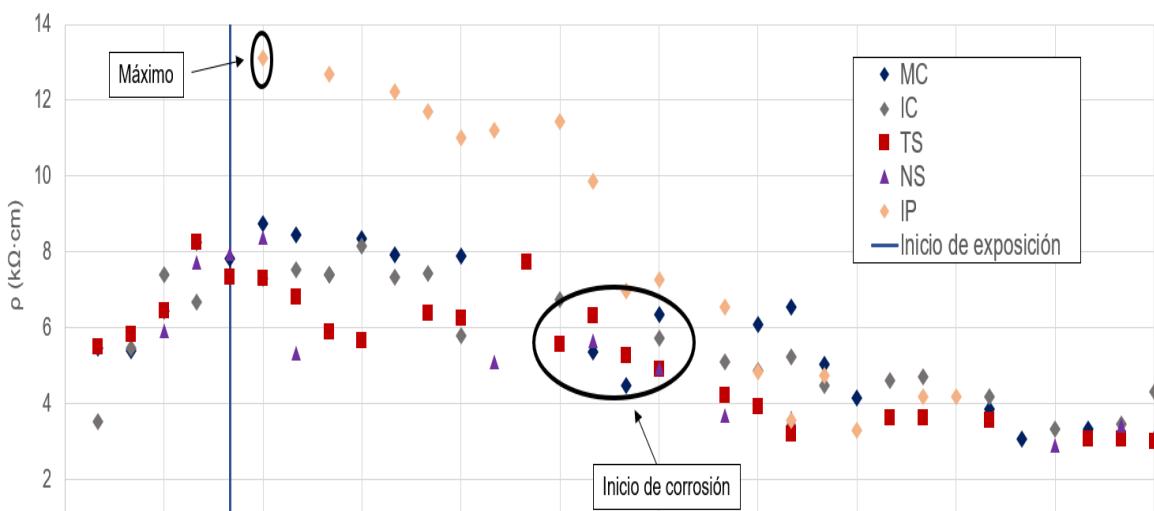


Figura 15. Resistividad eléctrica del concreto con los diferentes tratamientos, a/c=0.7.

CAPÍTULO IV

En la figura 15 se observa que la resistividad eléctrica máxima alcanzada fue de 13.1 kΩ-cm a los 42 días por el IP. Esto equivale a un incremento del 54% con respecto a MC, ya que esta alcanzó un máximo de 8.5 kΩ-cm. Lo que puede atribuir a una reducción en la cantidad de agua dentro de la matriz cementante [50]. Además, según la clasificación propuesta por la NMX C514 pasó de ser un concreto que permite el ingreso de agentes de deterioro extremadamente rápido a rápido. Por lo que el transporte de agentes de deterioro será más lento, incluyendo los cloruros. Inicialmente el IP presenta un obstáculo físico al ingreso de los agentes, pero, conforme pasa el tiempo la solución de NaCl se acumula dentro de la matriz cementante. Esto provoca que la resistividad eléctrica disminuya. Se sabe que uno de los factores más importantes en esta medición es el grado de humedad dentro de la matriz cementante [75,76]. Lo que explicaría el incremento en el tiempo de inicio de la corrosión de los especímenes tratados con IP.

Mientras que IC, TS y NS no incrementaron de manera significativa la resistividad eléctrica del concreto con respecto a la MC. En el caso de los tratamientos con NS Y TS se puede atribuir, a una baja reacción o interacción de los tratamientos con la matriz cementante. Ya que se ha reportado que cuando existe una reacción rápida de los tratamientos penetrantes, la resistividad del concreto incrementa [6]. En diferentes estudios en especímenes con IC no se ha reportado que tengan un efecto sobre esta propiedad, ya que su mecanismo de acción es diferente al de los tratamientos superficiales. Además, conforme los especímenes se someten a ciclos de humectación y secado, la resistividad eléctrica disminuye. Como se mencionó anteriormente, se atribuye a una mayor saturación dentro de la matriz cementante.

CAPÍTULO IV

También se encontró que cuando los valores de resistividad están entre 5 y 7 k Ω -cm el acero embebido en acero se activa independientemente del tratamiento utilizado. Esto concuerda con estudios, donde se propone el uso de esta técnica para determinar el estado del acero [75,77]. Aunque, es muy probable que este valor obtenido en este trabajo solo sirva para evaluar concretos con propiedades iniciales de durabilidad similares a las presentadas en este trabajo.

La figura 16 muestra los perfiles de cloruros presentes en el tiempo de inicio de la corrosión. Los valores están en porcentaje por peso de cemento (PPC).

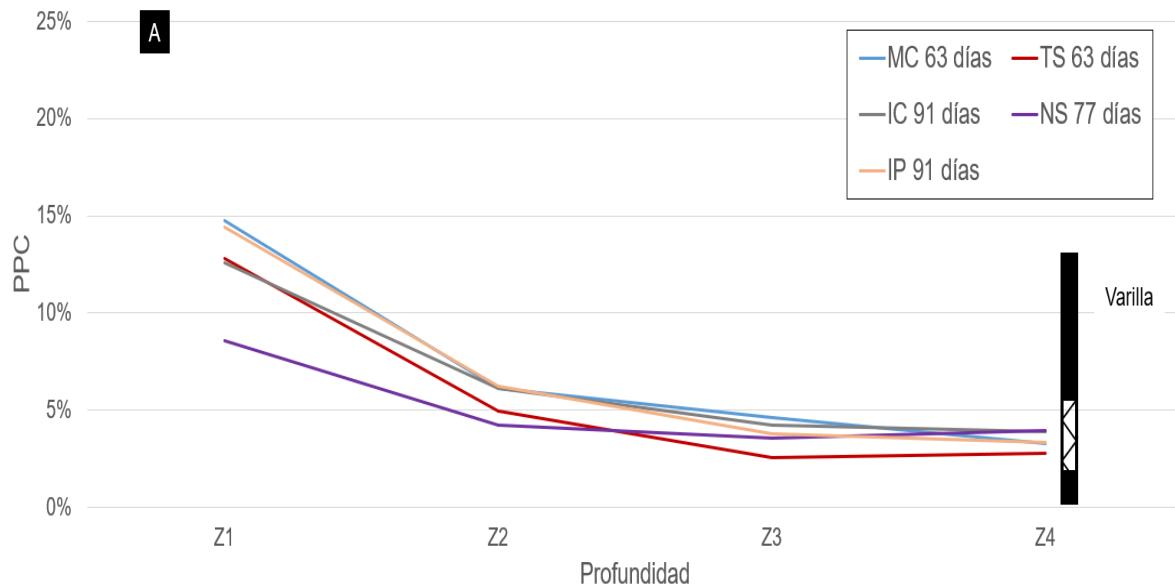


Figura 16, Perfil de cloruros de las mezclas tratadas con relación a/c de 0.7, Z1=0-5mm, Z2=5-10mm, Z3=10-15mm y Z4=15-20mm de profundidad.

Se observa que la difusión de cloruros en todos los especímenes muestra el mismo comportamiento. La zona que tiene la mayor concentración de cloruros, es la 1 (Z1), seguida de la 2 (Z2) y así, hasta 4 (Z4). Además, la concentración máxima de cloruros en la Z4, es de 2.8 y 3.9 PPC para los especímenes con TS e IC respectivamente, lo cual concuerda con valores que han sido reportados [41]. Es de

CAPÍTULO IV

notar que el aditivo IC no incrementa de manera significativa el umbral de Cl^- , lo que explicaría por qué la velocidad de corrosión de los especímenes con IC no se incrementó con respecto a los especímenes de la mezcla control. Asimismo, se sabe que algunos aditivos multifuncionales (anódicos y catódicos) no solo interactúan con el acero embebido, sino que también lo hacen con la matriz cementante. Algunos efectos que han sido reportados son, la formación compuestos complejos en presencia de cloruros, o la reacción con algunos productos de hidratación del cemento [78].

También se observa que, aunque los tratamientos TS y NS son métodos de prevención penetrantes, ambos muestran un desempeño diferente. La cantidad de Cl^- en las distintas zonas es diferente, aunque, en la Z4 son similares y concuerdan con los valores de umbrales de Cl^- reportados anteriormente. Asimismo, se observó que el comportamiento y los valores de cloruros al momento de la despasivación son similares para los especímenes con IP y de la MC. Por lo que el IP solo fue un obstáculo inicial al paso de Cl^- y no tuvo un efecto en el transporte de ellos dentro de la matriz cementante.

La figura 17 muestra los resultados de perfiles de cloruros realizados a una misma edad para relación a/c de 0.7.

CAPÍTULO IV

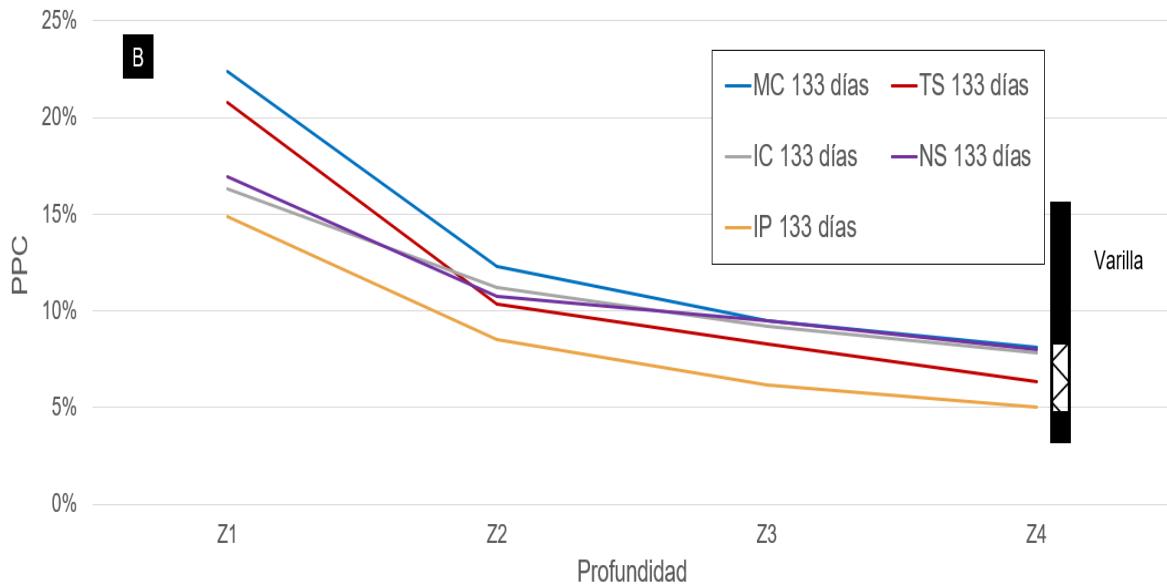


Figura 17. Perfil de cloruros de las mezclas tratadas con relación a/c de 0.7 a una misma edad de ensaye, Z1=0-5mm, Z2=5-10mm, Z3=10-15mm y Z4=15-20mm de profundidad.

Se observa que el tratamiento que ofrece mayor resistencia al ingreso de cloruros es el IP. Tiene un valor de 5.1 PPC en la zona más cercana con el acero, seguido de TS con un 6.3 PPC y finalmente el IC, NS y MC con un valor de aproximadamente 8 PPC. Además, la Z1 el IP muestra mejor desempeño, ya que la cantidad de Cl⁻ es menor si se compara con los demás métodos de prevención. Lo que concuerda con los datos de resistividad mostrados anteriormente. En los datos se observó que los especímenes con IP presentaron una mayor resistividad eléctrica comparada con los otros métodos de prevención, lo que indica que el IP ofrece mayor resistencia al ingreso de agentes de deterioro y esta prueba lo comprobó. También se sabe que este tipo de método de prevención conserva por más tiempo la humedad al interior de la matriz cementante. Esto podría causar un problema, ya

CAPÍTULO IV

que cuando se tiene humedad por lapsos prolongados en la zona entre el tratamiento y el concreto, la adherencia del mismo se pierde. Lo que provoca una pérdida en la efectividad de dicho tratamiento. Además, la temperatura y la humedad son dos factores importantes que causan el deterioro del recubrimiento. En un estudio relazado por [52] se encontró que conforme los especímenes pasan tiempo en ciclos de humectación y secado en un ambiente rico en Cl^- , la efectividad de los tratamientos formadores de película disminuye. Por lo que la protección no se puede mantener por lapsos prolongados.

Los tratamientos IC y NS muestran un desempeño similar en las diferentes zonas, en el caso del IC puede ser atribuido a la interacción de éste con la matriz cementante, como ha sido mencionado. Mientras que en el caso del tratamiento con NS, este puede ser causado por una reacción tardía entre la nanosílice y los productos de hidratación del cemento. Asimismo, el tratamiento TS muestra un comportamiento similar a lo reportado en la figura 16.

Al no encontrar un incremento mayor en el tiempo de inicio de la corrosión con el tratamiento de NS, se fabricaron nuevos especímenes para ser tratados con NS. Ya que es probable que la NS no haya reaccionado a edades tempranas. Por lo que al momento de la exposición del espécimen con el ambiente de deterioro, los cloruros reaccionaron antes de que lo hiciera la NS. Esto podría explicar porque el tiempo de inicio de corrosión de los especímenes sólo incrementó un 22 %. Para clarificar esta duda, se elaboraron más especímenes, con el objetivo de monitorear la ganancia de resistividad eléctrica en el tiempo. De esta manera encontrar el tiempo en el cual se obtiene un incremento significativo en la resistividad eléctrica.

CAPÍTULO IV

En este apartado se optó por dar seguimiento a la ganancia de resistividad utilizando la técnica de EIS. La resistividad eléctrica obtenida por esta técnica está en función del recubrimiento, ya que el electrodo de trabajo es el acero embebido y electrodo auxiliar es colocado sobre el borde del recubrimiento. Anteriormente, se utilizó la técnica de Wenner, en la cual se mide la resistividad eléctrica hasta una profundidad de 3.5 cm (distancia entre puntas) aproximadamente. Esta es una longitud mayor a la del recubrimiento propuesto, además, la reacción de la NS con la matriz cementante puede estar sucediendo sólo en las capas superficiales de la matriz cementante. Por lo que una medida de 3.5 cm podría estar minimizando el incremento en la resistividad, mientras que en la técnica de EIS el efecto de la NS podría apreciarse de mejor manera.

En la figura 18 se muestra el seguimiento electroquímico de X_{\max} de los especímenes con tratamiento NS y la MC. De los nuevos especímenes.

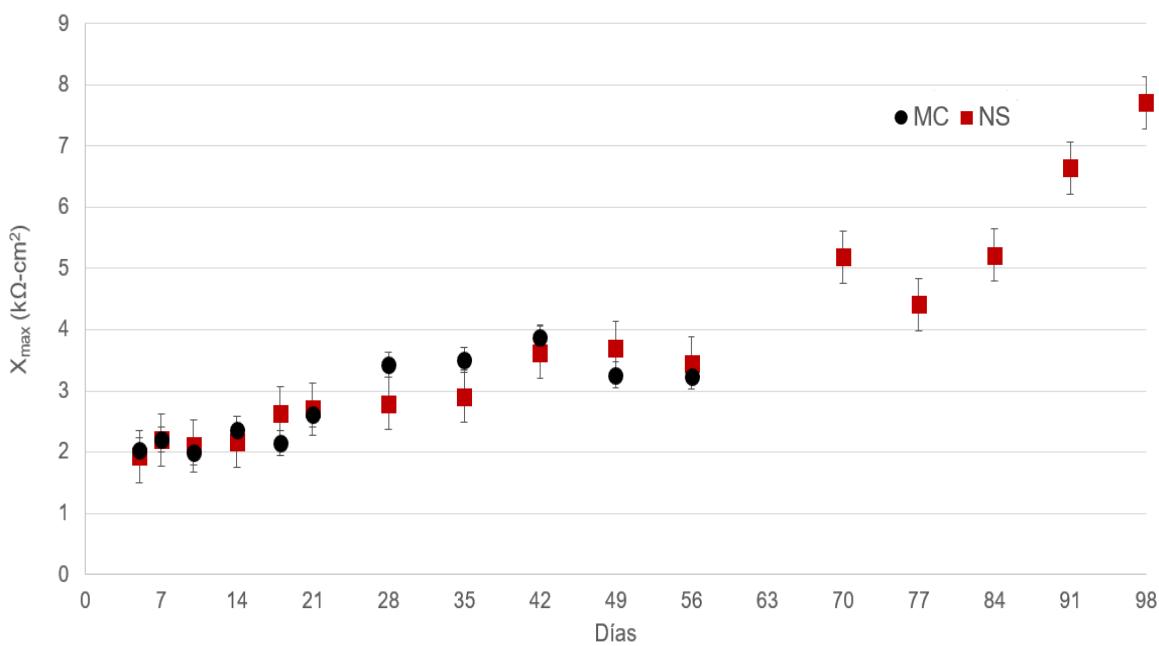


Figura 18. Seguimiento de X_{\max} de especímenes de MC y NS.

CAPÍTULO IV

El valor de X_{\max} para MC y NS a edades iniciales (hasta 28 días) incrementa con el paso del tiempo. Después de los primeros 28 días, el valor de X_{\max} se mantiene constante para MC y NS, lo que concuerda con lo reportado en la literatura. Sin embargo, a la edad de entre 70 y 77 días el valor en X_{\max} de NS se empieza a incrementar de manera significativa, llegando a valores de casi el doble que la MC. Lo cual puede atribuirse a un bloqueo de poros debido a la reacción de la NS con el hidróxido de calcio presente en la matriz cementante [79]. Estas reacciones reducen la permeabilidad del concreto y lo vuelve más resistente al ingreso de agentes de deterioro. La ganancia de resistividad eléctrica a estas edades, indica que el efecto de la nanopartícula tiene un retraso no contemplado en el tiempo de inducción del deterioro acelerado. Lo que puede ser un factor determinante en el tiempo de inicio de la corrosión. Además, si el tiempo de inicio de la exposición al ambiente de deterioro fuese a la edad de 70 o 77 días, el tiempo de inicio de la corrosión pudo haberse incrementado más.

4.3.2 Matriz cementante con relación a/c de 0.3

La figura 19 muestra el seguimiento electroquímico correspondiente a Ecorr e icorr de los especímenes tratados y los no tratados con relación a/c de 0.3.

CAPÍTULO IV

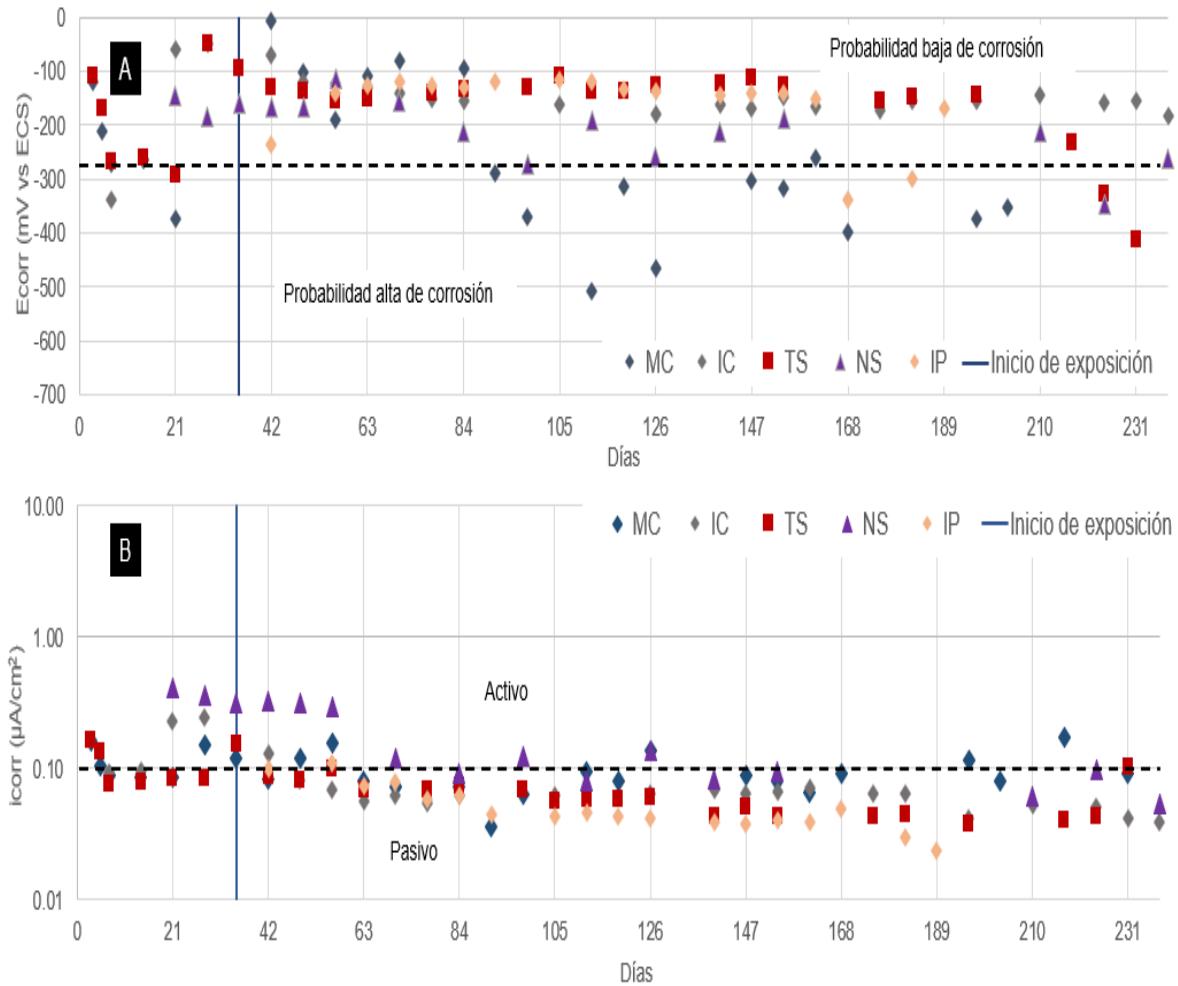


Figura 19. potenciales de corrosión y B, Velocidad de corrosión durante la experimentación, $a/c= 0.3$.

En la figura 19 se observa que, en todos los casos, los Ecorr iniciaron en valores de aproximadamente -300 mV (activo) aproximadamente. Conforme pasa el tiempo, se vuelven más positivos y a la edad de entre 21 y 28 días los Ecorr pasan de estar en un estado activo a uno pasivo. Entre la edad de 42 y 49 días los Ecorr se estabilizaron entre 100 y 200 mV. En el caso de la icorr, todas las velocidades comienzan en valores mayores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (activo). Conforme pasa el tiempo los valores de icorr pasan de estar en un estado activo a uno pasivo. Lo cual es un

CAPÍTULO IV

comportamiento normal, ya que puede ser atribuido a la formación de la capa pasiva sobre el acero [30].

Así mismo, se observa que el Ecorr de MC en algunas edades se encuentra en la zona de alta probabilidad de corrosión, pero la velocidad de corrosión en las mismas edades se mantiene en valores inferiores a $0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Esto puede ser causado por un pequeño punto anódico dentro de la zona de trabajo del acero embebido. Pero al ser tan pequeño no tiene efecto en icorr. Al día de hoy, ninguna de las muestras con relación a/c de 0.3 se ha activado.

La figura 20 muestra los resultados de resistividad eléctrica obtenidos en los especímenes de la MC con relación a/c de 0.3.

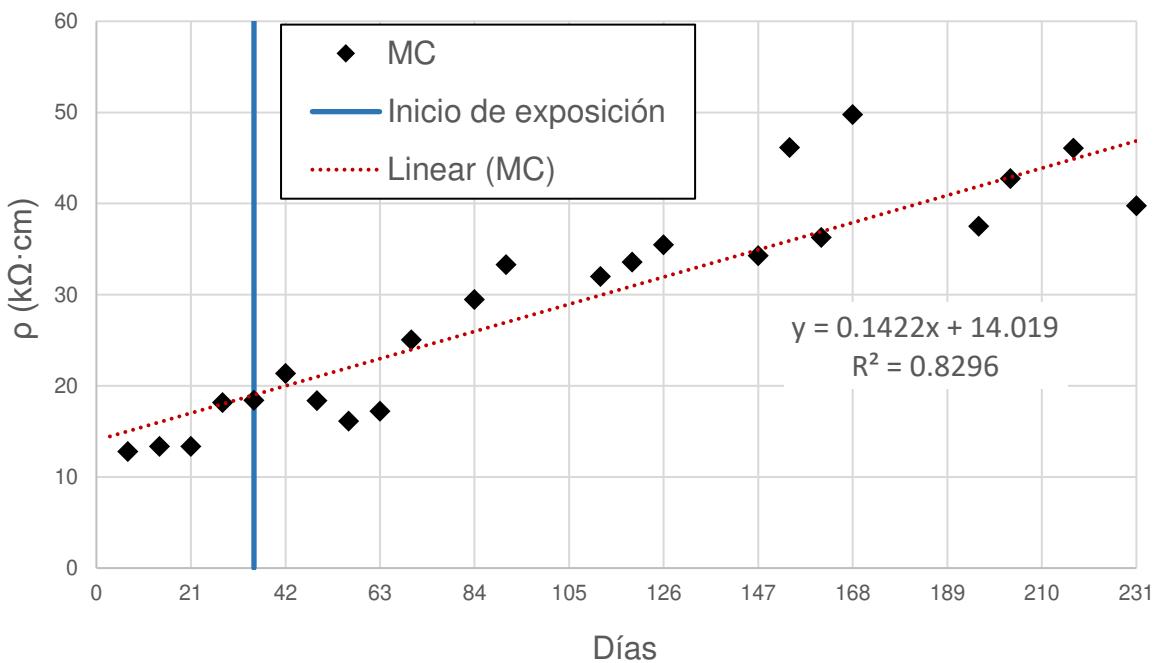


Figura 20. Resistividad eléctrica de la mezcla control con relación a/c de 0.3.

En la figura 20 se observa la tendencia a incrementar de la resistividad eléctrica de la MC. Esto a pesar de que la exposición ha ingresado cloruros, lo que debería de

CAPÍTULO IV

reducir la resistividad. Porque, cuando la solución de poros contiene cloruros, esta se vuelve más conductora [31]. Sin embargo, esto puede atribuirse a que una matriz con estas características contiene aun material sin hidratar. Por lo que, cuando ingresa la solución de NaCl hidrata material anhidro. El comportamiento de las mezclas tratadas es similar. Como se comentó anteriormente, el cemento utilizado tiene un alto contenido en SO₃ lo que podría generar en gran cantidad etringita. Esta se expande y genera micro agrietamientos en la matriz cementante, una manera de ver si esto está sucediendo es con la medición de la resistividad. Esta propiedad debería de disminuir con la presencia de grietas, pero los resultados indican que esta incrementa con el tiempo, por lo que podemos decir que no hay presencia de micro agrietamientos causados por etringita.

La figura 21 muestra los resultados de perfiles de cloruros realizados a una misma edad para todos los métodos de protección.

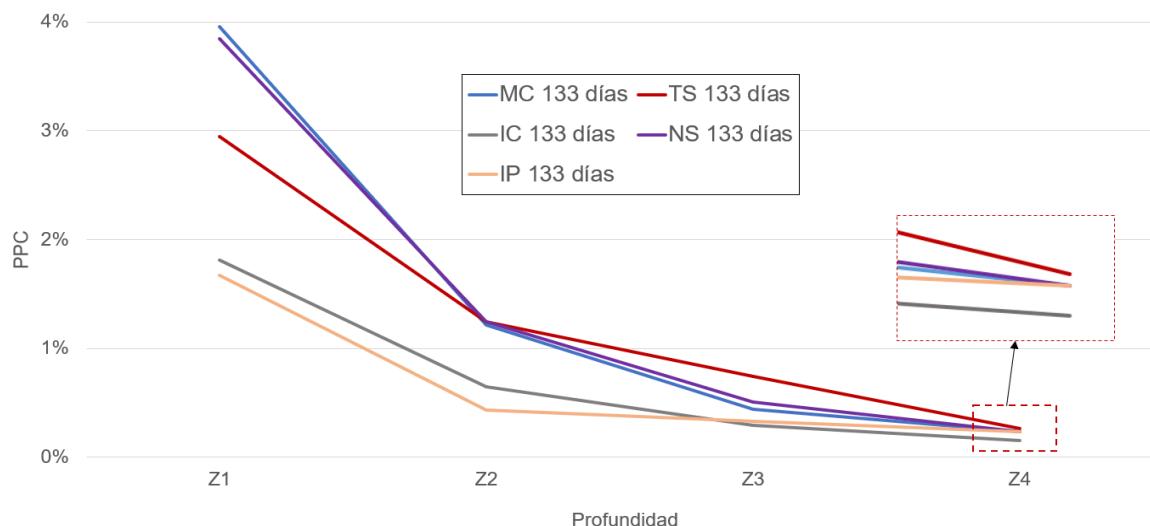


Figura 21. Perfil de cloruros de las mezclas tratadas con relación a/c de 0.3, Z1=0-5mm, Z2=5-10mm, Z3=10-15mm y Z4=15-20mm de profundidad.

CAPÍTULO IV

En la figura 21 se muestra que el IP es el tratamiento con desempeño, ya que reduce un 55.2% la cantidad de cloruros en la zona que está en contacto con el ambiente de exposición. Se observa que el IC reduce un 52.6% la cantidad de cloruros presentes en la Z1. Mientras que, en la Z4, es el método que mejor desempeño muestra, redujo un 32.3% la cantidad de cloruros presentes. Esto se puede atribuir a la interacción de los compuestos del aditivo con la matriz cementante y con los cloruros, como se mencionó anteriormente. Asimismo, es un comportamiento diferente a lo observado en la figura 17, donde el IC mostro una menor cantidad de cloruros en las Z1 y Z2. Pero en las Z3 y Z4 los cloruros tuvieron un valor similar a lo obtenido en muestras de MC. Mientras que el TS reduce un 23% la cantidad de cloruros presentes en la Z1. Pero en la Z4 la cantidad de cloruros es mayor a lo observado en la MC. El tratamiento con NS no tuvo un efecto significativo en la cantidad de cloruros presentes en la zona 1. La cantidad de cloros presentes en la Z4 en la figura 21 para todos los métodos de prevención está por debajo de lo permitido por los diferentes códigos. El valor máximo permitido antes del inicio de la corrosión es de 0.6 [80]. Además, estos valores se encuentran por debajo de la cantidad critica de cloruros encontrados en los especímenes de relación a/c de 0.7. Estos valores están de acuerdo a los valores de icorr (tabla 13), donde se observa que todos los especímenes se encuentran pasivos a la edad de 133 días de exposición.

En las figuras 20 y 24 se observa que el comportamiento del IP es similar en las diferentes zonas analizadas, Además, es el método de prevención que menor cantidad de cloruros tiene en las diferentes zonas. Por lo que se espera que sea

CAPÍTULO IV

uno de los métodos que más incremente el tiempo de inicio de la corrosión, ya que en los especímenes con relación a/c de 0.7, el IP incrementó un 44% el tiempo de inicio de la corrosión. El IC tiene un desempeño similar en la matriz cementante de relación a/c de 0.3 que el impermeabilizante. Esto puede ser causado por la baja permeabilidad de la matriz cementante y a la posible interacción del aditivo IC con los productos de hidratación de la matriz cementante. Además, cuenta con una menor cantidad de cloruros en las diferentes zonas comparada con la mezcla control. Este es un comportamiento diferente a lo encontrado en la matriz cementante con relación a/c de 0.7. Pero al momento de la activación del acero, el IC incrementó ligeramente el umbral de cloruros. Por lo que se espera que en esta matriz cementante se lleve también más tiempo en alcanzar dicho umbral, por lo que el tiempo de inicio de la corrosión se incrementará.

El TS presenta comportamientos diferentes en ambas matrices cementantes, aunque ambas tienen valores similares en la zona 4 al de la MC. En la zona 1 en matriz cementante de 0.3 se observa que la Z1 logra incrementar la resistencia al ingreso de cloruros. Esto no sucede cuando se utiliza este tratamiento en la matriz cementante con relación a/c de 0.7. Lo que puede ser atribuido a la facilidad con la que una sustancia puede ingresar a la matriz como se ha mencionado anteriormente. La NS tiene un desempeño diferente en la zona 1 en la matriz de relación a/c de 0.3, ya que en la matriz de relación a/c 0.7, se tiene una concentración menor de cloruros comparada con la MC, mientras que en la de a/c de 0.3, no presenta un cambio significativo. Lo que puede ser atribuido a una menor permeabilidad de la matriz cementante de a/c de 0.3. La que es necesaria para

CAPÍTULO IV

ingresar la NS, por lo que se podría esperar que no incrementé significativamente el tiempo de inicio de la corrosión.

4.4 Ángulo de contacto

Esta prueba se utilizó para comprobar el efecto hidrofóbico que el TS ejerce sobre los especímenes de concreto a lo largo del tiempo. Los resultados que se muestran en la figura 22, son el promedio de tres mediciones. La distinción entre un material hidrofílico y uno hidrofóbico es cuando este tiene un ángulo de contacto de una gota de agua es mayor a 90° [81].

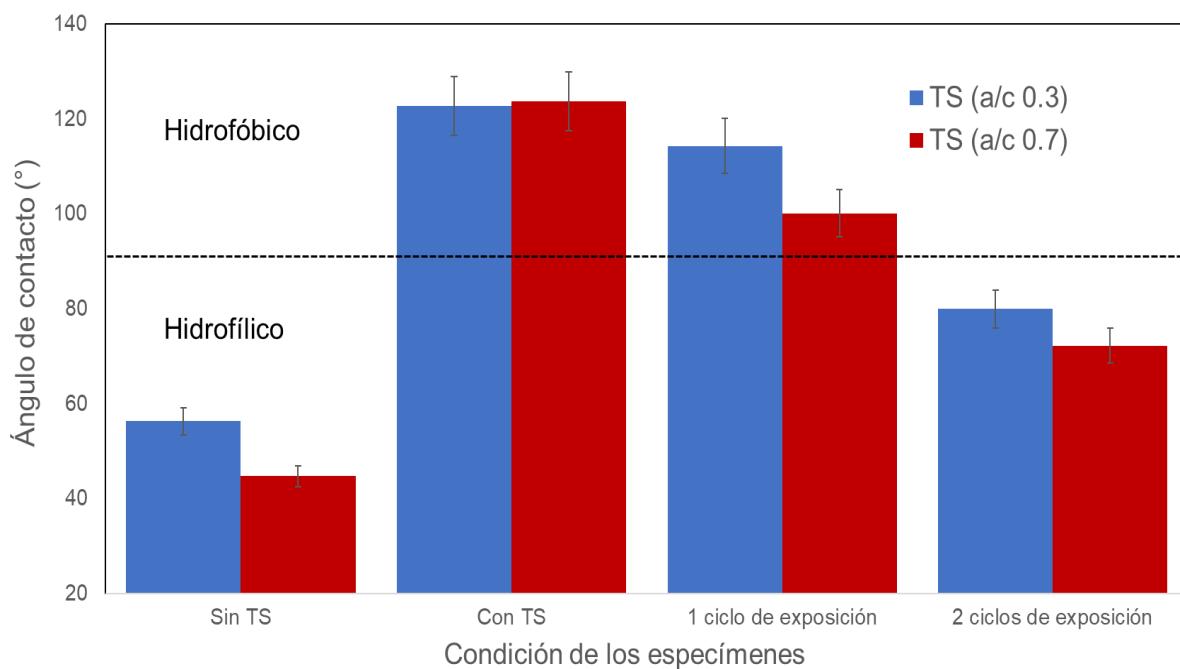


Figura 22. Seguimiento de la hidrofobicidad en los concretos con (TS).

Inicialmente el concreto de la mezcla de relación a/c de 0.3 tiene un ángulo de 56° , mientras que el ángulo de la mezcla con relación a/c de 0.7 es de 45° . Esto se puede atribuir a que el concreto con relación a/c de 0.7 tiene una mayor permeabilidad, como se mostró en las diferentes pruebas de durabilidad que se realizaron a los

CAPÍTULO IV

concretos (véase sección 4.2). Después de la aplicación del método de prevención (TS) el ángulo de contacto en la superficie de ambos concretos pasó de ser hidrofílico a hidrofóbico. Por otro lado, cuando los especímenes se sometieron al ambiente de exposición (cloruros) se observó una disminución del ángulo. En ambas matrices cementantes se observó un comportamiento similar. Esto se puede atribuir a que no se dio el tiempo necesario para que la mezcla de silanos/siloxanos reaccionaran de manera adecuada con los productos de la matriz cementante. Como ha sido reportado en [82] donde se encontró que las condiciones y el tiempo de curado después de la aplicación del tratamiento influyen en el desempeño del mismo. Este tipo de tratamiento requiere de un tiempo de interacción para reaccionar con la matriz cementante y así poder ser eficiente.

Además, se evaluó el ángulo de contacto del agua de los diferentes especímenes una vez que se activaron las muestras, los resultados se muestran e la figura 23. Se puede observar que todos los especímenes cuentan con una superficie hidrofílica, ya que el ángulo de contacto es menor de 90°. Sin embargo, para los dos matrices cementantes, el ángulo de contacto que se presenta en el IP es similar. Además, es un valor mayor al que presentan los otros métodos de prevención, siendo de casi 80° para ambos casos. Lo anterior explicaría por qué este es uno de los métodos que más incrementa el tiempo de inicio de la corrosión, ya que después de un tiempo prolongado es más impermeable que los demás métodos de prevención.

CAPÍTULO IV

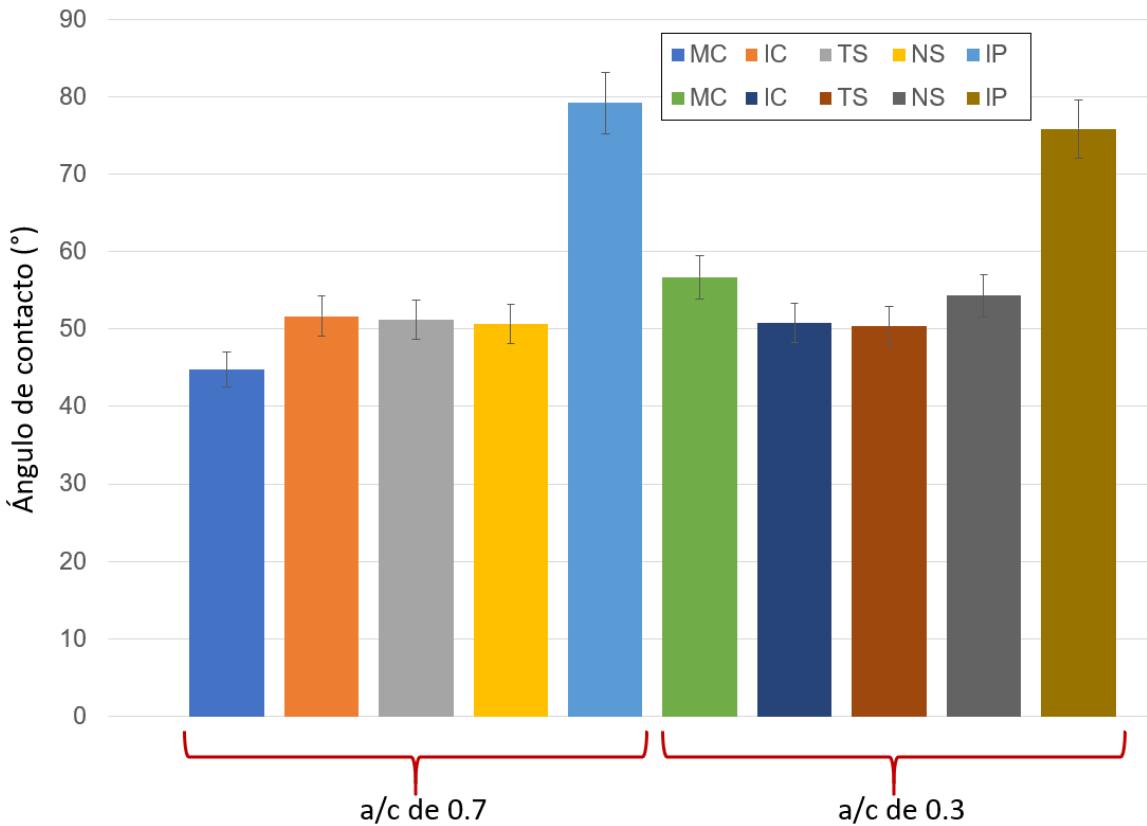


Figura 23. Ángulo de contacto de los diferentes especímenes, después de la activación.

También se observa en la figura 26 que el ángulo de contacto de TS, IC y NS es similar al de la MC. Por lo que el ingreso de agentes de deterioro puede ser igual de rápido que el de la MC. Aunque es importante mencionar que se pueden estar formando diferentes productos dentro de la matriz cementante, lo que podría afectar la velocidad con la que los Cl⁻ ingresan.

4.5 Morfología de la matriz cementante en presencia del aditivo inhibidor de corrosión

Con el objetivo de evaluar el efecto en los productos de hidratación de la matriz cementante. Se realizaron micrografías y un análisis semicuantitativo y de

CAPÍTULO IV

distribución de elementos sobre algunas muestras tomadas de la superficie de los especímenes. Los resultados se muestran en la figura 24.

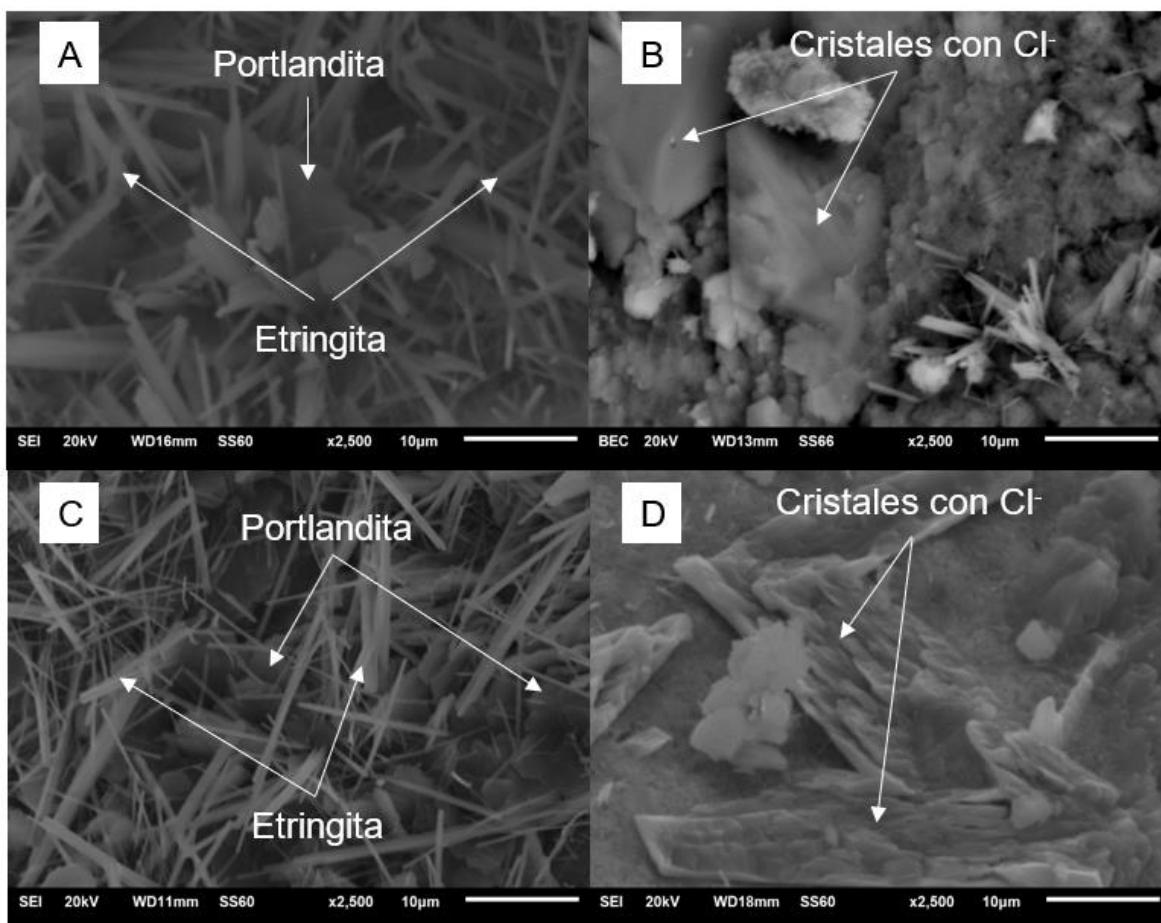


Figura 24. Micrografías de la microestructura de las muestras, A) matriz cementante con la incorporación del aditivo IC antes de ser expuesta al ambiente de deterioro, B) Matriz cementante con la incorporación del aditivo IC después de ser expuesta al ambiente de deterioro, C) matriz cementante de referencia antes de ser expuesta al ambiente de deterioro, D) matriz cementante de referencia después de ser expuesta al ambiente de deterioro.

La morfología de los cristales de portlandita y ettringita observados en las muestras A y C de la figura 24, corresponde con las morfologías de los productos de

CAPÍTULO IV

hidratación en matrices cementantes como han sido reportado en [83]. Sin embargo, la matriz cementante en la figura A se fabricó con la incorporación del aditivo IC, mientras que en la figura C se presenta la mezcla control. En las imágenes no se aprecia un cambio en la morfología de ambas muestras. Lo contrario sucede cuando los especímenes son sometidos al ambiente rico en Cl⁻. Como se puede observar en la figura B y D, se observa que la morfología de los productos hidratados es diferente. Por lo que se puede inferir que existe un efecto del aditivo IC en la matriz cementante cuando es expuesta a Cl⁻. Un análisis de EDS sobre la zona de las figuras B y D se muestran en la figura 25.

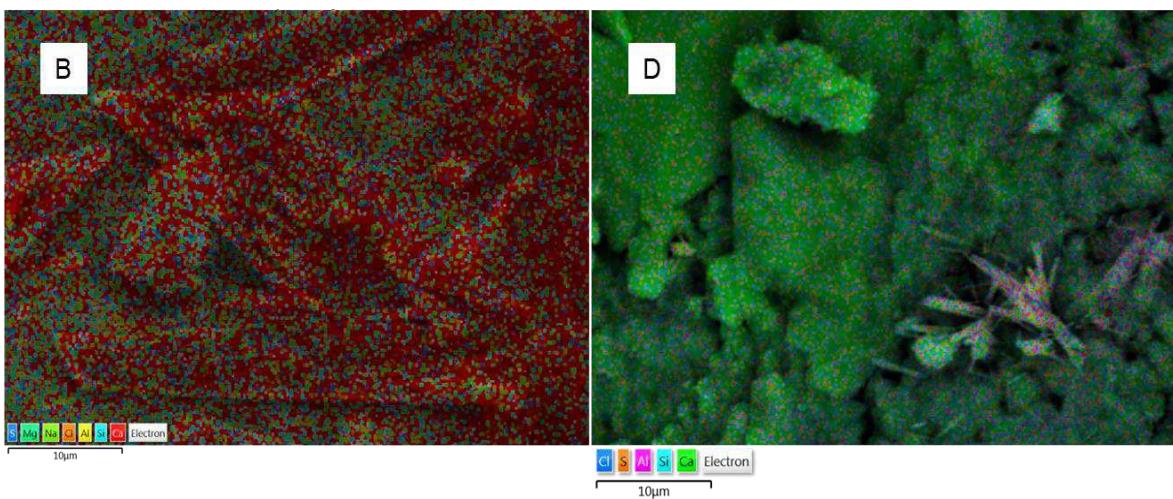


Figura 25. EDS de las muestras con y sin aditivo IC después de la exposición al ambiente de deterioro. A, sin aditivo IC y B, con aditivo IC.

El análisis de EDS de los cristales observados en los poros de las muestras B y D indica evidencia de elementos Ca, Al, S y Cl, característicos de los compuestos presentes en la sal de Friedel ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Como es conocido los cloruros se ligan químicamente con etringita y monosulfatos hidratados presentes [84]. No obstante, como se observa en la figura 25, las morfologías de los cristales en las

CAPÍTULO IV

dos muestras son diferentes. Esto se puede atribuir a la presencia del aditivo IC y que correspondería con lo reportado en el caso de algunos aditivos inhibidores de corrosión multifuncionales que interactúan con los cloruros presentes en la matriz cementante (ligan cloruros). Por lo que se podría tener una cantidad menor de cloruros libres a una misma edad, si se compara con una muestra de características similares sin aditivo inhibidor de corrosión, lo que afectarían el tiempo de inicio de la corrosión [85–87].

4.5 Evaluación de pérdida de masa

En la tabla 19 y figura 26 se muestran los valores de pérdida de masa promedio del acero, calculada gravimétricamente y con los valores de icorr utilizando la ecuación descrita en la sección 3.8.2.

Tabla 19. Pérdida de peso del acero, determinado por diferentes métodos.

	MC	TS	IC	NS	IP
Tiempo (días)	364	259	280	273	231
icorr ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	8.00	6.24	4.67	7.63	4.05
% Δ peso, teórico	4.08	2.27	1.83	2.92	1.31
% Δ peso, gravimétrico	4.73	3.34	2.04	2.51	1.64

CAPÍTULO IV

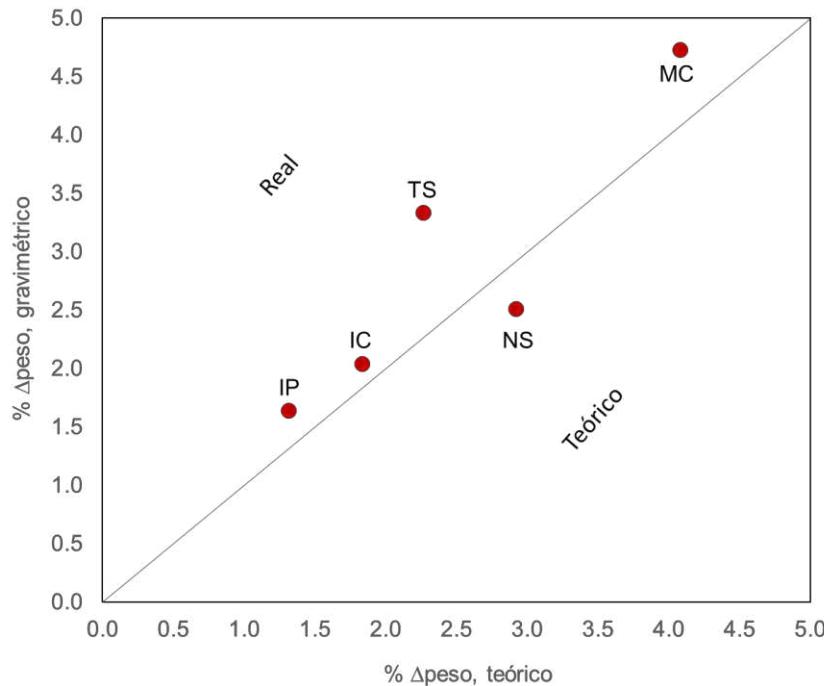


Figura 26. Pérdida de masa del acero determinado por diferentes métodos.

Los resultados de la tabla 6 muestran que la pérdida de peso y la velocidad de corrosión son mayores en la MC. Mientras que el IC e IP tienen la menor pérdida de peso y velocidad de corrosión, lo que coincide con el incremento en el tiempo de inicio de la corrosión. Además, la pérdida de peso y la velocidad de corrosión en los tratamientos TS y NS son similares. Esto se puede atribuir a que en ambos métodos el tiempo de inicio de la corrosión fue muy similar.

CAPÍTULO V:

Conclusiones y

Recomendaciones

CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones del análisis de los diferentes resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas a los diferentes especímenes.

- Mediante las pruebas de compatibilidad de aditivos, se demostró que el uso de los materiales propuestos para el desarrollo de este trabajo no tiene un efecto adverso en las propiedades físicas y mecánicas en las pastas elaboradas.
- Utilizando diferentes técnicas de caracterización se comprobó la obtención de dos matrices cementantes con propiedades mecánicas y de durabilidad diferentes. Lo que se vio reflejado en la velocidad de ingreso de los cloruros hacia el interior de la matriz cementante.
- El alto contenido de SO_3 en el cemento utilizado aquí, no afectó el desarrollo de la matriz cementante. En efecto, mediante la técnica de resistividad eléctrica, se demostró que no se presentó agrietamiento en la matriz cementante. En este trabajo la resistividad eléctrica de la matriz cementante con relación a/c de 0.3 incrementó conforme pasó el tiempo. El incremento en esta propiedad se atribuyó a una densificación en la matriz cementante, causada por la hidratación de productos anhidros.

Del análisis del efecto de la matriz cementante en el desempeño de los diferentes métodos de prevención se mencionan las siguientes conclusiones.

- Mediante el seguimiento electroquímico se demostró que los métodos de prevención como son el NS, IC e IP incrementan el tiempo de inicio de la

CAPÍTULO V

corrosión en los especímenes elaborados con concreto con relación a/c de 0.7. Además, en los perfiles de cloruros elaborados al momento de la despasivación, se encontró que una cantidad de cloruros similar en la zona más cercana al acero de refuerzo. Por lo que se concluye que la velocidad de ingreso de los cloruros se modificó cuando se usaron los diferentes métodos de prevención. Esto, porque la cantidad de cloruros presentes en esta zona fue similar, lo que cambio fue el tiempo necesario para lograr dicha concentración. Por otro lado, el uso del tratamiento TS no logra incrementar el tiempo de inicio de la corrosión. Lo cual se atribuyó al tiempo de reacción entre el producto y la matriz cementante, siendo insuficiente para lograr reforzar la matriz cementante antes de ser expuesta al ambiente rico en Cl^- .

- Para los especímenes elaborados con concreto con relación a/c de 0.3 se concluye que la velocidad de ingreso de Cl^- se modificó cuando se usó el IP, IC. Esto porque en los perfiles de cloruros elaborados se encontró una diferencia en la cantidad de cloruros en las diferentes zonas de los especímenes. Por lo que también se espera que se incremente el tiempo de inicio de la corrosión. Mientras, que el tratamiento con TS muestra un buen desempeño en la zona en contacto con el ambiente de exposición, pero obtuvo el peor desempeño en la zona en contacto con el acero. Así mismo el tratamiento con NS no tuvo un efecto significativo en las diferentes zonas y por lo tanto la velocidad de ingreso de Cl^- no se modificó. Por lo que se espera que no incremente el tiempo de inicio de la corrosión.
- Se encontró que los métodos que más incrementaron el tiempo e inicio de la corrosión fueron el impermeabilizante y el aditivo inhibidor de corrosión.

CAPÍTULO V

- Cuando se usó el tratamiento con NS, el tiempo de inicio de la corrosión se incrementó, aunque este incremento fue menor en comparación con los otros métodos. Esto se atribuye a una reacción tardía entre la nanopartícula de sílice y el hidróxido de calcio, con respecto al tiempo de inicio de la exposición en cloruros. En este sentido, los resultados de resistividad eléctrica obtenidos en especímenes puestos en inmersión en agua durante un largo del tiempo fueron de aproximadamente el doble comparados con los primeros especímenes.
- Mediante el uso de la técnica de resistividad eléctrica, se encontró que el acero en los especímenes de concreto con relación a/c de 0.7 se activa cuando los valores se encuentran entre 5 y 7 kΩ-cm independientemente del tratamiento utilizado.

5.2 Recomendaciones

Durante los trabajos realizados en este proyecto se observaron diferentes cuestionamientos, por lo que se recomienda:

- Identificar el tiempo de inicio de la exposición de los diferentes especímenes al ambiente de deterioro. Ya que se observó, en el caso de los especímenes con NS se podría incrementar la resistencia al ingreso de agentes de deterioro si se da el tiempo para que la NS reaccione con el hidróxido de calcio presente.
- Se recomienda utilizar otra forma de acelerar el ingreso de Cl^- en una matriz cementante densa, ya que en este trabajo no se pudo apreciar el tiempo de inicio de la corrosión.

CAPÍTULO V

- Realizar la exposición de los especímenes a concentraciones menores de cloruros que las que se utilizaron en este trabajo. Ya que la alta concentración de cloruros pudo afectar el desempeño de los métodos de prevención.
- Evaluar el desempeño de los diferentes métodos de prevención en otros ambientes de deterioro (CO_2 , rayos UV, etc), esto con el objetivo de evaluar la degradación que podrían tener los diferentes métodos en dichos ambientes.

Referencias

REFERENCIAS

- [1] ACI 201.2R, Guía para la Durabilidad del Hormigón, Durabilidad Del Hotmigon. (2001) 1–59.
- [2] A.M. Aguirre-Guerrero, R. Mejía-de-Gutiérrez, M.J.R. Montês-Correia, Corrosion performance of blended concretes exposed to different aggressive environments, *Constr. Build. Mater.* 121 (2016) 704–716. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.038.
- [3] H. Böhni, Corrosion in reinforced concrete structures, CRC Press, New York, 2005.
- [4] D.D.L. Chung, Corrosion control of steel-reinforced concrete, *ASM Int.* 9 (2000) 585–588. doi:10.1361/105994900770345737.
- [5] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 582–590. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.009.
- [6] D. Cruz-Moreno, G. Fajardo, I. Flores-Vivián, A. Cruz-López, P. Valdez, Tratamiento superficial con nanopartículas base silicio inducido durante el curado: Efecto en la durabilidad de materiales base cemento portland, *Alconpat, Rev.* 3 (2017) 274–285. doi:10.21041/ra.v7i3.239.
- [7] N.Z. Muhammad, A. Keyvanfar, M.Z. Muhd, A. Shafaghat, J. Mirza, Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 80–90. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.048.
- [8] T.A. Söylev, M.G. Richardson, Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 609–622. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013.
- [9] D.O.D. LA FEDERACIÓN, Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018, D. Of. LA Fed. (2014). http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342547&fecha=29/04/2014 (accessed January 8, 2019).
- [10] Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México, Retos y Soluciones del NAIM, 2017. <http://www.amivtac.org/xseminarioingenieriaavial/assets/retosnaicm.pdf> (accessed January 8, 2019).
- [11] W.C.P. Steven H. Kostmatka, Beatrix Kerkhoff, Design and Control of Concrete Mixtures, 16th ed., PCA, 2016.
- [12] R.D. Hooton, J.A. Bickley, Design for durability: The key to improving concrete sustainability, *Constr. Build. Mater.* 67 (2014) 422–430. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.016.
- [13] S.W. Tang, Y. Yao, C. Andrade, Z.J. Li, Recent durability studies on concrete structure, *Cem. Concr. Res.* 78 (2015) 143–154. doi:10.1016/j.cemconres.2015.05.021.

REFERENCIAS

- [14] F. Altmann, V. Mechtcherine, Durability design strategies for new cementitious materials, *Cem. Concr. Res.* 54 (2013) 114–125. doi:10.1016/j.cemconres.2013.08.008.
- [15] PCA, Historias de casos. Puente de la confederación de Canadá, (n.d.). <https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability/case-histories> (accessed January 9, 2019).
- [16] P. Berkowski, G. Dmochowski, M. Kosior-Kazberuk, Analysis of structural and material degradation of a car-park's RC bearing structure due to city environmental influences, *Procedia Eng.* 57 (2013) 183–192. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.026.
- [17] R.D. Hooton, J.A. Bickley, Prescriptive versus performance approaches for durability design - The end of innocence?, *Mater. Corros.* 63 (2012) 1097–1101. doi:10.1002/maco.201206780.
- [18] Y. Ji, M. Wu, Z. Tan, F. Gao, F. Liu, Process control of reinforcement corrosion in concrete . Part 2 : Time-dependent dominating factors under different environmental conditions Auxiliary bar, *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 214–221. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.103.
- [19] O. Hernández-Castañeda, C.J. Mendoza-Escobedo, Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, *Ing. Investig. y Tecnol.* VII. 1 (2006) 57–70.
- [20] Y.-S. Ji, G. Zhan, Z. Tan, Y. Hu, F. Gao, Process control of reinforcement corrosion in concrete. Part 1: Effect of corrosion products, *Constr. Build. Mater.* 79 (2015) 214–222. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.083.
- [21] B. Hou, X. Li, X. Ma, C. Du, D. Zhang, M. Zheng, W. Xu, D. Lu, F. Ma, The cost of corrosion in China, *Npj Mater. Degrad.* 1 (2017) 4. doi:10.1038/s41529-017-0005-2.
- [22] Y. Ohama, Polymer-based materials for repair and improved durability: Japanese experience, *Constr. Build. Mater.* 10 (1996) 77–82. doi:10.1016/0950-0618(95)00063-1.
- [23] X. Pan, Z. Shi, C. Shi, T.-C. Ling, N. Li, A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms, *Constr. Build. Mater.* 132 (2017) 578–590. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025.
- [24] O. Gjorv, Durability Design and Quality Assurance of Concrete Infrastructure, *Concr. Int.* 1 (2013) 45–63.
- [25] NT Build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, *Measurement.* (2011) 1–8. doi:UDC 691.32/691.53/691.54.
- [26] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, Ø. Vennesland, J. Gulikers, R. Weidert, M. Raupach, RILEM TC 154-EMC: ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES FOR MEASURING METALLIC CORROSION, *Mater. Struct.* 33 (2000) 603–613.

REFERENCIAS

- [27] J.F. Lataste, Electrical resistivity for the evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited, 2010. doi:10.1533/9781845699604.2.243.
- [28] J. Zhang, Z. Lounis, Nonlinear relationships between parameters of simplified diffusion-based model for service life design of concrete structures exposed to chlorides, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 591–600. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.008.
- [29] S.A. Al-Saleh, Analysis of total chloride content in concrete, *Case Stud. Constr. Mater.* 3 (2015) 78–82. doi:10.1016/j.cscm.2015.06.001.
- [30] J.P. Broomfield, Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair, Second Edition, 2nd ed., Taylor & Francis Group, 2006. doi:10.4324/9780203414606.
- [31] E. Poulsen, L. Mejlbø, Diffusion of Chloride in Concrete: Theory and Application, 2010.
- [32] B.B. Das, B. Kondraivendhan, Implication of pore size distribution parameters on compressive strength, permeability and hydraulic diffusivity of concrete, *Constr. Build. Mater.* 28 (2012) 382–386. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.055.
- [33] L. Mao-Hua, Zhang, hui, Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 608–616. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.07.032.
- [34] M.M. Salta, M.F. Montemor, Effect of fly ash on concrete reinforcement corrosion studied by EIS, *Cem. Concr. Compos.* 22 (2000) 175–185.
- [35] S. V.P., R.B. C., S. K., R.U.P. R.M., CORROSION PERFORMANCE OF DIFFERENT REINFORCEMENT BARS USED IN CORROSION PERFORMANCE OF DIFFERENT REINFORCEMENT BARS USED IN CONCRETE STRUCTURES, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 03 (2016) 756–759.
- [36] M. Stefanoni, U. Angst, B. Elsener, Local electrochemistry of reinforcement steel – Distribution of open circuit and pitting potentials on steels with different surface condition, *Corros. Sci.* 98 (2015) 610–618. doi:10.1016/j.corsci.2015.06.004.
- [37] F. Bolzoni, G. Fumagalli, L. Lazzari, M. Ormellese, M.P. Pedeferri, Mixed-in inhibitors for concrete structures, *Corros. Reinf. Concr. Monit. Prev. Rehabil. Tech.* (2006). doi:10.1533/9781845692285.185.
- [38] J. Calleja, Andrade, Prevención de la corrosión de armaduras en el hormigón mediante aditivos inhibidores, 23 (1973).
- [39] C. Andrade, Future trends in research on reinforcement corrosion, Elsevier Ltd, 2016. doi:10.1016/B978-1-78242-381-2.00014-6.
- [40] O.S.B. Al-Amoudi, M. Maslehuddin, A.N. Lashari, A.A. Almusallam,

REFERENCIAS

- Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 439–449. doi:10.1016/S0958-9465(02)00084-7.
- [41] B. Elsener, Corrosion inhibitors for reinforced concrete – an EFC state of the art report, *Corros. Reinf. Concr. Mech. Monit. Inhib. Rehabil. Tech. (EFC 38)*. (2006) 170–184. doi:10.1533/9781845692285.170.
 - [42] T. Zafeiropoulou, E. Rakanta, G. Batis, Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars, *Prog. Org. Coatings*. 72 (2011) 175–180. doi:10.1016/j.porgcoat.2011.04.005.
 - [43] A. Brenna, F. Bolzoni, S. Beretta, M. Ormellese, Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings, *Constr. Build. Mater.* 48 (2013) 734–744. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.099.
 - [44] M.H.F. Medeiros, P. Helene, Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on and capillary water absorption, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1476–1484. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.06.013.
 - [45] L. Baltazar, J. Santana, B. Lopes, J.R. Correia, M.P. Rodrigues, Surface skin protection of concrete with epoxy resin impregnations: influence of the substrate roughness and moisture, *Mater. Struct. Constr.* 48 (2015) 1931–1946. doi:10.1617/s11527-014-0284-9.
 - [46] P. Hou, J. Qian, X. Cheng, S.P. Shah, Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO₂on cement-based materials, *Cem. Concr. Compos.* 55 (2015) 250–258. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.09.014.
 - [47] P. Hou, X. Cheng, J. Qian, R. Zhang, W. Cao, S.P. Shah, Characteristics of surface-treatment of nano-SiO₂on the transport properties of hardened cement pastes with different water-to-cement ratios, *Cem. Concr. Compos.* 55 (2015) 26–33. doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.07.022.
 - [48] M. Levi, C. Ferro, D. Regazzoli, G. Dotelli, D. Chimica, I. Chimica, G. Natta, B. Regione, S. Giovanni, L. Punta, Comparative evaluation method of polymer surface treatments applied on high performance concrete, *J. Mater. Sci.* 7 (2002) 4881–4888.
 - [49] Y. Zhao, P. Du, W. Jin, Evaluation of the performance of surface treatments on concrete durability, *J. Zhejiang Univ. A*. 11 (2010) 349–355. doi:10.1631/jzus.A0900580.
 - [50] F. Bolzoni, M. Ormellese, A. Brenna, V. Mancinelli, Efficiency of Concrete Coatings on Chloride-induced Corrosion of Reinforced Concrete Structures, *NACE Conf. Expo.* (2011) 1–11.
 - [51] S. Sadati, M. Arezoumandi, M. Shekarchi, Long-term performance of concrete surface coatings in soil exposure of marine environments, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 656–663. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.094.
 - [52] G. Li, B. Yang, C. Guo, J. Du, X. Wu, Time dependence and service life

REFERENCIAS

- prediction of chloride resistance of concrete coatings, *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 19–25. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.003.
- [53] A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini, Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete, *Constr. Build. Mater.* 113 (2016) 188–201. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041.
- [54] G. Li, J. Yue, C. Guo, Y. Ji, Influences of modified nanoparticles on hydrophobicity of concrete with organic film coating, *Constr. Build. Mater.* 169 (2018) 1–7. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.191.
- [55] I. Izarra, J. Cubillo, A. Serrano, J.F. Rodriguez, M. Carmona, A hydrophobic release agent containing SiO₂-CH₃ submicron-sized particles for waterproofing mortar structures, *Constr. Build. Mater.* 199 (2019) 30–39. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.018.
- [56] M. Sanchez, C. Alonso, J. Fullea, L. Granizo, J.D. Izquierdo, Protection of reinforcements using mixed corrosion inhibitors. Dependence of inhibition mechanism on interaction between rebar and corrosion inhibitor, *Corros. Eng. Sci. Technol.* 46 (2011) 445–452. doi:10.1179/174327809X457021.
- [57] T.A. Østnor, H. Justnes, Anodic corrosion inhibitors against chloride induced corrosion of concrete rebars, *Adv. Appl. Ceram.* 110 (2011) 131–136. doi:10.1179/1743676110Y.0000000017.
- [58] M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni, T. Pastore, Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures, *Cem. Concr. Res.* 36 (2006) 536–547. doi:10.1016/j.cemconres.2005.11.007.
- [59] S.M. Trépanier, B.B. Hope, C.M. Hansson, Corrosion inhibitors in concrete: Part III. Effect on time to chloride-induced corrosion initiation and subsequent corrosion rates of steel in mortar, *Cem. Concr. Res.* 31 (2001) 713–718. doi:10.1016/S0008-8846(01)00470-7.
- [60] J.O. Okeniyi, C₁₀H₁₈N₂Na₂O₁₀ inhibition and adsorption mechanism on concrete steel-reinforcement corrosion in corrosive environments, *J. Assoc. Arab Univ. BASIC Appl. Sci.* (2014). doi:10.1016/j.jaubas.2014.08.004.
- [61] K. Al-sodani, O.S.B. Al-amoudi, Performance of Corrosion Inhibitors under the Combined Effect of Chloride and Sulfate Contamination in Concrete, (2015) 1–9.
- [62] F. Bolzoni, G. Fumagalli, M. Ormellese, L. Coppola, Laboratory test results on corrosion inhibitors for reinforced concrete, *NACE - Int. Corros. Conf. Ser.* 2005–April (2005).
- [63] A.S. Fazayel, M. Khorasani, A.A. Sarabi, The effect of functionalized polycarboxylate structures as corrosion inhibitors in a simulated concrete pore solution, *Appl. Surf. Sci.* 441 (2018) 895–913. doi:10.1016/j.apsusc.2018.02.012.
- [64] H. Zheng, W. Li, F. Ma, Q. Kong, The effect of a surface-applied corrosion

REFERENCIAS

- inhibitor on the durability of concrete, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 36–40. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.007.
- [65] P. C. L, M.M. Page, Durability of concrete and cement composites, England, 2007.
- [66] B. Elsener, Corrosion inhibitors for reinforced concrete – an EFC state of the art report, *Corros. Reinf. Concr.* (2007) 170–184. doi:10.1533/9781845692285.170.
- [67] C. Andrade, I. Martínez, Techniques for measuring the corrosion rate (polarization resistance) and the corrosion potential of reinforced concrete structures, *Non-Destructive Eval. Reinf. Concr. Struct. Non-Destructive Test. Methods.* (2010) 284–316. doi:10.1533/9781845699604.2.284.
- [68] Ha-Won Song, Velu Saraswathy, Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A Review, *Int. J. Electrochem. Sci.* 2 (2007) 1–27.
- [69] J.O. Rivera-Corral, G. Fajardo, G. Arliguie, R. Orozco-Cruz, F. Deby, P. Valdez, Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: Effect of surface finish, *Constr. Build. Mater.* 147 (2017) 815–826. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.186.
- [70] J.O. Rivera-Corral, G. Fajardo, G. Arliguie, R. Orozco-Cruz, F. Deby, P. Valdez, Corrosion behavior of steel reinforcement bars embedded in concrete exposed to chlorides: Effect of surface finish, *Constr. Build. Mater.* 147 (2017) 815–826. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.186.
- [71] V. López García, Estudios de los Efectos de Algunos Materiales Componentes en las Propiedades de Hormigones de Altas Prestaciones desde Edades Tempranas, Universidad Politécnica de Madrid, 2003.
- [72] L.Y. Gómez Zamorano, G. Garcia Guillén, J. Acevedo Dávila, Estudio de la hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolín: efecto del empleo de dos aditivos superplastificantes, *Alconpat.* 5 (2015) 203–218. doi:<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.33>.
- [73] W. Morris, A. Vico, M. Vazquez, S.R. De Sanchez, Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements, *Corros. Sci.* 44 (2002) 81–99. doi:10.1016/S0010-938X(01)00033-6.
- [74] K.Y. Ann, N.R. Buenfeld, The effect of calcium nitrite on the chloride-induced corrosion of steel in concrete, *Mag. Concr. Res.* 59 (2007) 689–697. doi:10.1680/macr.2007.59.9.689.
- [75] K. Hornbostel, C.K. Larsen, M.R. Geiker, Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review, *Cem. Concr. Compos.* 39 (2013) 60–72. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019.
- [76] R.B. Polder, W.H.A. Peelen, Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by

REFERENCIAS

- electrical resistivity, Cem. Concr. Compos. 24 (2002) 427–435. doi:10.1016/S0958-9465(01)00074-9.
- [77] D.A. Koleva, O. Copuroglu, K. van Breugel, G. Ye, J.H.W. de Wit, Electrical resistivity and microstructural properties of concrete materials in conditions of current flow, Cem. Concr. Compos. 30 (2008) 731–744. doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.04.001.
- [78] C.K. Nmai, Multi-functional organic corrosion inhibitor, Cem. Concr. Compos. 26 (2004) 199–207. doi:10.1016/S0958-9465(03)00039-8.
- [79] H.E. Cardenas, L.J. Struble, Modeling Electrokinetic Nanoparticle Penetration for Permeability Reduction of Hardened Cement Paste, J. Mater. Civ. Eng. 20 (2008) 683–691. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:11(683).
- [80] C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, H.-W. Reinhardt, Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures, 2010. doi:10.1533/9781845699604.2.185.
- [81] H. Husni, M.R. Nazari, H.M. Yee, R. Rohim, A. Yusuff, M.A. Mohd Ariff, N.N.R. Ahmad, C.P. Leo, M.U.M. Junaidi, Superhydrophobic rice husk ash coating on concrete, Constr. Build. Mater. 144 (2017) 385–391. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.078.
- [82] X. Pan, Z. Shi, C. Shi, T.-C. Ling, N. Li, A review on surface treatment for concrete – Part 2: Performance, Constr. Build. Mater. 133 (2017) 81–90. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.128.
- [83] K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, Taylor & Francis Group, New York, 2016.
- [84] H. Hirao, K. Yamada, H. Takahashi, H. Zibara, Chloride Binding of Cement Estimated by Binding Isotherms of Hydrates, J. Adv. Concr. Technol. 3 (2005) 77–84. doi:10.3151/jact.3.77.
- [85] J.M. Gaidis, Chemistry of corrosion inhibitors, Cem. Concr. Compos. 26 (2004) 181–189. doi:10.1016/S0958-9465(03)00037-4.
- [86] M.L.S. Rivetti, J. da S.A. Neto, N.S. de A. Júnior, D.V. Ribeiro, Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review, Corros. Inhib. Princ. Recent Appl. (2018). doi:10.5772/intechopen.72772.
- [87] B. Elsener, Corrosion inhibitors for reinforced concrete - an EFC state of the art report, Corros. Reinf. Concr. Monit. Prev. Rehabil. Tech. (2006) 170–184. doi:10.1533/9781845692285.170.