



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis Profesional

OPTIMIZACIÓN DE USO DE ÁNODOS GALVÁNICOS DE
ZINC CONTRA LA CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE
CONCRETO REFORZADO

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

LILIA ALEJANDRA DÍAZ CRUZ

Asesor:

M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

Coasesores

Dr. Andrés Antonio Torres Acosta

M.I.T. Mauricio Arreola Sánchez

Morelia, Michoacán, Abril 2016

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Índice	Página
Índice	1
Índice de Figuras	4
Indice de tablas	7
AGRADECIMIENTOS	8
RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Introducción	11
1.2 Justificación	11
1.3 Hipótesis	12
1.4 Objetivo General	12
1.5 Objetivos Específicos	12
2 ANTECEDENTES	14
2.1 Daños en estructuras de concreto reforzado	14
2.2 Concreto.....	14
2.2.1 Concreto reforzado	14
2.2.2 Concreto presforzado	15
2.3 Daños que se presentan en estructuras de concreto reforzado	15
2.4 Corrosión metálica	16
2.5 Tipos de corrosión	17
2.5.1 Por su origen	17
2.5.2 Por su forma	18
2.6 Tipos de protección contra la corrosión	19
2.6.1 Aislamiento eléctrico del material	19
2.6.2 Polarización del mecanismo electroquímico	20
2.6.3 Utilización de materiales resistentes a la corrosión dependiendo del medio de exposición	20
2.6.4 Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión	21

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

2.7 Protección catódica	22
2.7.1 Corriente impresa	23
2.7.2 Ánodos de sacrificio.....	24
.....	26
2.7.3 Casos de protección catódica en México.....	26
2.8 Sistema de protección catódica “Life Jacket”	27
3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	29
3.1 Pruebas físicas del mortero	29
3.1.1 Granulometría.....	29
3.1.2 Absorción del agregado fino.....	29
3.1.3 Impurezas Orgánicas	30
3.1.4 Peso Volumétrico Seco Suelto	30
3.2 Proceso de fabricación de cubos de mortero y prismas	30
3.2.1 Fabricación de Cubos 5x5x5.....	32
3.2.2 Fabricación de proto tipos SPC.....	33
3.3 Resistividad Eléctrica	35
3.4 Velocidad de pulso ultrasónico	36
3.5. Porcentaje total de vacíos	37
3.6 Porosidad efectiva o absorción capilar	39
3.7 Resistencia a la compresión	40
3.8 Potenciales de media celda	41
3.9 Corriente galvánica entre ánodo y cátodo	42
3.10 Decaimiento de depolarización	42
4 RESULTADOS Y DISCUSION	43
4.1 Definición de las etapas de esta investigación	43
4.2 Caracterización del mortero	44
4.2.1 Primera etapa.....	44
4.2.1.1 Resultados del agregado fino utilizado en el mortero	44
4.2.1.2 Resistividad eléctrica	45
4.2.1.3 Porcentaje total de vacíos	46
4.2.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico	48

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.1.5 Porosidad efectiva	49
4.2.1.6 Resistencia a la compresión	50
4.2.2 Segunda etapa	51
4.2.2.1 Resistividad eléctrica	51
4.2.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico	53
4.2.3 Tercera etapa	54
4.2.3.1 Resistividad.....	54
4.2.3.2 Velocidad de pulso ultrasónico	55
4.2.3.3 Porcentaje total de vacíos	56
4.3 Resultados electroquímicos en los SPC	57
4.3.1 Primera etapa.....	57
4.3.1.1 Potenciales de media celda	57
4.3.2 Segunda etapa	61
4.3.2.1 Potenciales de media celda	61
4.3.3 Tercera Etapa	66
4.3.3.1 Potenciales de media celda	66
4.3.3.2 Decaimiento de depolarización	69
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
5.1 Conclusiones sobre la caracterización física.....	73
5.2 Conclusiones de electroquímica	73
6 BIBLIOGRAFIA	75

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Índice de Figuras

Página

Figura 2.1. Modelo de corrosión del acero embebido en concreto.....	17
Figura 2.2. Celda Electroquímica	23
Figura 2.3. Protección Catódica por Corriente Impresa	23
Figura 2.4. Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio	26
Figura 2.5. Esquema del sistema de PC Life Jacket.....	27
3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	29
Figura 3.1. Criterio de color basado en el Hellige Tester (ASTM c-40	30
Figura 3.2. Pruebas realizadas a los agregados, 1) Granulometría del agregado, 2) Absorción del agregado fino, 3) Impurezas orgánicas, 4) Gravedad específica, 5) Peso Volumétrico Seco Suelto	31
Figura 3.3. Prueba de Índice de fluidez.....	31
Figura 3.4. Matriz de Variables	32
Figura 3.5. Procedimiento de preparación de cubos 1) Moldes engrasados, 2) Apizonamiento, 3) Vibrado de mortero, 4) Cubos.....	33
Figura 3.6. Prismas con camisa de reparación con mortero adicionado con alúmina al 1%, grafito al 1% y zinc al 0.5%.....	34
Figura 3.7. Representación de Depolarización	43
Figura 4.1. Curva granulométrica de agregados finos	45
Figura 4.2. Resistividad eléctrica, Zn =adición de zinc, Al = adición de alúmina, C =adición de carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena.	45
Figura 4.3. Porcentaje total de vacíos, Zn = zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena.	46
Figura 4.4. Velocidad de pulso ultrasónico, VPU, Zn = de zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena.....	48
Figura 4.5. Porosidad efectiva, Zn = de zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena. Porcentajes corresponden a la cantidad de la adición vs contenido de cemento.....	49

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Figura 4.6. Resistencia a la compresión, Zn = de zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena. Porcentajes corresponden a la cantidad de la adición vs contenido de cemento.....	50
Figura 4.7. Resistividad eléctrica, Zp =adición de zinc, P CR =adición de carbón.	51
Figura 4.8. Velocidad de pulso ultrasónico, Zp =adición de zinc, P CR =adición de carbón.	53
Figura 4.9. Resistividad eléctrica de especímenes, 6 especímenes de cada una de las adiciones en el mortero, Zinc 0.5%, Alúmina 0.5%, Alúmina 1%, Alúmina 2%, Grafito 0.5%, Grafito 1%, Grafito 2%	54
Figura 4.10. Velocidad de pulso ultrasónico de especímenes, 6 especímenes de cada una de las adiciones en el mortero, Zinc 0.5%, Alúmina 0.5%, Alúmina 1%, Alúmina 2%, Grafito 0.5%, Grafito 1%, Grafito 2%. .55	
Figura 4.11. Porcentaje total de vacíos de especímenes, 6 especímenes de cada una de las adiciones en el mortero, Zinc 0.5%, Alúmina 0.5%, Alúmina 1%, Alúmina 2%, Grafito 0.5%, Grafito 1%, Grafito 2%.	56
Figura 4.12. Potenciales de la barra 7, barra 8, malla de zinc 1, barra 9, barra 10, malla de zinc 2 del prisma con camisa de mortero con adición de grafito al 1%, sin sumergir en agua al 3.5% de NaCl	57
Figura 4.13. Potenciales de la barra 7, barra 8, malla de zinc 1, barra 9, barra 10, malla de zinc 2 del prisma con camisa de mortero con adición de grafito al 1%, sumergidos en agua al 3.5% de NaCl	57
Figura 4.14. Potenciales de la barra 11, barra 12, malla de zinc 3, barra 15, barra 16, malla de zinc 5 del prisma con camisa de mortero con adición de zinc al 0.5%, sin sumergir en agua al 3.5% de NaCl	58
Figura 4.15. Potenciales de la barra 11, barra 12, malla de zinc 3, barra 15, barra 16, malla de zinc 5 del prisma con camisa de mortero con adición de zinc al 0.5%, sumergidos en agua al 3.5% de NaCl.....	58
Figura 4.16. Potenciales de la barra 13, barra 14, malla de zinc 4, barra 17, barra 18, malla de zinc 6 del prisma con camisa de mortero con adición de Alúmina al 1%, sin sumergir en agua al 3.5% de NaCl	59
Figura 4.17. Potenciales de la barra 13, barra 14, malla de zinc 4, barra 17, barra 18, malla de zinc 6 del prisma con camisa de mortero con adición de Alúmina al 1%, sumergidas en agua al 3.5% de NaCl	59
Figura 4.18. Potenciales “ON” del sistema con camisa de reparación con aditivo de grafito al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%	61
Figura 4.19. Potenciales “Instant off” del sistema con camisa de reparación con aditivo de grafito al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%	61
Figura 4.20. Potenciales “ON” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%	63
Figura 4.21. Potenciales “Instant off” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%	63

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Figura 4.22. Potenciales “ON” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%	64
Figura 4.23. Potenciales “Instant Off” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%	64
Figura 4.25. Potenciales “Instant Off” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	66
Figura 4.24. Potenciales “On” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	66
Figura 4.26. Potenciales “On” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	67
Figura 4.27. Potenciales “Instant Off” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	67
Figura 4.28. Potenciales “On” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	68
Figura 4.29. Potenciales “Instant Off” del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	68
Figura 4.30. Decaimiento de depolarizacion de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	69
Figura 4.31. Decaimiento de depolarizacion de las barras de acero de refuerzo del sistema de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	69
Figura 4.32. Decaimiento de depolarizacion de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	70
Figura 4.33. Decaimiento de depolarizacion de las barras de acero de refuerzo del sistema de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	70
Figura 4.34. Decaimiento de depolarizacion de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.	71

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Indice de tablas

Pagina

Tabla 1.1 Limites de concentración de cloruros para concretos reforzados	18
Tabla 1.2 Serie Electromotriz	24
Tabla 2.1. Especificaciones de granulometría según Bureau Of Reclamación ASTM.	29
Tabla 2.2. Interpretación de las mediciones de resistividad de Cavalier y Vassie	36
Tabla 2.3. Criterios para evaluar porcentaje total de vacíos (ASTM C642, 2006).	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.4. Criterios para evaluar la sorción capilar (ASTM C-642, 2006).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.5. Criterios para evaluar velocidad de pulso ultrasónico (VPU), ASTM C-597, 2009.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.6. Tabla Criterios para evaluar resistencia a la compresión (ASTM C109/C109M, 2005).	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 2.7. Criterios generales de las mediciones de potenciales, norma ASTM C876-80.....	41
Tabla 4.1. Granulometría del agregado fino.	44

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por permitirme tener una educación de calidad.

Al Director de la Facultad de Ingeniería Civil el M.A Wilfrido Martínez Molina por todo el apoyo brindado.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán por todo el apoyo brindado.

A mí querida Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y Facultad de Ingeniería Civil.

Al laboratorio de Materiales de la Universidad Michoacana, Sección de Corrosión, por el apoyo brindado para la realización de mi tesis, con su instrumentación y al personal docente.

Al laboratorio de Ingeniería Eléctrica, por el apoyo brindado para la realización de mi tesis, con su instrumentación.

Al Instituto Mexicano del Transporte por brindarme su apoyo y todas las facilidades que permitieron la realización de esta tesis.

Gracias al Dr. Andrés Antonio Torres Acosta por su guía, paciencia y dedicación en la asesoría para la formación de esta tesis.

A mi compañero y amigo Aldo Alberto Rangel Torres, por su gran ayuda y apoyo en todo momento.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

RESUMEN

La protección catódica es el método más efectivo para combatir la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Existe un sistema de protección catódica (SPC) muy usado desde 1990 en Estados Unidos (principalmente en el estado de Florida) que es utilizado en subestructuras de concreto (pilas, pilotes) que están semi sumergidas en el mar, en puentes y muelles. Este SPC consta de tres partes: protección de la pila en la zona aérea con termorociado de zinc; protección de la pila en la sección de cambio de mareas con un encamisado de fibra de vidrio que incluye una malla de zinc internamente; y protección de la pila en la zona sumergida con un ánodo de zinc tipo lingote (o bulk).

El Instituto Mexicano del Transporte en investigaciones anteriores concluyó que el mortero del encamisado disminuye la activación del ánodo de malla de zinc, disminuyendo así la efectividad del SPC, por lo que se recomendó el evaluar la posibilidad de que el mortero colocado dentro de la camisa de fibra de vidrio pudiera ser modificado para mejorar su conductividad y, por ende, la eficiencia del SPC.

En esta investigación se incluyen los resultados de las evaluaciones hechas a morteros modificados con adiciones metálicas para aumentar su conductividad eléctrica. Las adiciones usadas fueron de grafito, zinc y alúmina. Las pruebas realizadas al mortero para conocer sus propiedades físico-mecánicas fueron; resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, absorción por capilaridad, porcentaje total de vacíos y resistencia a la compresión simple.

También se incluyen resultados de pruebas electroquímicas realizadas en sistemas de encamisado prototipo que se fabricaron con los morteros que mejor se desempeñaron de entre todos los probados. Estas pruebas fueron las de medición de potencial de media celda al acero de refuerzo y al ánodo de zinc, la corriente eléctrica drenada entre el acero de refuerzo y el ánodo de zinc y, finalmente, el decaimiento de la polarización luego de desconectar el refuerzo al ánodo en periodos hasta de 24 horas, de acuerdo con Normas bien establecidas.

Los resultados obtenidos nos demuestran que aunque a edades tempranas el sistema funciona bien con el mortero adicionado con alúmina, no fue así a edades tardías, ya que ninguna de las adiciones mejora la activación de la malla de zinc.

(Palabras clave: corrosión, protección catódica, ánodo de sacrificio, cátodo, electrolito, morteros, conductividad eléctrica, potencial eléctrico).

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

ABSTRACT

Cathodic protection is the most effective method against corrosion in reinforced concrete structures. Exists a system of cathodic protection (CP) very used in United States since 1990 (especially in the state of Florida), used in concrete substructures (piles and bridges) that are semi submerged in the sea. This system consists of three parts; protection of pile in the overhead section with thermoware, protection of pile in the tide section with a jacketed of mortar with zinc net and glass fiber inside, and a zinc anode ingot type (or bulk) in the submerged section.

The Mexican Transport Institute (IMT) by a previous research concluded that jacketed of mortar reduced the activating of zinc anode (the net), reducing as well the efficiency of CP, it was recommended evaluate the possibility that the mortar placed inside the jacket of glass fiber could be changed to improve conductivity and efficiency of CP

This research included the results of evaluations made to modified mortars with metallic additions, to improve the electric conductivity. The additions used were carbon, zinc, alumina. The mortar tests to know their physical and mechanical properties were; electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity, capillary water absorption, total void content, compressive strength.

Electrochemical tests results are also included, this was realized on the prototype system jacketed made of mortars best performers among all tested. These tests were the measuring half-cell potential to reinforcing steel and zinc anode, the electric current drawn between the reinforcing steel and the zinc anode and finally the decay of the polarization after disconnecting strengthening the anode in periods up to 24 hours, according to well-established standards.

The results show us that an early age the system worked well with mortar improved with alumina, but it was not the same at later ages, as none of the additions increased activation of zinc (the net).

(Keywords: corrosion, cathodic protection, sacrificial anode, cathode, electrolyte, mortar, electric conductivity, electric potential).

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El concreto, material resultante de una combinación entre arena-agua-cemento es uno de los materiales de construcción más importantes, principalmente por las características de resistencia a la compresión que posee, sin embargo en estructuras importantes hay que considerar otras fuerzas externas como las de tensión y torsión, en la que el concreto por sí solo no las resiste bien, es por esta razón que se le agrega acero, material cuya principal característica es resistir las cargas antes mencionadas.

Sin embargo se debe considerar las desventajas del acero y esta es su susceptibilidad a la corrosión. Se pensó que la combinación de cemento-acero era una sociedad productiva, el acero le daba al concreto las características de resistencia de las que carecía y el concreto protegía al acero de la corrosión, se comprobó que no es así. La mínima exposición del acero a agentes agresivos hace que el proceso de corrosión comience. La corrosión disminuye el volumen del acero, provocando desprendimiento del concreto y disminuyendo la resistencia para la que fue diseñada la estructura, comprometiéndola así a posibles daños y pérdida total de la funcionalidad de esta.

Conociendo la importancia del acero en el concreto y la falla en la funcionalidad del concreto reforzado, es que se comenzó a estudiar y buscar maneras de proteger al acero.

1.2 Justificación

Las estructuras de concreto siempre han sido elaboradas para resistir cargas dejando de lado otros aspectos importantes que afectan su durabilidad, como los ataques a las estructuras de concreto por agentes agresivos que inician el proceso de corrosión. Se sabe que la protección catódica es la más eficiente tanto como sistema de reparación como sistema de prevención. El desarrollo de estos sistemas sigue en aumento debido a la demanda de la cantidad de

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

estructuras de concreto reforzado que presentan daños por corrosión en especial las que se encuentran en ambientes marinos, y que representan una fuerte suma de inversión tanto pública como privada.

En el año 2014 el Instituto Mexicano del Transporte comprobó que la protección catódica puede funcionar, mediante un sistema que protege las tres zonas que afectan las estructuras marinas, que son; zona aérea, zona de mareas, y zona sumergida. Sin embargo en la zona mareas, los resultados no fueron satisfactorios, debido a la desactivación del ánodo, a causa del tipo de mortero utilizado en un encamisado.

1.3 Hipótesis

Dentro del sistema de protección catódica en pilas y pilotes, la utilización de un mortero con una baja resistividad (menor a los 5 k Ω -cm), es el adecuado para usarse como relleno en el encamisado expuesto a una zona de mareas.

1.4 Objetivo General

Mejoramiento del mortero como electrolito (mejoramiento de su conductividad eléctrica), que se empleara como material de relleno en el encamisado, colocado en la zona de marea del sistema de PC instalado en los laboratorios del IMT (Instituto Mexicano del Transporte).

1.5 Objetivos Específicos

Conocer los criterios de aceptabilidad para la caracterización física, eléctrica, y mecánica de los morteros.

Conocer y elaborar las pruebas físicas y eléctricas que requieren los especímenes de mortero para obtener su caracterización.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Analizar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para evaluar el desempeño y efectividad del ánodo de zinc del sistema de protección catódica.

Hacer un estudio comparativo a través del tiempo del desempeño y efectividad del ánodo de zinc del sistema de protección catódica.

2 ANTECEDENTES

2.1 Daños en estructuras de concreto reforzado

En todas las estructuras, el acero se utiliza tanto parcialmente, como complemento en estructuras de concreto reforzado, o totalmente, en estructuras hechas por completo de este material. La corrosión podría considerarse el cáncer de los metales, una vez afectados se vuelven inservible, desde el punto de vista ingenieril, la principal razón, es porque se pierde la funcionalidad de la estructura.

En todos los países existen construcciones de concreto reforzado que se encuentran en ambientes agresivos, estos mismos países destinan un gran capital a la construcción, restauración, conservación y mantenimiento de estas estructuras.

En México por ejemplo se cuenta con los datos del inventario de puentes mexicanos conocido como SIPUMEX en el cual el 7% del total de estos, presentaba daños por corrosión en diferentes grados de afectación.

En el año 2012 se realizó una inspección a los muelles no concesionados de los puertos federales mexicanos por el Laboratorio de Materiales del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), y encontraron que el 100% de ellos muestran daños por corrosión en su subestructura y superestructura.

2.2 Concreto

2.2.1 Concreto reforzado

Un buen material de construcción debe de tener dos características importantes: resistencia a la compresión y a la tensión. Sin estas dos el material no se podría considerar como material estructural.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

El concreto tiene como una de sus características principales, tener excelente resistencia a las cargas de compresión, no igual con las cargas axiales, para que resista estas cargas se le agrega refuerzos de acero, en donde se sabe presentara las deformaciones bajo las cargas de servicio. El acero generalmente presentado en barras, restringe las fallas que se pudieran formar en una estructura, provocadas por la poca resistencia a la tensión del concreto.

El uso del refuerzo no está limitado a aumentar la resistencia a las cargas axiales. También se emplea en zonas de compresión para aumentar la resistencia del elemento reforzado, para reducir las deformaciones debidas a cargas de larga duración y para proporcionar confinamiento lateral al concreto, lo que indirectamente aumenta su resistencia a la compresión (Oscar Gonzáles y Francisco Robles, 2005).

La combinación del concreto combinado con acero es lo que conocemos como concreto reforzado.

2.2.2 Concreto presforzado

El concreto presforzado es una modalidad del concreto reforzado, en la que se crea un estado de refuerzos de compresión en el concreto antes de la aplicación de acciones. De este modo, los esfuerzos de tensión producidos por las acciones quedan contrarrestados o reducidos. La manera más común de presforzar consiste en tensar el acero de refuerzo y anclarlo en los extremos del elemento (Gonzales et al 2005).

2.3 Daños que se presentan en estructuras de concreto reforzado

Aunque el concreto es un material muy resistente, como todo material, sufre de daños, que podemos catalogar.

Daños por agentes exteriores, entre los que se encuentran los ataques físicos (erosión y heladas) y ataques químicos (ácidos, sulfatos, reacción de los álcalis, carbonatación, ataque de cloruros).

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Daños propios del concreto, como son daños no estructurales (asientos plásticos, retracciones, contracciones) y daños estructurales (compresión, flexión, cortante, torsión, etc.).

Daños causados por acciones extraordinarias, como los accidentes naturales (sismos, incendios, suelos expansivos, empujes del terreno), o impactos.

Siendo los daños por agentes exteriores, como la corrosión, los causantes de grandes pérdidas económicas al año, en todos los países, y sobre todo en estructuras importantes como puentes y muelles que son las que promueven tanto comercio como comunicación.

2.4 Corrosión metálica

La electroquímica es la parte de la química que estudia las reacciones en las que participan electrones, ejemplos de estas reacciones son la oxidación y la reducción.

La oxidación y la reducción son reacciones que representan a la corrosión. Podemos definir a la oxidación como la liberación de electrones, en metales, este proceso se lleva a cabo sobre la superficie del metal, este proceso define al metal como ánodo. Se considera como reducción cuando un metal gana electrones, dándole el nombre de cátodo al metal participante.

Para comprender el proceso de corrosión en el acero, debemos de considerar lo que se llama Celda electroquímica, que contiene cuatro elementos; ánodo, donde ocurre la corrosión; cátodo, el cual no se corroe; electrolito, que es una solución capaz de conducir corriente eléctrica por medio de iones; y un conductor, el cual conecta al ánodo y al cátodo.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

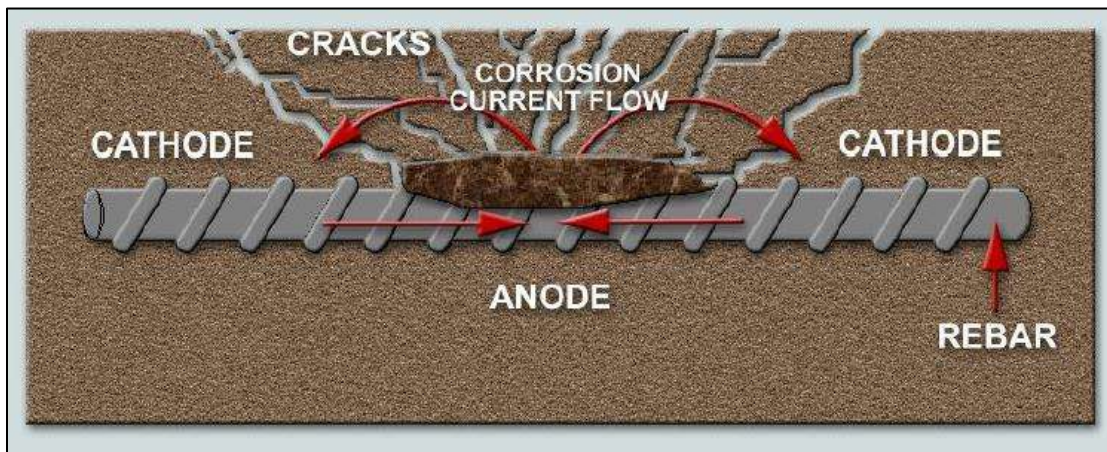


Figura 2.1. Modelo de corrosión del acero embebido en concreto

Esta celda electroquímica se presenta porque el metal tiende a regresar a su estado mineral, que es la fase más estable que tienen en la naturaleza.

2.5 Tipos de corrosión

En las estructuras de concreto reforzado existen varias formas de corrosión; tanto por el tipo de origen de la reacción, como por la forma en que la reacción afecta al acero.

2.5.1 Por su origen

Carbonatación: El concreto tiene un pH que va desde 12.0 a 13.5 esto provoca que el concreto tenga cierta estabilidad respecto al intercambio de energía que tiene con el acero, lo que se quiere decir, es que el acero forma una capa protectora, capa constituida por óxidos estables y compactos que impiden al acero la pérdida de energía. Esta capa protectora, también llamado recubrimiento pasivo, formada por Fe_2O_3 , suele perderse cuando los diferentes constituyentes del cemento entran en contacto con CO_2 (Dióxido de carbono) y SO_3 (Trióxido de

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

azufre), como el CO₂ se encuentra con mayor abundancia es el que le da el nombre al fenómeno, la carbonatación lleva al concreto a cambiar su pH a un 8.0-9.5 lo que ya no permite que la estabilidad en el intercambio de energía sea posible, y así, la capa protectora se pierde y comienza el proceso de corrosión en el acero. Algunos factores que permiten la carbonatación son, la composición y relación del cemento, compactación, condiciones de curado y las condiciones ambientales.

Cloruros: Existen partículas cargadas eléctricamente, de cloro, conocidas como iones cloruro, o anión cloruro, que proceden del Cloruro de sodio disuelto en agua, que se encuentran en ambientes marítimos, tanto agua como aire. Estos iones cloruro avanzan desde el exterior hasta el centro del concreto donde se encuentra el acero, una vez llegan al acero, se acumulan hasta alcanzar una concentración crítica, concentración que rompe la estabilidad de la capa pasiva, y una vez rota como ya se ha dicho, comienza el proceso de corrosión en el acero.

Cabe aclarar que no porque el cemento contenga cloruros, significa que se presentara corrosión, esta empieza dependiendo de la concentración de cloruros, existen normativas que presentan los límites de concentración.

Tabla 2.1 Limites de concentración de cloruros para concretos reforzados

PAIS	NORMA	LIMITE MAS DE C1 ⁻	REFERIDO A
USA	AC1 318	≤ a 0.15% en ambiente de C1	cemento
USA	AC1 318	≤ a 0.3% en ambiente normal	cemento
USA	AC1 318	≤ a .1% en ambiente seco	cemento
INGLATERRA	CP-110	≤ a 0.35% al menos en un 95%	cemento
AUSTRALIA	AS 3600	≤ al 0.22%	cemento
NORUEGA	NS 3474	≤ al 0.6%	cemento
ESPAÑA	EH 91	≤ al 0.40%	cemento
EUROPA	EUROCODIGO 2	≤ al 0.22%	cemento
JAPON	JSCE-SP 2	≤ al 0.6 Kg/m ³ %	hormigón
BRASIL	NBR 6118	≤ al 0.05%	agua

2.5.2 Por su forma

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Corrosión Uniforme: Se refiere a la pérdida generalizada del recubrimiento pasivo del acero, principalmente ocurrida por la carbonatación.

Corrosión localizada: Principalmente presentada por el ataque de cloruros a la capa pasiva del acero de forma puntual. Hay varios tipos de corrosión localizada:

Corrosión por picadura. Se forma por la disolución localizada de la película pasiva.

Corrosión en espacios confinados. Se presenta cuando no existe acceso de oxígeno a la varilla y se crea una celda diferencial que induce a la corrosión.

Corrosión bajo tensión. Se caracteriza por ocurrir en aceros sometidos a severos esfuerzos en un ambiente altamente agresivo, lo que resulta en microgrietas, las cuales al progresar en su crecimiento pueden generar fracturas del metal.

Corrosión por corrientes de interferencia. Resultan de corrientes que no forman parte de la celda electroquímica. (Pt290, 2006).

Corrosión Galvánica: Se presenta cuando hay diferentes tipos de metales en el concreto, puede que esto provoque que no se presente la película protectora característica en alguna sección del metal, lo que generaría una pila de corrosión.

2.6 Tipos de protección contra la corrosión

Hay numerosos sistemas de protección, prevención, o control, contra la corrosión. Se pueden dividir respecto a cómo trabajan en el sistema.

2.6.1 Aislamiento eléctrico del material

El acero es protegido mediante sustancias. Pinturas, resinas o recubrimientos diversos.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Selladores: Existen dos tipos de selladores que son utilizados; selladores penetrantes y selladores superficiales. Los penetrantes donde se incluyen a los compuestos silanos y siloxanos, reaccionan con las paredes porosas de concreto endurecido para crear una superficie no humectable o hidrófoba. Los selladores tipo superficial, formados por materiales epóxicos u aceites, por otra parte, bloquean los poros evitando que se acumule humedad en ellos. La vida útil de los selladores suele ser de 5 a 7 años.

Recubrimientos: El recubrimiento puede ir sobre la estructura de concreto, o directamente sobre el acero. Los recubrimientos son a base de sustancias epóxicas, acrílicas, metacrilatos o uretanos, y actualmente, recubrimientos galvanizados.

El propósito de los selladores y de los recubrimientos, es evitar el paso de humedad a la estructura y con esta el paso de iones agresivos a la interfaz metal-concreto (capa pasivante).

2.6.2 Polarización del mecanismo electroquímico

El propósito del sistema es eliminar el oxígeno disuelto mediante inhibidores (aditivos), los cuales se encargan de disminuir la velocidad de corrosión mediante la polarización uno de los electrodos de la pila de corrosión, algunos inhibidores tienen efecto sobre la reacción anódica y otros sobre la catódica obteniendo el mismo resultado, la protección del acero. Los más utilizados son los aceleradores de fraguado, hidróxidos, carbonatos, silicatos; y los retardadores de fraguado, inorgánicos, Óxido de Zinc, Óxido de Plomo, por ejemplo; y orgánicos como ácidos orgánicos o glicerina.

2.6.3 Utilización de materiales resistentes a la corrosión dependiendo del medio de exposición

El mejoramiento de las propiedades del concreto es un ejemplo, las principales propiedades del concreto que afectan a la corrosión son la

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

permeabilidad, la capacidad de reacción con cloruros y la resistividad eléctrica. Para mejorar la permeabilidad se puede disminuir la relación agua/cemento, tener una buena consolidación del concreto, colocarlo adecuadamente, un curado apropiado; también puede modificarse la permeabilidad utilizando aditivos puzolanicos o polímeros modificadores.

El acero inoxidable es una aleación de acero con metales como el cromo, molibdeno, níquel, manganeso o carbono, en diferentes proporciones y combinaciones de uno o más de estos elementos. Tiene una elevada resistencia a la corrosión ya que los metales antes mencionados tienen gran afinidad con el oxígeno y reaccionan con el formando una capa pasivadora evitando así la corrosión del hierro.

2.6.4 Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión

Estas son las llamadas técnicas electroquímicas, las más utilizadas son tres.

1.- La realcalinización es un tratamiento temporal que incrementa la alcalinidad el concreto cambiando su pH, por medio de un electrolito aplicado al concreto, por los poros, desde el exterior, así este proceso repasa al acero mediante las reacciones electroquímicas que suceden dentro del concreto.

2.- La extracción de iones de cloruro en el concreto, es un técnica electroquímica que permite mantener al acero pasivado mediante la extracción de del ion cloruro, ya que el ion posee una carga negativa, se utiliza un ánodo localizado en el exterior de la estructura para que sea atraído. Esta técnica utiliza el mismo principio que la protección catódica, su diferencia radica en la corriente que ocupa, siendo mayor la utilizada en la extracción de iones.

3.- El principio de la protección catódica nos dice que al unir el acero con un metal más activo, se puede llegar a evitar la corrosión, ya

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

que el acero dejara de actuar como ánodo en toda su superficie y pasara a trabajar como cátodo solamente, mientras el metal más activo se convierte en ánodo.

2.7 Protección catódica

Se le nombra así porque el metal a proteger es obligado a comportarse como cátodo, es decir la zona donde se reciben electrones.

La protección catódica es una técnica utilizada desde 1824, inicialmente utilizada para la protección de los cascos de los barcos, la técnica resulto ser tan provechosa que su uso se trasladó a la protección del acero en las estructuras de concreto por el año 1970.

Es bien conocido que para que el acero se pase o se active, participan condiciones tanto del pH del concreto, como del potencial en la celda electroquímica. La corrosión para efectos prácticos se traduce como la perdida de electrones del metal, formándose así iones metálicos cuya velocidad de reacción dependen de la cantidad de electrones que se pierden.

El propósito primordial de la protección catódica, es proveer al acero de refuerzo los electrones que él mismo pierde, debido al proceso de oxidación, esto mediante que el ánodo descargue la corriente en el electrolito y mientras pierde electrones y se corroe, esos mismos electrones los adquiere el cátodo. El suministro de los electrones se puede realizar por dos vías: 1) Corriente Impresa 2) Ánodos de sacrificio.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

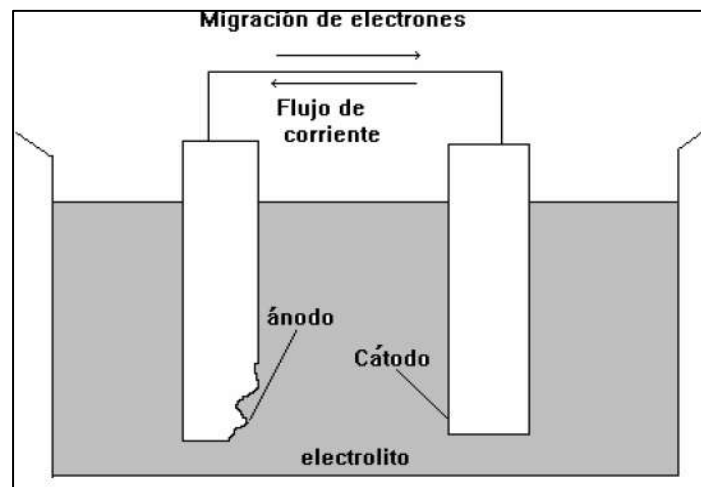


Figura 2.2. Celda Electroquímica

Los ánodos utilizados se escogen en función de sus propiedades y del medio en que serán colocados. Un metal que se pueda considerar como buen ánodo debe de presentar ciertas características como:

- Bajo consumo.
- Densidad de corriente drenada elevada.
- Pequeñas dimensiones.
- Baja resistividad.
- Buena resistencia mecánica.

2.7.1 Corriente impresa

La forma de trabajar de este sistema es mediante la aplicación de

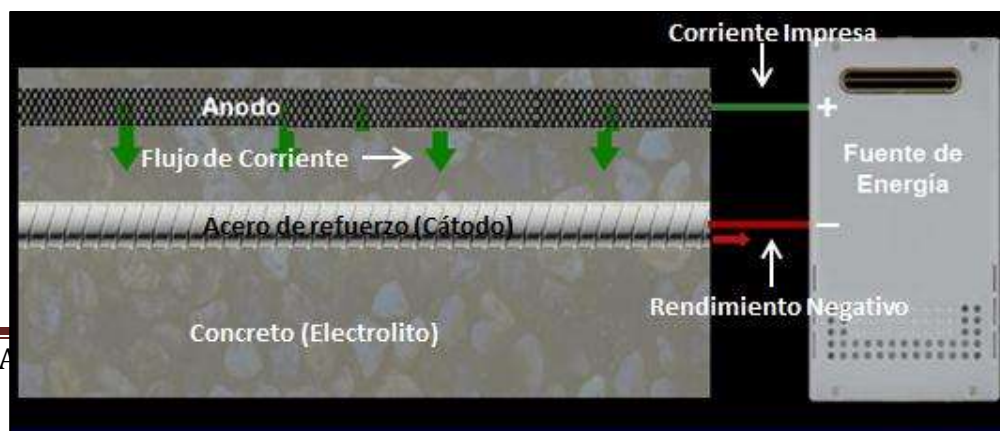


Figura 2.3. Protección Catódica por Corriente Impresa

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

corriente externa, de suministro continuo y de bajo voltaje, que le permita al acero mantener la capa pasivante, forzando a la superficie del acero a que reciba los electrones de la corriente de polarización. La fuente de corriente tiene dos terminales una que indica el polo positivo (ánodo) y una que indica el polo negativo (cátodo). La terminal positiva se conecta al ánodo localizado a cierta distancia del acero que se desea proteger, y la terminal negativa se conecta a la estructura metálica que se desea proteger, para que el sistema funcione es indispensable la existencia de un electrolito, que completa el circuito y que es por donde pasa la corriente.

2.7.2 Ánodos de sacrificio

El sistema funciona gracias a la diferencia en la actividad química de los metales que se escogen como ánodo y cátodo. Esta diferencia se explica en la serie electromotriz que es una tabla que toma en cuenta las diferentes reacciones electroquímicas que involucran a los metales y a sus cationes simples, o sea reacciones que solo dependen del potencial, respecto a una reacción de referencia, en este caso es la reacción del hidrogeno ($2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$), cuyo valor de potencial es arbitrario y es cero.

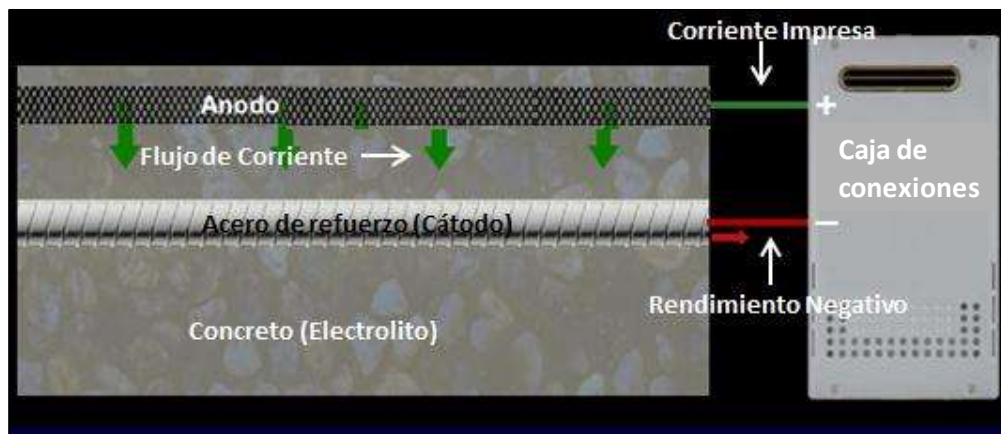
Tabla 2.2 Serie Electromotriz

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Reacción en equilibrio	E _H (volts)
$\text{Au}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Au}$	+ 1.7
$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$	+ 1.23
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pt}$	+ 1.20
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Hg}$	+ 0.85
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+ 0.80
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+ 0.34
$2\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{H}$	+ 0.00 por definición
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pb}$	- 0.13
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	- 0.25
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cd}$	- 0.40
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	- 0.44
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Cr}$	- 0.70
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	- 0.76
$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ti}$	- 1.63
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Al}$	- 1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$	- 2.38

El sistema de ánodos de sacrificio aprovecha a los elementos que se encuentran por debajo del acero en la serie, que son los metales que son más activos que el acero. Así se conectan eléctricamente ambos elementos dentro de un electrolito provocando que la reacción de oxidación del metal más activo aporte los electrones al acero, obligándolo a establecer una reacción de reducción y así mantenerse con estado de oxidación cero.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO



Fura 2.4. Protección Catódica por Ánodos de Sacrificio

2.7.3 Casos de protección catódica en México

El puente de la Unidad en el estado de Campeche es un caso muy conocido y estudiado respecto al deterioro producido por la corrosión. Construido en 1982, cuenta con 3.2 Km de longitud, compuesto por 108 claros de 30 m entre los ejes de apoyo, formado por 5 trabes AASHTO tipo IV, con una losa de rodamiento de concreto reforzado colocada sobre losetas fijas de concreto presforzado, la superestructura se apoya en 109 cabezales de concreto reforzado, cimentados en forma profunda con pilotes de concreto reforzado hincados por percusión.

Para la rehabilitación del puente de la Unidad se utilizaron tres sistemas de protección:

- Protección Catódica por medios de Ánodos de Sacrificio Galvashield XP.
- Metalizado de Zinc.
- Encapsulamiento Avanzado en Pilotes A P E Grout.

Los tres sistemas son altamente funcionales y aptos para combatir la corrosión cuando son bien empleados en la finalidad que cada uno tiene.

Siendo el método de protección catódica, más funcional como sistema correctivo que preventivo, y al utilizarse en el caballete 35, donde los pilotes que lo conformaban se encontraban en buen estado y no era necesaria la reparación con ánodos, no se pudo observar que el sistema funcionara.

En el caso del metalizado de zinc se obtuvo una mayor protección catódica, ya que este sistema recubre en su totalidad las zonas donde es aplicado, sin embargo en los pilotes donde se utilizó (el caballete 20) no cubrieron las zona

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

de mareas, siendo esta la zona más expuesta a los agentes que producen la corrosión. Se debió de utilizar antes de que los pilotes fueran hincados y fijados.

El sistema A P E Grout resulto ser el más adecuado en el puente de la Unidad para la rehabilitación de la zona de mareas, sin embargo este sistema fue utilizado en el exterior del pilote cuando, los pilotes altamente afectados por la corrosión debían de ser rehabilitados desde el interior, esto en conjunto con la deficiencia al colocar el sistema de protección, hizo que en su conjunto no funcionara.

2.8 Sistema de protección catódica “Life Jacket”

El laboratorio de materiales del Instituto Mexicano del Transporte llevo a cabo una evaluación del desempeño de un sistema de protección catódica, aplicada en subestructuras de puentes o muelles de concreto.

Este sistema de protección lo podemos dividir en tres partes, metalizado de Zn en la zona aérea, encamisado con fibra de vidrio y malla de Zn en la zona de mareas, y ánodos bulk de Zn en la zona sumergida, esta evaluación se llevó a cabo en un ambiente controlado.



Figura 2.5. Esquema del sistema de PC Life Jacket

La evaluación dio resultados positivos tanto en la zona aérea, como en la zona sumergida, siendo la zona de mareas, la más afectada debido a la constante acumulación de cloruros, la que presento resultados ineficientes.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Los resultados presentados dieron a conocer que la malla de zinc se pasivo, esto se relacionó al tipo de mortero comercial utilizado en el encamisado. Para corroborar ese punto se le hizo pruebas de resistividad al mortero, estos resultados arrojaron que la resistividad del mortero se encontraba muy por encima de los 5 k Ω -cm, impidiéndose la conducción de iones en el mortero, y ya que el fundamento de la PC es la corriente de iones en el mortero, esto da por resultado una baja eficiencia en el sistema.

Para poder disminuir la resistividad es necesario utilizar adiciones que permitan aumentar su conductividad eléctrica al mortero utilizado en el relleno de la camisa de fibra de vidrio y la malla de zinc.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Pruebas físicas del mortero

Un mortero es una mezcla de cemento-arena-agua, antes de realizarse se verifica que el agregado fino cumpla con ciertos criterios.

3.1.1 Granulometría

La prueba de granulometría sirve para conocer la distribución de diámetros de las partículas y así conocer los cambios significativos en el agregado, ya que cambios muy grandes repercuten en la demanda de agua y en consecuencia en la trabajabilidad del mortero.

Tabla 3.1. Especificaciones de granulometría según Bureau Of Reclamación ASTM.

Malla	% que pasa
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10

Recomendaciones y especificaciones: el porcentaje referido de dos mallas sucesivas no debe de ser mayor a 45%.

3.1.2 Absorción del agregado fino

Sirve para conocer el volumen del agregado excluyendo los vacíos que existen entre las partículas, esto nos sirve principalmente para conocer las relaciones agua-cemento o proporcionamientos que podrá tener la mezcla.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

3.1.3 Impurezas Orgánicas

Sirve para determinar el contenido de materia orgánica en una arena, ya que la materia orgánica afecta la calidad de la mezcla y del mortero una vez colocado.



Figura 3.1. Criterio de color basado en el Hellige Tester (ASTM c-40)

3.1.4 Peso Volumétrico Seco Suelto

Sirve para determinar el peso por unidad de volumen del agregado fino cuando el acomodo de sus partículas es en forma natural o libre, esto sirve para determinar la cantidad necesaria para el proporcionamiento.

3.2 Proceso de fabricación de cubos de mortero y prismas

Para la realización del mortero que se utilizaría para los cubos y los prismas, se le hicieron varias pruebas a los agregados

- Granulometría del agregado bajo la norma ASTM C 33
- Absorción del agregado fino bajo la norma ASTM C 128
- Impurezas orgánicas bajo las normas ASTM C 40/ ASTM D 1544
- Gravedad específica bajo la norma ASTM C 128
- Peso Volumétrico Seco Suelto

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

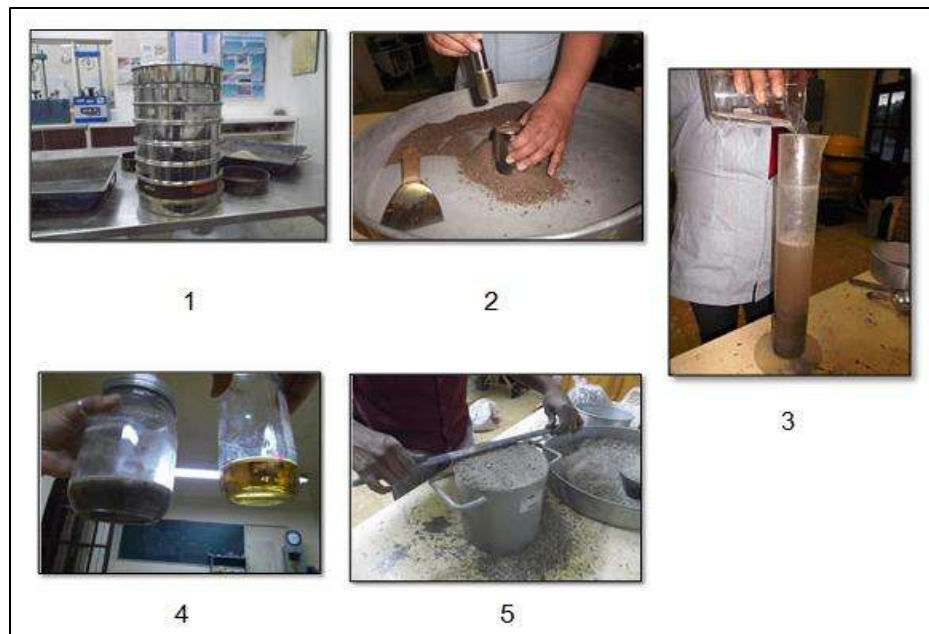


Figura 3.2. Pruebas realizadas a los agregados, 1) Granulometría del agregado, 2) Absorción del agregado fino, 3) Impurezas orgánicas, 4) Gravedad específica, 5) Peso Volumétrico Seco Suelto

A la mezcla

- Índice de fluidez bajo las normas ASTM C 230/ ASTM C 230 M/ ASTM C 305/ ASTM C 11437
- Diseño de mezcla bajo la norma ASTM C 109
- Mezclado mecánico bajo la norma ASTM C 305



Figura 3.3. Prueba de Índice de fluidez

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

3.2.1 Fabricación de Cubos 5x5x5

Para la inclusión de los materiales conductores, zinc, alúmina y carbón, como aditivos, se generó una matriz cúbica, tomando en cuenta variables como la humedad y la relación agua-cemento.

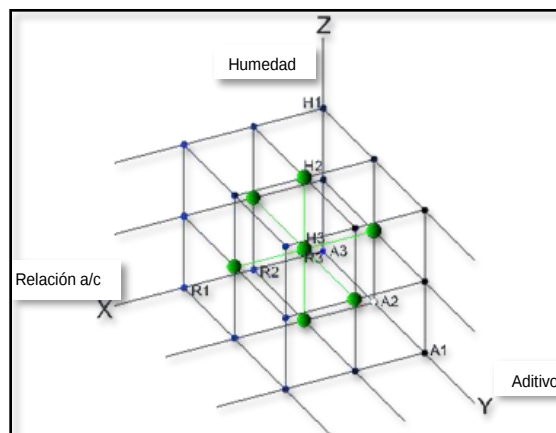


Figura 3.4. Matriz de Variables

De las combinaciones resultantes de la matriz de variables se eligieron algunos puntos aleatoriamente, de acuerdo con la literatura citada se mencionan porcentajes de adiciones conductivas las cuales se toman como referencia, y así se propuso la adición de 0.5%, 1.0% y 2.0% por peso de cemento. (Duran Mejía, 2015).

Se colocó la primera capa de mortero un poco arriba de la mitad del molde de cubos de (5 cm x 5 cm). Se apisonó la capa con 32 golpes, cada serie de 8; en la segunda y cuarta serie los golpes se dieron perpendiculares a la primera y tercera serie. En seguida de apisonar se enrasó bien y se colocó en la mesa de vibrado para quitar el aire atrapado finalmente se pasó el borde recto de la cuchara de albañil y se quitaron los excedentes, se desmoldó después de 24 horas.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Después de desmoldar, se colocaron los cubos en recipientes con una rejilla en la parte inferior con un nivel de agua para mantener la humedad dentro del recipiente, se mantuvieron dentro del mismo hasta cumplir con la edad de ensaye que fue de 28 y 60 días.

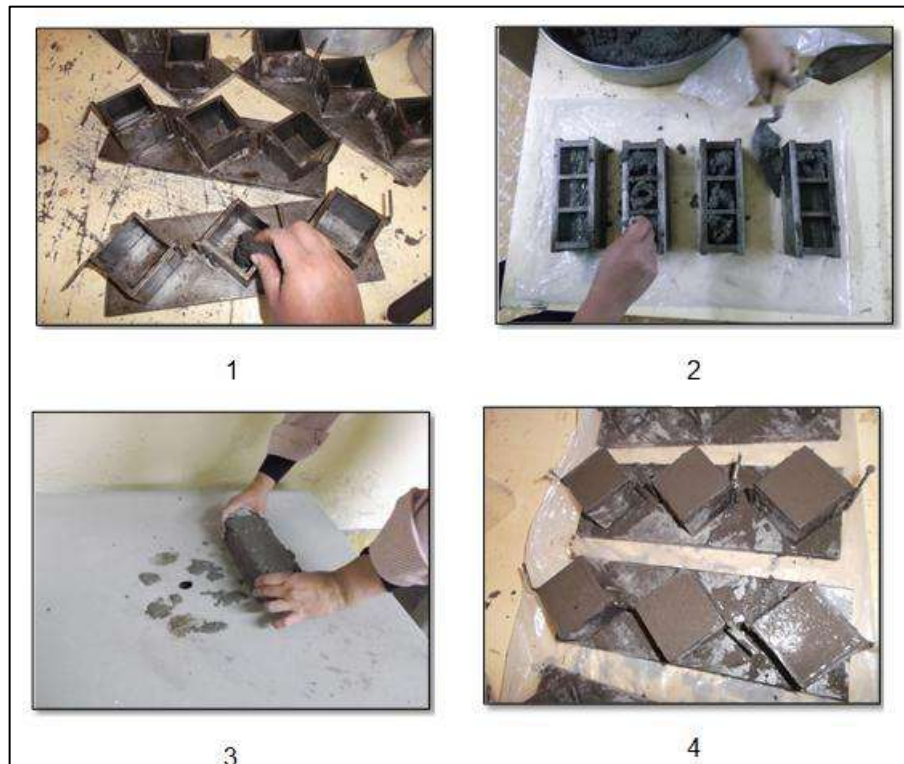


Figura 3.5. Procedimiento de preparación de cubos 1) Moldes engrasados, 2) Apizonamiento, 3) Vibrado de mortero, 4) Cubos

Después de cumplir los días de 28 y 60 días de curado los cubos se sometieron a secado al horno a una temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 5$ hasta llegar a peso constante, posteriormente al secado se saturaron los cubos hasta llegar a 100%, de igual manera hasta llegar a peso constante.

3.2.2 Fabricación de prototipos SPC

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Para la fabricación de los prototipos de SPC, que simularán los encamisados, se utilizaron recipientes de plástico con diámetro de 26.7 cm con una altura de 15 cm a los que se les retiro el plastico de la base.

El mortero protege a unas probetas cuyas dimensiones son 9 x 15 x 25 cm con dos varillas, se obtuvo el área exterior de las varillas a proteger:

$$A = 2\pi rh$$

Diámetro de varilla = 3/8", altura = 30 cm

$$A\text{-varilla} = 89.77 \text{ cm}^2$$

$$A\text{-zinc} = 89.77 = 2\pi (0.15)h$$

La h necesaria para proteger una varilla es: 95.25, por dos varillas = 190.5 cm, así se obtuvo la cantidad de alambre de zinc para cada probeta.

Para facilitar el monitoreo los prismas fueron señalados de la siguiente manera:

- 2 prismas de Zinc 0.5% con las varillas 15-16 y 11-12.
- 2 prismas de Alúmina 1% con las varillas 17-18 y 13-14.
- 2 prismas de Grafito (carbón) 1% con las varillas 7-8 y 9-10.



Figura 3.6. Prismas con camisa de reparación con mortero adicionado con alúmina al 1%, grafito al 1% y zinc al 0.5%

3.3 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad que se encuentra en todos los materiales, su unidad de medida empleada el $k\Omega \cdot cm$ u $\Omega \cdot m$, y como su nombre bien lo insinúa, es una propiedad que indica la resistencia que el material tiene a la electricidad, impermeabilidad, podría ser un sinónimo.

Siendo la resistividad eléctrica una de las propiedades que permite la corrosión, la resistividad de los morteros ha despertado interés. En los morteros la resistividad se ve afectada por factores como el tipo de cemento empleado, la relación agua-cemento, la forma de aplicación, entre otras.

Material utilizado:

- Medidor de resistividad eléctrica marca Nilsson.
- Bernier con precisión de décimas.

Se colocó una cara del espécimen sobre una esponja saturada puesta sobre una placa de acero galvanizado, la cara superior también tiene una esponja saturada puesta y otra placa, ambas placas soportan el espécimen mientras los cables del medidor de Resistencia van conectados para someterse a una corriente dada (I) para regular el voltaje (V).

El medidor solo nos arroja medidas de resistencia, por lo que para obtener la resistividad necesitamos calcularla mediante la fórmula 1.

$$\rho = \frac{A_{Prom}}{L_{Prom}} \times R_e$$

Dónde:

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

- ρ es la resistividad eléctrica en ohm-m.
- R_e es la resistencia eléctrica en ohms.
- A es el área promedio en m^2 .
- L es la longitud promedio en m.

Cavalier y Vassie han realizado extensos trabajos sobre la relación de la resistividad del concreto con la corrosión de sus partes de acero. Se presenta a continuación

Tabla 3.2 Interpretación de las mediciones de resistividad de Cavalier y Vassie

Resistencia del concreto Ω - cm	Pronostico de corrosión del acero de refuerzo
Mayor a 12000	No se encuentran indicios (normalmente)
Entre 5000-12000	Probable
Menor a 5000	Casi seguro

3.4 Velocidad de pulso ultrasónico

Es un ensayo no destructivo que se enfoca en la homogeneidad del concreto, detecta las fallas internas características del mortero como son los poros, fallas, fisuras, etc.

La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia del viaje, a través del mortero, de una onda ultrasónica (o impulso eléctrico) y el tiempo que tarda en recorrerla. Existen varios criterios de evaluación como se muestra a continuación.

Tabla 3.3. Criterios para evaluar velocidad de pulso ultrasónico (VPU), ASTM C-597, 2009.

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del hormigón
<2000	Deficiente

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

2001 a 3000	Normal
3001 a 4000	Alta
>4000	Durable

Se comenzó la prueba calibrando el aparato usando la barra de referencia, o dispositivo equivalente del equipo. Para esta prueba se realizó la medición por transmisión directa.

Se colocó y presionó las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, considerándose satisfactorios cuando se obtuvo un valor mínimo de lectura como variación de $\pm 1\%$. Una vez verificada la barra de patrón se procedió con los cubos de mortero utilizando el mismo procedimiento, para que haya contacto entre la barra y los cubos se aplicó alcohol en gel y por último se registró el valor obtenido. El equipo nos arrojó el tiempo en m/s.

Fórmula 3 sirve para la obtención de la velocidad de propagación de ondas:

$$v = \frac{l}{t}$$

Dónde:

- V es la velocidad de propagación (m/s).
- L es la distancia entre los puntos de acoplamiento.
- T es el tiempo recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción.

3.5. Porcentaje total de vacíos

El espacio vacío o porosidad en el mortero se presenta por la evaporación del exceso del agua a la hora de elaboración, o el aire encapsulado que obtuvo a la hora de su manipulación. Este fenómeno afecta seriamente la permeabilidad del

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

concreto. Las propiedades físicas del mortero como la resistencia a la compresión y la durabilidad también se ven inversamente afectadas respecto a la porosidad.

Los poros pueden ser cerrados u ocluidos y se pueden clasificar en tres variedades; los que se hallan alrededor de 100 nm o poros de gel, los que van de 100 nm hasta 105 nm o poros capilares, y los que van desde 105 μ m o mayores, que se denominan poros de aire o grandes poros.

Los poros cuyo tamaño afectan al mortero son los que su tamaño es superior a los 120 nm, hay que tomar en cuenta que hay poros que por el contrario su presencia no significa nada, como los poros discontinuos, los poros que contienen agua absorbida y aquellos que aunque sean de considerable tamaño tienen una entrada estrecha.

Tabla 3.4. Criterios para evaluar porcentaje total de vacíos (ASTM C642, 2006).

Porcentaje total de vacíos	Características del hormigón
$\leq 10\%$	Buena calidad y compacidad
10%-15%	Moderada calidad
$> 15\%$	Inadecuada durabilidad

Para la obtención de total de vacíos se necesitan tres distintos pesos de los cubos de mortero

- Peso saturado, que se obtiene cuando la muestra alcanza un peso constante mientras se satura de agua
- Peso sumergido, que se obtiene cuando la muestra saturada es pesada en una pesa hidrostática
- Peso seco, que se obtiene cuando la muestra alcanza un peso constante de secado, en un horno, a 50°C, esto, porque a mayores temperaturas, como 150°C, la muestra podría sufrir alteraciones a nivel microestructural, afectando así los resultados de las pruebas.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Fórmula 2 sirve para la obtención del porcentaje total de vacíos:

$$\text{Porcentaje total de vacíos} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}}$$

3.6 Porosidad efectiva o absorción capilar

Una vez que los cubos de mortero alcanzaran peso constante en el horno a una temperatura de $50^{\circ}\text{C} \pm 5$, se procede con la prueba de porosidad efectiva o absorción capilar. Después de registrar su peso inicial, W_0 , la muestra se colocó sobre una esponja en el interior de un recipiente de fondo plano, se tuvo cuidado de que el nivel de agua quedara a 5 mm por encima de la parte inferior del cubo de 5x5x5 cm. Previamente, los cubos fueron cubiertos con parafina al 80% y urea al 20%, esto para que el líquido tuviera mejor adherencia al mortero y mejor manejabilidad al cubrirlo, en las áreas laterales del espécimen.

El cambio de peso ($W_t - W_0$) de la probeta por unidad de área expuesta del espécimen, se registró a intervalos de tiempo de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 60 min, 120 min, 240 min, 360 min, y cada 24 hrs.

La fórmula 4 sirve para calcular la absorción capilar:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \left(\frac{mm}{h^{1/2}} \right) o \left(m / s^{1/2} \right)$$

Donde m es un coeficiente que se obtiene mediante la fórmula 5:

$$m = \frac{t}{z^2} \left(s / m^2 \right)$$

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Dónde z representa la profundidad de penetración del agua al tiempo t y se obtiene mediante la fórmula 6 y 7:

$$k = \frac{(W_t - W_0)/A}{\sqrt{t}} \left(\frac{kg}{m^2 s^{1/2}} \right)$$

$$\varepsilon = \frac{k\sqrt{m}}{1000} (\%)$$

Los criterios de evaluación del concreto para determinar si tiene una adecuada durabilidad se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.5. Criterios para evaluar la sorción capilar (ASTM C-642, 2006).

Sorción capilar	Calidad
$S \leq 3 \text{ mmh-1/2}$ ($5 \times 10^{-5} \text{ ms-1/2}$)	Aceptable
$S \geq 6 \text{ mmh-1/2}$ ($1 \times 10^{-4} \text{ ms-1/2}$)	No aceptable

3.7 Resistencia a la compresión

La ultima en realizarse es la prueba de resistencia a la compresión, que es destructiva, al iniciar se verificó que los cubos de muestra de mortero tuvieran superficies perfectamente planas; para que así, la fuerza ejercida entre los platos de la prensa se pudiera distribuir uniformemente. Los testigos que estaban irregulares en sus caras fueron desbastados con lija en la superficie, para así obtener caras regulares y lisas.

La fuerza de compresión a la ruptura del espécimen se obtuvo de la prensa. Posteriormente, para lograr la resistencia a la compresión, esta fuerza ya en Newton, se dividió entre el área del cubo, considerando el área en mm^2 ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$).

La resistencia la compresión se obtiene mediante la fórmula 8:

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde

- F_m es la resistencia a la compresión en psi o (MPa)
- P es la carga máxima total en lbf o (N)
- A es el área de superficie cargada en mm^2

3.8 Potenciales de media celda

El potencial eléctrico es la diferencia de potenciales entre las áreas de media celda anódica y las áreas de media celda catódica. El potencial eléctrico de media celda se puede medir respecto a una celda de referencia, en este caso es muy utilizado el electrodo de Cu-CuSO₄ por su manejabilidad y economía.

Las medidas de potencial eléctrico, son indicativos de la probabilidad de corrosión que tiene el metal en una estructura de concreto.

Tabla 3.6. Criterios generales de las mediciones de potenciales, norma ASTM C876-80

E_{corr} Cu-CuSO₄	Probabilidad de corrosión
Más negativo de -0.35 V	Mayor del 95%
Más positivo de -0.20 V	Menor del 5%
-0.20 V a -0.35 V	Aproximadamente 50%

Esta prueba se realiza mediante un multímetro de alta impedancia interna, se tiene una celda de referencia, muy comúnmente usado el Cu- CuSO₄, el electrodo de referencia se sumerge en el agua con NaCl y se conecta al multímetro, mientras que el cable sensor se coloca ya sea en la barra (para medir el potencial de la barra) o en la malla de zinc (para medir el potencial del zinc),

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

para medir los potenciales en “on” el sistema debe de estar conectado eléctricamente.

Para la medición de potenciales “Off” se procede de la misma manera, pero el sistema debe de estar desconectado, las barras deben de estar desconectadas de la malla de zinc y esperar un par de segundos para tomar la lectura desconectados ambos (ánodo y cátodo). Por ello el nombre es potencial “Instant Off” como se menciona en inglés.

3.9 Corriente galvánica entre ánodo y cátodo

Las lecturas de intensidad de corriente galvánica entre el ánodo y el cátodo, fueron tomadas con un amperímetro digital, con resistencia interna muy baja, conectando el ánodo de zinc a la terminal negativa y el acero de refuerzo a la terminal positiva.

3.10 Decaimiento de depolarización

Técnica electroquímica establecida por la NACE que sirve para evaluar si una estructura está siendo protegida catódicamente.

Existen varios criterios propuestos por la NACE para saber si un sistema de protección catódica está funcionando.

- Que exista un voltaje de -0.85 V respecto a un electrodo de Cu-CuSO_4 saturado.
- Un desplazamiento del E_{corr} de al menos 300 mV en dirección negativa, causado por la aplicación de la corriente de protección catódica.
- Un desplazamiento del E_{corr} de 100 mV en dirección negativa, determinado por la interrupción de la corriente y eliminando la caída óhmica.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

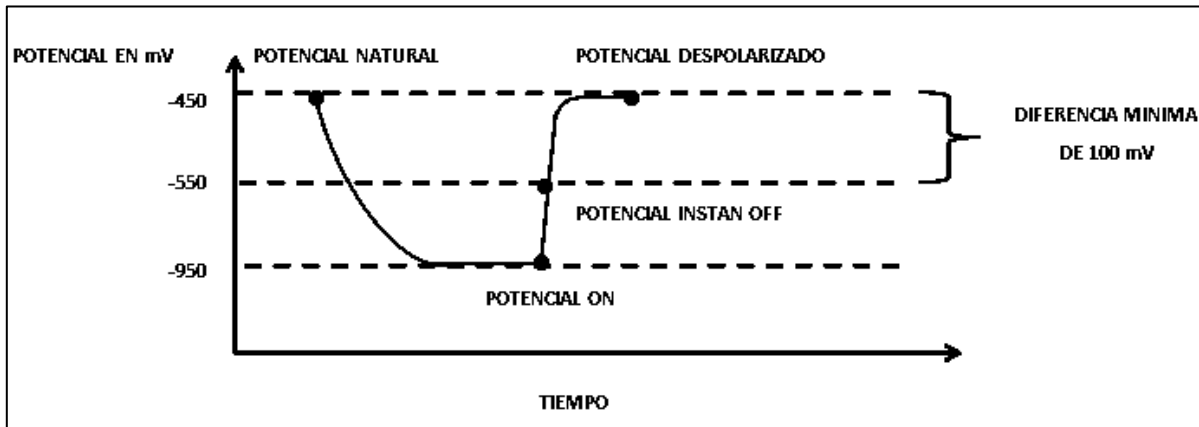


Figura 3.7. Representación de Depolarización

4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Definición de las etapas de esta investigación

Se le realizaron pruebas a los cubos de morteros y a los prototipos de SPC (que simulaban la camisa de reparación) en tres etapas diferentes, en base a las fechas de evaluación:

Primera etapa: no existió conexión entre ánodo (malla de zinc) y cátodo (varillas de refuerzo del concreto) del SPC. Mediciones electroquímicas fueron tomadas desde el día 0 hasta el día 92 aproximadamente.

Segunda etapa: se conectó el ánodo (malla de zinc) con el cátodo (varillas de refuerzo) y se sumergieron en agua al 3.5% de NaCl para simular un ambiente marino y sus mediciones se tomaron a partir del día 386. Se mantuvieron desconectadas desde el día 389 hasta el día 392. Luego se conectaron el ánodo y el cátodo y se monitorearon potenciales y corrientes hasta el día 404.

Tercera etapa: se realizaron las mediciones electroquímicas en los SPC conectados desde el día 756 hasta el día 883. Este es el periodo de mediciones que corresponde a los realizados en esta investigación

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2 Caracterización del mortero

4.2.1 Primera etapa

4.2.1.1 Resultados del agregado fino utilizado en el mortero

Se empezó realizando pruebas al agregado fino que formaría parte de la mezcla del mortero con el que se hicieron los cubos y prismas:

- Granulometría del agregado
- Absorción del agregado fino: 6.57%
- Impurezas orgánicas: Sin sustancias orgánicas perjudiciales para el concreto
- Gravedad específica: 45.15%
- Peso Volumétrico Seco Suelto
- Índice de fluidez: $110 \pm 5\%$

Tabla 4.1. Granulometría del agregado fino.

Malla	Malla en mm	Retenido gr	% retenido	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00	100.00
4.00	4.75	4.55	0.82	0.82	99.18
8.00	2.36	76.52	13.78	14.60	85.40
16.00	1.18	163.39	29.43	44.03	55.97
30.00	0.60	136.97	24.67	68.71	31.29
50.00	0.30	86.93	15.66	84.36	15.64
100.00	0.15	39.74	7.16	91.52	8.48
200	0.075	11.96	2.15	93.68	6.32
Pasa 200		35.10	6.32	100.00	0.00

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

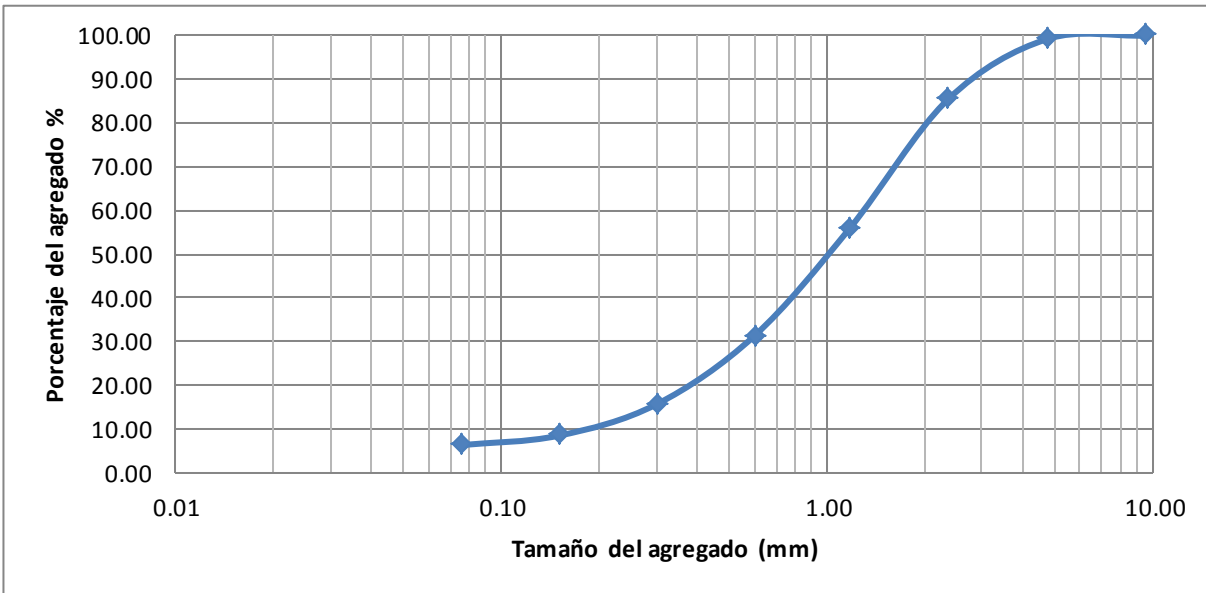


Figura 4.1. Curva granulométrica de agregados finos

4.2.1.2 Resistividad eléctrica

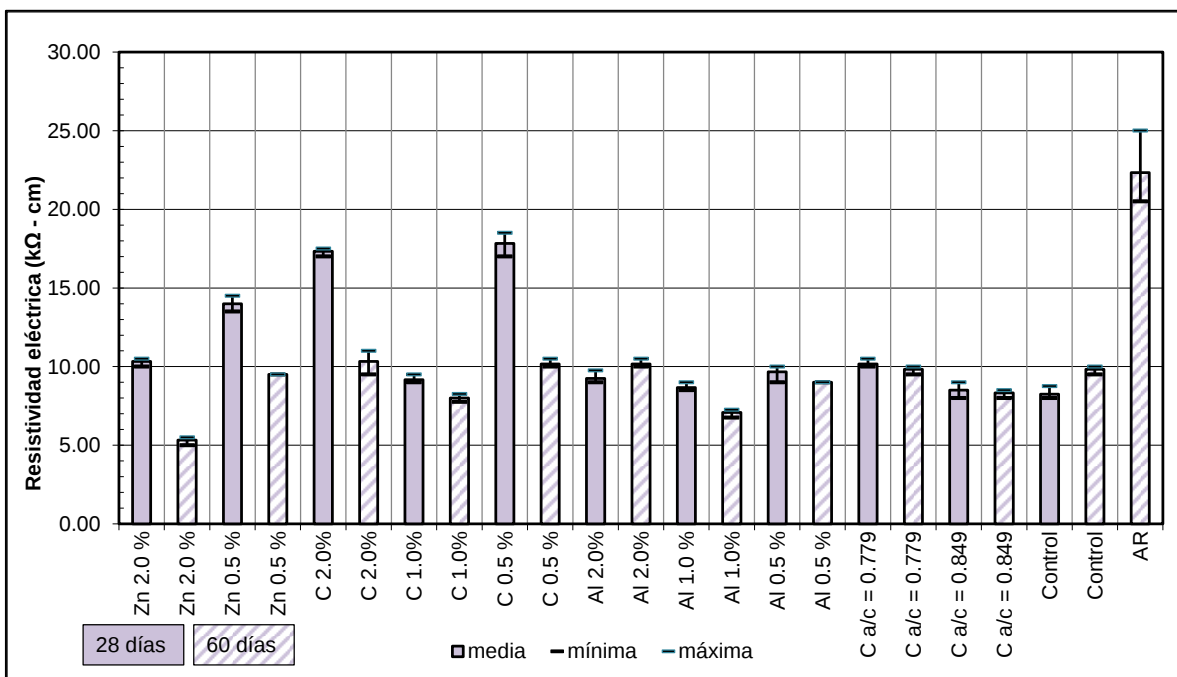


Figura 4.2. Resistividad eléctrica, Zn =adición de zinc, Al= adición de alúmina, C=adición de carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

En la Figura 4.2 se muestran los resultados promedios de tres especímenes (con la misma adición y en la misma cantidad en porcentaje), a 28 días de curado y 60 días en un ciclo de sacado-húmedo. El promedio obtenido entre las mezclas que muestra una mejor conductividad fue la mezcla de alúmina al 1.0% la cual presentó el valor más bajo de entre todos. Enseguida le siguió el valor para la mezcla de carbón a 1.0% y la otra es carbón a 1.0% con relación a/c de 0.849, aunque esta última no mostró diferencia en los valores promedio obtenidos a los 28 o a los 60 días de curado. Las mezclas con 0.5% y 2.0% con adición de zinc, mostraron una expansión en la cara donde no tenía restricción del molde, al desmoldarse mostró ese comportamiento aunado con pequeñas grietas. Aunque muestre un mejor resultado de la resistividad eléctrica húmeda en relación a las demás mezclas, no se puede tomar como confiable debido a esta reacción que surgió.

4.2.1.3 Porcentaje total de vacíos

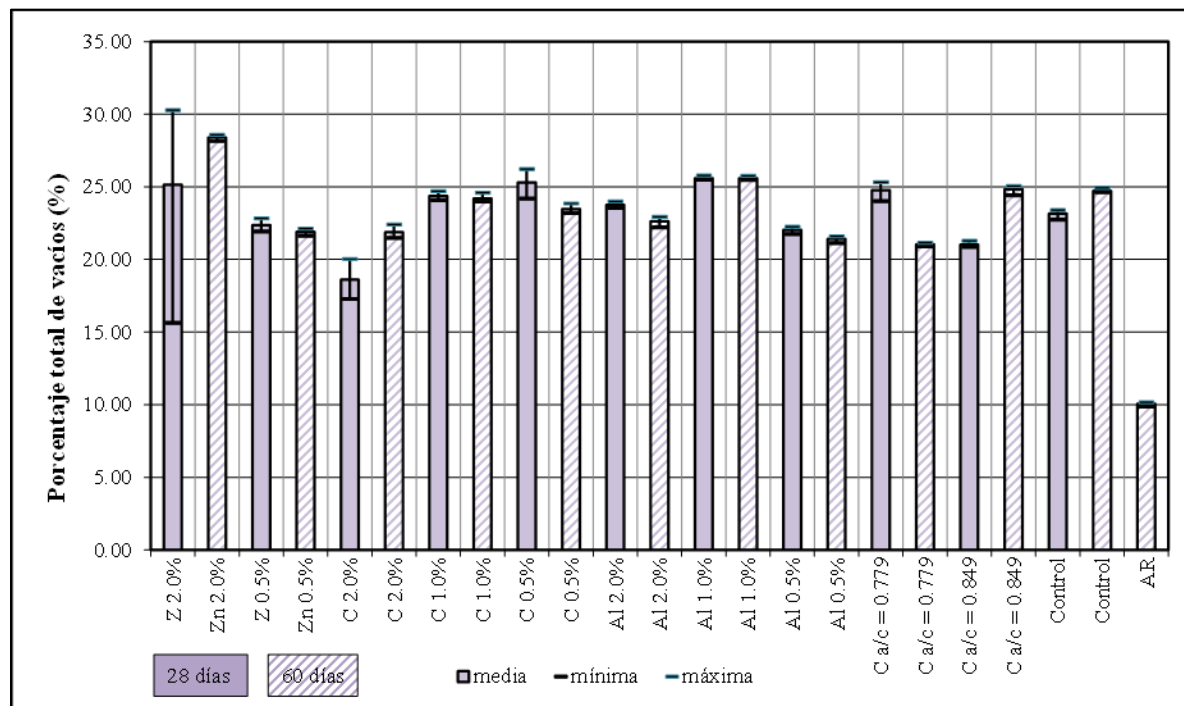


Figura 4.3. Porcentaje total de vacíos, Zn = zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Tomando en cuenta que uno de los factores que afecta la resistividad eléctrica es la porosidad del material, se observó que los morteros que presentaron baja resistividad eléctrica, como el mortero con adición de alúmina al 1% tienen como característica, una elevada porosidad siendo el caso contrario con el mortero AR que presento una baja porosidad mientras que su resistividad era la más alta.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.1.4 Velocidad de pulso ultrasónico

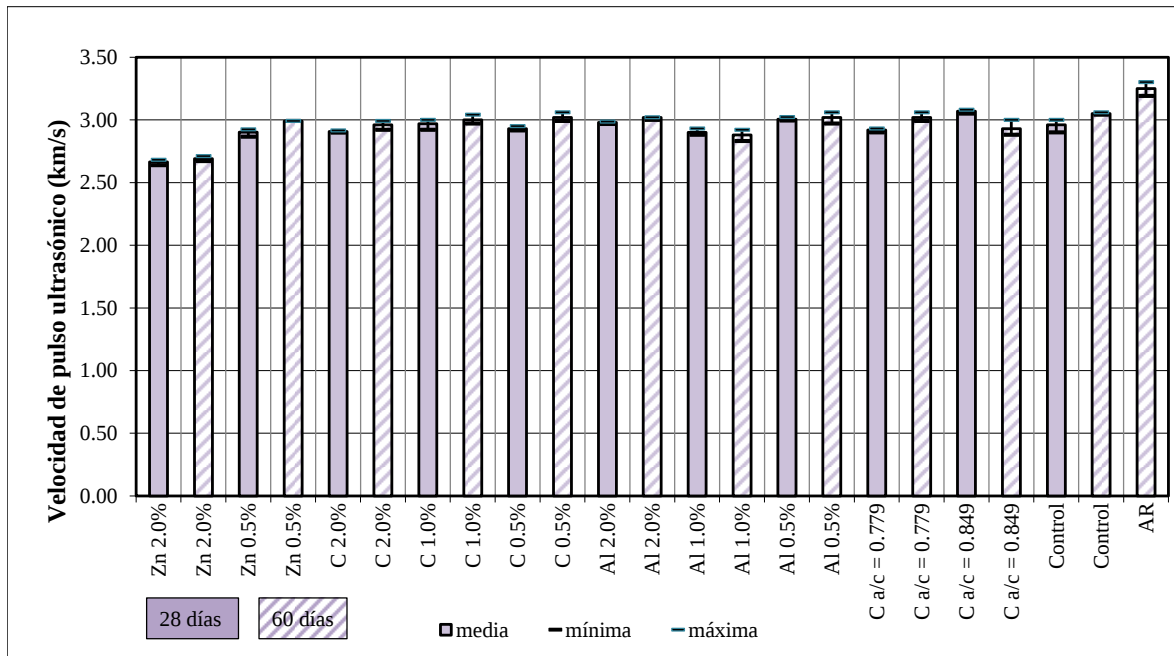


Figura 4.4. Velocidad de pulso ultrasónico, VPU, Zn = de zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena

Se observó una homogeneidad entre las mezclas, ya que como se puede ver los resultados de VPU no mostraron diferencias comparables entre la mezcla del mortero AR, la mezcla control y las mezclas con las adiciones.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.1.5 Porosidad efectiva

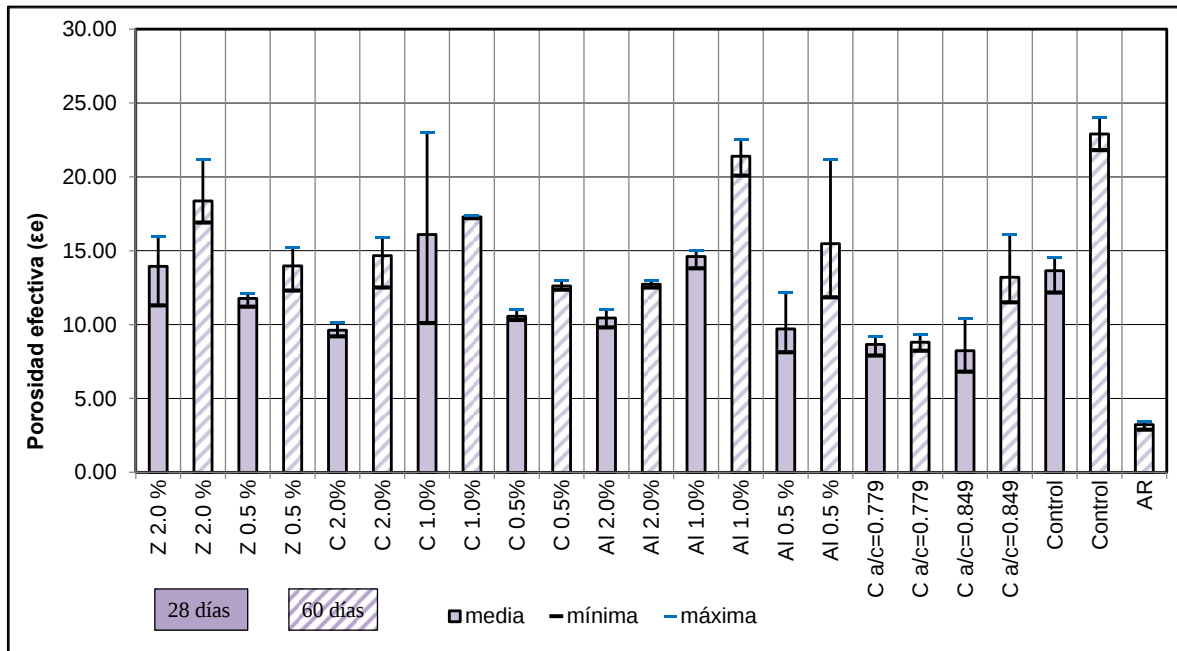


Figura 4.5. Porosidad efectiva, Zn = de zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena. Porcentajes corresponden a la cantidad de la adición vs contenido de cemento

Se muestra la existencia de una mayor porosidad en los cubos de control en ambas edades de curado (que corresponden edades de 83 y 121 días después de la fecha de fabricación). Sus valores aumentan de 13.64% a 22.90%, enseguida la mezcla de alúmina con 1.0% en peso de cemento tuvieron valores promedio de 14.6% a 21.4% (correspondiente a 83 y 109 días después de ser fabricadas).

En esta investigación lo que nos interesa es que haya conductividad, por lo tanto más poros.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.1.6 Resistencia a la compresión

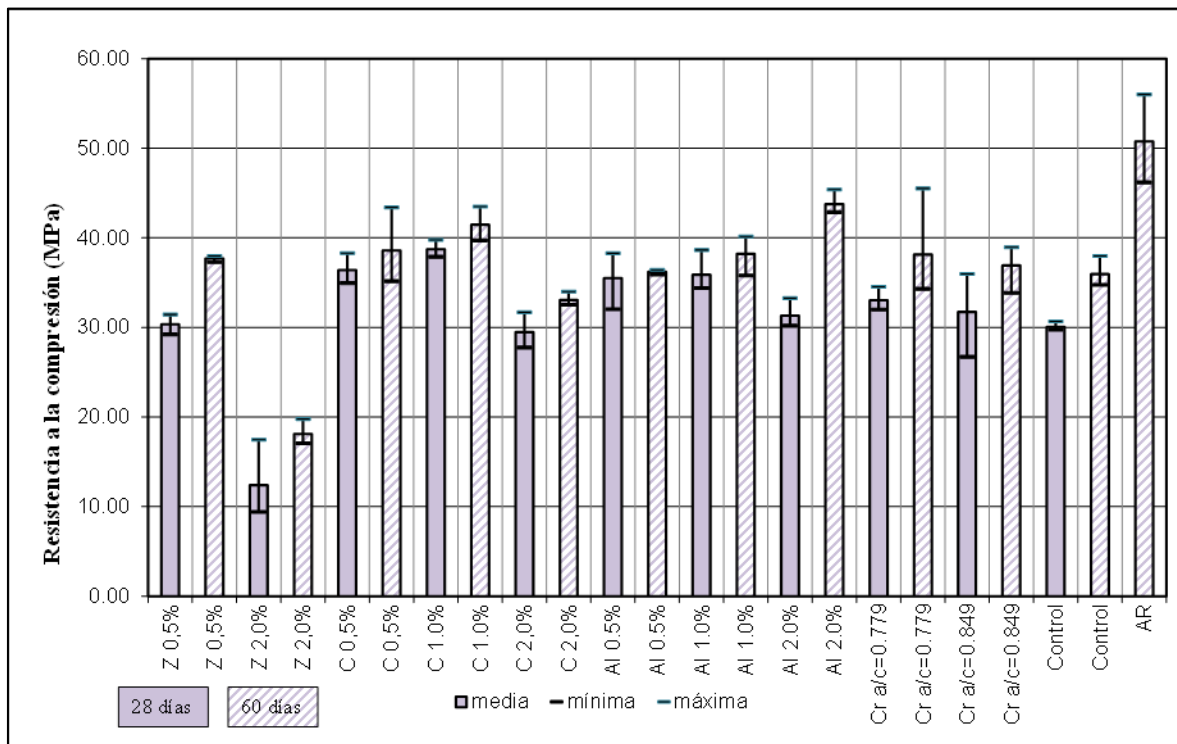


Figura 4.6. Resistencia a la compresión, Zn = de zinc, Al = alúmina, C = carbón, AR = mortero comercial y Control = mezcla cemento-agua-arena. Porcentajes corresponden a la cantidad de la adición vs contenido de cemento.

Esta prueba se realizó para complementar la caracterización aunque no sea relevante para el estudio. Los valores que se obtuvieron oscilan entre 30 y 40 MPa en promedio, la diferencia que se marca es en el 2.0% de adición de zinc que es el mortero que más se expandió por lo tanto sufrió más grietas y por ende tiene menos resistencia a la compresión.

La mezcla que sobresale considerablemente es la mezcla de alúmina al 2.0% de una fecha a otra cambia considerablemente. Mientras que la mayoría de las mezclas sobrepasan la mezcla de control

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

El mortero AR tiene la mayor resistencia a la compresión, cabe destacar que este si tiene función estructural.

4.2.2 Segunda etapa

4.2.2.1 Resistividad eléctrica

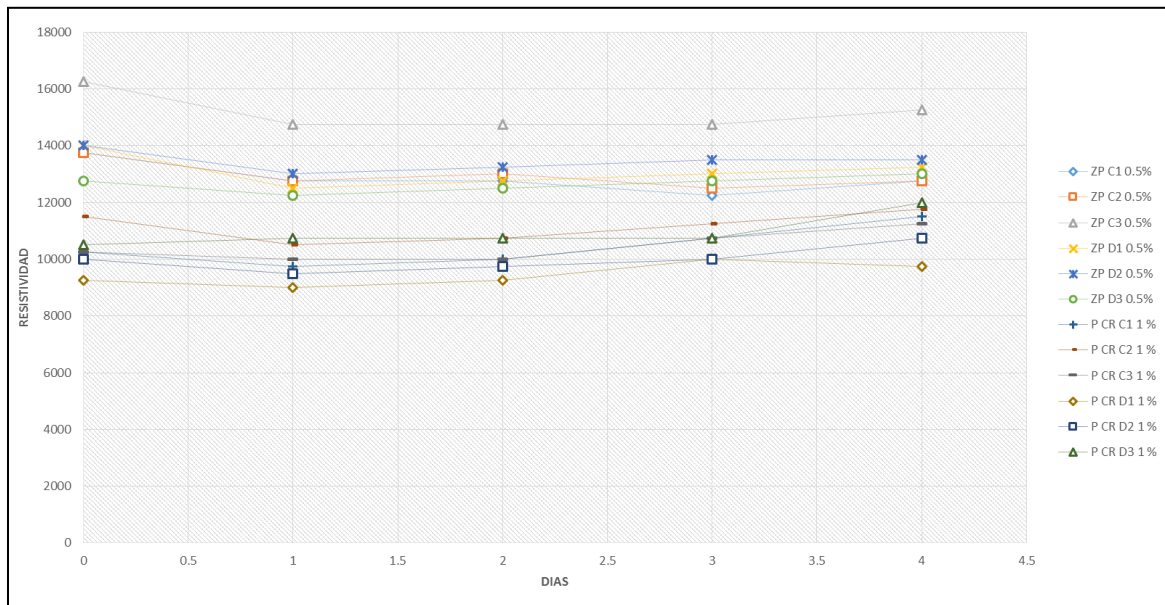


Figura 4.7. Resistividad eléctrica, Zp =adición de zinc, P CR =adición de carbón.

En la imagen se muestran los resultados de 6 especímenes (con la misma adición y en la misma cantidad en porcentaje). El promedio obtenido entre las mezclas que muestra una mejor conductividad fue la mezcla de grafito al 1.0% la cual presentó el valor más bajo de entre todos.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico

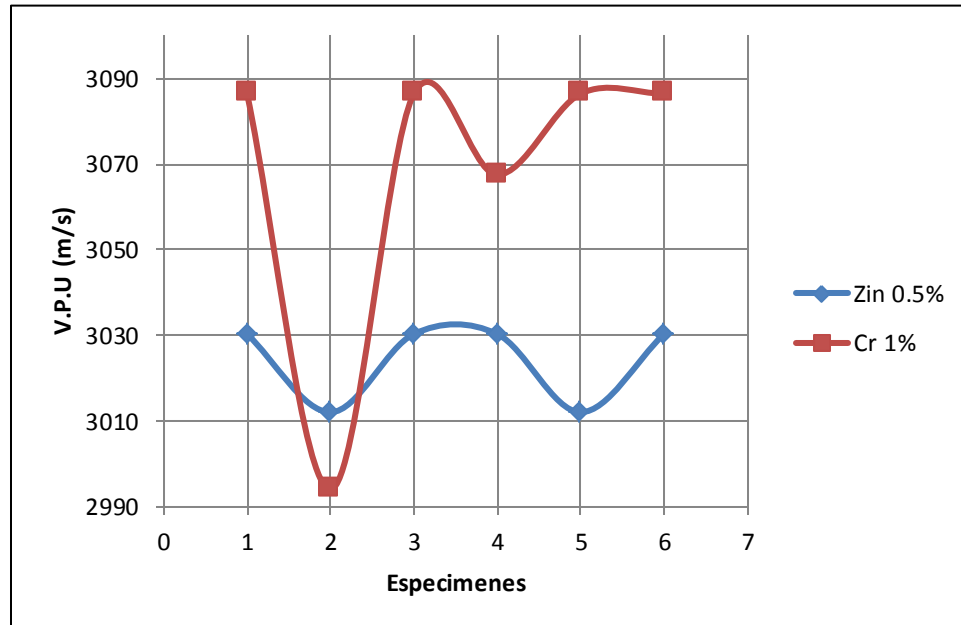


Figura 4.8. Velocidad de pulso ultrasónico, Zp =adición de zinc, P CR =adición de carbón.

Se observó que el mortero con adición de Zinc al 0.5% tiene valores más bajos que el mortero con adición de grafito al 1% lo que hace que el mortero adicionado con zinc sea el más poroso.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.3 Tercera etapa

4.2.3.1 Resistividad

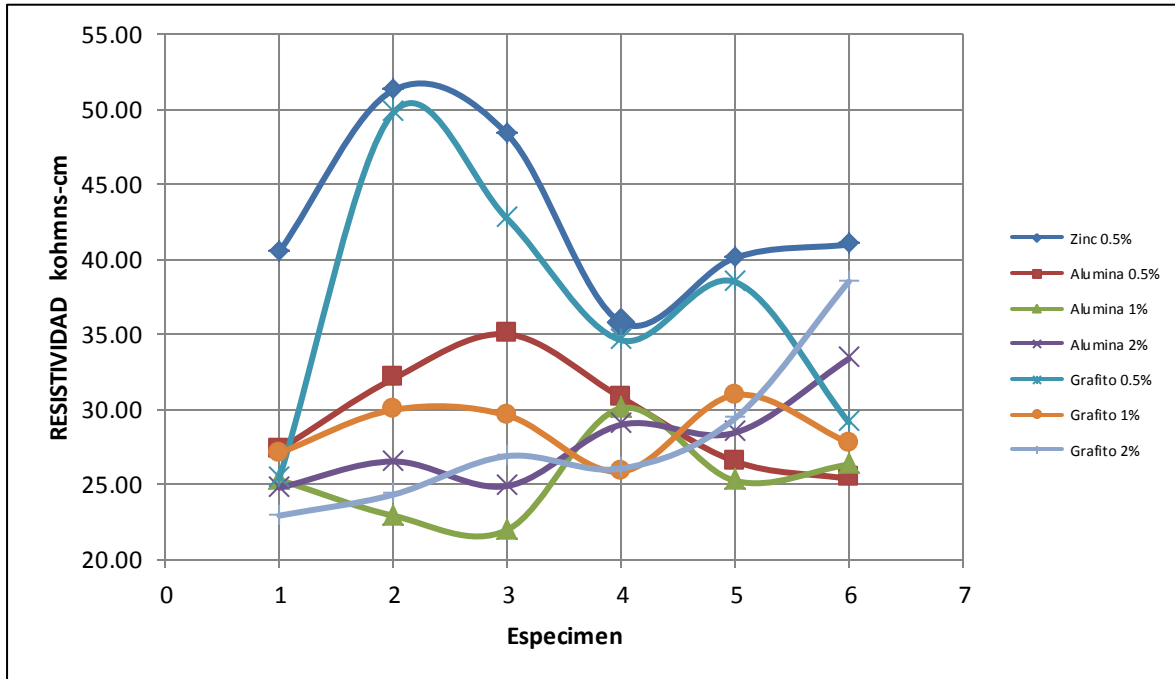


Figura 4.9. Resistividad eléctrica de especímenes, 6 especímenes de cada una de las adiciones en el mortero, Zinc 0.5%, Alúmina 0.5%, Alúmina 1%, Alúmina 2%, Grafito 0.5%, Grafito 1%, Grafito 2%

Se observó que los valores más bajos obtenidos de resistividad eléctrica, corresponden a los valores de los morteros con aditivos de alúmina al 1% seguido por alúmina al 2%, mientras que los valores de grafito al 1% y 2% se encuentran muy cerca de estos.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.3.2 Velocidad de pulso ultrasónico

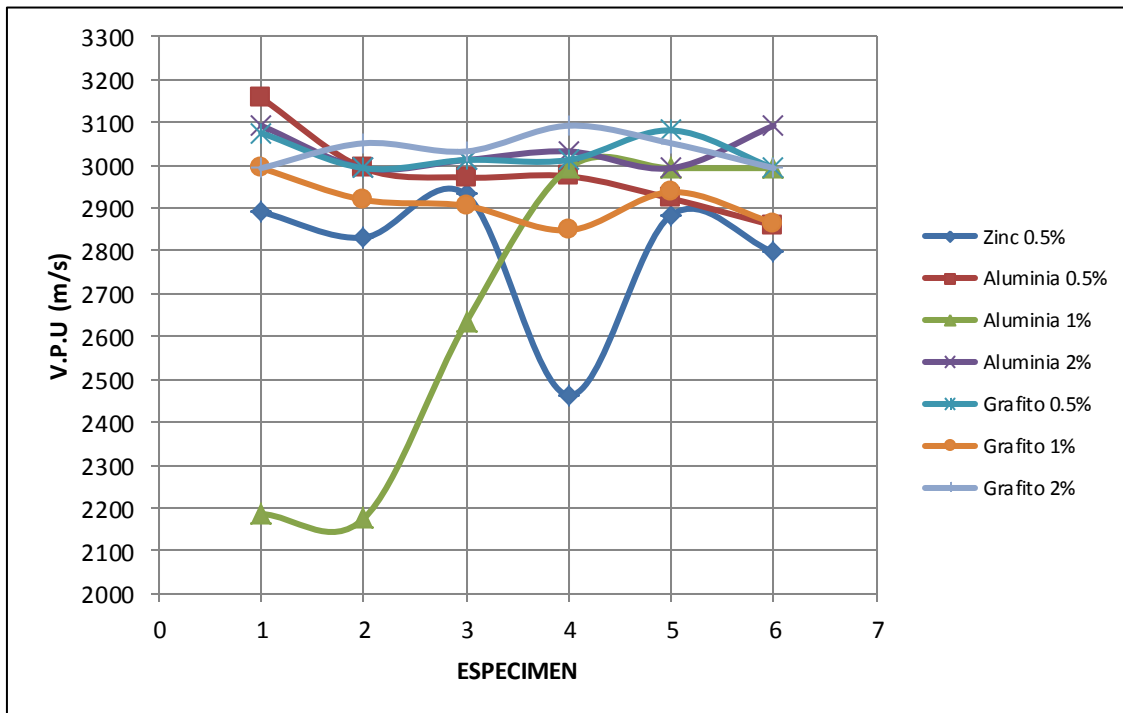


Figura 4.10. Velocidad de pulso ultrasónico de especímenes, 6 especímenes de cada una de las adiciones en el mortero, Zinc 0.5%, Alúmina 0.5%, Alúmina 1%, Alúmina 2%, Grafito 0.5%, Grafito 1%, Grafito 2%.

Como se representa en la gráfica, se observó que la velocidad de pulso ultrasónico más baja fue la que corresponde al mortero con aditivo de alúmina al 1% seguido de la mezcla de mortero con aditivo de zinc al 0.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.2.3.3 Porcentaje total de vacíos

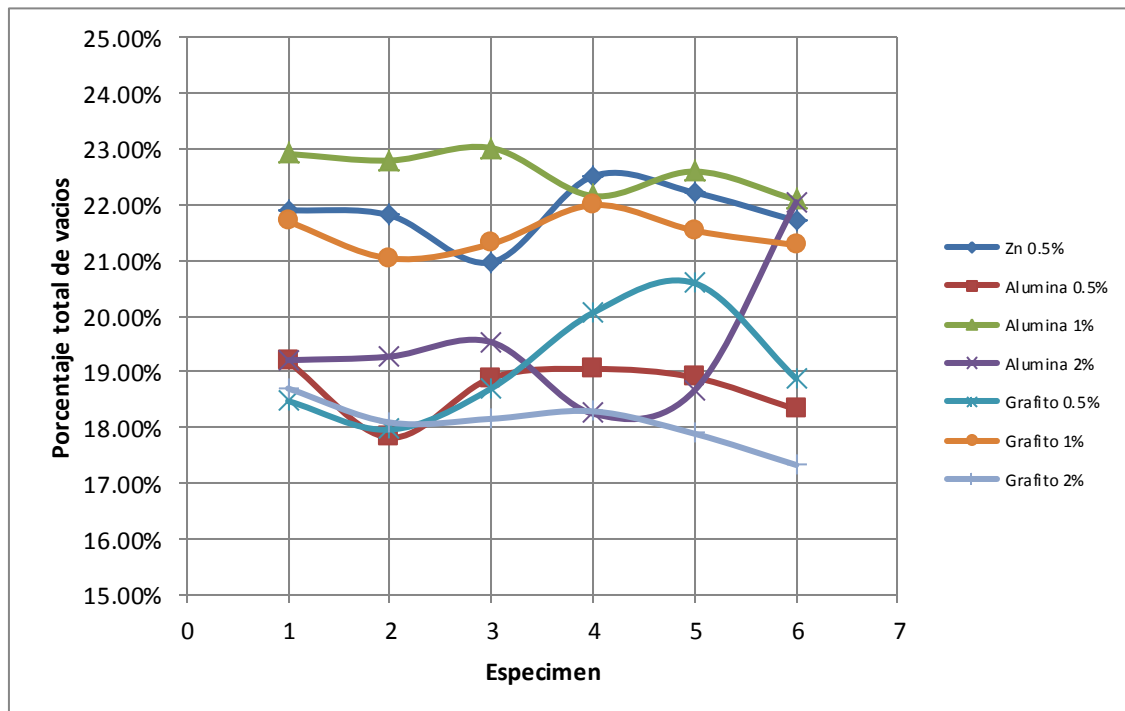


Figura 4.11. Porcentaje total de vacíos de especímenes, 6 especímenes de cada una de las adiciones en el mortero, Zinc 0.5%, Alúmina 0.5%, Alúmina 1%, Alúmina 2%, Grafito 0.5%, Grafito 1%, Grafito 2%.

El mortero que obtuvo el valor más alto de porcentaje total de vacíos fue el mortero con adición de alúmina al 1%, seguido del mortero adicionado con zinc al 0.5% y en tercer lugar el mortero con adición de carbono al 1%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.3 Resultados electroquímicos en los SPC

4.3.1 Primera etapa

4.3.1.1 Potenciales de media celda

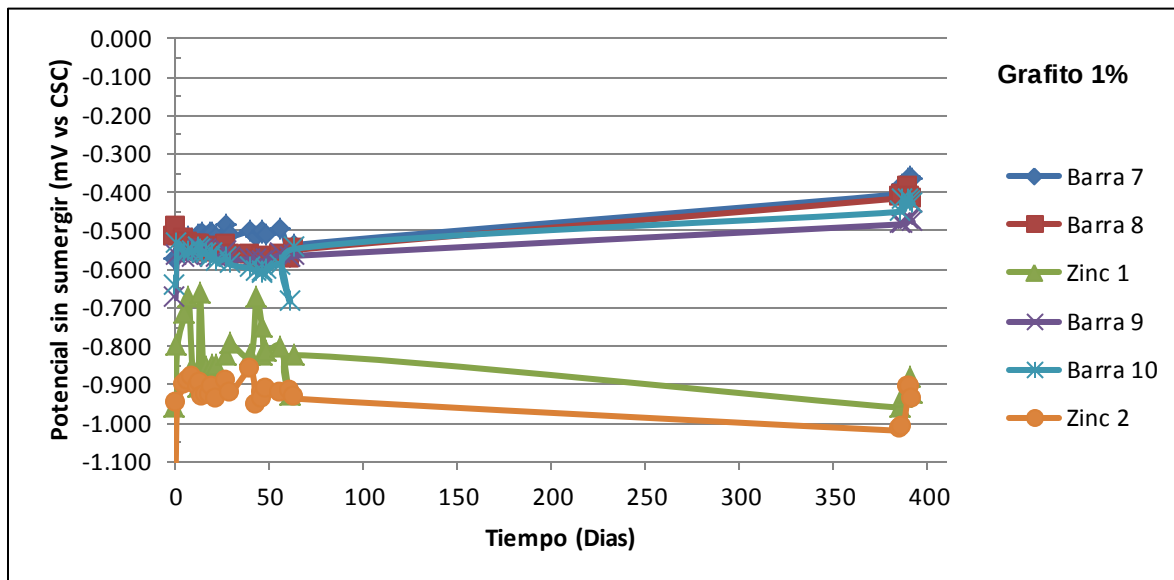


Figura 4.12. Potenciales de la barra 7, barra 8, malla de zinc 1, barra 9, barra 10, malla de zinc 2 del prisma con camisa de mortero con adición de grafito al 1%, sin sumergir en agua al 3.5% de NaCl

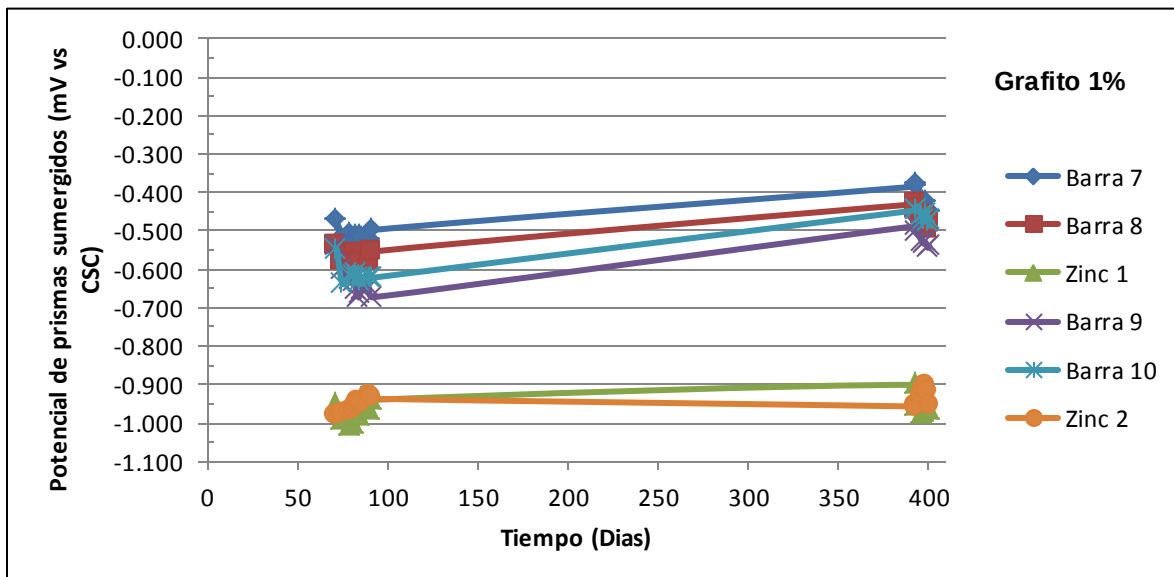


Figura 4.13. Potenciales de la barra 7, barra 8, malla de zinc 1, barra 9, barra 10, malla de zinc 2 del prisma con camisa de mortero con adición de grafito al 1%, sumergidos en agua al 3.5% de NaCl

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

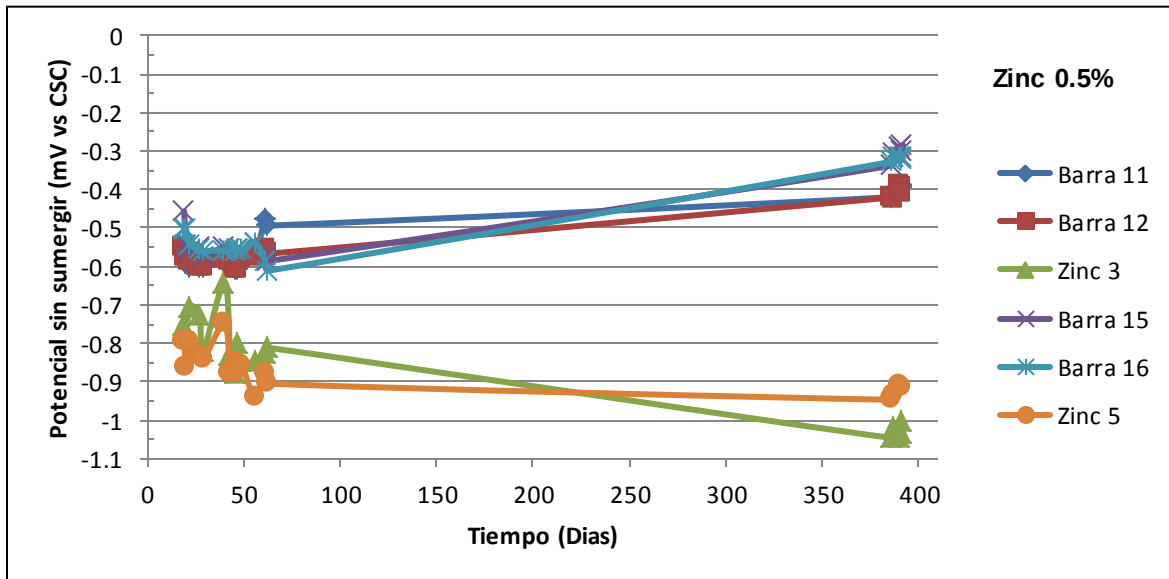


Figura 4.14. Potenciales de la barra 11, barra 12, malla de zinc 3, barra 15, barra 16, malla de zinc 5 del prisma con camisa de mortero con adición de zinc al 0.5%, sin sumergir en agua al 3.5% de NaCl

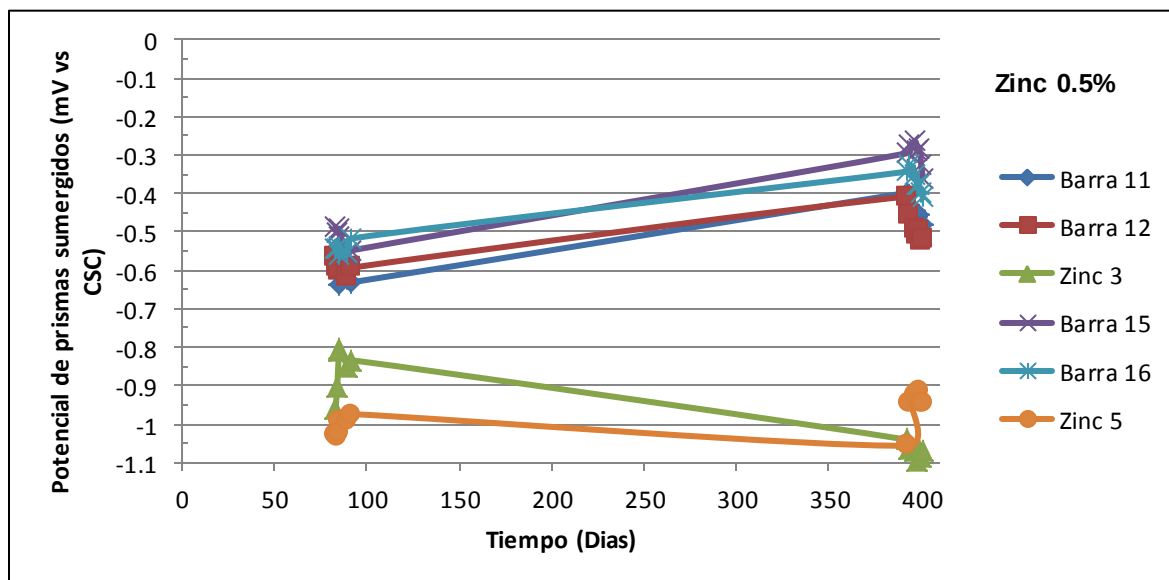


Figura 4.15. Potenciales de la barra 11, barra 12, malla de zinc 3, barra 15, barra 16, malla de zinc 5 del prisma con camisa de mortero con adición de zinc al 0.5%, sumergidos en agua al 3.5% de NaCl

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

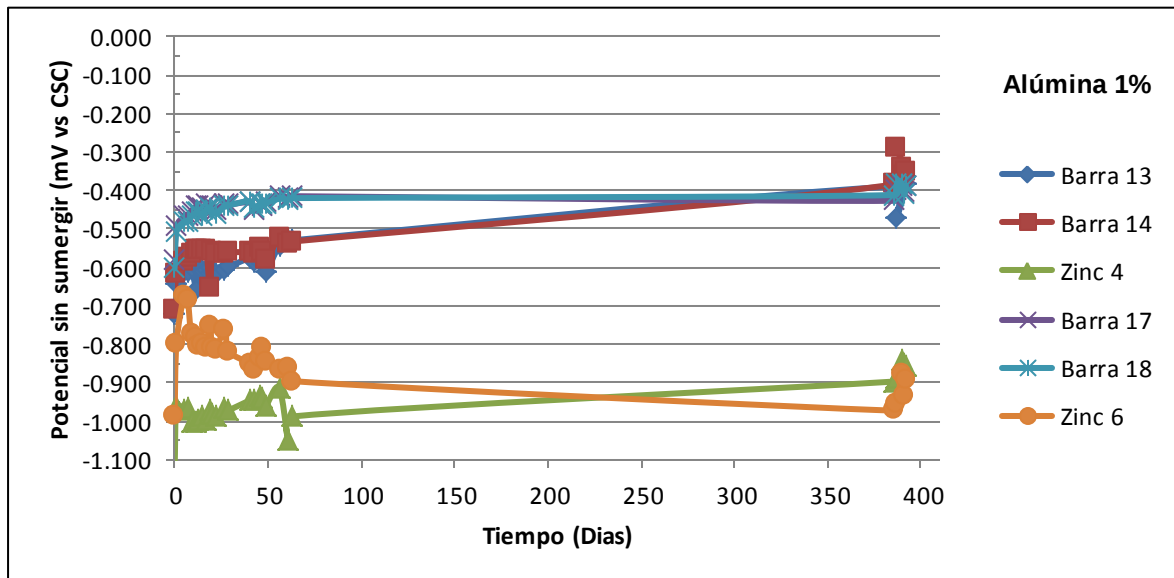


Figura 4.16. Potenciales de la barra 13, barra 14, malla de zinc 4, barra 17, barra 18, malla de zinc 6 del prisma con camisa de mortero con adición de Alúmina al 1%, sin sumergir en agua al 3.5% de NaCl

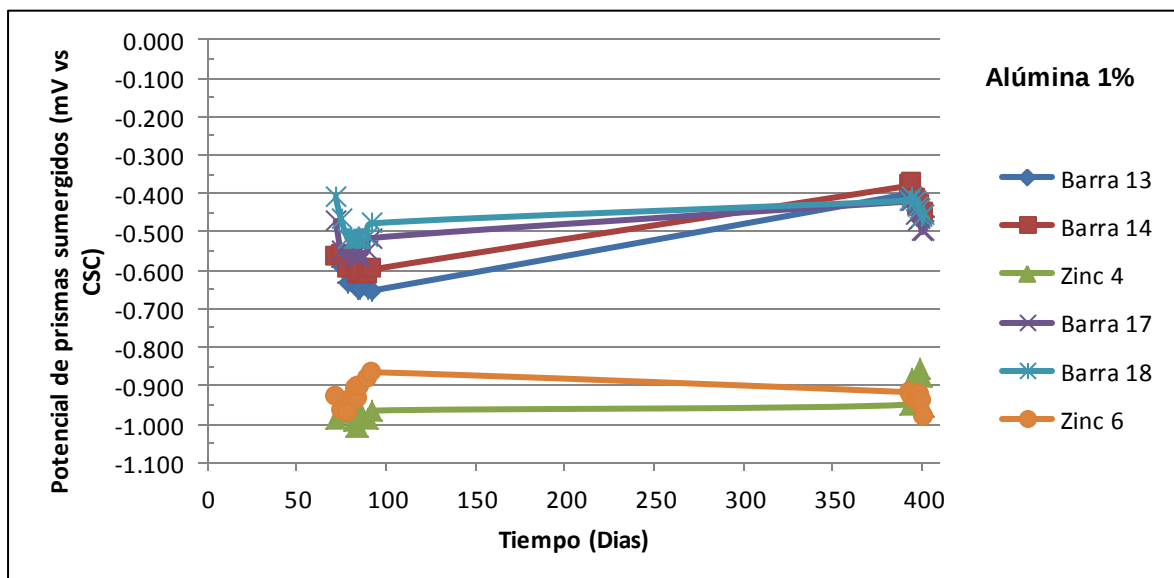


Figura 4.17. Potenciales de la barra 13, barra 14, malla de zinc 4, barra 17, barra 18, malla de zinc 6 del prisma con camisa de mortero con adición de Alúmina al 1%, sumergidas en agua al 3.5% de NaCl

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Se midió su potencial durante 63 días mientras los SPC's no estaban sumergidos en agua con NaCl al 3.5%, durante ese periodo se pudo observar que el potencial de las barras osciló entre -0.700 mV a -0.500 mV mientras que los potenciales de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de grafito al 1% osciló entre los valores de -1.000 mV a -0.700 mV.

A los 72 días los SPC's se sumergieron en agua con NaCl al 3.5% esto para simular un ambiente marino, y se pudo observar que el potencial de las barras se hizo más negativo, aunque el cambio es apenas perceptible, mientras el potencial de las mallas no cambió significativamente.

Se hizo una segunda ronda de mediciones del potencial de media celda de los SPC's sin que estuvieran sumergidos en la solución salina, y nuevamente sumergiéndolos, comprobándose así que ambientes agresivos aceleran el proceso de corrosión.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.3.2 Segunda etapa

4.3.2.1 Potenciales de media celda

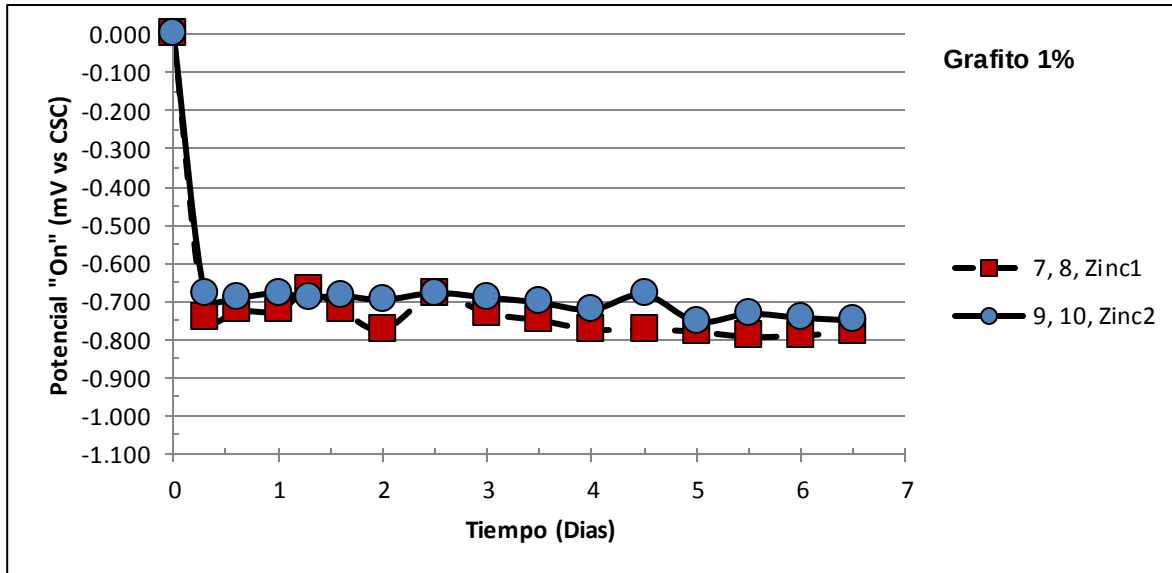


Figura 4.18. Potenciales "ON" del sistema con camisa de reparación con aditivo de grafito al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%

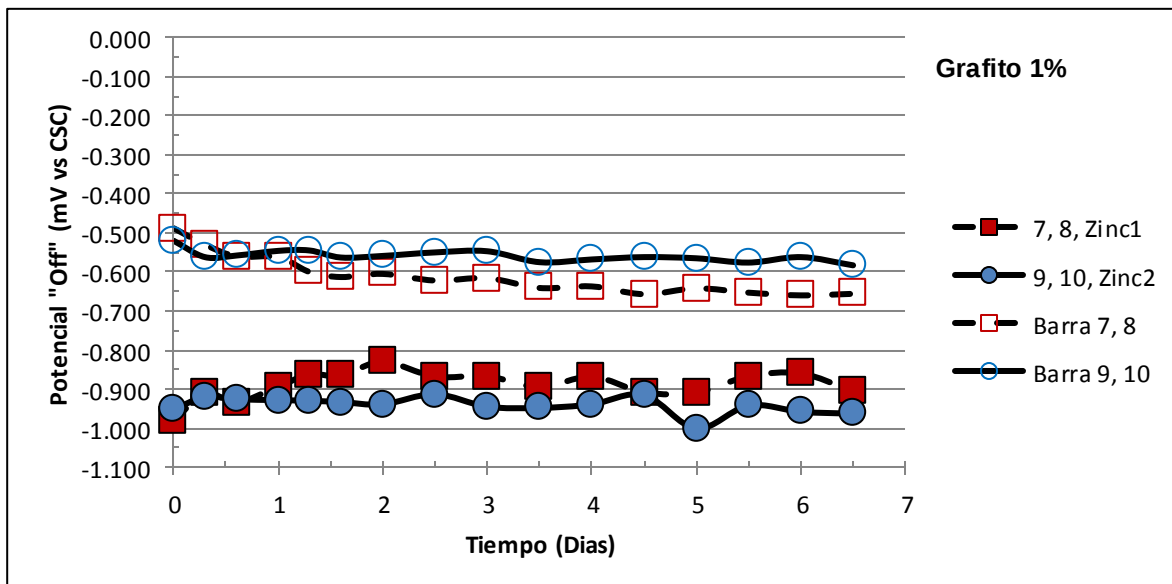


Figura 4.19. Potenciales "Instant off" del sistema con camisa de reparación con aditivo de grafito al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

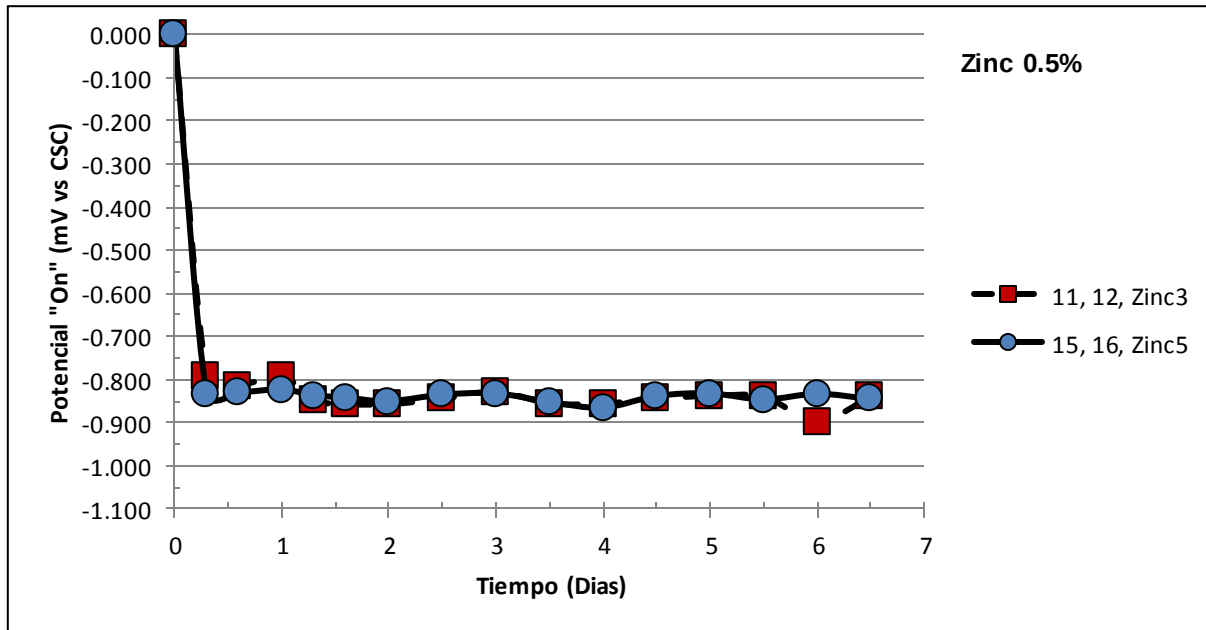


Figura 4.20. Potenciales "ON" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%

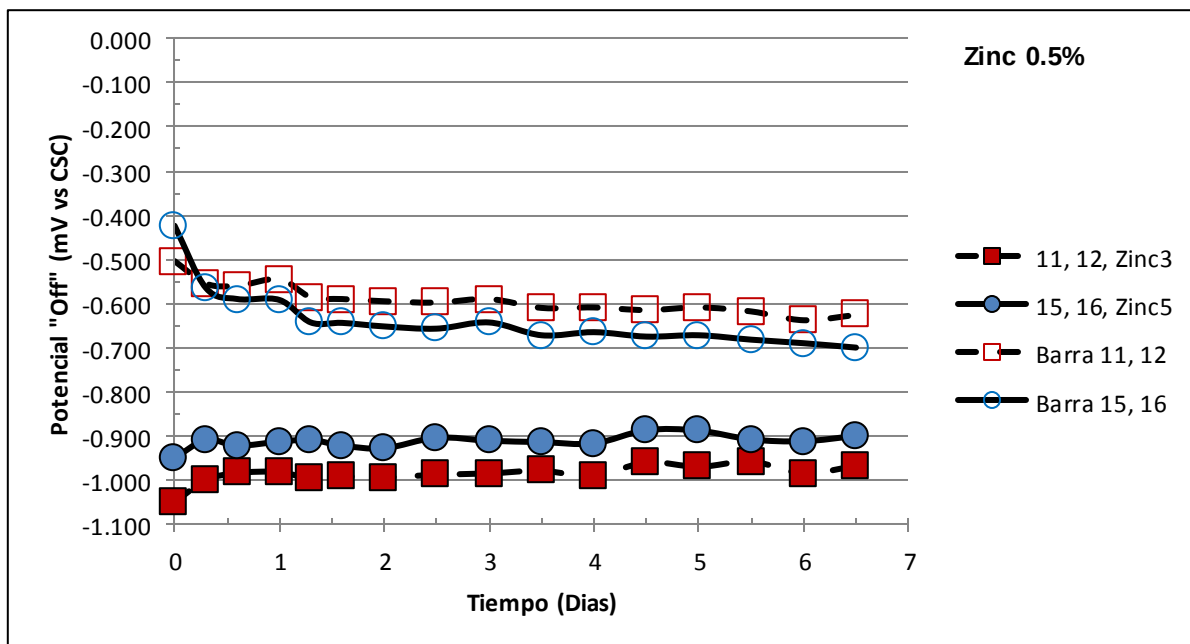


Figura 4.21. Potenciales "Instant off" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

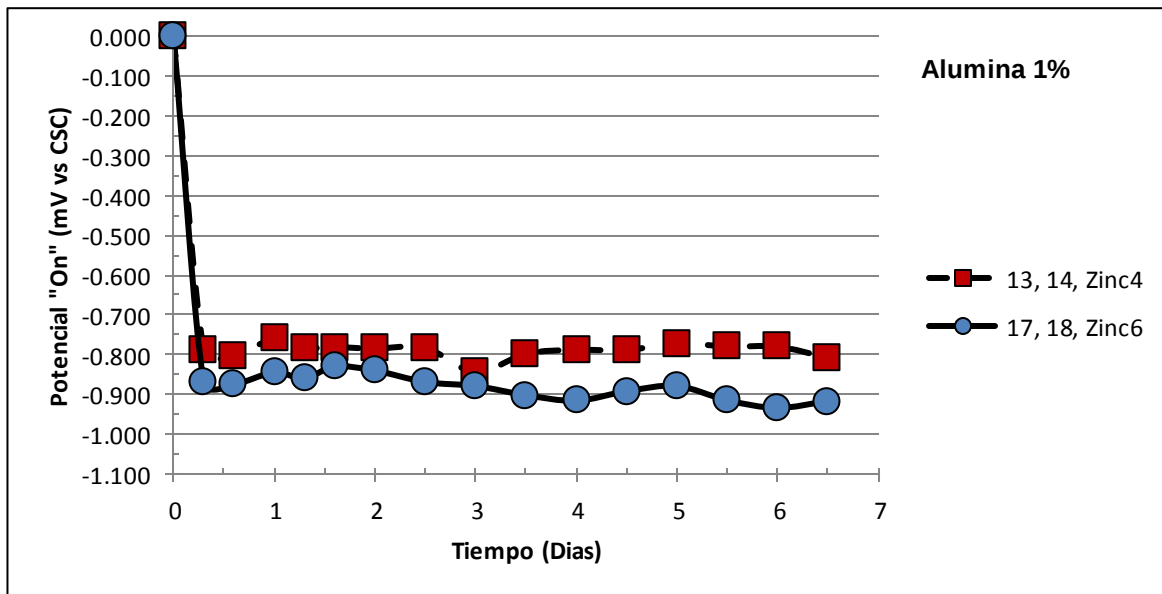


Figura 4.22. Potenciales "ON" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%

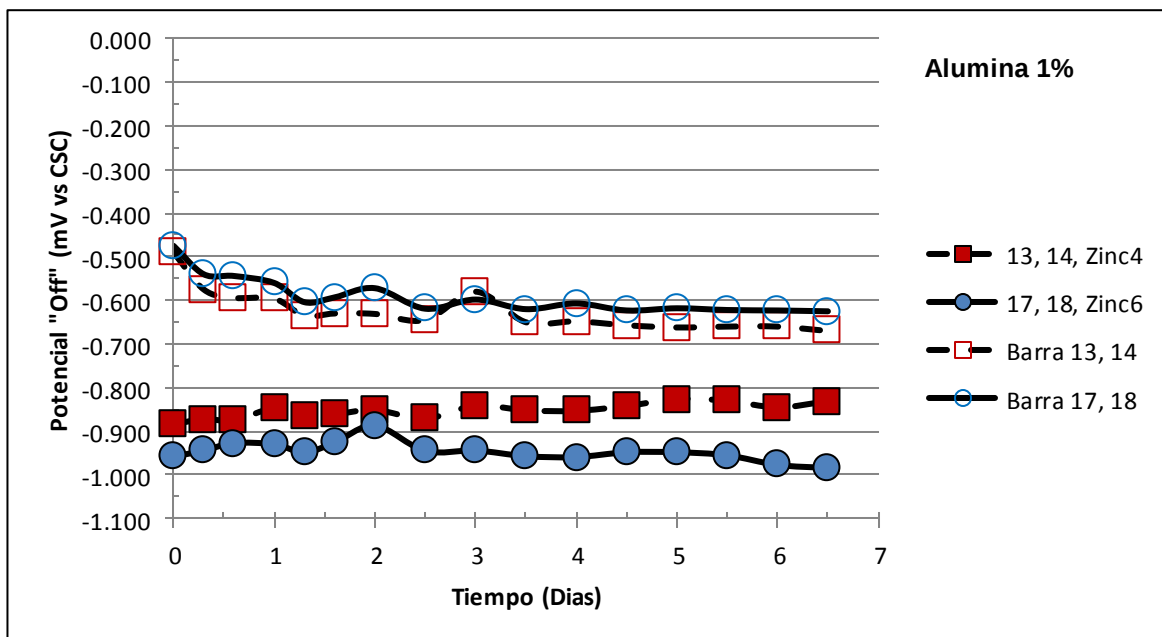


Figura 4.23. Potenciales "Instant Off" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua al con NaCl al 3.5%

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

Tomando en cuenta los criterios de la NACE para saber si el funcionamiento en un sistema de protección catódica funciona, se observó que efectivamente, en todos los SPC's (adición de grafito al 1%, zinc al 0.5%, alúmina al 1%) existe un desplazamiento en dirección negativa que ronda de 0.700 mV a 0.850 mV que superó por mucho los 0.300 mV mínimos que se solicitan.

El voltaje del sistema de todos los SPC's (adición de grafito al 1%, zinc al 0.5%, alúmina al 1%) respecto una media celda de Cu- CuSO₄ se mantuvo en un rango de -0.700 mV a -0.900, siendo los menores valores para los SPC's con adición de grafito al 1% y los valores mayores para los SPC's con adiciones de alúmina al 1%, los cuales se acercan bastante al -0.850 mV que marca como criterio la NACE.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.3.3 Tercera Etapa

4.3.3.1 Potenciales de media celda

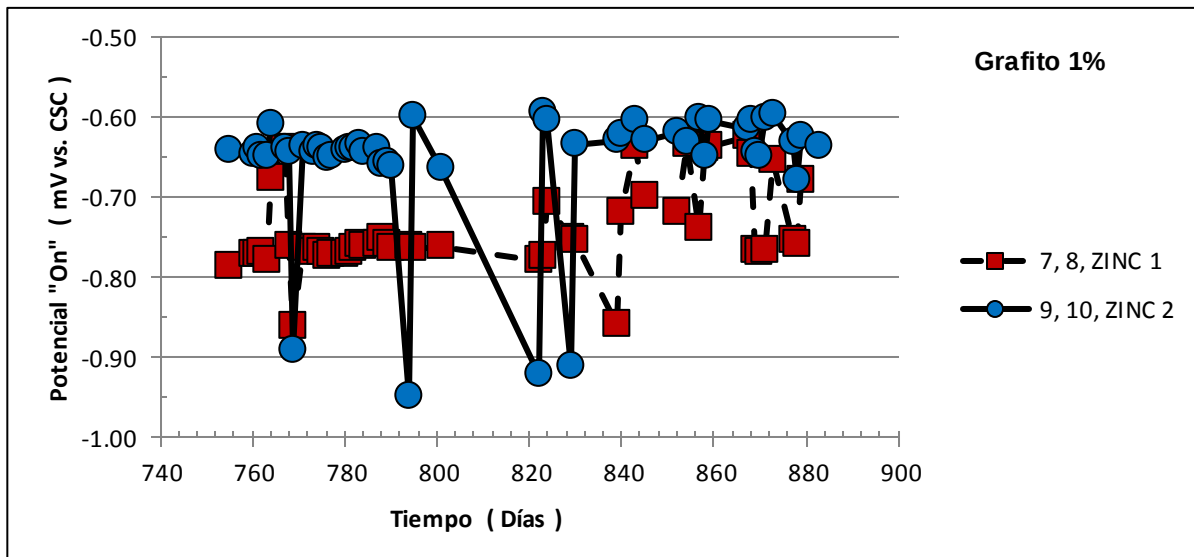


Figura 4.24. Potenciales "On" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

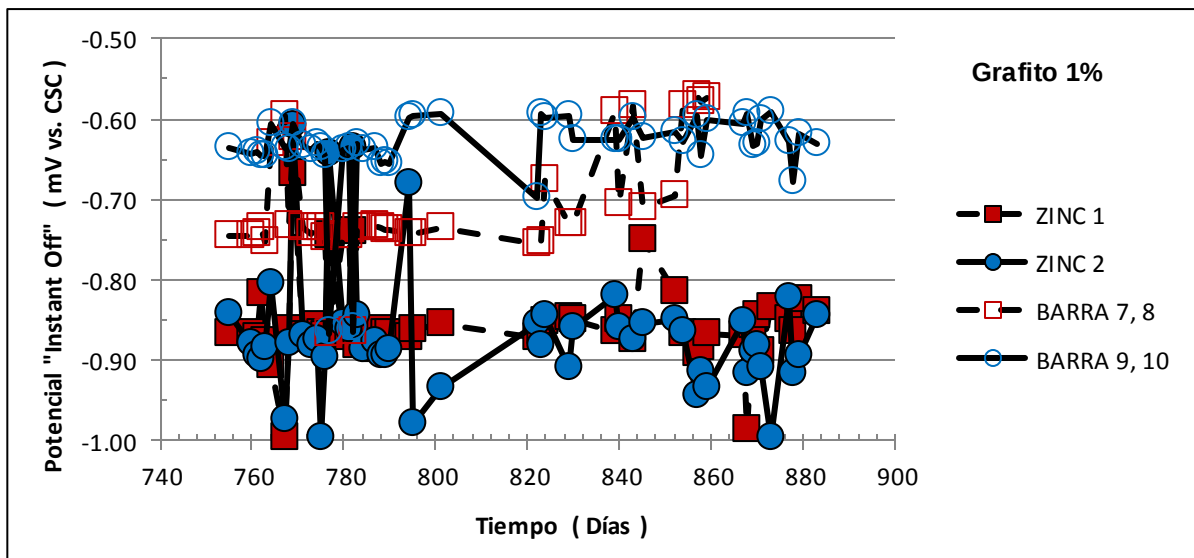


Figura 4.25. Potenciales "Instant Off" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

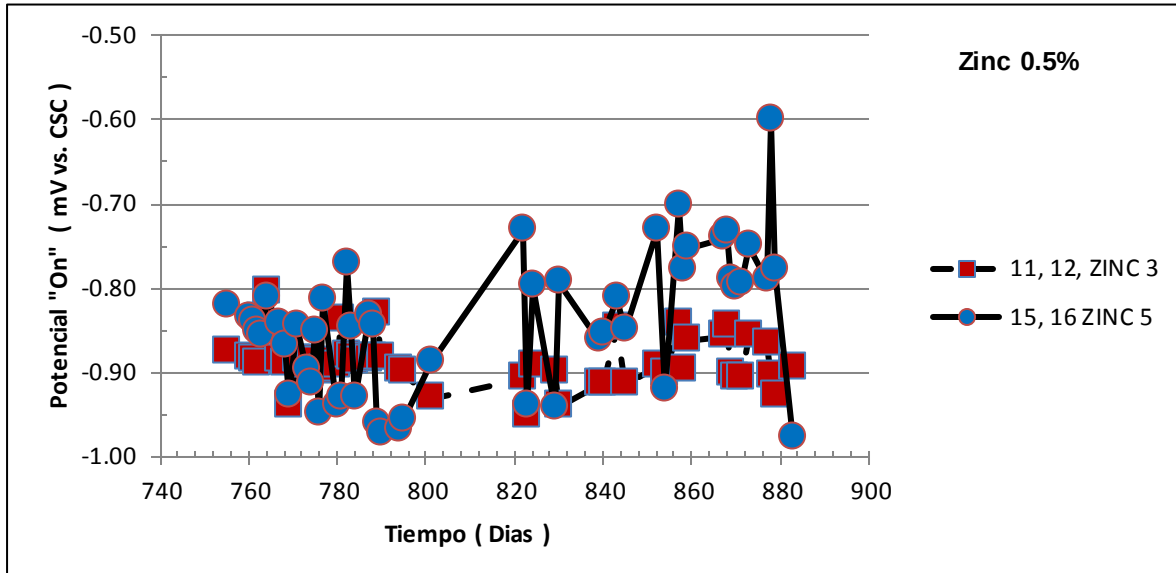


Figura 4.26. Potenciales "On" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

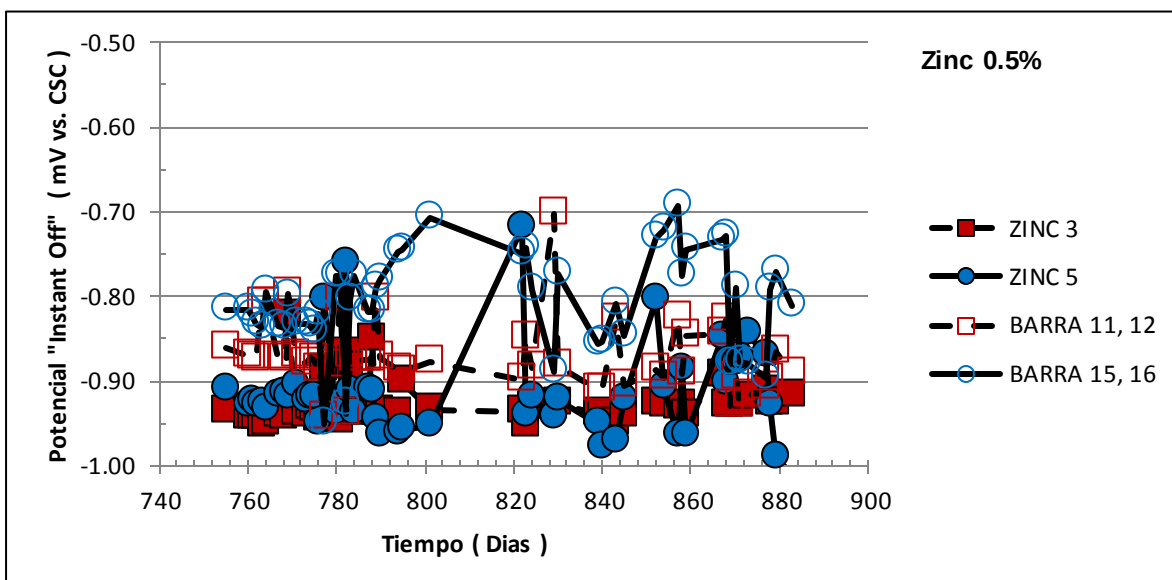


Figura 4.27. Potenciales "Instant Off" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

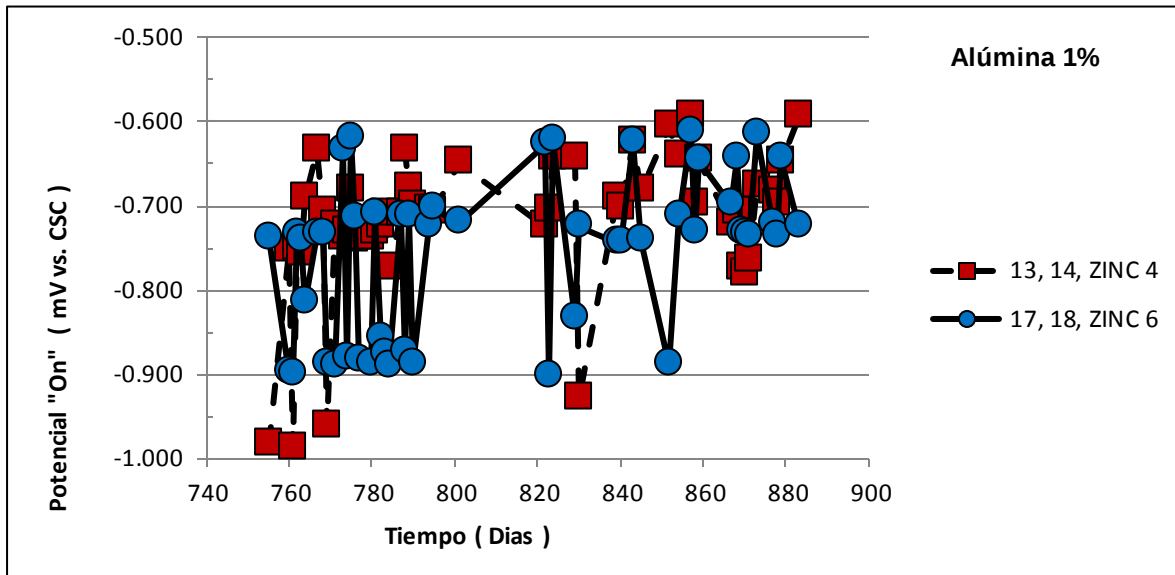


Figura 4.28. Potenciales "On" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

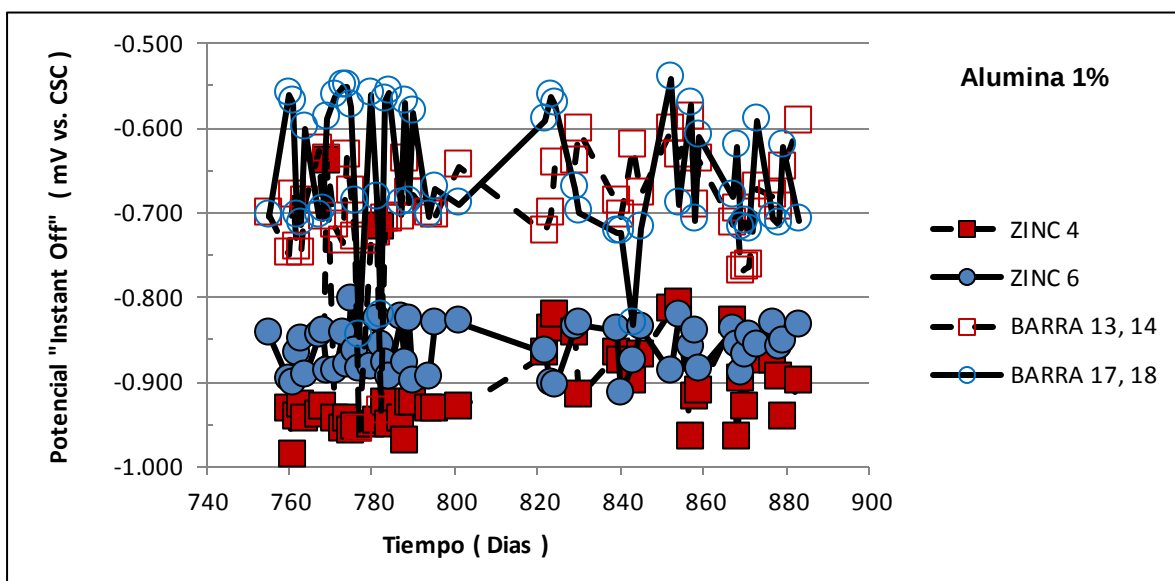


Figura 4.29. Potenciales "Instant Off" del sistema con camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

4.3.3.2 Decaimiento de depolarizacion

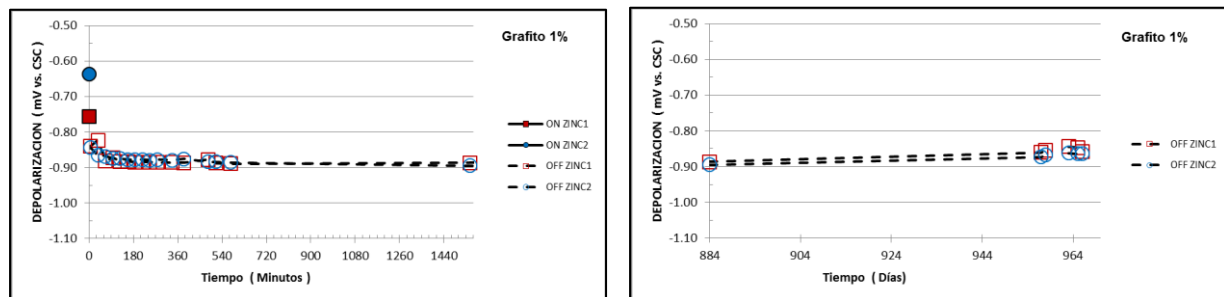


Figura 4.30. Decaimiento de depolarizacion de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

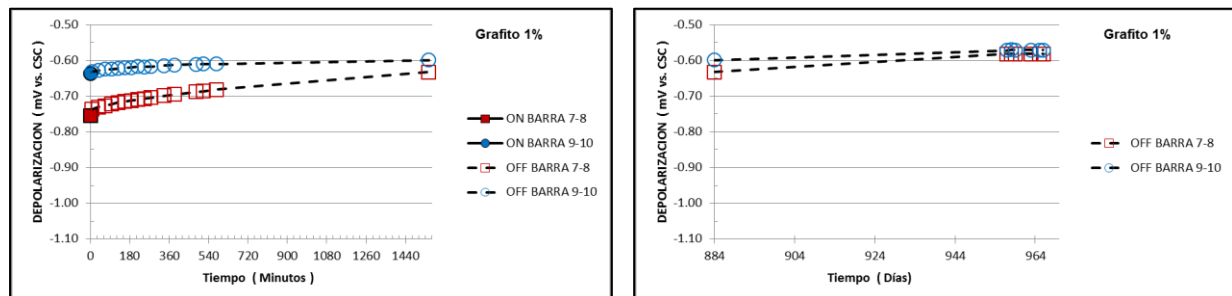


Figura 4.31. Decaimiento de depolarizacion de las barras de acero de refuerzo del sistema de reparación con aditivo de Grafito al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

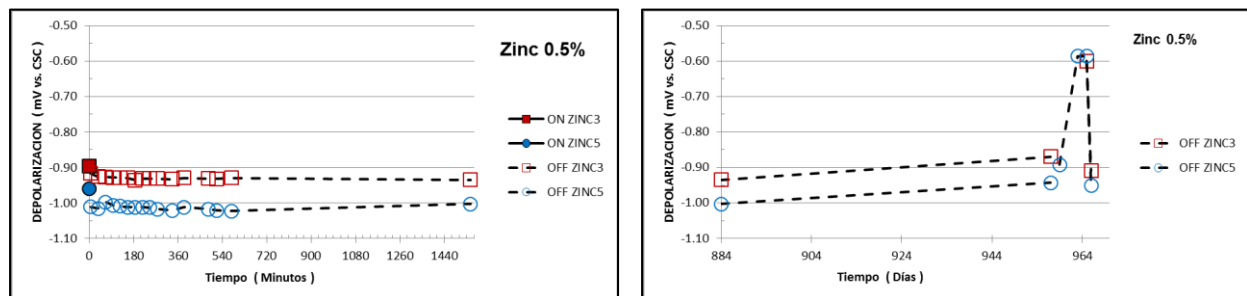


Figura 4.32. Decaimiento de depolarizacion de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

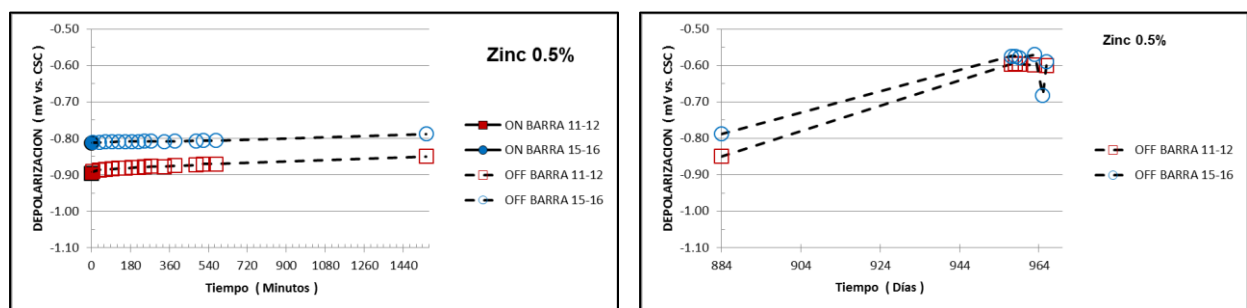


Figura 4.33. Decaimiento de depolarizacion de las barras de acero de refuerzo del sistema de reparación con aditivo de Zinc al 0.5% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

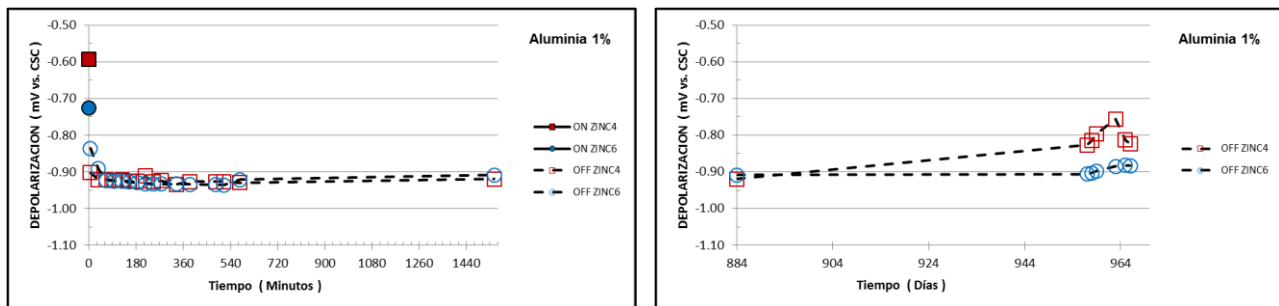


Figura 4.34. Decaimiento de depolarización de la malla de zinc de la camisa de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

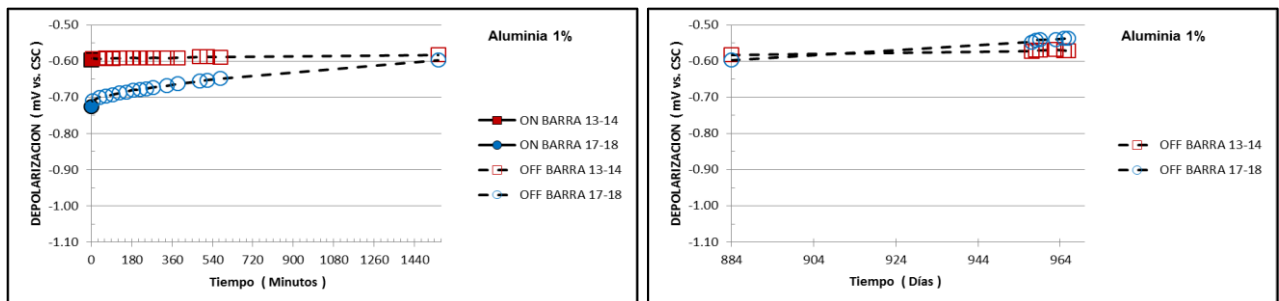


Figura 4.35. Decaimiento de depolarización de las barras de acero de refuerzo del sistema de reparación con aditivo de Alúmina al 1% sumergidos en agua con NaCl al 3.5%.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un mortero normal, sin adiciones de ningún tipo, y si su realización y colocación es la adecuada, suele tener una alta resistividad y baja permeabilidad, pero esto lo hace un pésimo electrolito, que no permitirá el flujo de electrones en un sistema de protección catódica, por lo tanto, lo que se busca de un mortero que será parte de un sistema de protección catódica es: Baja resistividad eléctrica y alta permeabilidad.

5.1 Conclusiones sobre la caracterización física

De los morteros adicionados que se valoraron, se concluyó, durante la primera y segunda etapa, que el mortero adicionado con alúmina al 1% era el que presentaba valores más bajos de resistividad eléctrica y por lo tanto valores más altos de permeabilidad así como el mayor porcentaje de poros. En la tercera etapa se concluyó que la tendencia de los morteros adicionados era la misma que un mortero sin adicionar, esto es, que los morteros disminuyeron su porcentaje de vacíos o porosidad, y por lo tanto aumentaron su resistividad, esto ocurrió en todos los morteros adicionados.

5.2 Conclusiones de electroquímica

Sobre los prismas, los criterios que se tomaron fueron los establecidos por la NACE, en la segunda etapa se pudo tomar en cuenta el criterio de desplazamiento negativo de al menos 0.300 mV al aplicar la corriente de protección, este criterio fue cumplido por los 6 prismas. También se tomó en cuenta el criterio de un voltaje de -0.850 mV respecto a un electrodo de Cu-CuSO₄ que solo cumplieron las varillas 11-12 y varillas 15-16 que corresponden a los prismas con la camisa de reparación de mortero adicionado con zinc al 0.5% y las varillas 17-18 que corresponde a los prismas con la camisa de reparación de mortero adicionado con alúmina al 1%. En la segunda etapa se puede observar también que los valores de los potenciales en “On” tienden a acercarse a los

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

valores de potencial en “Off” de las mallas de zinc, sobre todo de los morteros adicionados con zinc al 0.5% y alúmina al 1%, lo que nos dice que en un principio el ánodo era eficiente.

En la tercera etapa el criterio del voltaje de -0.850 mV en “On” solo lo cumplieron las varillas 11-12 y 15-16 que corresponden a los prismas con la camisa de reparación de mortero adicionado con zinc al 0.5%. En la tercera etapa es donde se toma en cuenta el criterio del desplazamiento de 0.100 mV en dirección negativa determinado por la interrupción de la corriente y eliminando la caída óhmica (depolarización), criterio cumplido solo por las varillas 7-8 correspondiente al prisma con la camisa de reparación de mortero adicionado con grafito al 1% y las varillas 17-18 correspondientes al prisma con la camisa de reparación de mortero adicionado con alúmina al 1%.

Las ventajas que se pensaban se obtendrían de los morteros adicionados no se presentaron, actuando éstos como si fueran morteros normales, disminuyendo la eficiencia del SPC probado.

La recomendación es seguir investigando adiciones para mortero, que lo conviertan en un mejor electrolito para un sistema de protección catódica, con adiciones que le permitan presentar las características físicas que lo puedan volver eléctricamente conductivo. Un ejemplo podría ser adicionar sales que pudieran mantener activo el ánodo de zinc dentro del mortero y también ayudaría a disminuir la resistividad del mortero.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

6 BIBLIOGRAFIA

- Mejía Duran María del Roció. 2015. Evaluación de morteros para protección catódica en Subestructura de Puentes de Concreto Reforzado. Tesis para optar el título profesional de Maestra en Ingeniería de Vías Terrestres. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Ingeniería.
- Carrión Viramontes Francisco Javier, Hernández Rivera Jaime y Acosta Esqueda Miguel Antonio. 1999. Publicación técnica No. 122. Estudios de corrosión en puentes de concreto pre-esforzado, cables de pre-esfuerzo. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.
- Poblano Salas Carlos Agustín. 2000. Publicación Técnica No. 158. Sistemas de protección contra la corrosión en puentes investigaciones recientes. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.
- Torres Acosta Andrés y Martínez Madrid Miguel. 2001. Publicación Técnica No. 181. Diseño de Estructuras de concreto con criterios de durabilidad. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.
- Del Valle Moreno Angélica, Pérez López Tezozómoc y Martínez Madrid Miguel. 2001. Publicación técnica No. 182. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.
- Torres Acosta Andrés A. Fabela Gallegos Manuel de Jesús, Vázquez Vega David, Hernández Jiménez José Ricardo, Martínez Madrid Miguel, Muñoz Noval Alejandro. 2002. Publicación técnica No. 204. Cambios en la rigidez y resistencia a la flexión de vigas de concreto dañadas por corrosión. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.
- Del valle Moreno Angélica, Torres Acosta Andrés, Terán Guillén Jorge, Pérez Quiroz José Trinidad, Oidor Salinas Patricia. 2006. Publicación técnica No.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

290. Protección catódica de concreto reforzado usando ánodos de sacrificio discretos. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.

Torres Acosta Andrés, Del Valle Moreno Angélica, Martínez Madrid Miguel, Pérez Quiroz José Trinidad, Backhoff Polhs Miguel. 2010. Publicación Técnica 327. Plan nacional de evaluación de puentes federales libres de peaje, dañados por corrosión (2005-2010), una cuantificación de resultados, proyectos y colaboraciones. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.

Del Valle Moreno Angélica, Fabela Gallegos Manuel de Jesús, Hernández Jiménez José Ricardo, Vázquez Vega David, Torres Acosta Andrés, Terán Guillén Jorge, Martínez Madrid Miguel. 2011. Publicación técnica No. 336. Determinación del estado de corrosión y capacidad de carga de los muelles del puerto de Guaymas. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.

Pérez Quiroz José Trinidad, Ramírez Reyes José Luis, Terán Guillén Jorge, Lomelí González María Guadalupe. 2011. Publicación técnica No. 348. Evaluación electroquímica de cables postensados con aplicación estructural en el sector transporte. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.

Mejía Sánchez Isaac, Pérez Quiroz José Trinidad, Malo Tamayo José Maria, Terán Guillén Jorge, Lomelí González María Guadalupe, Martínez Madrid Miguel. 2011. Publicación técnica No. 380. Evaluación electroquímica de cables postensados con aplicación estructural en el sector transporte 2^a parte. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.

Rendón Belmonte Mariela, Pérez Quiroz José Trinidad, Martínez Madrid Miguel, Torres Acosta Andrés. 2013. Publicación técnica No. 402. Aplicación de corriente catódica como sistema de protección contra la corrosión de

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

estructuras de concreto reforzado. Instituto Mexicano del Transporte Sanfandila. Querétaro. México.

Gonzales Cuevas Oscar M., Fernández-Villegas Francisco Roble. Aspectos Fundamentales del concreto reforzado. 4^a Edición, México, Editorial Limusa. 2005.

Tebar Lattuf Omar. 2004. Proceso de corrosión y métodos de protección utilizados en la rehabilitación del puente La Unidad ubicado en Cd. Del Carmen, Campeche. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Constructor. Instituto Tecnológico de la Construcción.

Porto Quintian Jesús. 2005. Manual de patologías en las estructuras de hormigón armado. Universidade da Coruña, Escola Universitaria de Arquitectura Técnica. Coruña. España.

ASTM, C29 / C29M, Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate.

ASTM, Designation: C 33 – 03, Standard Specification for Concrete Aggregates.

ASTM, Designation: C 40 – 99, Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete.

ASTM, Designation: C 42/C 42M – 03, Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of concrete.

ASTM C-57-84, Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity using the Wenner four-electrode Method.

ASTM C 75 - 03, Standard Practice for Sampling Aggregates.

ASTM, Designation: C 109/C 109M – 98. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

ASTM, Designation: C 128 – 01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.

ASTM, Designation: C 136 – 01. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

ASTM, Designation: C 150 – 04. Standard Specification for Portland Cement.

ASTM, Designation: C 185 – 02. Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar.

ASTM, Designation: C 230/C 230 M – 03. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.

ASTM, Designation: C 305 – 99. Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.

ASTM, Designation: C 595 – 03. Standard Specification of Blended Hydraulic Cements.

ASTM C 597-83, Standard Method for Pulse Velocity through Concrete.

ASTM C 642-97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

ASTM, Designation: C 702 – 98 (Reapproved 2003). Standard Practice for Reducing Samples Aggregate to Testing Size.

ASTM, Designation: C 778 – 06. Standard Specification for Standard Sand.

ASTM, Designation: C 876 – 91 (Reapproved 1999). Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.

NMX-C-414-ONNCCE-2004 “Industria de la Construcción – Cementos Hidráulicos - Especificaciones y métodos de Prueba”.

OPTIMIZACION DE USO DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC CONTRA LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO

NMX-C-403-ONNCCE-1999 “Industria de la Construcción -Concreto Hidráulico para uso Estructural”.

RED DURAR (1997). “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Concreto Armado.” CYTED, Maracaibo, Venezuela.