



Certificación ISO 9001:2000 ‡

Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto

Andrés Antonio Torres Acosta
Wilfrido Martínez Molina
María Guadalupe Lomelí González
Alejandro Pérez Gallardo

**Publicación Técnica No. 328
Sanfandila, Qro, 2010**

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Adiciones en base a cactus como inhibidor de
corrosión para acero de refuerzo en concreto**

Publicación Técnica No. 328
Sanfandila, Qro, 2010

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, M.A. Wilfrido Martínez Molina, Ing. María Guadalupe Lomelí González e Ing. Alejandro Pérez Gallardo.

Se agradece la colaboración de la M.C. Guadalupe Evangelina Itandehui Martínez Peña, de la Universidad Marista de Querétaro.

Índice

Resumen		v
Abstract		vii
Resumen	Ejecutivo	ix
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Marco teórico	15
Capítulo 3.	Procedimiento experimental	35
Capítulo 4.	Resultados y discusión	53
Capitulo 5.	Conclusiones	68
Bibliografía		71
Anexos		76

Resumen

Esta investigación en curso, incluye resultados del comportamiento a la corrosión del acero de refuerzo en concreto cuando el cactus deshidratado (*Opuntia Ficus Indica*, nopal) es usado como aditivo en concreto. La adición del cactus deshidratado es mezclada en diferentes concentraciones en relación con el peso del cemento (0,10%, 0,25%, 0,5%, y 1,0%). Las mediciones de potencial de media celda y LPR fueron realizados en diferentes periodos de tiempo para caracterizar el posible efecto inhibitor de la corrosión por las adiciones de cactus probadas. Los resultados demostraron que el nopal deshidratado presenta un buen efecto inhibitor de la corrosión en el acero de refuerzo, en todos los especímenes probados, cuando los iones cloruro están presentes. La adición del cactus llevó a la formación evidente de una capa superficial más densa y llena de hidróxido de oxígeno en la superficie de acero la cual disminuyó la actividad de la corrosión. Los resultados preliminares sugieren que agregar nopal o áloe vera en concentraciones entre 1 y 2% de peso, puede ser conveniente para la durabilidad que se presente en entornos alcalinos, especialmente en estructuras de concreto.

Abstract

This research in progress includes results on the corrosion performance of reinforced steel in concrete when dehydrated cactus (*Opuntia Ficus Indica*, nopal) was used as an addition in concrete. The dehydrated cactus addition was mixed at different concentrations by cement mass (0,10%, 0,25%, 0,5%, and 1,0%). Half cell potentials and LPR measurements were performed at different time periods to characterize the possible corrosion inhibiting effect of the cactus additions tested. Results showed good corrosion inhibiting effect of dehydrated nopal on reinforced steel, in all tested concretes, when chloride ions are present. The addition of such cactus led to an apparent formation of a denser and more packed oxide/hydroxide surface layer on the steel surface that decreased corrosion activity. The preliminary findings suggest that adding nopal or aloe vera in concentrations between 1% and 2% by mass, might be suitable for durability enhancing applications in alkaline media, especially in concrete structures.

Resumen ejecutivo

Esta investigación tiene como objetivo llevar a cabo ensayos en probetas de concreto reforzado para determinar si la adición de nopal deshidratado actúa como agente que inhibe la corrosión. Asimismo, determinar, las concentraciones óptimas de nopal que se podrán adicionar a la mezcla de concreto para que dicha adición pueda trabajar eficientemente en la extensión de la vida útil de estructuras de concreto expuestas a ambiente marino, justificando la efectividad del uso de adiciones de nopal deshidratado.

En este trabajo, se presenta una breve descripción de los problemas más comunes que genera la corrosión en estructuras de concreto armado, seguido de un pequeño resumen de los componentes principales que constituyen el concreto reforzado; posteriormente, se hace una explicación concisa de las etapas de durabilidad de una estructura, así como los diferentes tipos de corrosión que se señalan. Se enumeran objetivos de estudio y alcances.

En el capítulo 2 se muestra la descripción de las actividades realizadas durante el proceso experimental desarrollado, definiéndose los parámetros involucrados, una explicación del proceso de fabricación y curado de los prismas, así como el sistema de usado para acelerar la penetración de los cloruros en el concreto de los prismas, su respectiva instrumentación y por ultimo, los procedimientos electroquímicos utilizados durante el monitoreo.

El capítulo 3 señala los resultados y discusiones obtenidos de las pruebas realizadas (resistencia a la compresión del concreto fabricado, potenciales de media celda, resistencia a la polarización).

En capítulo 4, se indican las conclusiones obtenidas de los diferentes resultados y por último en el capítulo 5, se exponen las bibliografías consultadas para la realización de este trabajo.

1 Introducción

El concreto reforzado es uno de los materiales cuyo uso está más difundido en la industria de la construcción, en obras como edificios, puentes, presas, puertos, entre otros; esto se debe al bajo costo de fabricación y mantenimiento (mantenimiento requerido de la estructura cuando ésta empieza a presentar algún daño; principalmente mantenimiento preventivo). Sin embargo, a pesar del bajo costo de mantenimiento, dichas estructuras pueden deteriorarse por agentes agresivos en el medio ambiente en el que son erigidas.

Los materiales utilizados principalmente para la elaboración del concreto son: arena, grava, agua y cemento. Para el caso del concreto reforzado se incluyen barras de acero que quedan embebidas en el concreto (Fig. 1.1). Como consecuencia de la acción de los cloruros que penetran la estructura por los poros del concreto o por la carbonatación, se produce la corrosión de las armaduras metálicas, la cual se manifiesta en la merma de la sección transversal de las barras y por la acción expansiva de los productos de corrosión, reduciendo la acción útil del concreto, debido a la fisuración del recubrimiento (el recubrimiento es la distancia libre desde el punto más cercano de la superficie permanente del concreto al acero de refuerzo; la superficie permanente más cercana es la superficie del concreto terminado libre de cualquier recubrimiento posterior) (Durar, 2002). De esta manera disminuye el momento resistente de la viga y se pierde la adherencia entre el concreto y el acero (Torres y Martínez, 2001).

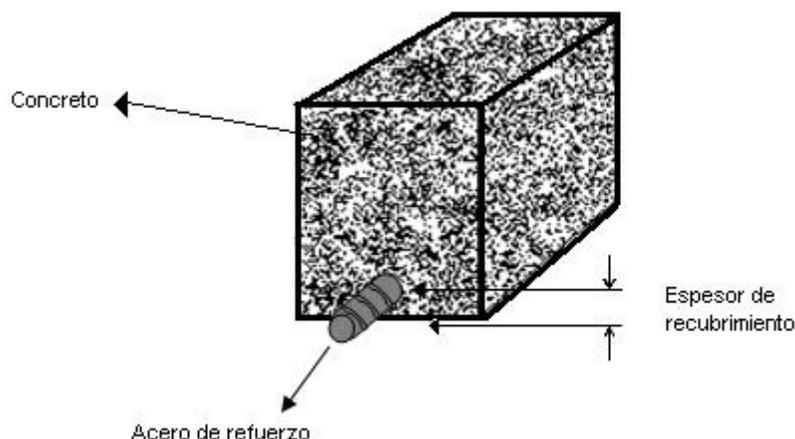


Figura 1.1

Concreto reforzado

El uso de manejos inadecuados de materiales, mala construcción, faltas de normas por durabilidad, etc., ha ocasionado que estructuras relativamente nuevas (menos de 10 años) presenten daños por corrosión. En ingeniería civil se ha tratado el problema de la corrosión orientado hacia técnicas de monitoreo, reparación, rehabilitación y protección de estructuras de concreto. En México se tienen muchos problemas en las infraestructuras (puentes) que sufren algún daño (Torres y Martínez, 2002), bastantes de los cuales son reparados superficialmente sin tener datos de cuales son los daños que sufren realmente, acrecentándose el problema incluso hasta llegar al colapso.

Las pérdidas económicas derivadas del aumento del número de estructuras dañadas por corrosión ha superado cifras alarmantes, cuantificándose algunas veces el costo de reparación cercano al doble del valor de una estructura nueva, implicando a la vez mayor riesgo de trabajo. Por lo anterior, se ha tratado de implementar una metodología para la evaluación y diagnóstico del grado de daño por corrosión que sufren tales estructuras.

En esta investigación, se evaluará el uso de adiciones botánicas base cactus mexicano como medio para disminuir potencialmente el riesgo de corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto. Por tanto, este trabajo justificará si el incremento en el costo debido a la adición propuesta es adecuado, para incrementar la vida útil de estructuras de concreto en ambientes agresivos (marinos).

1.1 Concreto reforzado

El concreto reforzado ha probado ser el material de construcción más adecuado para las estructuras, superando con grandes ventajas otras alternativas viables, como la madera o el acero. Su uso se remonta a mediados del siglo XIX; hasta años recientes eran muy pocos los desarrollos importantes en la tecnología del concreto, el cual ha proyectado hasta ahora nuevas líneas de investigación de gran importancia, ya que éstas tendrán un efecto significativo en la producción y el uso del concreto en los años por venir.

1.1.1 Concreto

El concreto es un material semejante a la piedra que se obtiene mediante la mezcla de dos componentes: pastas y agregados. La pasta de concreto se compone de cemento, agua, aditivos, arena, grava, oxígeno y otros componentes. Los agregados principales en el concreto son conocidos como finos (arena) y gruesos (grava), donde el cemento y el agua interactúan químicamente para unir las partículas de agregado y conformar una masa sólida.

1.1.2 Tipos de cemento

Un material cementante es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados inertes y conformar una masa sólida de resistencia y durabilidad adecuada (ONNCCE, 2004). Existen diferentes tipos de

cemento Portland en el mercado, los cuales se encuentran clasificados de acuerdo con la norma C150 de la ASTM (American Society for Testing and Materials), como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1
Tipos de cemento Portland

Cemento	Uso
Tipo I	Cemento de uso general.
Tipo II	Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede provocar agrietamientos.
Tipo III	Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es usado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días.
Tipo IV	Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III; se utiliza en construcciones de concreto masivo.
Tipo V	Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos; se emplea en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas concentradas.

(Neville, 1999)

La norma mexicana clasifica a los cementos de acuerdo con tres aspectos (ONNCCE, 2004):

1. Tipo de cemento.
2. Clase resistente.
3. Características especiales.

En la Tabla 1.2 se especifica el tipo de cemento (ONNCCE, 2004).

Tabla 1.2

Clasificación de los cementos

Tipo	Descripción
CPO	Cemento Portland ordinario
CPP	Cemento Portland puzolánico
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno.

(ONNCCE, 2004)

En la clasificación por clase resistente, se tienen dos tipos de resistencia: normal y rápida. La resistencia normal es la resistencia a la compresión a los 28 días (Tabla 1.3). La clase resistente de un cemento de acuerdo con la resistencia normal se indica por la designación del tipo de cemento, seguida por los valores 20, 30 o 40. La resistencia rápida se refiere a la resistencia a la compresión a los tres días (Tabla 1.3). Para especificar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia rápida se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia rápida para las clases 30 R y 40 R (ONNCCE, 2004).

Tabla 1.3

Resistencia a la compresión dependiendo de la clase resistente

Clase Resistente	Resistencia a la compresión N/mm²		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

(ONNCCE, 2004)

1.1.3 Agregados

Los agregados le proporcionan al concreto mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad. Son de gran importancia en el concreto, ya que la calidad de éstos se ve reflejada en su resistencia y en adición, sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural. Los agregados ocupan aproximadamente entre 70 y 75% del volumen de la masa endurecida. Originalmente se consideraban materiales inertes, que se utilizaban por razones económicas; sin embargo, ahora se piensa que éstos son un material de construcción unido a un todo cohesivo por medio de la pasta de cemento. De hecho, los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, térmicas y químicas influyen en el desempeño del concreto.

1.1.4 Relación agua/cemento

La relación agua/cemento no es otra cosa que la cantidad de agua utilizada con respecto a la cantidad de cemento. Juega un papel muy importante en la preparación del concreto, ya que la mezcla debe ser lo suficientemente semifluida, para manejarla cómodamente.

La relación agua cemento radica en que una pasta de cemento con poco contenido de agua estará más compacta, por lo que tendrá menos cantidad de poros interconectados (que son permeables a líquidos y gases) donde se aloje la humedad; esto impedirá la difusión de iones que puedan iniciar el proceso de corrosión. Lo contrario sucede en una pasta con mayor contenido de agua y por tanto, mayor porosidad y mayor permeabilidad. Esto es de importancia crítica para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, ya que tanto los elementos soporte (O, CO₂, etc.) como los agentes iniciadores (ión cloruro) del ataque corrosivo, pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto. La velocidad de difusión del oxígeno y de los iones cloruro en el concreto es menor cuando se reduce la relación agua/cemento y por consiguiente la porosidad (Durar, 2002).

La pasta de cemento pasa por dos etapas: el fraguado y el curado, que es donde se lleva a cabo la hidratación, la cual es de vital importancia en una estructura de concreto ya que le ayuda a alcanzar mejores propiedades mecánicas. El fraguado es el cambio de estado líquido a estado sólido, causado por la hidratación selectiva de algunos componentes del cemento (aluminato tricálcico y silicato tricálcico). El proceso de curado se realiza con el fin de prevenir la evaporación del agua en el concreto, manteniendo la humedad (100%) para que realice satisfactoriamente la hidratación de los materiales cementantes y el endurecimiento apropiado del concreto. El propósito es mantener el concreto saturado, con el objetivo de que los productos de hidratación del cemento llenen los espacios de la pasta fresca (de concreto) que al principio estaban llenos de agua (Neville, 1999).

1.1.5 Acero de refuerzo

El acero de refuerzo, es una aleación hierro/carbón que generalmente tiene un acabado superficial en relieve llamado corrugado (Fig. 1.1). El acero de refuerzo o armadura es el componente metálico embebido en la masa de concreto que le proporciona resistencia a la tracción. Cuando el concreto se prepara correctamente, debido a su elevado pH (de 12,5 a 13,5 aproximadamente) mantiene a las armaduras en estado pasivo, garantizando una protección química que prolonga su vida útil (Durar, 2002). Por otro lado, el concreto supone un impedimento físico a la penetración por difusión de oxígeno, humedad, cloruros, anhídrido carbónico y otras sustancias agresivas hasta la superficie del acero. Cuando estas condiciones no se satisfacen, el concreto se hace más permeable a agentes agresivos que ocasionan problemas de corrosión y causan su pronto deterioro.

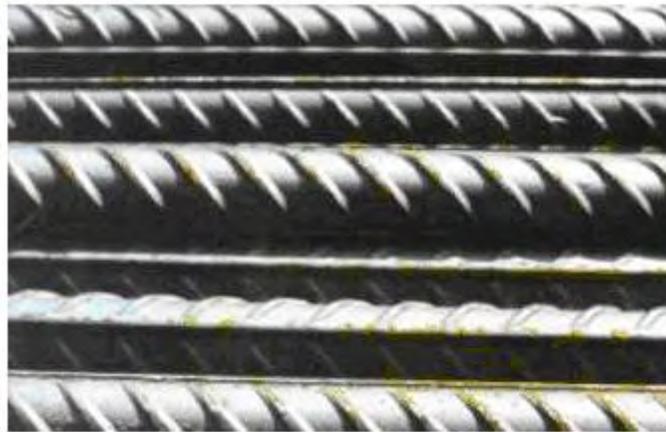


Figura 1.2

Acero de refuerzo

1.1.6 Durabilidad y resistencia

El estudio de la durabilidad de las estructuras de concreto armado y pretensado ha evolucionado durante los últimos años, gracias al mayor conocimiento de los mecanismos de transporte de líquidos y gases agresivos en el concreto, que hacen posible asociar en el tiempo los modelos matemáticos que expresan cuantitativamente esos mecanismos. Consecuentemente, permiten evaluar la vida útil de una estructura expresada en número de años y ya no en criterios subjetivos de tipo “más o menos adecuada” para un cierto grado de exposición (Durar, 2002; Torres y Martínez, 2001). El principio básico de análisis no se ha alterado. Se requiere, por un lado, conocer, evaluar y clasificar el grado de agresividad del ambiente y, por otro, conocer el concreto y la estructura, estableciendo entonces

una correspondencia entre ambos, es decir, entre la agresividad del medio y la durabilidad del concreto de la estructura.

La norma americana ACI 211, así como la europea ENV-2062, dejan muy en claro que el problema de durabilidad de las estructuras de concreto debe considerarse bajo los siguientes aspectos:

- La clasificación de la agresividad del medio ambiente
- La clasificación de la resistencia del concreto al deterioro
- Los modelos (preferentemente numéricos) del deterioro y envejecimiento de las estructuras de concreto
- La vida útil deseada, es decir, el periodo de tiempo en el cual se pretende que la estructura atienda ciertos requisitos funcionales con un mínimo de mantenimiento (Fig. 1.2) (Torres y Martínez, 2001).

La resistencia de la estructura de concreto reforzado dependerá, tanto de la resistencia del concreto, como de la resistencia de la armadura. Cualquiera de las dos que se deteriore, comprometerá la estructura como un todo.

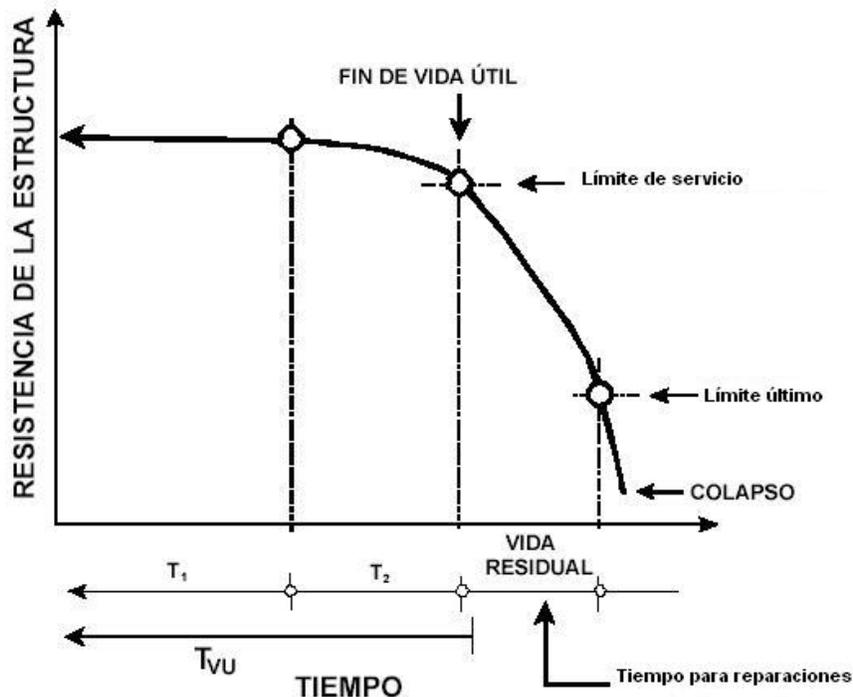


Figura 1.3

Modelo de durabilidad de una estructura

El modelo de durabilidad está basado en dos etapas de degradación: T_1 y T_2 que son denominados periodos de iniciación y de propagación. T_1 se define como el lapso de tiempo que tarda el ión cloruro en penetrar el recubrimiento y T_2 el periodo entre la pérdida de protección de la película pasiva y la manifestación externa de los daños por corrosión. T_{vu} es conocido como el periodo de vida útil de la estructura, pero cuando en ésta se presentan grietas mas anchas de 0.1mm, laminaciones (desprendimientos de fragmentos de concreto a causa de las tensiones generadas por los productos expansivos de corrosión), barra de refuerzo expuesta, entre otros, la estructura está en una etapa más allá de la vida útil, o sea, en la etapa de vida residual. El periodo de la vida residual termina hasta un límite último (Torres y Martínez, 2001).

1.2 Tipos de corrosión que se presentan en el concreto

Existen diversos tipos de corrosión que se presentan en el acero de refuerzo (Figura 1.4), los cuales se manifiestan dependiendo del tipo de ambiente que afecta la estructura (Durar, 2002):

1.- Corrosión localizada:

- Cloruros
- Picaduras
- Fisuras
- Bajo tensión

2. Corrosión generalizada:

- Carbonatación

Corrosión por cloruros. La corrosión del acero de refuerzo en concreto no se presenta, a menos que un agente externo al medio (Cl^- , SO_4^- , CO_2 , SO_2) modifique el estado pasivo normal del medio alcalino. El ión cloruro causa el rompimiento de la condición pasiva normal del acero en el concreto, dando como resultado el desarrollo de la corrosión.

Corrosión por picaduras. Las picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva. Resultan del ingreso de iones cloruros al medio, ya sea porque proviene del medio exterior o porque fueron incorporados en la masa del concreto. Como ya se sabe las picaduras son auto-catalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento.

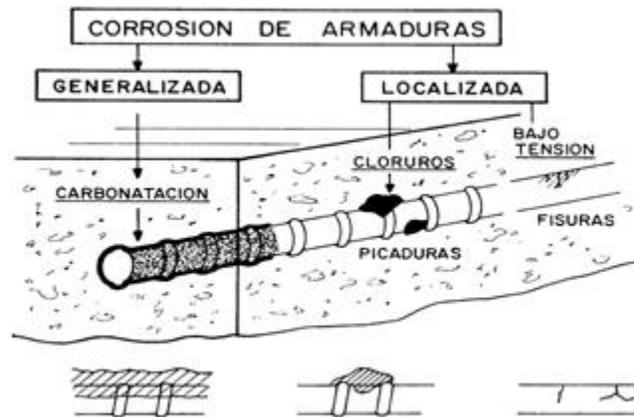


Figura 1.4

Tipos de ataque de corrosión en armaduras de concreto (Andrade, 1990)

Corrosión bajo tensión. Este tipo de corrosión ocurre cuando se dan conjuntamente dos circunstancias: esfuerzo de tracción sobre el acero y un medio agresivo. La corrosión bajo tensión es un fenómeno muy específico generalmente asociado a mala calidad del concreto, o a la presencia de iones generalmente aportados por algunos aditivos o al uso de un determinado tipo de acero.

Corrosión uniforme o generalizada (carbonatación). Es el resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva resultante de la carbonatación del concreto o la excesiva cantidad de iones cloruros. También puede ocurrir por efecto de la lixiviación del concreto (extracción de los componentes solubles del concreto, a través del paso del agua en el mismo concreto (Durar, 2002). La carbonatación es el proceso en el que el dióxido de carbono de la atmósfera reacciona con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto dando lugar a la neutralización de todo el material.

1.3 Métodos para mitigar la corrosión en el concreto

Los sistemas y métodos para la reparación, prevención y protección contra la corrosión son muy variados y constantemente aparecen nuevos productos que tratan de evitar y controlar este fenómeno. Existen diversas maneras de luchar contra la corrosión:

- 1) Aislamiento eléctrico del material, mediante el empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o por aplicación de recubrimientos diversos.

- 2) Polarización del mecanismo electroquímico. Esto se puede lograr eliminando el oxígeno disuelto, mediante la adición de inhibidores de corrosión, los cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión y por tanto, llegar a detener o disminuir sus efectos.
- 3) Utilización de materiales resistentes a la corrosión de acuerdo con el medio de exposición como varillas galvanizadas o de acero inoxidable.
- 4) Cambio del sentido de la corriente en la pila de corrosión. Por ejemplo, al unir acero con un metal más activo (zinc o magnesio) se puede llegar a suprimir la corrosión del acero, ya que dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo (zinc o magnesio). Este es el principio de la protección catódica (Ávila, 2002).

Actualmente existen otras técnicas electroquímicas diferentes a la protección catódica para proteger al acero, entre las cuales se encuentran la realcalinización del concreto y la extracción de cloruros. Sin embargo, son extremadamente costosas y en estructuras nuevas debe considerarse mejor realizar un buen concreto que sería una adecuada solución, ya que no existe mejor protección de la varilla de refuerzo que la película pasivante formada por la hidratación del cemento (Durar, 2002).

En términos generales un buen concreto debe tener:

- Relación agua/cemento baja
- Baja porosidad
- Alta compactación
- Bajo contenido de sales, principalmente cloruros.

La compactación del concreto es la propiedad más importante para efectos de su resistencia a la penetración de agentes agresivos externos. Es inversamente proporcional a la porosidad y entre más alta sea la compactación mayor será la protección de la varilla de refuerzo contra la penetración de agentes agresivos. La compactación es función de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos; sin embargo, puede afectarse por la mala homogeneidad del concreto (Durar, 2002).

Los aditivos también denominados adiciones, son productos orgánicos e inorgánicos formulados para mejorar algunas propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Estos se agregan al concreto antes o durante el proceso de amasado en una proporción no mayor a 5% en peso de cemento; se clasifican de acuerdo con su acción principal en aceleradores de fraguado y endurecimiento, retardadores, reductores de agua o plastificantes, expansores e inhibidores de corrosión. Algunos de los aditivos más utilizados se presentan a continuación.

Aceleradores de fraguado: Cloruros [CaCl_2 (más eficaz), NaCl , AlCl , FeCl pero en la actualidad está prohibido su uso], hidróxidos, carbonatos, silicatos.

Retardadores de fraguado: Existen dos tipos: inorgánicos (ZnO , PbO , H_3PO_4 , H_3BO_4), orgánicos (ácidos orgánicos, glicerina). Estos dependen del tipo, cantidad de cemento, dosificación y la relación agua/cemento (Neville, 1999).

Estos aditivos, dependiendo del medio donde se apliquen, pueden afectar el proceso de corrosión, ya que las sustancias de los aditivos reaccionan con los compuestos del cemento como el silicato y el aluminato tricálcico, que se acostumbra representar en ingeniería civil como silicato tricálcico, C_3A , que reaccionan con los iones cloruro y debido a la naturaleza de estos, despasivan a la varilla de refuerzo, y cuando alguno de los aditivos reacciona con el concreto pueden acelerar o pasar inadvertidos en esta reacción (Helene, 2003).

1.4 Inhibidores de corrosión para el concreto

La Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (*Federal Highway Administration*, FHWA) publicó recientemente un artículo que estudia los costos directos asociados a la corrosión metálica en cada sector de la industria, infraestructura, transporte, producción y manufactura. Los resultados de este estudio demuestran que el costo estimado anual total de la corrosión es de \$276 mil millones de dólares aproximadamente, 3,1% del producto interno bruto de EUA (Nace, 2002).

Sin embargo, por lo menos una tercera parte de estos costos pudieron ahorrarse con la puesta en práctica de técnicas avanzadas para controlar la corrosión. La corrosión puede ser reducida, modificando la química de la superficie del metal o de su entorno de exposición.

Para retardar el índice de cualquier reacción entre ellos, por ejemplo, a la modificación ambiental, pueden adicionarse cantidades pequeñas de inhibidores químicos, los cuales afectan la cinética de las reacciones electroquímicas individuales que juntas abarcan el proceso de la corrosión. Los inhibidores de la corrosión se utilizan extensamente en el concreto donde las formulaciones convencionales incluyen a menudo algunas especies (nitrito o benzoato) pero éstos tienen toxicidad significativa.

Consecuentemente están prohibidos por los ecologistas y podrían ser restringidos de ser utilizados en un futuro cercano ya que son agentes contaminantes de importancia del medio ambiente. Ashassi-Sorkhabi *et al.* (2004), consideran el uso de aminoácidos simples como la alanina, glicina y leucina como inhibidores de corrosión para el acero en ácido clorhídrico. Los aminoácidos naturales han sido analizados como inhibidores de corrosión en diferentes laboratorios alrededor del mundo (Prato, 1995; El-Etre, 2000; El-Etre, 2003; Asáis-Sorkhabi, 2004; Tebbji, 2005). De éstos los que son extraídos de las plantas del cactus son los más prometedores (El-Etre, 2000; El-Etre, 2003).

1.5 Antecedentes del nopal

1.5.1 Usos comunes en México

El nopal pertenece al género *Opuntia*, del grupo cacti, que contiene cerca de 300 variedades (algunos con espinas otros sin ellas) un tipo común del cactus espinoso también conocido como higo indio (*Opuntia Ficus-indica*. OFI), crecen en grandes matorrales. Originaria de México, ahora se cultiva en regiones del mediterráneo, sur y oeste de Estados Unidos y a lo largo de América Latina. El cactus se comercializa hoy en México, Chile, Argentina, Marruecos, Italia, parte de California, Texas y Florida (Sáenz, 2004).

El OFI se ha utilizado en todo el mundo con éxito por siglos de varias maneras. Los aztecas ya cultivaban la planta en México antes de que los españoles llegaran en el siglo dieciséis. También lo utilizaban con propósitos medicinales según lo descrito en el herbario azteca de 1552 (Bishop y Funhauser, 1998; Torres-Montes, 2005). Su nombre genérico fue nohpalli y actualmente se sigue llamando comúnmente nopal. Ellos extrajeron el jugo lechoso de la planta y lo mezclaron con miel y yema de huevo para crear una pomada para las quemaduras.

En la medicina tradicional mexicana el nopal también se utiliza para el tratamiento de diabetes y contra altas concentraciones de colesterol. Su acción baja el azúcar de la sangre documentado ya en algunos estudios.

Diversas especies del cactus de nopal se han empleado como fuente de aditivos a la producción de cal y la conservación de la arquitectura en América Latina [15-18]. Por ejemplo, una de las prácticas actualmente extensas de conservación es utilizar el residuo de agua hervida con cactus de nopal (*Opuntia spp*) comúnmente disponible en la producción de masilla de cal que se emplea como una capa para proteger o reparar las iglesias o misiones de adobe en México y suroeste de América del Sur (Bishop y Funhauser, 1998; Torres-Montes, 2005).

Los análisis químicos e industriales del líquido del nopal comúnmente llamado "mucílago" indican que contiene gran cantidad de pectina y varios azúcares (Cárdenas, 1998; Goycoolea y Cárdenas, 2003). Las propiedades viscosas del mucílago son similares a las del aloe vera. Varios mecanismos para observar las mejoras que resultaban de la adición de aditivos orgánicos naturales se han propuesto en la conservación y construcción con materiales base yeso según lo presentado en la literatura (Bishop y Funhauser, 1998; Torres-Montes, 2005).

El comportamiento del mucílago del nopal en materiales base cemento es aún desconocido. Pocas son las investigaciones que estudian ambos elementos juntos, y la pregunta por contestar sobre el papel de las adiciones del nopal en pastas de cemento, mortero y concreto todavía existe. Se ha sugerido que el mucílago mejora las características físicas de las pastas de cemento y morteros (Martínez, 2003; Celis Mendoza, 2007). Por ejemplo en pastas de cemento

disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la compresión (Chandra, 1998).

Dos son los trabajos realizados por la Universidad Marista de Querétaro A.C. en el uso de nopal y sábila deshidratada en la mejora de morteros base cemento (Martínez, 2005; Celis Mendoza, 2007). Éstos han sido la base para la continuación de este trabajo que ahora intenta evaluar el efecto de estas adiciones en las propiedades electroquímicas del acero en concretos con estas adiciones y contaminados por cloruros. En estos ensayos se presentaron dos vertientes en la preparación de los morteros estudiados. En la referencia (Martínez, 2005) los morteros fueron fabricados utilizando la misma cantidad de agua en la mezcla, manteniendo la relación agua cemento constante. En el segundo (Celis Mendoza, 2007) se mantuvo constante lo maniobrable de la mezcla (fluidez) cambiando la cantidad de agua y, por ende, la relación agua cemento.

De los dos trabajos se pudo determinar que las adiciones de nopal incrementaban la resistencia a la compresión del mortero si se mantenía la relación agua/cemento constante (Martínez, 2005). Por el contrario, al buscar una misma maniobrabilidad del mortero cambiando la relación agua/cemento de la mezcla, se pudo observar que aunque se necesitaba más contenido de agua en las mezclas con mayor contenido de nopal o sábila deshidratada, la resistencia a la compresión se mantuvo constante.

Resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ($\leq 2\%$ en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado (Celis Mendoza, 2007). Pero el papel de cómo tales adiciones incrementan la durabilidad del concreto no está todavía bien comprendido. Una posibilidad es que el mucílago actúa como un tapón de poros, disminuyendo la penetración de cloruros y del agua funcionando como una red en el concreto, gracias a la acción química entre las pectinas y las moléculas de cloruro o de agua. La otra podría ser que el mucílago actúe como inhibidor de la corrosión del acero en concretos contaminados con cloruros (Torres-Acosta, 2007). Es posible también que funcione de forma semejante como lo observado en estudios anteriores en donde el mucílago del nopal actuaba como inhibidor de la corrosión de aluminio o acero en soluciones ácidas (El-Etre, 2000; El-Etre, 2003).

1.6 Alcances

Producto de la investigación bibliográfica presentada y teniendo como base que el nopal fue la única adición que retardó la corrosión en probetas de concreto reforzado expuestas a ciclos de humedad y secado con cloruros, este trabajo continuará el iniciado en la referencia (Torres-Acosta 2005) con la diferencia que se utilizarán concentraciones menores de nopal deshidratado.

- Elaborar 24 prismas de concreto reforzado de 20 cm. de largo, 10 de base y 5 de espesor, reforzados con dos varillas de 0,95 cm. de diámetro. Los concretos se harán con una relación agua/cemento de 0,45 y cementos tipos CPP y CPP como controles (tres prismas por cada uno). Las adiciones se harán a 0,25, 0,5 y 1% por peso del cemento. Se utilizarán dos marcas de nopal deshidratado: therbal y nopalzin.
- Acelerar el proceso de transporte del ión cloruro mediante ciclos de humedad (meter los prismas en agua salada) y secado (sacarlos de los baños de agua salada).
- Monitorear los cambios electroquímicos durante los ciclos de humedad y secado utilizando mediciones de potencial de media celda y de resistencia a la polarización (R_p).

2 Marco teórico

2.1 El fenómeno de la corrosión

Todos los metales que utilizamos en nuestra vida diaria desde el grifo del agua, las tuberías, el autobús en el que viajamos, los automóviles, aviones, edificios, utensilios de cocina y todas las obras de construcción, están soportadas principalmente por acero o algún material metálico. Es por eso que el hombre busca que estos materiales metálicos sean estables en la atmósfera y que su vida útil sea larga. Sin embargo, los metales se degradan con el tiempo de diferentes formas y pierden sus propiedades; todo ello se debe a la propia atmósfera que contiene oxígeno y otros elementos que reaccionan con el acero y lo degradan paulatinamente marcando el retorno del metal hacia una forma más estable, generalmente como óxidos o sulfuros (Rodríguez y col., 1999).

La mayoría de los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuestos a las condiciones ambientales, tienden a estabilizarse química y energéticamente.

El regreso espontáneo a su estado natural combinado de estos materiales, es la corrosión. Por lo que este proceso puede definirse como la degradación paulatina de los materiales metálicos debido al medio que lo rodea, produciendo un deterioro en sus propiedades físicas y químicas (Ávila, 2002). Dicha degradación trae como consecuencia pérdidas millonarias de dinero y anualmente se destruye hasta 25% de la producción anual de acero (Koch y col., 2002), debido al deterioro de estructuras, maquinaria, tuberías, etc., además de los daños indirectos que este provoca y los inconvenientes que supone su sustitución y por supuesto la degradación y excesivo consumo de los recursos naturales, aplicado principalmente a los metales cuya reserva mundial es limitada y que cada día su extracción es más difícil y costosa.

2.1.1 Generalidades sobre corrosión

Los metales forman parte de nuestra vida cotidiana; sin embargo, éstos se desgastan; tal dependencia nos ha obligado a utilizar aleaciones, metales o sistemas que no permitan la corrosión o que hagan que el avance de la misma sea muy lento.

Existen muchas maneras, por las cuales un metal o aleación deja de ser útil; por ejemplo, puede disolverse lentamente y transformarse en otra especie (corrosión uniforme); también pueden formarse grietas bajo ciertas condiciones al estar sujetos a un medio agresivo y un alto esfuerzo mecánico (corrosión bajo tensión) o pueden formar agujeros profundos que avanzan rápidamente (corrosión por

picaduras). Asimismo, los metales pueden sufrir de fatiga, con la consecuente pérdida de resistencia (corrosión por fatiga). La corrosión, por tanto, es un proceso, a veces inevitable, cuya prevención es difícil, pero sobre el que es posible y practicable un control y protección al mismo.

El proceso de corrosión en los metales, es un proceso químico cuando se refiere a sistemas no electrolíticos como gases y vapores o líquidos no conductores, y electroquímico cuando se presentan reacciones de oxidación y reducción, estableciéndose un intercambio de electrones y consecuentemente el paso de una corriente eléctrica entre un ánodo y un cátodo, a través de un medio conductor, como en una pila galvánica (Uhlig, 1970).

Las reacciones electroquímicas, se presentan generalmente en un medio acuoso y toman parte especies químicas y cargas eléctricas; un ejemplo de reacciones electroquímicas es la reacción de los iones hidrógeno a hidrógeno gas y la oxidación del agua a oxígeno gas. Este tipo de reacciones generan un proceso instantáneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión y donde ocurre la reacción de oxidación); una zona catódica (donde se produce la reacción de reducción), un electrolito y un contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo. Un electrolito es una solución que conduce la electricidad, debido a la presencia de iones (Ávila, 2002). La Fig. 2.1 muestra la típica celda de corrosión o electrolítica.

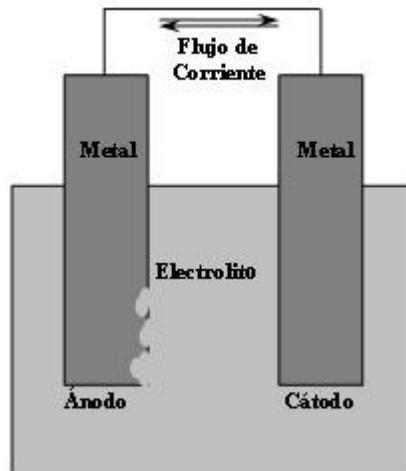


Figura 2.1
Diagrama de una celda electrolítica

Los cátodos o ánodos involucrados en un proceso de corrosión se conocen como electrodos y para que se lleve a cabo el proceso de corrosión el ánodo y el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito. La corriente eléctrica circula desde el cátodo al ánodo; en el electrolito el transporte de la corriente eléctrica tendrá lugar del ánodo al cátodo. Habrá un consumo y por consiguiente pérdida de metal en

aquellos lugares del ánodo en el que la corriente abandone el electrodo para pasar al electrolito. Este tipo de corrosión electroquímica también se presenta cuando dos metales diferentes, que tienen actividades diferentes, son sumergidos en un electrolito y conectados eléctricamente entre sí, se tendrá un flujo de electrones del metal más activo o anódico hacia el metal más noble o catódico, dejando el material anódico con una diferencia de electrones.

Esto trae como consecuencia que el ánodo se disuelva, es decir, se corroa. A la actividad electroquímica de esta naturaleza se le conoce como corrosión galvánica; dicha corrosión constituye también el principio de las llamadas pilas "secas". Cualquier par galvánico es capaz de crear energía en forma de una diferencia de potencial capaz de mover electrones. La energía generada por la corrosión no puede ser recuperada o usada, se desperdicia sin que podamos hacer algo, debido a que los procesos de corrosión ocurren a niveles microscópicos, donde los pares galvánicos son sistemas tan locales que inclusive el conductor eléctrico externo es la misma estructura metálica que se corroe. Un proceso de corrosión involucra tanto la reacción anódica como la catódica y si una de las dos reacciones falla, el proceso de corrosión se detiene.

Para describir el deterioro del acero en la atmósfera, tendremos en primer lugar que decir que el acero es una aleación hierro-carbono (máximo 2% C) que presenta diferentes fases, dependiendo del método utilizado para su fabricación, de la concentración de carbono, de la presencia de aleantes, de la refinación del acero o de su tratamiento térmico, el cual es necesario para imprimirle ciertas propiedades mecánicas.

En el acero encontramos una fase rica en hierro llamada ferrita y otra que contiene carburos de hierro en una matriz de ferrita llamada perlita; estas dos fases son diferentes y conductoras; es fácil establecer un par galvánico ante la presencia de un electrolito. Sin embargo, la ferrita es siempre más anódica (activa) que la fase perlítica (noble); el electrolito lo constituirá la humedad que existe en la atmósfera, la cual forma películas muy finas y casi imperceptibles sobre la superficie metálica.

Esta película de agua se acumulará y concentrará ciertos elementos e impurezas que están presentes en el aire, tales como el oxígeno, bióxido de carbono, anhídrido sulfuroso, cloruros, etc., dando como resultado una solución muy conductora y específicamente agresiva; es así como se conforma la pila de corrosión (Ávila, 2002). Esta pila forma un circuito eléctrico y en un circuito eléctrico existen varios fenómenos que se pueden medir:

- 1) La corriente, medida en amperios (A)
- 2) La fuerza electromotriz y la diferencia de potencial, ambas medidas en voltios (V)
- 3) La resistencia medida en ohmios (Ω)

2.1.2 Introducción a la ley de Ohm

La conductividad eléctrica es la facilidad con que puede moverse la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia. Ya que un electrón es una cantidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada Culombio (Q). Un culombio corresponde a 6,24 trillones de electrones ($6,24 \times 10^{18}$). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (densidad (I)). El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones y por iones, el flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones (corriente eléctrica).

$$A = Q/s \quad 1 \text{ Amperio} = 1 \text{ culombio/segundo} \quad (2.1)$$

$$Q = It \quad \text{Culombio} = \text{amperio} \times s \quad (2.2)$$

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (J), cuando 1 Q de electricidad se mueve de un punto al otro (Ávila, 2003). A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama voltio (V) y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 voltio cuando se realiza un trabajo de 1 J por cada culombio de electricidad que transita de un punto al otro, por tanto:

$$V = J/C \quad (2.3)$$

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en voltios y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda. Esta fem representa el trabajo total efectuado en julios por los culombios de electricidad transportados en un circuito en el que la celda esta conectada.

La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos (Ávila, 2003). El conductor que siga esta relación obedece la ley de Ohm expresada como:

$$V = RI \quad (2.4)$$

Donde R es la resistencia o habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor tiene baja resistencia y un mal conductor tiene alta resistencia. Un ohmio se define como la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio en sus extremos y una corriente de 1 A fluye por él.

$$\Omega = V/A \quad (2.5)$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero por ejemplo en el carbón la resistencia baja con la esta. La resistencia al flujo de corriente es mínima cuando:

- a) El medio presenta baja resistividad (alta conductividad)
- b) Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
- c) Tenemos un área transversal grande para el flujo de corriente

En cambio la resistencia al flujo de corriente es máxima cuando:

- a) El medio presenta alta resistividad (baja conductividad)
- b) Las distancias son grandes para el flujo de corriente
- c) El área transversal es pequeña para el flujo de corriente

2.1.3 Serie de fuerza electromotriz

Es así que la fuerza de una corriente que se obtiene de una celda no sólo depende de su fuerza electromotriz, sino también de su resistencia interna (Ávila y col., 2003, ASM, 1998). Debido a que los valores de una celda de corrosión representan especies químicas, es conveniente transformar la energía de una reacción química como energía eléctrica. Cuando una reacción química sucede espontáneamente, libera energía, este tipo de energía puede ser empleada parcialmente para efectuar algún tipo de trabajo; y esto se le denomina energía libre de una reacción y se representa como ΔG .

$$-\Delta G = W \quad (2.6)$$

En donde $-\Delta G$ es el cambio de energía libre de una reacción espontánea y W es cualquier trabajo, a este trabajo se le llama trabajo eléctrico y se define como la carga transportada, multiplicada por la diferencia de potencial existente entre las dos fases, es decir ΔE° , se tiene entonces que :

$$\text{Trabajo eléctrico } W = nF \Delta E^\circ \quad (2.7)$$

En donde n es el número de electrones transportados y F la constante de Faraday.

Sustituyendo la Ecuación (2.6) en la Ecuación (2.7) se obtiene que:

$$-\Delta G = nF \Delta E^\circ \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) implica que el cambio de una reacción química es directamente proporcional al potencial de celda generado. Es por ello que para poder conocer la

tendencia de los metales a corroerse, bajo el estudio de esta corriente eléctrica, se diseñó una escala donde los diversos metales en solución con sus mismas sales son medidos bajo condiciones estándar de temperatura, presión y concentración (ASM, 1998). Sin embargo, es imposible conocer el potencial verdadero o absoluto de un metal con sus iones en solución; ante esta situación se eligió un patrón de referencia contra el cual se pudieran medir todos los potenciales de electrodo. Para ello se eligió la reacción (2.9)



en agua, bajo condiciones estándar y con un electrodo de platino. Esta ecuación representa la reacción del electrodo estándar de hidrógeno y se le asigna un valor de 0.000 voltios. A la lista de metales en equilibrio con sus propios iones, respecto al electrodo normal de hidrógeno (ENH) se le llama Serie de Fuerza Electromotriz, la cuál se muestra en la Tabla 1.

Esta serie de fuerza electromotriz nos señala la tendencia termodinámica de los metales a corroerse y la espontaneidad de las reacciones, ya que cuanto más negativo sea el valor, la tendencia a corroerse será aún mayor. Sin embargo, esta serie posee severas limitaciones debido a que los metales no están siempre en contacto con sus mismas sales, sino con el agua, que es un factor muy importante para que se lleve a cabo la corrosión, por lo que los estudios deben llevarse a cabo en medios acuosos.

Una buena aproximación para el estudio del comportamiento de los metales en medios acuosos lo constituye los diagramas de potencial de reducción (E°_{H}) contra pH, también llamados de Pourbaix, en honor a Marcel Pourbaix quien los desarrolló.

Los diagramas de Pourbaix muestran los equilibrios existentes entre un metal y agua a 25° C y son representados por líneas que dependen del potencial, del pH o de ambos, delimitando así zonas termodinámicamente estables donde el metal existe en alguna de sus formas (disueltos, como óxido, como hidróxido o como metal, etc.).

Tabla 1
Serie de Fuerza Electromotriz

Reacción	Potencial estándar 25° C V vs ENH	Reacción	Potencial estándar 25° C V vs ENH
$\text{Au}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Au}$	1,50	$\text{Ga}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Ga}$	-0,53
$\text{Pd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pd}$	0,987	$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,74
$\text{Hg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Hg}$	0,854	$\text{Cr}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cr}$	-0,91
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}$	0,800	$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Zn}$	-0,763
$\text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Hg}$	0,789	$\text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mn}$	-1,18
$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0,521	$\text{Zr}^{4+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Zr}$	-1,53
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$	0,337	$\text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ti}$	-1,63
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	0,000	$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{Al}$	-1,66
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb}$	-0,126	$\text{Hf}^{4+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Hf}$	-1,70
$\text{Sn}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Sn}$	-0,136	$\text{U}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{U}$	-1,80
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$	-0,250	$\text{Be}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Be}$	-1,85
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$	-0,277	$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}$	-2,37
$\text{Tl}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Tl}$	-0,336	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$	-2,71
$\text{In}^{3+} + 3\text{e}^- \rightarrow \text{In}$	-0,342	$\text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ca}$	-2,87
$\text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cd}$	-0,403	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{K}$	-2,93

(ASM, 1998)

2.1.4 Diagramas de Pourbaix

Los diagramas de Pourbaix contienen una división natural del campo gráfico en tres regiones, las cuales pueden ser clasificadas de acuerdo con su actividad corrosiva en: pasividad, corrosión e inmunidad. La zona de pasividad, corresponde a una zona de corrosión, donde la fase formada constituye una película protectora formada por óxidos, hidróxidos, etc., que evita el avance del proceso de corrosión.

La formación de imperfecciones en la misma (pasivación imperfecta) conlleva a la aparición de corrosiones locales (picaduras). La zona de corrosión, se caracteriza por el predominio de las reacciones de oxidación, que causan la destrucción por combinación o disolución continua del metal. El límite entre la zona de inmunidad y la de corrosión activa es gradual, al igual que con la de pasividad. La zona de inmunidad, o zona de predominio de las reacciones de reducción, corresponde a la zona donde el metal se encuentra preservado bajo ciertas condiciones muy especiales de potencial y pH.

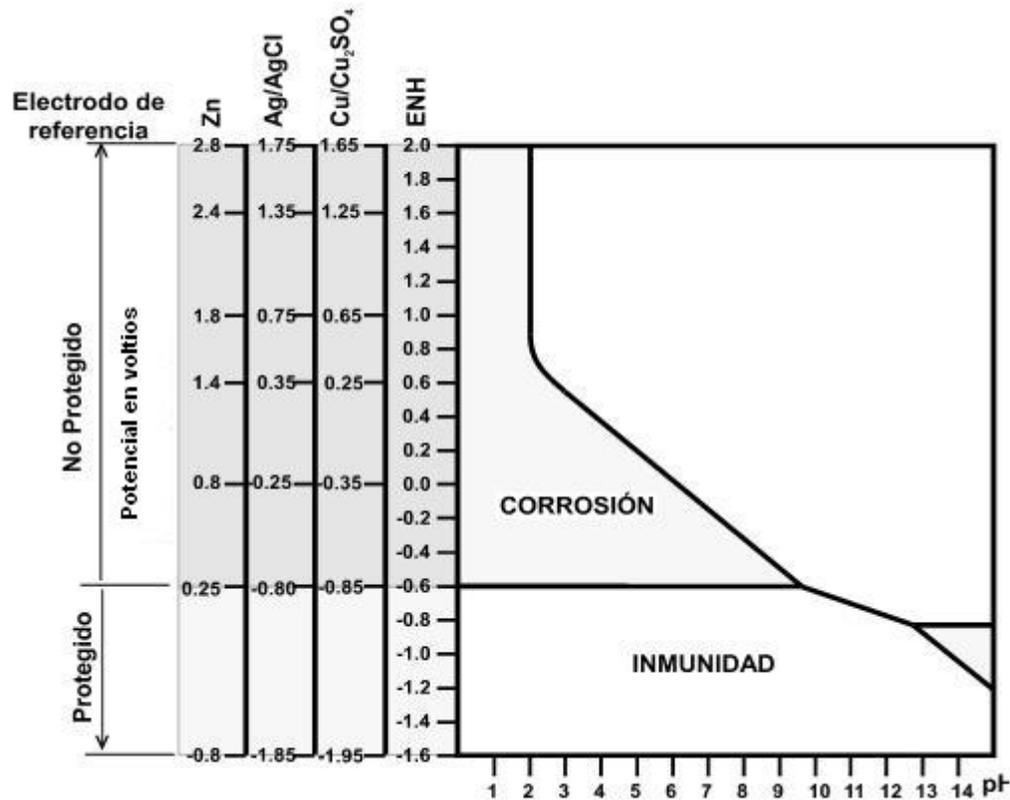


Figura 2.2

Diagrama de Pourbaix para el hierro

Pueden estudiarse para todos los metales, las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación, para determinar en cada caso las condiciones de E°_H -pH que supone estos comportamientos, lo que ayudará a diseñar estrategias adecuadas de lucha

contra la corrosión. En especial, debemos hacer hincapié en el diagrama E°_H -pH para el hierro (Fig. 2.2), por ser el material más usado en la industria de la construcción. Éste muestra una zona de inmunidad para pH inferiores a 11, a partir de un potencial estándar de -0,53 V con respecto al electrodo normal de hidrógeno, o -0,85 V con respecto al electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), que constituye el fundamento de la aplicación de la protección catódica.

A pesar de la gran estabilidad del ENH, éste presenta dificultades en su operación, ya que es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones prácticas, es por ello que se utilizan los llamados electrodos de referencia que deben cumplir con las siguientes condiciones:

- No reaccionar con su contenedor
- Fácil de construir
- No polarizable
- Reproducible
- Fácil de usar
- Que el potencial de reacción oxido-reducción permanezca constante respecto al ENH.

Como electrodos de referencia se utilizan el de calomel, el de plata/cloruro de plata, el de zinc, el de cobre/sulfato de cobre, teniendo éste último una gran utilización práctica (ASTM C 876–91 y ASM, 1998).

La Fig. 2.3 representa una equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodos de referencia utilizados en protección catódica, con indicación de los intervalos de corrosión, protección y sobreprotección para el acero al carbono (Ávila, 2003).

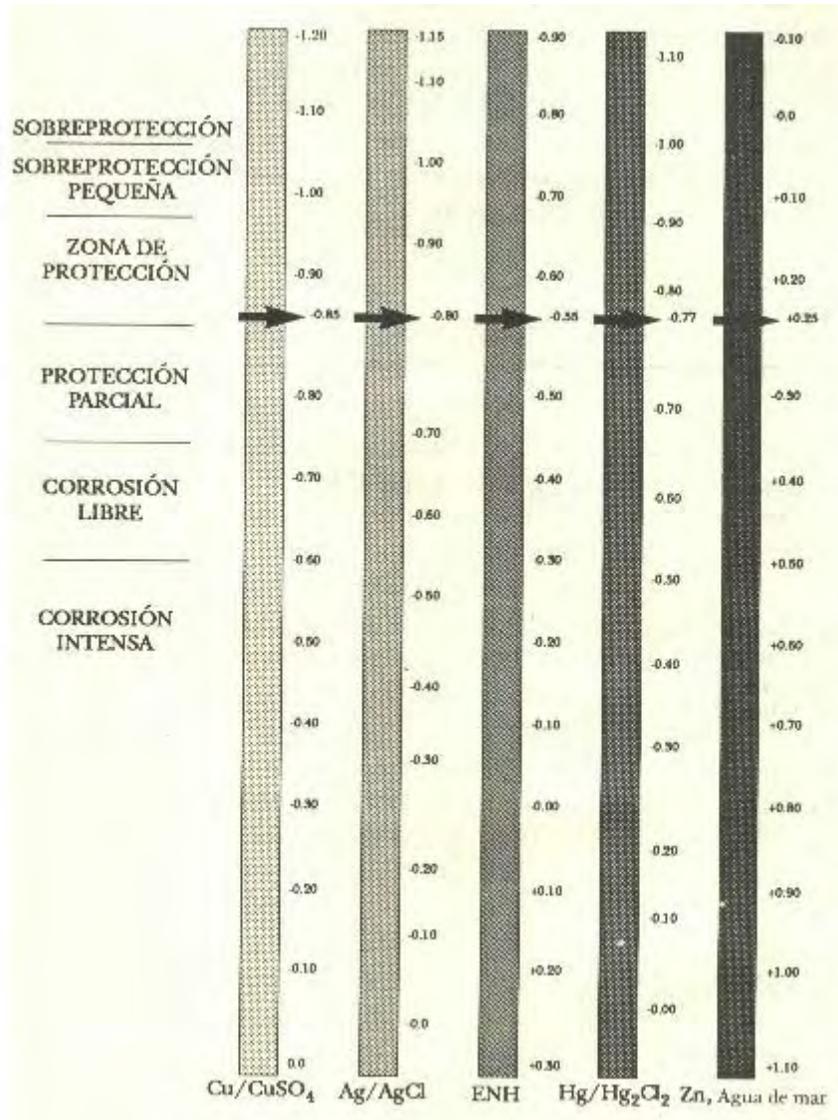


Figura 2.3

Equivalencia aproximada entre las escalas de potencial relativas a los electrodos de referencia utilizados en protección catódica, con indicación de intervalos de corrosión, protección y sobreprotección para el acero al carbono (Ávila, 2003)

2.1.5 Cinética de la corrosión de metales

En los diagramas de Pourbaix, que representan un proceso termodinámico de corrosión, no se incluyen los datos cinéticos. Esto significa que la velocidad del proceso no se toma en cuenta, solo la tendencia a que la corrosión ocurra. La cinética nos dice qué cantidad de metal por unidad de tiempo se está disolviendo en un medio dado, cuando este sistema está desplazado de una situación de equilibrio (ASM, 1998).

Butler y Volmer desarrollaron la teoría cinética electroquímica, obteniendo una expresión para la velocidad de reacción de transferencia electrónica bajo la influencia de un campo eléctrico, por lo que dicha relación representa la ecuación fundamental de la cinética electroquímica para transferencia de carga de electrodos.

$$i = i_0 \exp(1 - \beta)\eta^{\frac{F}{RT}} - \exp(-\beta)\eta^{\frac{F}{RT}} \quad (2.10)$$

donde i es la corriente neta, i_0 la corriente de intercambio, η el sobrepotencial, β el coeficiente de simetría (para corrosión toma un valor de 0,5), R la constante de los gases: T representa la temperatura absoluta y F la constante de Faraday. Esta ecuación es semejante a una función de seno hiperbólico, cuando se representa en una gráfica de potencial en función de la corriente, la cual se conoce como curva de polarización. Cuando el sobrepotencial es pequeño $< 0,05$ V, la ecuación de Butler-Volmer se puede simplificar.

$$i = i_0 \eta^{\frac{nF}{RT}} \quad (2.11)$$

$$\eta = \frac{iRT}{i_0 nF} \quad (2.12)$$

Por lo que la curva se puede considerar lineal y la pendiente de la curva de polarización, tiene unidades de una resistencia eléctrica que se conoce como resistencia a la polarización R_p , que es la resistencia de transferencia de carga bajo ciertas condiciones. Un valor de i_0 grande representa una R_p pequeña y viceversa.

$$R_p = \frac{RTi}{nFi_0} \quad (2.13)$$

Por las leyes de Faraday, ésta puede ser convertida a velocidad de corrosión.

Los potenciostatos-galvanostatos son instrumentos capaces de medir la resistencia a la polarización (R_p), que se relaciona con la I_{corr} (velocidad o densidad de corriente) como la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Sus unidades son $\mu A/cm^2$, transformando este dato a partir de la densidad de corriente en unidades de velocidad (mmpy, mpy).

$$R_p = \frac{B}{I_{corr}} \quad (2.14)$$

Donde R_p está en unidades de Ωcm^2 de tal manera que las unidades de I_{corr} serían $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. B se calcula mediante las pendientes catódicas y anódicas de la curva de polarización cíclica, (se asume como una constante que oscila entre 26 mV para metales activos y 52mV para metales pasivos). La R_p resulta de aplicar una pequeña perturbación eléctrica a las varillas y medir el cambio de potencial o intensidad que se produce. Estas perturbaciones deben causar un cambio de ± 20 mV como máximo.

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (2.15)$$

Los valores obtenidos en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ se pueden transformar en pérdida de espesor por unidad de tiempo mediante la ley de Faraday.

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{año}} = \frac{M i_{\text{corr}}}{nF\delta} \quad (2.16)$$

donde n es el número de electrones de intercambio o transferidos, I_{corr} la corriente en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, F la constante de Faraday, M el peso molecular del metal y δ la densidad del metal.

2.2 Corrosión en concreto reforzado

2.2.1 Planteamiento del problema

Las estructuras de concreto reforzado no escapan a la corrosión, esto se puede observar en puentes de zonas altamente industrializadas y costeras. La aparición de manchas de herrumbre en las estructuras de concreto reforzado, se deben a que el concreto es discontinuo, duro, de alta densidad y tiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados, siendo permeable a líquidos y gases, por lo que los agentes que desencadenan la corrosión en la atmósfera pueden introducirse en el concreto, formando una celda electroquímica y dar inicio así a la corrosión del acero (Helene, 2003). Cuando se rompe la película pasivante debido a sustancias agresivas que penetran en el concreto, el óxido formado en exceso ocupa un volumen mayor que el acero sin corroer, por lo que disminuye la sección de la varilla y hace perder la adherencia inicial deseada entre el acero y el concreto.

El concreto reforzado es un material compuesto que combina acero (varilla) y concreto, en el cual el concreto constituye una protección contra la corrosión del acero, esto se debe principalmente a la reacción alcalina asociada con la hidratación del cemento la cual tiene un alto valor de pH (de 12.5 a 13.6) protegiendo a la varilla pasivándola. Debido a su resistencia a la difusión, el

concreto constituye una barrera física que dificulta el paso a agentes promotores de la corrosión como oxígeno, dióxido de carbono y cloruros hacia la varilla. El concreto reforzado ha sido la mezcla por excelencia para gran cantidad de construcciones ya que el concreto le confiere al acero una protección de doble naturaleza; por un lado es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro el líquido encerrado en los poros del concreto forma un electrolito que ayuda a formar una película pasiva (Helene, 2003).

La desventaja del concreto es que es muy poroso y esto se debe entre otras cosas a la relación agua/cemento, estos poros permiten el acceso de elementos agresivos hasta el acero, que desencadenan la corrosión por el medio que lo rodea (Castro, 2003). La capa de óxido pasivante en la varilla cambia cuando el concreto se altera o a través de él penetran sustancias agresivas y se produce el rompimiento de esta película (Moreno, 2004). Los factores que afectan la corrosión son la dosificación, la compactación y la homogeneidad del concreto, el espesor del recubrimiento de concreto, el estado superficial de la varilla y la humedad ambiental. Es por ello que el concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, para garantizar la protección de la varilla de refuerzo contra las acciones agresivas de los agentes externos (Castro, 2003).

Existen iones despasivantes, como los cloruros, que provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras), que reducen drásticamente la sección de trabajo del acero, en espacios de tiempo relativamente cortos (Moreno, 2004 y Trejo, 2005). Estos cloruros se pueden encontrar en la masa de concreto para que los contengan las materias primas o, porque penetren desde el exterior al estar situada una estructura en ambientes marinos o a la acción de sales de deshielo (Whitmore, 2003).

Para que se inicie y mantenga la corrosión de la varilla, existen dos mecanismos generalmente aceptados:

- 1) Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas o neutralización parcial con bióxido de carbono u otra sustancia ácida.
- 2) Acción electroquímica que involucra al ión cloruro en presencia de oxígeno.

Es importante resaltar que sin la presencia simultánea en el concreto de oxígeno y humedad no es termodinámicamente posible la corrosión y sin una cantidad mínima crítica, no es factible que se desarrolle con una velocidad apreciable.

Ambos factores tienen un carácter ambivalente, pues cuando las varillas están pasivadas, una cierta cantidad de oxígeno y humedad pueden servir para engrosar la capa pasivante, pero cuando las varillas se corroen activamente, actúan acelerando notablemente el ataque. En su ausencia, sin embargo, la detienen completamente.

2.2.2 Tipos de corrosión en el concreto

Los tipos de corrosión más frecuentes en las varillas son tres:

a) Corrosión uniforme. Es el resultado de la pérdida generalizada de la película pasiva, debida principalmente a la carbonatación. El proceso de carbonatación sucede por las reacciones de los compuestos básicos de la fase acuosa del concreto, como NaOH, KOH y específicamente $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con los componentes ácidos de la atmósfera, tales como SO_2 y CO_2 , éste último es el más abundante y del cual deriva el nombre de carbonatación; los productos de estas reacciones son carbonatos, sulfatos y agua, con un descenso en la alcalinidad del concreto.

b) Corrosión localizada. Se da principalmente por la acción de agentes despasivantes como los iones cloruros. Los cloruros destruyen de forma puntual la película protectora pasiva formada sobre el acero por la alcalinidad del medio circundante. Estos iones pueden estar en el concreto porque se añaden a la mezcla y por tanto están presentes en el agua o en la arena, o porque penetren desde el exterior a través de la red de poros en estructuras de ambientes marinos. Aquí se pueden diferenciar varios tipos:

- 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, se crea una celda diferencial que induce la corrosión.
- Corrosión bajo tensión. Se caracteriza por ocurrir en aceros sometidos a altos esfuerzos en un ambiente altamente agresivo, lo que resulta en microgrietas, las cuales al progresar su crecimiento, pueden generar fracturas del metal.
- Corrosión por corrientes de interferencia. Son causadas por corrientes que no forman parte de la celda electroquímica (Durar, 2002).

c) Corrosión galvánica. Ésta se presenta cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico, en el concreto esta corrosión se formará cuando no se desarrolla una película pasiva característica en alguna sección de la varilla, lo que produce una pila de corrosión (Ávila, 2002). Estos tipos de corrosión se presentaron gráficamente en la Fig. 1.4.

2.2.3 Modelo de durabilidad

Los mecanismos de deterioro son generalmente desarrollados a través del tiempo y afectan directamente la vida útil o de servicio de la estructura. El deterioro atraviesa dos fases:

a) Iniciación. Es el tiempo que tarda el agente agresor en atravesar el recubrimiento de concreto, llegar a la película protectora de la varilla y

despasivarla. La penetración de iones cloruro se desarrollan durante la fase de iniciación y este proceso es acelerado por ciclos de humedecido/secado. El establecimiento de un límite seguro de concentración de iones cloruro es difícil de establecer debido a su dependencia de la humedad relativa, la permeabilidad del mismo y el contenido del cemento. Un valor umbral aceptado de concentración de iones cloruro es 0,4% con relación al peso de cemento o 0,05-1% en relación con el peso de concreto (Durar, 2002).

b) Propagación. Caracterizada por el deterioro acelerado, donde la varilla se corroe libremente hasta alcanzar un nivel inaceptable de corrosión. Los factores que aceleran la propagación del deterioro son el contenido de humedad y de oxígeno que rodean la varilla. El concreto absorbe humedad muy rápidamente, pero se seca muy despacio debido a que la humedad se almacena en los poros del concreto.

Cuando los poros están saturados, o humedecidos, existe una resistividad mínima y se facilita la formación de la pila de corrosión, sin embargo el oxígeno tendrá primero que disolverse en el agua para poder alcanzar la varilla, si este es el caso, las velocidades de corrosión serán de moderadas a bajas (Helene, 2003).

En el reporte de la Red Temática DURAR se propone una definición para el concepto de vida útil de una estructura: "Periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento". En el diseño de estructuras por durabilidad el requerimiento de la vida útil de la estructura puede ser definido de antemano por el cliente, por lo que se le llamará vida útil de servicio (T_{VU}).

Después del término de la vida útil comienza lo que se conoce como vida residual y es el tiempo en que la estructura alcanza el fin de la vida útil. Este es el periodo en el que la estructura necesitaría reparación, remodelación o completa renovación para que regrese a su estado de servicio original; esto es, que sea segura, funcional y estética. La etapa de vida residual es el tiempo que tiene el dueño de la estructura, para repararla antes que la degradación avance hasta el límite de posible colapso. Estas etapas fueron presentadas en un trabajo previo que se mostró en la Fig. 1.3.

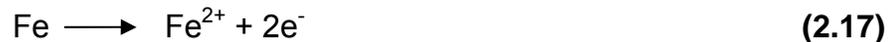
Los valores mínimos de servicio (o valores máximos aceptables de degradación) son llamados los estados límites de la durabilidad de una estructura. Estos son principalmente dos: 1) Estado límite de servicio (ELS) y 2) Estado límite último (ELU). El primero (ELS) corresponde al punto en el tiempo en el cual la estructura ha llegado al fin de su vida útil, o sea, "es el estado en el cual los requerimientos de servicio de una estructura (seguridad, funcionalidad y estética) ya no se cumplen". El ELU es el estado en que la estructura "se encuentra asociada con colapso u otra forma similar de falla estructural" (Torres, 2001). Se considera que la estructura mantiene las características de diseño mientras el deterioro no alcance un cierto valor límite que dependerá de cada elemento estructural.

Sin embargo, en la propagación o vida residual es necesario y propicio realizar la reparación de la estructura, ya que si no se hace en este tiempo se puede llegar al colapso de la misma. La Fig. 1.3 muestra un esquema de la vida útil de una estructura (Torres, 2001).

2.2.4 La electroquímica de la corrosión en concreto

La corrosión en el concreto ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica la cual consiste, como se explicó en la sección anterior, de cuatro elementos principales: ánodo, cátodo, conductor metálico y electrolito. En este caso y en presencia de humedad, el concreto actúa como electrolito. La corrosión del acero (varilla) en concreto contaminado con cloruros se lleva a cabo como sigue:

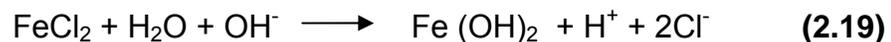
Reacción anódica: El hierro cambia a un ión cargado positivamente y libera electrones del ánodo:



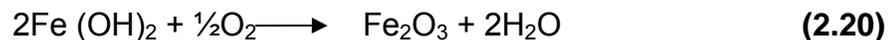
El ión hierro y el ión cloruro se combinan para producir un cloruro de hierro complejo en el ánodo como sigue



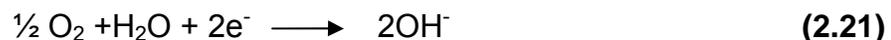
En condiciones alcalinas, el cloruro de hierro complejo reacciona con agua y el ión hidroxilo (del cátodo) en el sitio de corrosión y forma un hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), dejando los iones cloruro en el poro del agua en el ánodo. El hidróxido de hierro es la forma inicial de la corrosión del acero y tiene un color negro verdusco. El ión cloruro en el agua del poro es ahora libre de reaccionar con más hierro y continuar el proceso de corrosión



El hidróxido de hierro y el oxígeno presentes en el poro de agua del concreto en el ánodo, reaccionan para formar el óxido rojizo característico (Fe_2O_3 , hematita)



Reacción catódica: Para mantener el equilibrio, los electrones liberados en el ánodo, se mueven a través del acero y son consumidos en el cátodo, suponiendo que existen humedad y oxígeno. Como resultado, en el cátodo, se forman iones hidroxilo



Los iones hidroxilo producidos, se difunden en el ánodo y toman parte en el proceso de corrosión.

Electrolito: El concreto húmedo actúa como un electrolito y permite la corrosión. Un concreto totalmente seco no admite reacción a los iones ni es lo suficientemente conductivo para permitir que fluya la corriente de corrosión.

La presencia de sal en el concreto baja la resistividad del mismo. Mediciones en campo han mostrado que una resistividad del concreto de 50-70 kΩ·cm es el nivel arriba del cuál, la corrosión puede considerarse despreciable.

Oxígeno: El oxígeno es un factor esencial en el proceso de corrosión. El oxígeno se difunde a través del agua de los poros del concreto. El oxígeno es un elemento necesario para que ocurra la reacción catódica; sin embargo, no es necesario para la reacción anódica (Helene, 2003).

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso para que garantice, además de las sollicitaciones mecánicas requeridas, la protección de la varilla de las acciones agresivas de los agentes externos.

El concreto que cubre las varillas de acero debe cumplir dos funciones:

- a) Crear una barrera física que se oponga a la penetración de los agentes agresivos externos.
- b) Crear una capa pasivante sobre el acero, en virtud de su alcalinidad, que lo mantenga protegido durante tiempo indefinido.

Sin embargo, las buenas prácticas de ingeniería deben ser el primer paso para la protección de las estructuras contra la corrosión:

- a) Limitar la introducción de los cloruros como parte de la mezcla de concreto.
- b) Mantener una relación agua/cemento tan baja como sea posible.
- c) Proporcionar suficiente espesor al recubrimiento del concreto sobre las armaduras.
- d) Proporcionar un curado adecuado.
- e) Consolidar el concreto completamente.
- f) Usar concreto postensado para minimizar agrietamiento, cuando sea aplicable.
- g) Incluir planes para reparación de grietas, asumiendo que el concreto se va a agrietar.

2.3 Inhibidores de la corrosión

Los inhibidores de corrosión, son productos que actúan ya sea formando películas sobre la superficie metálica, como los molibdatos o fosfatos, o bien entregando sus electrones al medio. Por lo general, los inhibidores de este tipo son azoles modificados que actúan sinérgicamente con otros inhibidores como nitritos, fosfatos y silicatos. La química de los inhibidores no está del todo desarrollada aún. Su uso es en el campo de los sistemas de enfriamiento o disipadores de calor como radiadores, torres de enfriamiento, calderas y "chillers".

2.3.1 Aislamiento del medio

Existen distintos medios para impedir que ocurra la reacción química. Como primera medida de protección se puede aislar la pieza del ambiente, dándole una mano de pintura, cubriendo la pieza con plástico, haciendo un tratamiento de superficie (por ejemplo, nitruración, cromatación o proyección plasma).

2.3.2 Galvanismo anódico o protección catódica

También se puede introducir otra pieza para perturbar la reacción; es el principio del "ánodo de sacrificio" o "protección galvánica". Se coloca una pieza de aleaciones de zinc, de magnesio y aluminio, que se van a corroer en lugar de la pieza que se quiere proteger; la reacción química entre el ambiente y la pieza sacrificada impide la reacción entre el ambiente y la pieza útil. En medio acuoso, basta con atornillar el ánodo de sacrificio a la pieza que se debe proteger. Al aire, hay que recubrir totalmente la pieza; es el principio de la galvanización. Este método se usa ampliamente en ingeniería naval.

2.3.3 Galvanoplastia

La pieza se puede recubrir con una película de otro metal electrodepositado cuyo potencial de reducción es más estable que el alma de la pieza. Galvanoplastia existe como el niquelado, el zincado (galvanizado), el cobrizado y el cromatizado.

El cromado usado comúnmente en la industria automotriz y en la de los *fittings* confiere una protección estable al alma de hierro con la cual se confecciona el artículo. El cromado (no confundir el cromado, un depósito de cromo, con la cromatación, que es la formación de una capa de metal combinado con iones de cromo VI). En efecto, el cromo mismo no se corroe, protegiendo así la pieza, pero la mínima rayadura es catastrófica, pues la pieza hace entonces las veces de ánodo sacrificial del cromo y se corroe a gran velocidad.

Las pinturas anticorrosión con plomo han sido abandonadas a causa de su impacto dramático en el ambiente.

2.3.4 Aplicación de inhibidores asociados a una película de fijación

En este caso, están las pinturas anticorrosivas cuyas formulaciones aparte de aportar con un film de aislamiento de tipo epóxico fenólico o epoxi-ureico llevan asociados un paquete anticorrosivo compuesto por moléculas orgánicas o minerales aceptadoras de electrones como los azoles.

Es también conveniente mencionar que un inhibidor de corrosión deberá especificarse sobre qué tipo de corrosión va a inhibir dada la gran diversidad de tipos y formas de corrosión dependiendo principalmente de las condiciones del medio donde se está llevando a cabo ésta.

2.3.5 Exposición a soluciones reductoras

La superficie es expuesta a la permanente exposición de elementos químicos disueltos en una solución a bajas concentraciones, dichas especies son pares reductores que se oxidan ellos mismos a cambio de la pieza y además contribuyen con la pasivación o inactivación de la superficie formando micropelículas químicas estables. Estas especies se encuentran comúnmente en anticongelantes, pinturas de base acuosa y otras aplicaciones.

3 Procedimiento experimental

3.1 Materiales utilizados

En esta investigación se utilizaron varillas #3 con un diámetro nominal de 9mm. El concreto usado para los prismas fue hecho con cemento CPO (cemento Portland ordinario) y con CPP (cemento Portland puzolánico), roca basáltica triturada como agregado grueso (con un tamaño máximo de 9mm) arena de río como agregado fino. Se utilizaron dos tipos de adiciones de nopal deshidratado.

3.2 Mezclas preparadas

El nopal deshidratado fue mezclado con el cemento en seco antes de mezclarse con cualquier otro material. Esto se hizo con la finalidad de tener una mezcla homogénea y la inclusión de la adición al cemento. La Fig. 3.1 muestra el procedimiento de mezclado en seco del cemento base con el nopal.

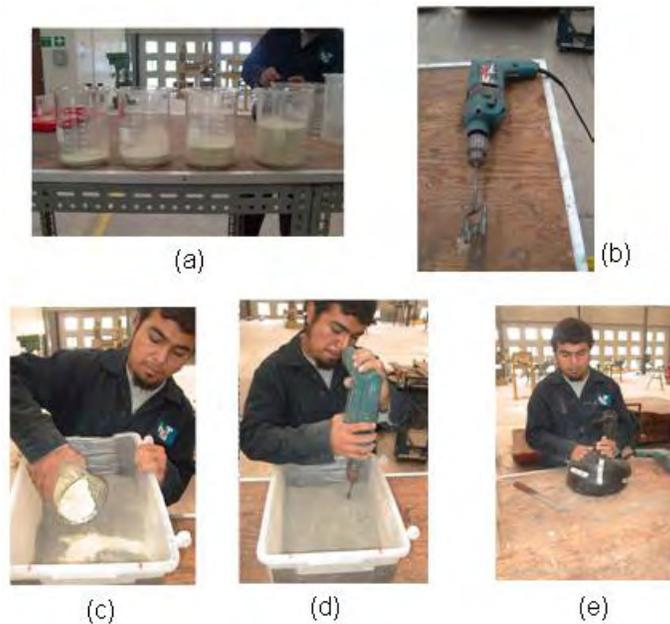


Figura 3.1

Mezclado del cemento y adición de nopal deshidratado. (a) Proporciones del nopal por utilizar, (b) Taladro con punta especial para mezclado de polvos; (c) Adicionando el nopal a la base cementante; (d) Mezclado en seco; (e) Entresacando el producto final

En la Tabla 3.1 se muestran los valores de las cantidades de cada material en mezclas utilizadas medidos por cada metro cúbico de concreto. El procedimiento de preparación fue considerando el método del reemplazo de cemento base. En cemento base se consideró el CPO con un contenido de 640 g por metro cúbico de concreto. Se fabricaron también prismas de concreto con cemento CPP o puzolánico para tenerlas igualmente como prismas de control. Los números 0.25, 0.5, 1.0 y 2.0 corresponden al porcentaje de reemplazo de cemento de las mezclas con las adiciones de nopal. Este cálculo se utilizó considerando que el nopal deshidratado tiene la misma densidad y peso específico del cemento como primera aproximación.

Tabla 3.1

Proporciones de las mezclas utilizadas

Tipo de concreto	Cemento (kg/m³)	Agua (kg/m³)	Arena (kg/m³)	Nopal (kg/m³)
CPO	640	387	1467	0
CPP	640	387	1467	0
CPO_0,25N o CPO_0,25T	638,4	387	1467	1,6
CPO_0,5N o CPO_0,5T	636,8	387	1467	3,2
CPO_1,0N o CPO_1,0T	633,6	387	1467	6,4

Las letras T o N corresponden a la casa fabricante del nopal deshidratado utilizado en esta investigación.

3.3 Caracterización de las pastas utilizando difracción de rayos X

Se solicitó al Dr. Juan de Dios Figueroa del grupo de Materiales, CINVESTAV (Unidad Querétaro), que realizara un estudio de caracterización de las adiciones naturales utilizadas. Para ello se realizaron dos pruebas de caracterización de materiales llamadas "Difracción de Rayos X" (X-Ray Diffraction, XRD) y Análisis de Espectrometría de Energía Dispersiva con Rayos X (Energy Dispersive X-ray spectrometry analysis, EDX). Ambas pruebas de Caracterización fueron

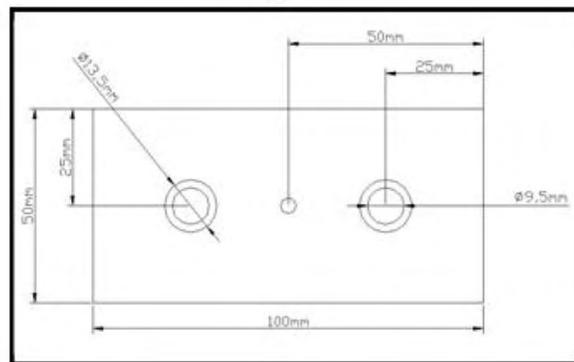
realizadas en el CINVESTAV Querétaro, por personal altamente calificado; los resultados se discutirán en el capítulo siguiente.

3.4 Fabricación de los moldes

Los moldes se fabricaron de triplay de 30 mm de espesor, cada molde maestro contiene 6 moldes individuales de probetas; los moldes secundarios cuentan con las dimensiones especificadas anteriormente (50x100x200 mm). Las varillas de refuerzo, así como el electrodo de referencia fueron colocados según dibujo presentado en la Fig. 3.2. La geometría de las probetas que se usó fue similar a otros trabajos (Lee Orantes 2005).



(a)



(b)

Figura 3.2

(a) Imagen de los moldes antes de la ubicación de los elementos. (b) Croquis de la ubicación de las varillas de refuerzo y del electrodo de referencia

En las Figs. 3.2 a 3.6, se ilustra el proceso de ubicación de las varillas de refuerzo y de los electrodos de referencia dentro de los moldes individuales. Como se observa en la Fig. 3.1 las varillas están situadas a 25 milímetros de las paredes de la probeta y distanciadas 50 mm entre ellas; en la parte central de la probeta se encuentran ubicados los electrodos de referencia en cada una.

Una vez que se hicieron los orificios correspondientes para poder fijar las varillas en el lugar correspondiente, haciendo lo mismo con los orificios de los electrodos de referencia, se procedió a la colocación y fijación de dichos elementos en su respectiva ubicación final. Más detalladamente se ilustra en las Figs. 3.3, molde completo y 3.4, molde individual. Los electrodos de referencia se fabricaron con barras de 3,2 mm de diámetro y 50 mm de longitud de material de titanio recubierto por una capa de óxido de titanio, que lo hace un electrodo de referencia muy estable dentro del concreto, como se ha estudiado en trabajos anteriores (Moreno 2004).



Figura 3.3

Colocación de las varillas de refuerzo y del electrodo de referencia



Figura 3.4

Molde maestro (6 individuales) con elementos de refuerzo

El electrodo de referencia, de titanio/óxido de titanio, se encuentra equidistante de las dos varillas y a la mitad de la longitud de las mismas, con la finalidad de poder realizar las mediciones de potenciales de corrosión de las dos varillas de refuerzo

de manera confiable. Una vez ensamblados todos los moldes requeridos se procedió a la elaboración de la mezcla de concreto por utilizar para la fabricación de las probetas requeridas.



Figura 3.5

Imagen a detalle de un molde individual con sus elementos ubicados en su posición final

3.5 Fabricación de prismas y cilindros de concreto

Después de la fabricación de los moldes de madera y colocación de las barras y electrodos de referencia en su posición, se continuó con la fabricación del concreto. Para ello, primero se mezcló la arena con el cemento y a continuación se le agregó la grava. Después se le añadió agua y se procedió a mezclarse hasta que fuera un concreto uniforme. Terminado el mezclado del concreto se realizó el vaciado en moldes de madera para después llevarlos a una mesa vibradora donde se compactaba el concreto para eliminar los vacíos excesivos (burbujas) que normalmente se forman por el oxígeno que se queda estancado en la mezcla.

Este llenado de los moldes y posterior vibrado se efectuaba en dos capas. Una vez vibrado el concreto en los moldes, se continuó con la identificación de cada prisma y posteriormente se mantuvieron tapados con bolsas de plásticos como membranas de curado por un lapso de 36 días. La Fig. 3.6 muestra las etapas de la fabricación de los prismas.

Además de los prismas, se fabricaron también cilindros de concreto de dos medidas: 10x20 cm y 5x10 cm. Los primeros (10x20 cm) se utilizarían para las pruebas mecánicas del material (resistencia a la compresión). Los cilindros más pequeños sirvieron para las mediciones de resistividad eléctrica del concreto. Para la fabricación de cilindros se tomaron moldes metálicos y los concretos fueron realizados de la misma manera que el de los prismas a dos capas y vibrados en mesa vibradora. Colados los cilindros de igual manera se taparon con bolsas de plástico a manera de membrana de curado hasta que se desmoldaron los prismas.

Los prismas y cilindros se mantuvieron en ambiente de alta humedad controlado mediante la humectación de su superficie con un atomizador hasta tener 36 días de curado a una temperatura ambiente de laboratorio ($21 \pm 5^\circ \text{C}$), logrando así un endurecimiento adecuado.



Figura 3.6

Imágenes progresivas del proceso de elaboración de mezcla y de colado de los prismas estudiados

3.6 Ciclos de humedad y secado

Para la etapa de los ciclos de humedad y secado se adecuaron contenedores plásticos (23,5X19X14) para recibir los tres prismas de cada mezcla de concreto evaluada. La Fig. 3.7 muestra al contenedor de plástico utilizado donde se puede apreciar la disposición de los prismas durante uno de los ciclos de humedad. Dichos ciclos duraron una semana (~7 días) dentro de los contenedores de agua salada e inmediatamente después se colocaban los prismas en ambiente de laboratorio (~70% HR, $21 \pm 5^\circ \text{C}$) por un periodo de tres semanas más (~21 días), cerrando el ciclo completo de un mes.

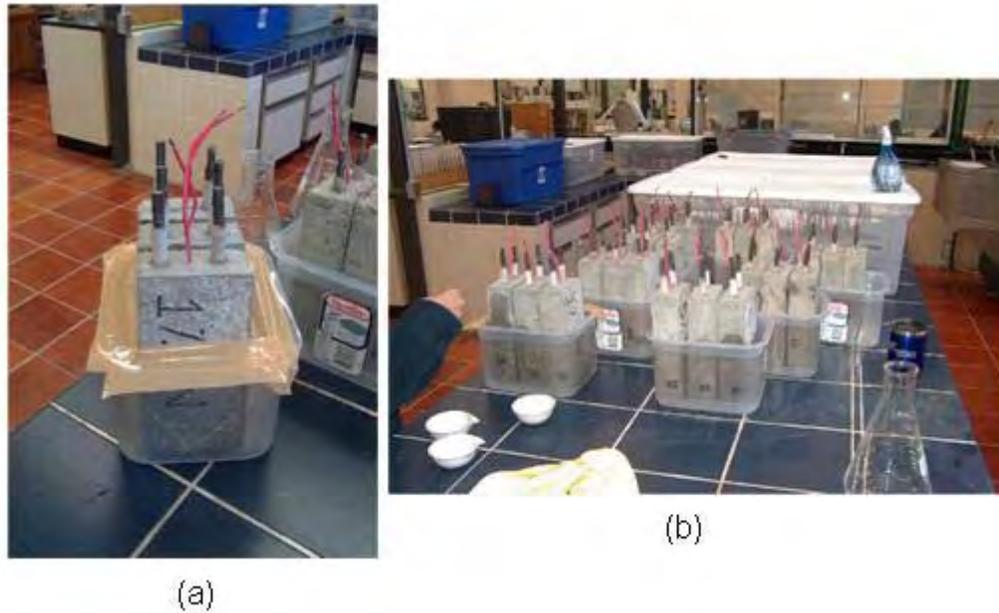


Figura 3.7

Fotografías que muestran a las probetas siendo preparadas para el primer ciclo de humedad en los contenedores de plástico.

- (a) Contenedor individual listo con tres prismas del mismo tipo de mezcla y el sello utilizando cinta canela para minimizar pérdida de la solución salada**
(b) Ubicación en el laboratorio de los contenedores de plástico

La solución salada se preparó a base de agua desionizada con una contaminación de 3,5% de NaCl (cloruro de sodio) en peso. Cada contenedor tenía 2 litros de solución salada aproximadamente.

3.7 Mediciones para determinar las propiedades físicas del concreto

3.7.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menos grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Se ha demostrado que esta propiedad del material varía según el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura entre otras. Es una propiedad de cada material y corresponde al recíproco de su conductividad. Su unidad de medida es el $k\Omega\text{-cm}$ u $\Omega\text{-m}$ ($\Omega = \text{ohmio}$).

En esta investigación, las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson (Fig. 3.8). Los cilindros pequeños de 5x10 cm fueron los que se utilizaron en esta prueba. Éstos se mantuvieron en una cámara de alta

humedad constante para evitar fluctuaciones importantes en las mediciones obtenidas y así conocer el valor aproximado de la resistividad eléctrica del concreto saturado de agua. De esta forma se eliminó la variable de falta de agua en la porosidad del mortero.

La prueba se realizó colocando las caras laterales del cilindro entre dos placas realizadas con acero inoxidable y entre éstas esponjas húmedas (Fig. 3.7). A éstas se le adicionaron tornillos del mismo material para así poder conectar la fuente y someterlos a una corriente dada (I) para regular el voltaje (E). La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en ohmios. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (\text{K}\Omega \text{-cm}); (\text{ohm-m}) \quad (3.1)$$

donde: R_e es la resistencia eléctrica que el equipo proporciona (en $\text{K}\Omega$), A = área transversal del espécimen (en cm^2) y L = longitud del espécimen (en cm).

En cuanto a los criterios de evaluación no existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se pueden utilizar como criterio general los datos que se muestran en la Tabla 3.2.

Debe tenerse en cuenta que la resistividad es solo uno de los parámetros que controla la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el mortero, por tanto, no podrá considerarse como único criterio para definir o prever posible daño sobre la estructura.



Figura 3.8

Equipo utilizado para las pruebas de resistencia eléctrica del concreto

Tabla 3.2

Criterios de evaluación en pruebas de resistencia eléctrica (Durar, 1997)

Intervalo	Criterio
$\rho > 200 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Poco riesgo de corrosión
$200 > \rho > 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Riesgo moderado de corrosión
$\rho < 10 \text{ K}\Omega\text{-cm}$	Alto riesgo de corrosión

3.7.2 Velocidad de pulso ultrasónico

Este es un ensayo no destructivo que tiene como objetivos principales verificar la homogeneidad, esto es, la uniformidad y calidad relativa del concreto y detectar las fallas internas, es decir, la presencia de vacíos, introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones.

La velocidad de pulso ultrasónico se define como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de onda.

Los equipos y materiales requeridos para este ensayo fueron:

- Acoplante (vaselina o gel).
- Equipo comercial de ultrasonido.
- Circuito generador-receptor (aparato de pulso ultrasónico de baja frecuencia ultrasónica).
- Transductor-emisor (aparato que posibilita la transformación del pulso eléctrico en onda de choque en una banda de 24 kHz hasta 500 kHz).
- Circuito medidor de tiempo (aparato que permite medir el tiempo recorrido desde la emisión de onda hasta su recepción).

- Cables coaxiales que deben permitir la conexión perfecta de los transductores al circuito generador-receptor.
- Barra de referencia. Pieza que permite la calibración del equipo de ultrasonido, cuya superficie tiene un acabado pulido y el tiempo de recorrido grabado.

Previo a la realización de la prueba de pulso ultrasónico, se verificó que los cilindros de concreto por ser ensayados, tuvieron la superficie plana, lisa, exenta de suciedad y carbonatación. En el caso de que la superficie no sea suficientemente lisa deberá regularizarse a través de procedimientos mecánicos o con una capa de pasta de cemento, yeso o resina epóxica con un espesor mínimo para no interferir la medida y facilitar el acoplamiento de los transductores.

Para comenzar la prueba, se deberá calibrar el aparato usando la barra de referencia o dispositivo equivalente del equipo. Posteriormente, los transductores se deberán posicionar como se indica a continuación.

- Transmisión directa, con los transductores en las caras opuestas del material.
- Transmisión indirecta, con los transductores en la misma cara.
- Transmisión semidirecta, con los transductores en las caras adyacentes.

Se colocan y presionan las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo, considerándose satisfactorios cuando sea obtenido un valor mínimo de lectura como variación de $\pm 1\%$. Para esta prueba se realizó la medición por transmisión directa.

Una vez verificada la barra de patrón se procede con los cubos de mortero utilizando el procedimiento. Se coloca en ambas caras del cubo un poco de gel para ubicar y presiona las superficies de los transductores sobre la zona de ensayo a fin de tener un buen contacto de éstos con el mortero. Ya colocados se enciende el equipo empleado para esta medición y se registra el valor obtenido.

En la Fig. 3.9 se muestra el método para la correcta ubicación de los transductores en los cubos, así como el aparato de ultrasonido empleado para la realización de esta prueba. Una vez obtenidos los valores a partir del aparato de medición, se procede a calcular la velocidad de propagación de ondas conforme a la siguiente fórmula.

$$v = l / t \quad (3.2)$$

donde: v = velocidad de propagación (m/s); l = distancia entre los puntos de acoplamiento (m) y t = tiempo recorrido desde la emisión de la onda hasta su recepción (s).



Figura 3.8

Aparato utilizado en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico con probeta de mortero cúbica de investigación previa (Celis 2007).

Los criterios de evaluación empleados para esta prueba son los descritos en el manual de la Red Durar (1997) y que se muestra a continuación en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3

Criterios de evaluación de morteros en pulso ultrasónico

Velocidad de propagación	Calidad del concreto
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

(Durar 1997)

3.7.3 Resistencia a la compresión

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Por tanto, no es sorprendente que las pruebas de resistencia estén indicadas en todas las especificaciones del cemento. La resistencia de un mortero o concreto depende de la cohesión de la pasta de cemento, de su adhesión a las partículas de los agregados y en cierto grado, de la resistencia del agregado mismo. Para determinar la resistencia del cemento, se utilizan morteros de cemento-arena y en algunos casos concretos de proporciones determinadas hechas con materiales específicos bajo control estricto (Celis 2007).

Esta prueba puede ser considerada como una de las propiedades más importantes y necesarias para establecer una evaluación general de la estructura, tanto desde el punto de vista de durabilidad como de la capacidad de resistencia mecánica. El equipo empleado para determinar la resistencia a la compresión se le conoce como Prensa Universal, ya que puede realizar ensayos a compresión o tensión, a flexión, con carga estática, carga dinámica o control de carga. Para esta prueba se utilizó una prensa marca Controls del laboratorio de SIKA.



Figura 3.9

Máquina universal utilizada para determinar la resistencia a la compresión de los concretos estudiados

La aplicación de la carga y velocidad fue constante de tal manera que la carga máxima alcanzó entre 20 y 80 segundos. Se determinó la fuerza de compresión a la ruptura del valor obtenido de la prensa. Posteriormente, para la obtención de la resistencia a la compresión, esta fuerza ya en Newtons, fue dividida entre el área del testigo ahora considerada en mm^2 ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$). En la Fig. 3.10 se muestra el procedimiento de colocación y aplicación de fuerza a los cubos de mortero haciendo uso de la prensa antes descrita.



Figura 3.10

Colocación y aplicación de fuerza a los cubos de mortero

El valor de la resistencia mecánica por sí solo no es indicativo de la durabilidad del hormigón ya que dependerá de varios factores entre los cuales se pueden mencionar: la relación a/c, la dosificación, el tipo de cemento, el espesor de recubrimiento de la armadura, entre algunos otros. Sin embargo, en general se acepta que hormigones de elevada resistencia (>45 MPa) son durables y que hormigones por debajo de 20 MPa son de baja durabilidad.

3.8 Mediciones electroquímicas a las barras de refuerzo

3.8.1 Medición de los potenciales de media celda de las barras de acero

Como se especificó con anterioridad la medición del potencial de media celda de las barras de refuerzo en los prismas estudiados, tiene la finalidad de funcionar como un indicador de la actividad corrosiva en estos elementos. Dicha actividad nos indica si los elementos de acero presentan o no signos de activación por corrosión [2]. Debido a la alta resistencia eléctrica inherente en la medición del sistema (concreto como electrolito); el voltímetro utilizado fue uno de alta

impedancia interna. Por esta razón en este estudio se utilizó un voltímetro marca MC Miller LC-4 (voltímetro con resistencia variable en el rango de 10 a 200 M Ω).

Las mediciones de los potenciales de media celda para cada una de las barras de refuerzo embebidas en los prismas fueron hechas en base al electrodo de referencia interno de titanio/óxido de titanio (Ti/TiO). Una vez que se tenían estas mediciones se procedía a realizar la medición del potencial de media celda de este electrodo (Ti/TiO) con respecto a un electrodo estandarizado de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), esto con la finalidad de poder comparar los resultados de los potenciales de media celda de las barras de refuerzo con los valores expuestos en la literatura y poder interpretar con mayor exactitud la actividad por corrosión presente en estos elementos. En la Fig. 3.11 se ejemplifica esta medición.

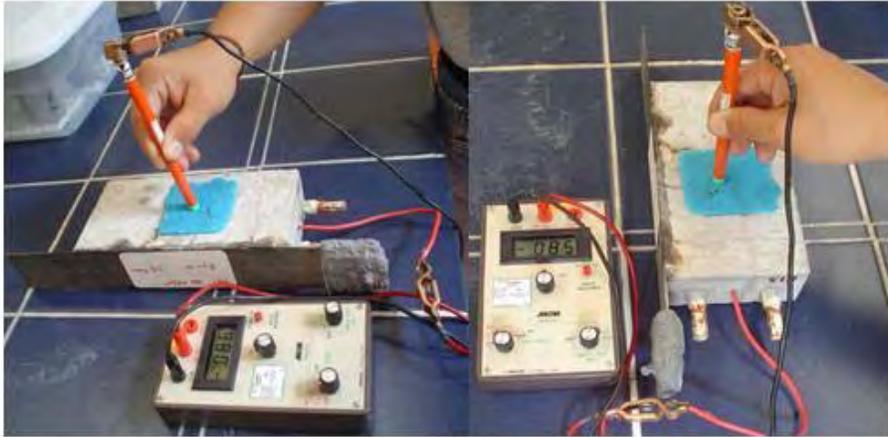


Figura 3.11

Medición del potencial de media celda para las barras de refuerzo

3.8.2 Medición del potencial de media celda del electrodo de titanio/óxido de titanio (Ti/TiO) (Calibración)

La calibración del electrodo de referencia de titanio activado (Ti/TiO) se realizó mediante la medición de su potencial de media celda utilizando un electrodo de referencia estandarizado de cobre/cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO₄) según muestra la Fig. 3.12. La medición se realizó conectando la terminal (COM) al electrodo de (Cu/CuSO₄) y la terminal (DC/AC/ Ω) al electrodo interno de titanio activado (Ti/TiO). Para poder llevar a cabo la medición del potencial de media celda, se tuvo que humedecer por medio de una esponja saturada con agua, el área de concreto donde se realizaría la prueba, para tener mayor precisión en la medición.

**Figura 3.12****Medición del potencial de media celda del electrodo de referencia****3.8.3 Mediciones de resistencia a la polarización lineal**

La determinación de la velocidad de corrosión se efectuó usando la técnica de Resistencia de Polarización Lineal. Dicha técnica se basa en el hecho de que bajo determinadas condiciones, en el entorno del potencial de corrosión (± 20 mV), se verifica una relación lineal entre el potencial aplicado al metal y la densidad de corriente que circula en la celda de polarización. La pendiente de la recta en el potencial de corrosión, $\Delta V/\Delta I$, descontada la resistencia óhmica del medio, se denomina resistencia de polarización R_p y mide la velocidad de corrosión.

Como se explicó en la sección 2.1.5, la R_p puede ser utilizada para determinar indirectamente la velocidad de corrosión de un metal en un electrolito cualquiera, incluyendo el concreto. Para obtener este valor se utilizó un potenciostato/galvanostato/amperímetro de resistencia interna cero, modelo PCI4/750 de la marca Gamry Instruments Inc., durante el periodo completo de la experimentación. La barra seleccionada para medir su R_p se conectó al potenciostato como el electrodo de trabajo. En la conexión al electrodo de referencia se empleó electrodo interno de Ti/TiO y por último como contra electrodo se usó la otra barra de refuerzo. El potencial que el equipo imprimía al electrodo de trabajo (barra a la cual se le mide el R_p) varió de potencial de circuito abierto (E_{OC}) a un potencial de +20 mV en sentido catódico, con una velocidad de barrido de 0,05 mV/s. Los valores de R_p de las barras de acero fueron estimados utilizando la pendiente de la porción lineal de la gráfica potencial vs corriente que regularmente es una línea recta después de los primeros 10 mV de sobrepotencial aplicado a las barras de acero durante las pruebas.

Terminada la prueba de R_p se obtenía la resistencia eléctrica del electrolito, en este caso, la resistencia eléctrica que existía entre el electrodo de referencia y el

electrodo de trabajo. Esta medición se realizó con un resistómetro de suelos marca NILSSON, modelo 400. La Fig. 3.13 muestra las conexiones y el equipo usado en estas mediciones.



Figura 3.13

Medición de resistencia eléctrica del electrolito (concreto entre el electrodo de referencia, Ti/TiO, y el electrodo de trabajo, una de las barras de refuerzo)

Esta resistencia eléctrica del electrolito (concreto) se tiene que restar del valor de R_p que se obtiene de las mediciones con el potencióstato para así eliminar el efecto de que las barras de acero se encuentran en un medio muy resistente, que puede afectar en gran medida al valor real de la R_p de la barra.

El procedimiento para la utilización del potencióstato Gamry se explica a continuación:

- a) Se colocaron los conectores tipo caimán del potencióstato según se indica en la Fig. 3.13, usando a una de las barras como electrodo de trabajo y a la otra como contra electrodo. El electrodo interno de Ti/TiO se usa como electrodo de referencia para la prueba. La Fig. 3.14 muestra estas conexiones en un espécimen listo para experimentar.
- b) Se localiza en el software el programa de Polarización Lineal. Se colocan los parámetros de medición antes mencionados: nombre del archivo que se generará con los datos del experimento; barrido de 0 mV a +20 mV vs E_{OC} ; velocidad de barrido 0,05 mV/s.
- c) Se realiza la prueba de R_p con el potencióstato. Ésta duraba alrededor de 8 min.

- d) Terminada la prueba se desconectaba la probeta del potenciostato y se medía la resistencia eléctrica del concreto, R_s , utilizando un resistómetro marca NILSSON (Fig. 3.13).
- e) Se utiliza el software de análisis del potenciostato Gamry, para obtener la pendiente de la zona recta del diagrama potencial vs corriente que se obtiene de la prueba con el potenciostato. Con este software se estima la pendiente de la gráfica potencial vs corriente en la zona lineal de esta gráfica. Esa pendiente es el valor de R_p que incluye intrínsecamente el valor de R_s . Se obtiene R_p restando al valor de R_p el valor de R_s obtenido en el paso anterior con el NILSSON: $R_p = R_p - R_s$.

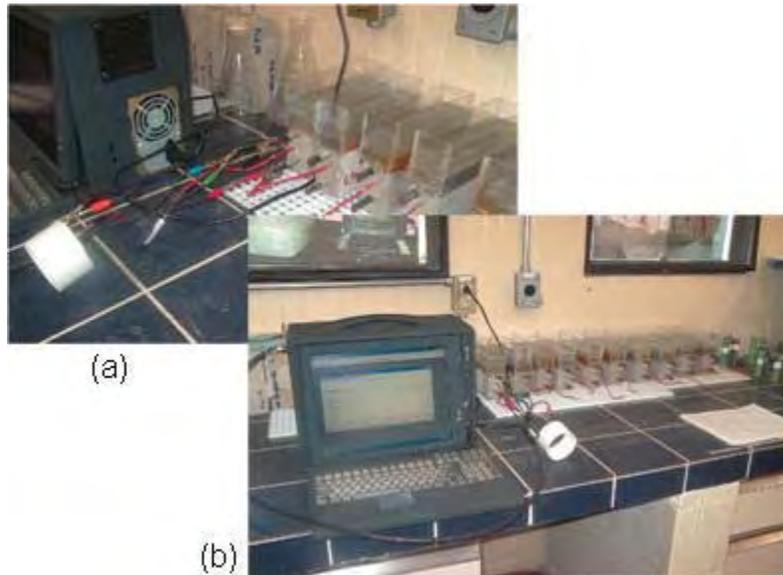


Figura 3.14

Medición de la resistencia a la polarización, R_p , con el potenciostato marca Gamry: a) Detalle de las conexiones a las barras y el electrodo interno de Ti/TiO; b) sistema completo con el detalle del potenciostato y las probetas conectadas

Estos valores electroquímicos (potencial de media celda y R_p) se monitorearon por un periodo de casi un año y se presentarán en el siguiente capítulo de este trabajo.

4 Resultados y discusión

4.1. Caracterización de las pastas utilizando difracción de rayos X

Una tercera prueba se elaboró con la pasta de cemento endurecido provista. Fue echa polvo y se realizo un análisis por difracción de rayos X. Como se mencionó, la energía dispersiva de la espectrometría por rayos X (EDX) resulta en su mayor parte de la presencia de carbono, oxígeno y elementos como el calcio, el potasio y el magnesio. La Fig. 3 muestra los patrones de difracción de (1) Las adiciones botánicas (dos muestras nopal: NT y NN y una muestra de aloe vera: S); (2) Control vs Nopal, y (3) Control vs aloe vera. No se observaron diferencias significativas entre las muestras de control (sin adición) y el nopal o las pastas de aloe vera. Un comportamiento similar de las adiciones sólo se observó en la muestra de referencia con cuatro picos distintivos, correspondiendo a C-O-Ca compuesto llamado Whewellite ($C_2CaO_4 \cdot H_2O$) [ICDD # 20-0231]. Este compuesto químico en particular apoya la idea de utilizar esta clase de adición botánica en materiales a base de cemento, ya que es químicamente coexistente con minerales como calcio, potasio y magnesio. Por lo tanto, se espera poca o nula degradación química de la adición botánica en un largo intervalo de tiempo.

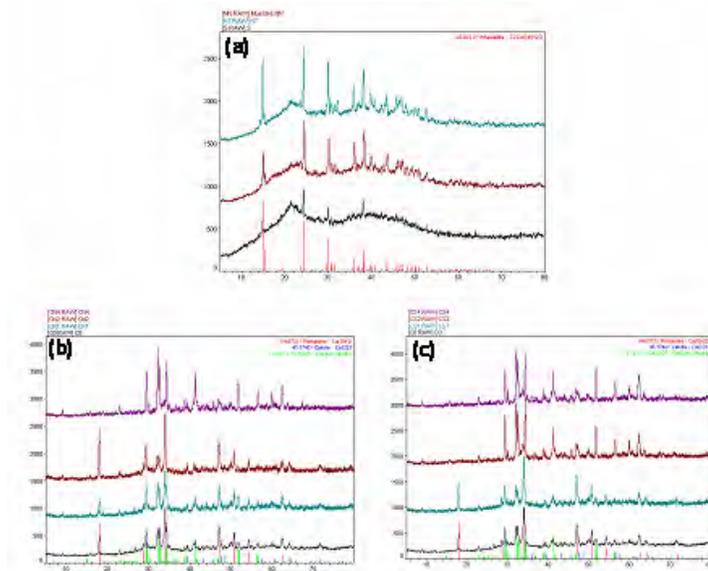


Figura 4.1

EDX resultados de las pruebas: (a) adiciones cactus (b) pastas de cemento con adiciones de nopal (c) pastas de cemento con adiciones de aloe vera

4.2 Pruebas físicas del concreto endurecido

Como primera parte se presentan a continuación los resultados de las pruebas físicas obtenidas de los cilindros de concreto de 5x10 y 10x20 cm que se fabricaron para conocer algunas de las propiedades físicas de los concretos que se usaron con o sin adiciones de nopal.

4.2.1 Pruebas de resistencia eléctrica del concreto (Rs)

Los resultados de las mediciones de resistencia eléctrica de los cilindros de 5x10 cm se pueden observar en la Figura 4.2.

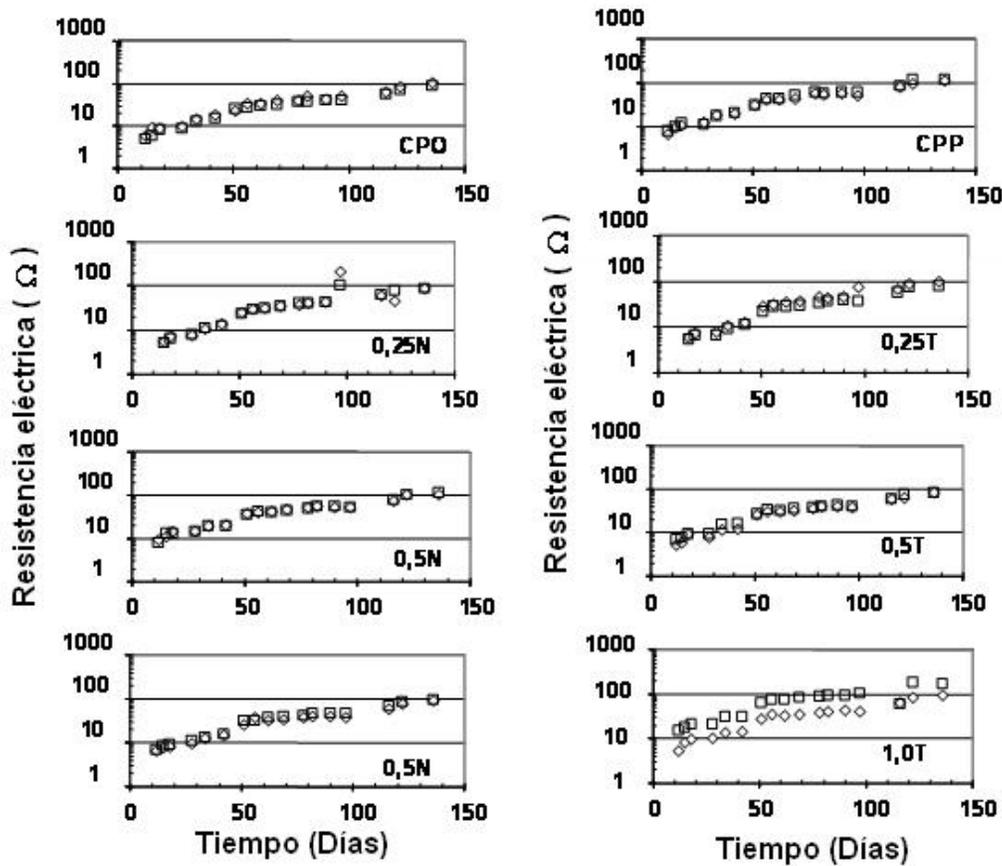


Figura 4.2

Datos obtenidos en la prueba de resistencia eléctrica del concreto (Rs) vs tiempo de todas las mezclas estudiadas

Como se aprecia en la Fig. 4.2, las resistencias eléctricas registradas aumentaron de valores del orden de 10 Ω a valores del orden de 100 Ω durante el periodo de casi 150 días de monitoreo de los cilindros de concreto de 5x10 cm. Cabe señalar que los cilindros se mantuvieron saturados todo el tiempo de esta prueba, por lo que este cambio de resistencia eléctrica correspondería al rellenado de los

espacios vacíos o poros, por los productos de hidratación de la pasta de cemento, y por ello subió hasta llegar a valores constantes después del día 100.

De acuerdo con el criterio del Manual de la Red Durar (1997) todos estos concretos, sin importar el hecho que tengan o no adiciones, presentan una R_s de 120 K Ω . Utilizando (3.1) podemos obtener la resistividad eléctrica de los concretos evaluados, dando un valor de $\rho = (19,6 \text{ cm}^2) (120 \text{ K}\Omega) / (10 \text{ cm}) = 235 \text{ K}\Omega\text{-cm}$. Acorde con el criterio del referido manual, mostrado en la Tabla 3.2, estos concretos estarían en el rango de concretos de buena durabilidad, lo que se comprobará con los resultados electroquímicos que se presentarán más adelante.

Es importante aclarar que estas pruebas de resistividad proporcionan una manera indirecta de obtener la tortuosidad presente en la porosidad de materiales base cemento. Además, la tabla del Manual de la Red Durar (Tabla 3.2) suministra un método para comparar la propensión a que el acero se corroa en función de la conductividad iónica dentro del concreto. El dato de resistividad eléctrica debe considerar, por tanto, el efecto que podría tener la existencia de otros iones dentro de la porosidad del material y no solo su tortuosidad. Con la siguiente prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se corroborará lo encontrado en ésta en resistividad eléctrica estimada.

4.2.2 Pruebas de velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

En la Tabla 4.1 se muestran los valores individuales y los promedio obtenidos en esta prueba de VPU. De estos resultados observamos que los valores para los controles (concreto con CPO y sin adiciones) fueron en promedio igual a 3 981,3 m/s, siendo éste el mayor de todos los obtenidos y, por tanto, una mejor homogeneidad de la mezcla preparada y posible disminución de espacios vacíos.

Como se ha demostrado en trabajos anteriores con mezclas de morteros con o sin adiciones de nopal (Celis 2007), a mayor porcentaje de vacíos existe menor VPU. Las ondas ultrasónicas viajan más lentamente en el vacío que en un material sólido. Esto es observado comúnmente en materiales porosos. Los valores obtenidos con adiciones de nopal como reemplazo señalan valores de VPU muy similares al control (entre 3600 y 3700 m/s), por lo que indica que no se generó diferencia alguna en la microestructura en el concreto con adiciones.

De acuerdo con los resultados de VPU en la Tabla 4.1 (entre 3 600 y 3 700 m/s) y el criterio del Manual de la Red Durar (1997) podemos concluir que el concreto con o sin estas adiciones cumpliría el requisito de durabilidad, ya que los valores de la Tabla 3.3 corresponden a datos de concreto de alta calidad, corroborando así que el material como se fabricó posee alta durabilidad.

TABLA 4.1

Resultados de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Nomenclatura del prisma	Distancia entre sensores (mm)	Tiempo de recepción (μ s)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)	Valores promedio de la VPU (mm/s)
CPP1	104	25,3	4110,7	3981,3
CPP2	104	27	3851,9	
CPO1	101	28,1	3594,3	3667,5
CPO2	101	27	3740,7	
CN0,25N1	100,5	26,8	3750,0	3686,6
CN0,25N2	100	27,6	3623,2	
CN0,25T1	104	28	3714,3	3723,0
CN0,25T2	101,5	27,2	3731,6	
CN0,5N1	101	28	3607,1	3614,5
CN0,5N2	102,5	28,3	3621,9	
CN0,5T1	99	28	3535,7	3536,8
CN0,5T2	98	27,7	3537,9	
CN1,0N1	101	27,2	3713,2	3702,1
CN1,0N2	101,5	27,5	3690,9	
CN1,0T1	101,9	30,2	3374,2	3330,2
CN1,0T2	99,9	30,4	3286,2	

Los resultados de esta segunda prueba física apoyaron los obtenidos en las pruebas de resistencia eléctrica, onde también hubo poca variación en los resultados conseguidos con respecto a la mezcla control (CPO), por lo que aparentemente no se afecta la homogeneidad del material e indirectamente, sin afección en la porosidad total del concreto si se le adiciona nopal.

4.2.3 Resistencia a la compresión

Se realizaron las pruebas de resistencia a la compresión a los 30 días de edad de los cilindros de 10x20 cm que se fabricaron para realizar esta prueba. El procedimiento seguido para este ensayo fue de la Norma ASTM C-42 utilizando dos cilindros por cada tipo de mezcla con o sin aditivo. Los resultados se aprecian en la Tabla 4.2.

TABLA 4.2

Resultados de la prueba de resistencia a la compresión (ASTM C-42).

Nomenclatura del prisma	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)
CPO	286	276,5
	267	
CPP	277	276
	275	
0,5N	277	290,5
	304	
0,5T	176*	252
	252	
1N	281	280,5
	280	
1T	281	288
	295	

* No se consideró este valor por ser su resultado muy sospechoso.

Resultados de la resistencia a la compresión de las mezclas 0,25T y 0,25N que no se obtuvieron en este trabajo debido a la falta de probetas para la prueba mecánica.

Es interesante observar que los valores de resistencia a la compresión de todas las mezclas usadas en esta investigación no fueron muy diferentes y las variaciones de los promedios estuvieron entre 252 y 290 kg/cm², que corresponde a únicamente una diferencia de entre un 9% menos y un 5% de más con respecto a la mezcla control fabricada con cemento tipo CPO. Solo un cilindro para la mezcla de 0,5T (0,5% de nopal Therbal) llegó a una resistencia a la compresión de solo 176 (kg/cm²) lo que hace pensar que este cilindro en particular tuvo algún problema en la prueba efectuada sobre éste, por lo que su resultado es cuestionable. Aun así su pareja alcanzó una resistencia de 252 kg/cm², que está dentro del rango de las otras mezclas, por ello se omitió este valor para el análisis de resultados.

Cabe aclarar que esta resistencia a la compresión de las diferentes mezclas fabricadas y obtenida a la edad de 30 días podría variar como lo encontrado en un trabajo previo con morteros base cemento (Celis 2007). En su trabajo, Celis (2007) demostró que la resistencia a la compresión de cubos de mortero de 5x5 cm, donde se le agregaron adiciones de nopal y sábila, aumentan al paso del tiempo, por lo que hace pensar que las resistencias de los concretos fabricados en este trabajo también pudieran incrementarse. Esto deberá de corroborarse en trabajos futuros.

4.3 Mediciones electroquímicas a las barras de refuerzo

4.3.1 Medición de los potenciales de media celda de las barras de acero

Como parte de la caracterización de las mezclas de concreto están las que involucran al comportamiento electroquímico de las posibles barras de refuerzo que se podrían colocar dentro de éstas. La primera evaluación se realizó con simples mediciones de potencial de media celda del acero, las cuales siguieron el procedimiento explicado en la sección 3.8.1. Los resultados de cada una de las mezclas analizadas (ocho en total) se muestran con lujo de detalle en la Fig. 4.3.

Cada mezcla evaluada constó de tres prismas también llamadas celdas electroquímicas (porque funcionaron para realizar las pruebas electroquímicas de esta investigación). Dichos prismas fueron colocados en los ciclos de humedad y secado como lo explica la sección 3.6, donde la porción húmeda del ciclo los prismas fueron colocados dentro de recipientes que contenían agua con NaCl al 3.5% en peso, para así simular ambiente marino. Por supuesto que durante este tiempo los cloruros se movieron del agua salada al interior de los prismas de concreto. Cuando el cloruro penetra todo el recubrimiento del concreto se deposita en la superficie de la barra de refuerzo. Al momento de que éste llega al refuerzo, la pasividad se rompe y el refuerzo inicia su proceso corrosivo.

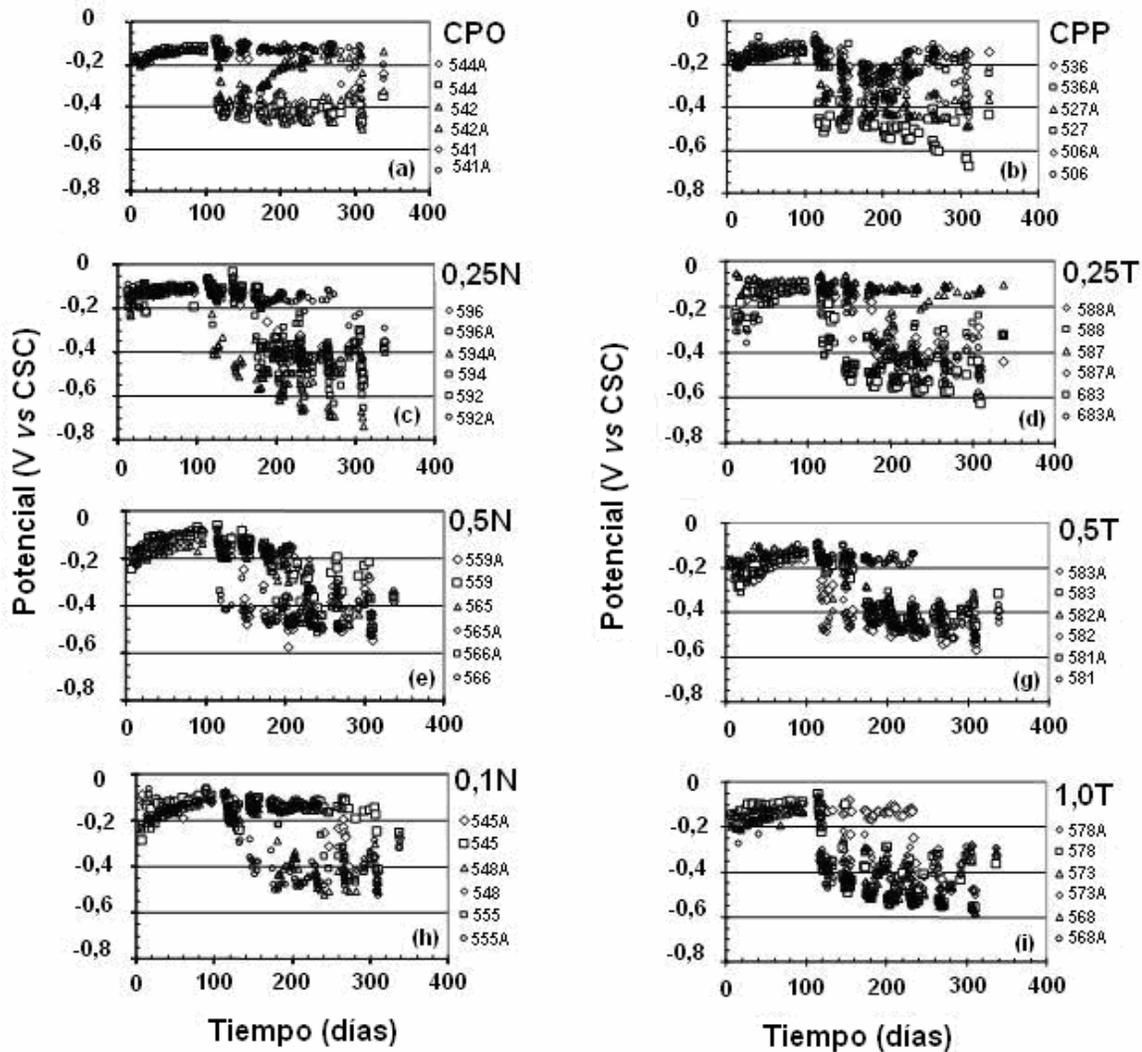


Figura 4.3

Potenciales de media celda vs Tiempo de todas las probetas de concreto estudiadas. Los números corresponden a la nomenclatura de las barras de refuerzo colocadas en los prismas

Con los resultados observados de la Fig. 4.3 se pueden hacer las siguientes anotaciones:

1. Los potenciales de media celda de las barras de refuerzo de todas las mezclas estudiadas presentaron un valor inicial de aproximadamente $-0,2$ V vs el electrodo de cobre/sulfato de cobre (CSC) sin importar si tenían o no adiciones de nopal.
2. Los valores del potencial de media celda durante los periodos de curado (de 0 a 30 días) y estabilización en temperatura y humedad de

laboratorio (de 31 a 114 días), permanecieron muy estables en el rango de -0,1 a -0,2 V vs CSC. Estos valores demuestran que todas las barras en dichos periodos se encontraban en estado pasivo.

3. Durante el periodo de ciclos de humedad y secado (del 115 al 338 días) el rango de los valores de potencial de las barras de refuerzo fueron más negativos, de entre -0,2 a -0,7 V vs CSC, y fluctuaron dependiendo de si la etapa del ciclo era seca o húmeda.

Cabe aclarar que los valores de potencial de media celda corresponden a seis barras de refuerzo por cada mezcla de concreto estudiada. En la literatura que versa sobre el tema de corrosión de acero en concreto, se define que el valor de potencial de media celda de la barra llega a su estado de activación de la corrosión cuando éste sea más negativo que -0,35 V vs CSC (Durar, 2002). De esta manera podemos observar, con algo de dificultad por la escala de la propia figura, cómo las barras de refuerzo fueron una a una activándose por corrosión cuando su potencial de media celda llega a valores más negativos que -0,35 V vs CSC.

Al tiempo que transcurre entre el inicio de la etapa de ciclos de mojado y secado y la activación de la barra por corrosión se le llamará T_i o tiempo de iniciación de la corrosión. En la Fig. 4.4 se presenta un resumen de estos tiempos de iniciación, T_i , de todas las barras estudiadas. Esta figura se separó en dos partes: a) comparativo entre los controles (barras de refuerzo dentro de los concretos fabricados sin adición de nopal denominados CPO y CPP) y las mezclas con las adiciones de la marca T; y b) comparativo entre los mismos controles y las mezclas con las adiciones de la marca N. Las gráficas están presentadas como T_i vs fracción acumulada.

Esta fracción acumulada fue obtenida de la siguiente manera: primero se registraron para cada barra el T_i ; después de tener todas las barras de refuerzo activas por corrosión (seis barras para cada mezcla) se ordenaron los valores de T_i en forma ascendente; por último se le asignó a cada valor la fracción de $1/6 = 0,17$ así se le asignó al valor más pequeño de T_i con la fracción de 0,17, al siguiente valor de T_i se le fijó el valor de porcentaje acumulado de 0,34 y así sucesivamente hasta que el valor más alto de T_i de las seis barras se le asignó el valor de fracción acumulada de 1,0.

Esta última figura muestra en línea continua los tiempos T_i para los concretos de control CPO y CPP. La gran variabilidad de los valores de T_i para estas dos mezclas se refleja en que la línea de tendencia posee una pendiente pronunciada que va desde $T_i = 2$ días hasta $T_i = 180$ días. El valor medio (mediana) de los resultados estaría en el eje de la ordenada de 0,5, que para estas dos mezclas es de sólo 10 días.

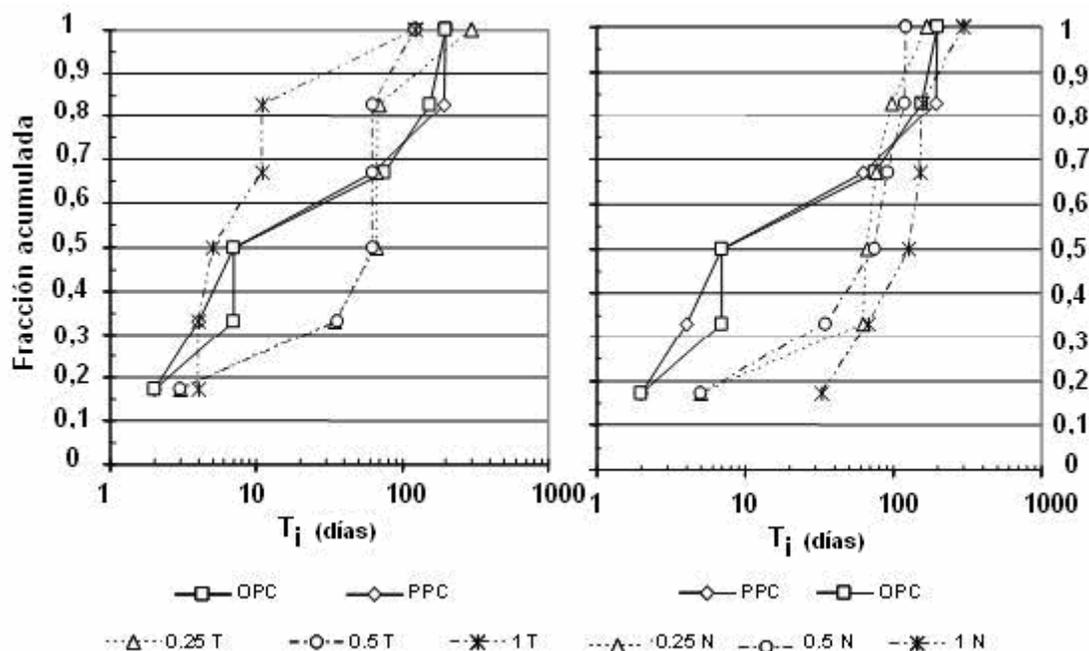


Figura 4.4

Tiempos de iniciación de la corrosión de todas las barras de refuerzo estudiadas en función de la fracción acumulada activada. Los controles son las mezclas CPO y CPP. T y N son las marcas de nopal deshidratado utilizadas en la fabricación de los concretos

Para el caso de las mezclas con nopal deshidratado marca T, se obtuvo un valor medio de 5 días para 1,0T en comparación con 80 días para 0,25T y 0,5T. Este comportamiento obtenido es bastante raro, ya que se esperaría que a mayor concentración del nopal deshidratado (en este caso 1%) el valor de T_i incrementara, como se obtuvo en las mezclas hechas con nopal marca N donde sí se cumplió este comportamiento. De hecho, las mezclas fabricadas con nopal N se comportaron mejor (valores de T_i mayores de entre todas las mezclas) que las mezclas con nopal marca T y los controles. Aun así se puede observar la gran variabilidad de los valores T_i para todas las mezclas.

Estas variaciones pudieron haberse obtenido por la variabilidad de los recubrimientos de concreto de los prismas, ya que por más que se quiso controlar durante la colocación de las barras en los moldes, durante el colado de los concretos en estos moldes de madera, se tuvo que utilizar una mesa vibradora. Fue después de desmoldar las barras que se percató que éstas se movieron unos milímetros de su posición original. De todas maneras la tendencia de las mezclas de concreto con nopal mostraron un valor medio de T_i mayor que las de control CPO y CPP.

En resumen, con estas pruebas de potencial de media celda se obtuvo que los porcentajes utilizados de nopal adicionado (<1%) durante el mezclado del concreto mejoró tímidamente la resistencia al transporte de iones cloruros del concreto. Esto corrobora lo obtenido en las pruebas físicas y mecánicas de los concretos, ya que no hubo mejoría considerable al adicionarles el nopal deshidratado.

4.3.2 Medición de resistencia a la polarización (R_p) de las barras de acero

Como siguiente prueba electroquímica utilizada en esta investigación se realizaron mediciones de R_p durante todo el periodo de evaluación de las mezclas de concreto estudiadas. Cabe aclarar que estas pruebas se llevaron a cabo inmediatamente de que los prismas terminaban el ciclo de mojado, es decir, antes de sacarlas de las tinajas de mojado con agua salada. Al finalizar estos ensayos de R_p , los prismas se sacaban de las tinajas de mojado para estar aproximadamente 21 días fuera de éstas en ambiente laboratorio (lo que se conoce como ciclo de secado).

Para tratar de resumir la información recabada durante los más de 200 días de mediciones, se prepararon las gráficas mostradas en la Fig. 4.3 a 4.6, las cuales corresponden a los valores de R_p mostrados en formato similar a los valores de T_i (Fig. 4.4). Se seleccionaron cuatro periodos: a) estabilización, antes de los ciclos de mojado-secado con cloruros (Fig. 4.5); b) primer ciclo de mojado-secado (Fig. 4.6); c) cuarto ciclo de mojado-secado (Fig. 4.7), y d) octavo y último, ciclo de mojado-secado (Fig. 4.8).

En las Figs. 4.5 a la 4.8 se dibujó una línea punteada en el valor de $3\text{ K}\Omega$, el cual corresponde al valor del umbral de corrosión, es decir, que para valores menores a este umbral la barra se encuentra activa por corrosión. Este valor fue calculado de la siguiente manera: el umbral de corrosión ha sido considerado igual a $I_{\text{CORR}} = 0,2\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (Durar, 2002); sabiendo que la velocidad de corrosión $I_{\text{CORR}} = B/R_p$ despejamos R_p obteniéndose $R_p = B/I_{\text{CORR}}$; se sabe que B para acero activo en concreto vale $0,026\ \text{V}$ lo que daría una R_p de $130\ \text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$; si toda la barra de refuerzo se corroe uniformemente el valor de R_p total sería igual a 130 entre el área de superficie de la barra $= 130 / 42\ \text{cm}^2 = 3,1\ \text{K}\Omega$ que es el valor utilizado en las Figs. 4.5 a 4.7.

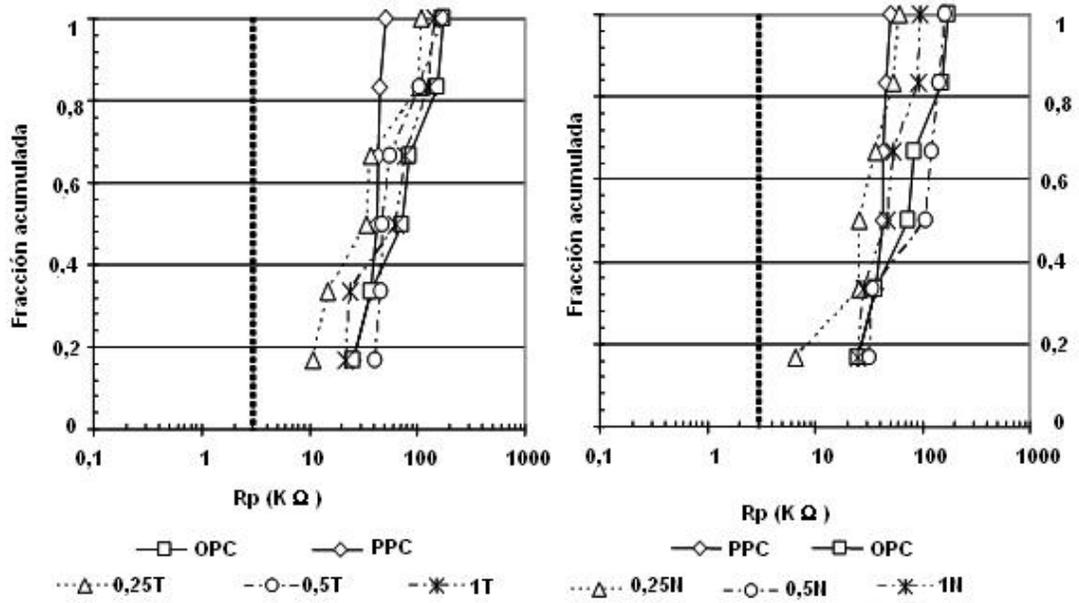


Figura 4.5

Valores de resistencia a la polarización (R_p) durante el periodo de estabilización (antes de ciclos mojado-secado con cloruros) de todas las barras de refuerzo estudiadas en función de la fracción acumulada

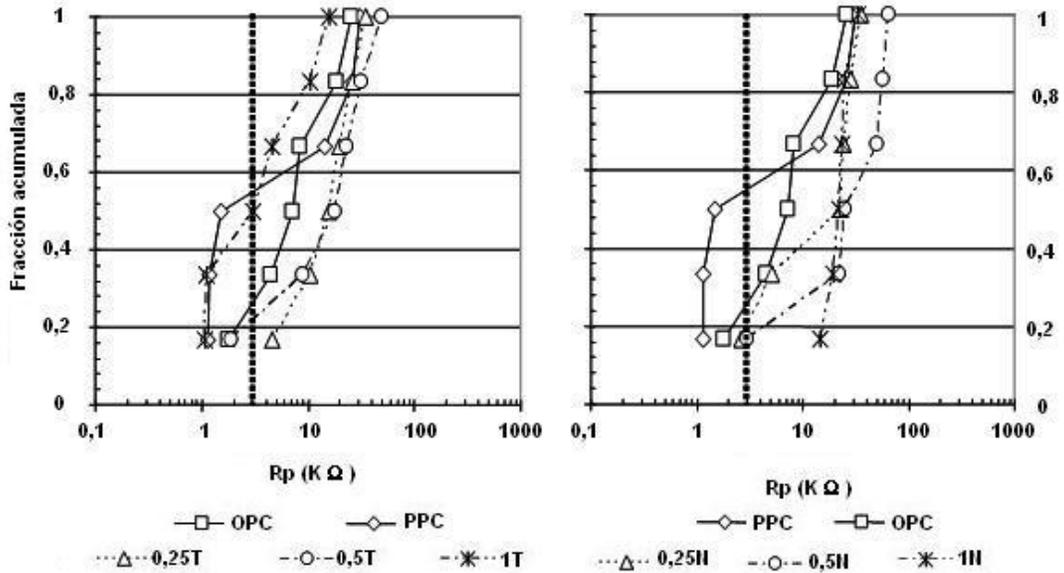


Figura 4.6

Valores de resistencia a la polarización (R_p) después del primer ciclo de mojado-secado con cloruros, de todas las barras de refuerzo estudiadas en función de la fracción acumulada

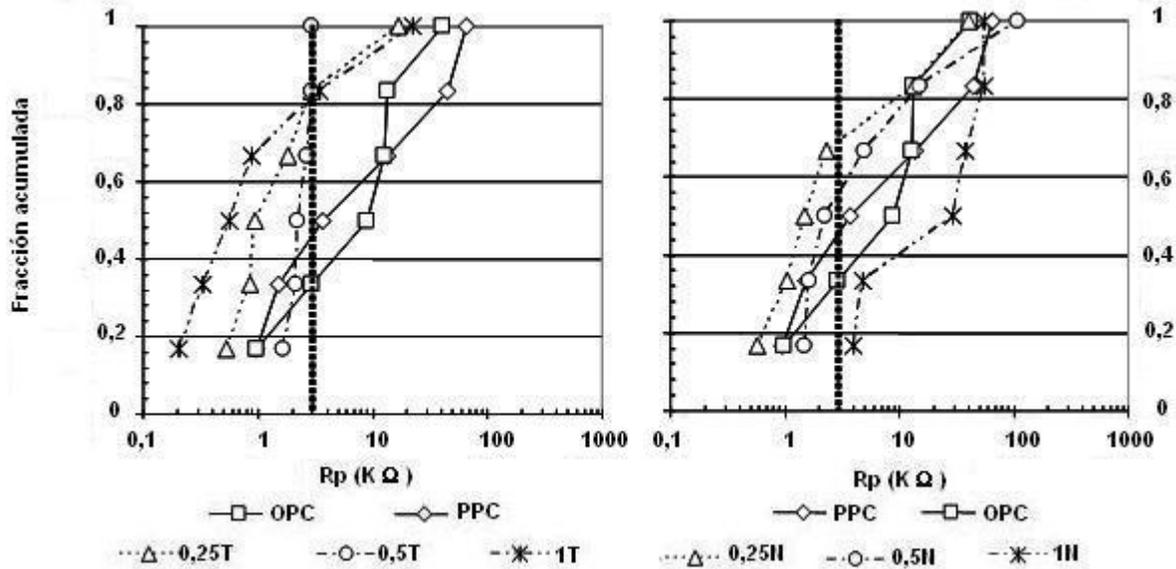


Figura 4.7

Valores de resistencia a la polarización (R_p) después del cuarto ciclo de mojado-secado con cloruros, de todas las barras de refuerzo estudiadas en función de la fracción acumulada

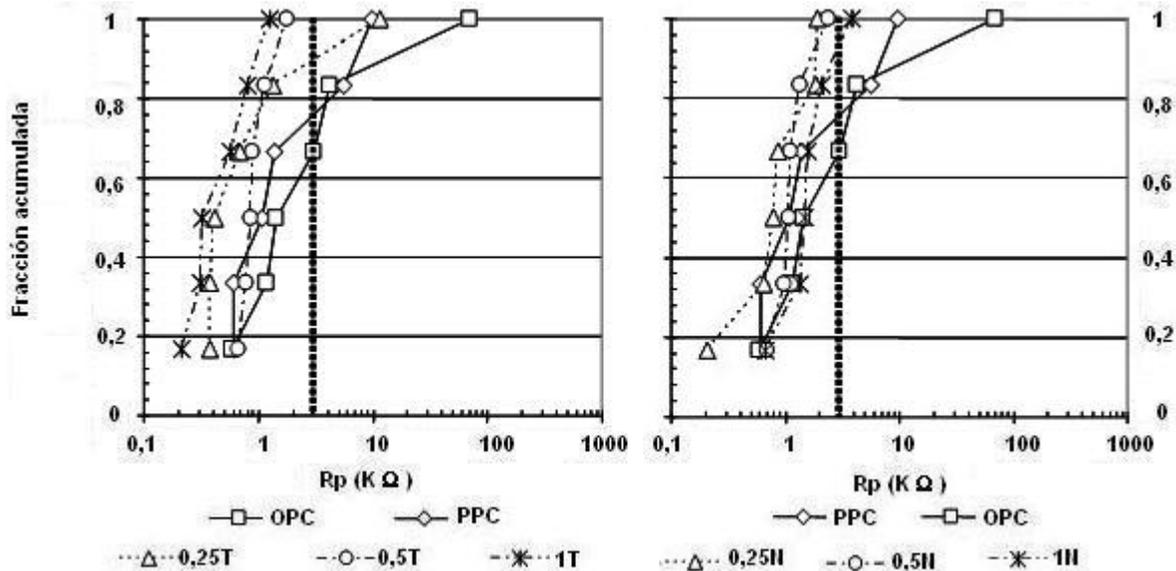


Figura 4.8

Valores de resistencia a la polarización (R_p) después del octavo y último ciclo de mojado-secado con cloruros, de todas las barras de refuerzo estudiadas en función de la fracción acumulada.

Las figuras anteriores muestran de manera muy objetiva la progresión de cómo cada serie de barras de refuerzo (y de cada mezcla estudiada) fue sesgándose

hacia valores más pequeños de R_p e inclusive menores del umbral de $3\text{ K}\Omega$. Para el primero y cuarto ciclos se puede observar una mejoría (mayores valores de R_p demostrados por el sesgo hacia la derecha de las series control CPO y CPP) en la resistencia aparente de la penetración de cloruros en las mezclas con nopal deshidratado marca N. Para el nopal marca T esta mejoría se pierde e inclusive los controles se comportaron mejor. Al final de las pruebas y durante el octavo ciclo, no se observó cambio alguno en los resultados de R_p , indicando que las adiciones marca N surtieron efecto en un tiempo muy limitado de casi un año de pruebas.

La Fig. 4.9 muestra los valores de R_p promedio de las seis barras de refuerzo en función de la mezcla de concreto estudiada y el ciclo de mojado-secado evaluado. Se puede observar que el valor promedio de R_p al principio de la prueba (antes de los ciclos) fue muy similar, pero que al paso de los ciclos de mojado-secado con cloruros, estos valores fueron disminuyendo paulatinamente, y que la mezcla 1,0%N fue normalmente la que mejor se comportó (mayor valor de R_p) hasta que en el octavo ciclo todas quedaron muy parejas.

Estos resultados corroboran los obtenidos en las pruebas de potenciales de media celda donde se observó que los concretos con adiciones del 1% de nopal marca N (1,0%N) fueron los que se comportaron mejor contra la corrosión de las barras de refuerzo. Pero esta mejora es un tanto limitada, ya que también al cabo de cierto tiempo todas las barras en esta mezcla (1,0%N) iniciaron su proceso corrosivo.

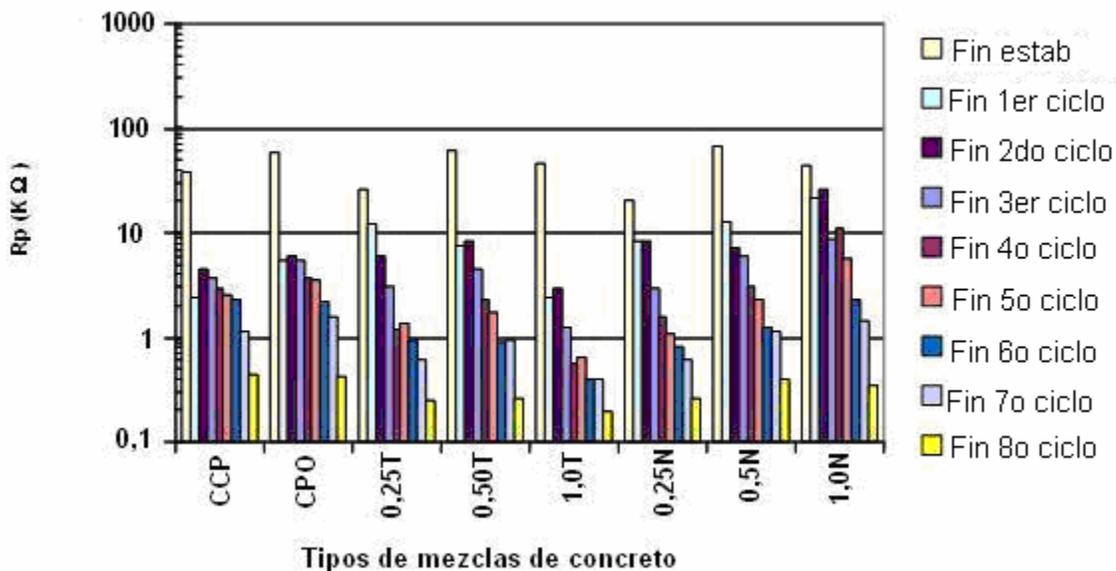


Figura 4.9

Valores promedio de R_p para todas las mezclas estudiadas en función de la etapa del proyecto

En estudios anteriores donde mezclas de concreto contenían nopal y sábila deshidratados, y discutida en la introducción de esta tesis, demostró que concretos con adiciones del 2% de nopal deshidratado al concreto mostraron un mejor comportamiento al transporte de cloruros y a las propiedades electroquímicas del acero cuando el cloruro llegaba a las barras (Torres-Acosta *et al.* 2005). En este trabajo se repitió el procedimiento de evaluación con la diferencia de que las mezclas de concreto se le añadieran menores cantidades de nopal (0,25%, 0,50% y 1,0%) y verificar si esta disminución en cantidad de nopal en la mezcla (que lleva de la mano a una reducción en el costo del concreto) pudiera incrementar la durabilidad del concreto estudiado. Sin embargo con los resultados obtenidos se pudo concluir que los porcentajes menores de 1% no son del todo adecuados por lo que se recomienda el uso de porcentajes entre 1% y 2% de nopal deshidratado por peso del cemento de la mezcla.

5 Conclusiones

En este trabajo se explicó que existen diversos modos para disminuir la corrosión del acero de refuerzo o preesfuerzo en concreto, siendo el uso de adiciones en el mismo una de las más viables para mejorar su durabilidad por su economía en comparación con otros métodos como la protección catódica. Los avances tecnológicos obtenidos de experimentar con nuevos materiales han generado productos innovadores, como el caso del nopal deshidratado, que está siendo evaluado para infinidad de usos, entre ellos en la industria de la construcción.

De los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir lo siguiente:

1. Con la adición de nopal deshidratado en materiales base cemento, como en este caso el concreto, se obtuvieron mejorías en cuanto a sus propiedades físicas, aunque los porcentajes adicionados en esta investigación (<1% por peso del cemento de la mezcla) no fueron lo suficientemente adecuados para que estas mejoras pudieran ser exitosas.
2. La resistividad eléctrica, que es una medida de la dificultad de que iones, gases o líquidos se transporten en el material, obtenida en los concretos estudiados con adiciones de nopal (<1%) no mostraron diferencias con relación al concreto base sin adiciones.
3. Mediciones directas de la velocidad de pulso ultrasónico en los concretos preparados, indicaron que los concretos con adiciones de nopal en porcentajes menores a 1% fueron muy similares a los concretos sin adiciones, por lo que no se produjo mejoría alguna con el nopal.
4. Los valores de resistencia a la compresión a los 30 días de haberse fabricado los concretos, muestran también que hay una leve mejoría en la resistencia de los concretos con 1% de nopal, pero ésta fue solo de 4% con respecto a los controles sin nopal.
5. Las mediciones electroquímicas como el potencial de media celda mostraron que sí hay una mejoría en el tiempo de iniciación de la corrosión en concretos con una adición de 1% de nopal. Estos tiempos mejoraron, en promedio, de 5 a 8 días para el concreto control hasta 80 días para concretos con 1% de nopal deshidratado como adición.
6. Los valores de resistencia a la polarización corroboraron lo encontrado en las mediciones de potencial de media celda dando que adiciones de

1% de nopal deshidratado pueden incrementar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo en concreto.

Con estos resultados se recomienda el uso de este producto como adición del cemento, pero en concentraciones por arriba de 2%, que confirma lo obtenido por otros autores. Asimismo, es recomendable continuar con las investigaciones de este producto para aplicación en los materiales de construcción base cemento, para así sustentar lo obtenido en este trabajo al igual que en trabajos anteriores presentados en esta universidad, para conseguir una mejora sustancial en la durabilidad de estos materiales y se pueda, en un futuro no muy lejano, comercializarlo ya que proviene de una planta muy mexicana: el nopal.

Bibliografía

Ashassi-Sorkhabi, H., Majidi, M.R., and Seyeddi, K. (2004), *Applied Surface Science*, 225, p.176.

Andrade, C., Alonso, M.C., and Gonzalez, J.A. (1990), *An Initial Effort to Use the Corrosion Rate Measurements for Estimating Rebar Durability*, In *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, ASTM STP-1065, Berke, N.S., Chaker, V., and Whiting, D. Editors, American Society of Testing Materials, Philadelphia, USA. 29-37.

Andrade, C., Alonso, C., Gulikers, A., Polder R., Cigma, R., Vennesland, Ø., Salta, M., Raharinaivo, A., Elsener, B. (2004). *Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method*. *Materials and Structures*, Vol. 37: 623-643.

ASM Handbook, 1998. Corrosion, Vol. 13, 15-45, 77-123, 466-477.

ASTM C29/C29M–97. *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates Vol. 04.02, 1-4.

ASTM C39/C 39M, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates Vol. 04.02, 18-22

ASTM C127–88. *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates Vol. 04.02, 64-68.

ASTM C128–97. *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates Vol. 04.02, 69-73.

ASTM C136-96^a, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates, Vol. 04.02, 78-82.

ASTM C566-97, *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates Vol. 04.02, 290-292.

ASTM C702–98, *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates, Vol. 04.02, 374-377.

ASTM C 876–91, *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*, ASTM Annual Book of Standards, Concrete and Aggregates, Vol. 04.02, 466-477.

Ávila, J., Genescá, J. (2002), *Más allá de la herrumbre I*, 3^a. Ed. La ciencia para todos, México, 25-86.

Ávila, J., Genescá, J. (2003), *Más allá de la Herrumbre II*, 3^a. Ed. La ciencia para todos, México, 48-81

Bishop, M.H. and Funkhouser, V.M. (1998), WAAC Annual Meeting, Western Association of Art Conservation, sep, 21 (1998).

Bosch, R. W. (2005). *Electrochemical impedance spectroscopy for the detection of stress corrosion cracks in aqueous corrosion systems at ambient and high temperature*, Corrosion Science, Vol. 47, 125-143.

Brown, Michael. Sharp, Stephen (2005), *Effectiveness of sacrificial anodes in high-resistivity shotcrete repairs*, Report final, Virginia Transportation Research Council.

Cárdenas, A., Argüelles, W.M. and Goycoolea, F.M. (1998), Journal of the Professional Association for Cactus Development, Vol. 3, p.64.

Celis Mendoza, C. (2007), *Mejora en la Durabilidad de Materiales base Cemento, Utilizando Adiciones Deshidratadas de dos Cactáceas*. Tesis de Licenciatura, Universidad Marista de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, jun.

Chandra, S., Eklund, L. and Villarreal, R.R. (1998), *Use of Cactus in Mortars and Concrete*, Cem. and Conc. Res., Vol. 28, No. 1, pp 41-51.

Goycoolea, F.M. and Cárdenas, A. (2003), Journal of the Professional Association for Cactus Development, Vol. 5, p.17.

Castro, P. y Moreno E. (2003), CONPAT 2003, Mérida, Yucatán, México, Vol. I. Control de Calidad, 71-84, II.65-II.72, V.9-V.16, II.97-II.104, IX.9-X.16, VI.1-VI.8.

Castro, P. y Moreno E. 2003. CONPAT 2003, Mérida Yucatán México, Vol. II. Patología: XII.25-XII.32, II.169-II.175, II.1-II.7, II.153-II.160.

Castro, P. y Moreno E. (2003), CONPAT 2003, Mérida, Yucatán, México, Vol. III. Recuperación, VII.9-VII.16, VII.41-VII.48.

Durar, (2002), Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado, 3ra. Ed, CYTED: 18-60, 88-92, 112-117, 124-128, 135.

El-Etre, A.Y. and Abdallah, M. (2000), Corrosion Science, Vol. 42, p.731.

El-Etre, A.Y. (2003), Corrosion Science, Vol. 45. p.2485.

Feliu, S., González, J. A., Miranda, J. M., Feliu, V. (2005). *Possibilities and problems of in situ techniques for measuring steel corrosion rates in large reinforced concrete structures*. Corrosion science, Vol. 47, 217-238.

González, J. A., Miranda, J. M., Birbilis, N., Feliu, S. (2005). *Electrochemical techniques for studying corrosion of reinforcing steel: limitations and Advantages*, Corrosion science, Vol. 61, 37-50.

Helene, P., Pereira, F. (2003). Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección, 1ra. Ed., Degussa, São Paulo, 39-49, 131, 147, 341-375, 730-741.

Kliskis, M., Radosevic, J., Gudic, S., and Katalinic, V. (2000), Applied Electrochemistry, Vol. 30, p 823.

Koch, G. H., Brongers, P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y.P., Payer, J. H. (2002), *Corrosion cost and preventive strategies in the united states*, Materials Performance, Supplement to Materials Performance, 2-11

Lasa, Ivan. (2002). State Materials Office Corrosion Research Laboratory. State of Florida Department of Transportation, document no. 00-124.

Lee Orantes, F. (2005), Refuerzo-Protección en estructuras de concreto dañadas por corrosión, utilizando fibras de grafito como protección catódica, Tesis de maestría, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, ago.

Martínez, R. M. (2005), Adiciones de nopal y sábila deshidratado en mortero, Tesis de licenciatura, Universidad Marista de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro, dic.

Moreno, M., Morris, W., Alvarez M. G., Duffó, G. S. (2004). *Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content*, Corrosion Science, Vol. 46, 2681-2699.

Nace (2002), *Corrosion costs and preventive strategies in the United States*, Supplement of Materials Performance, jul, -12.

Neville, A. (1999), Tecnología del concreto. 1ra Ed., IMCYC, México, 75-121, 167-183, 187-197, 406-410.

ONNCCE. (2004), Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004, Industria de la Construcción; Cementos Hidráulicos; Especificaciones y Métodos de Prueba, Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificaciones, S.C.

Pérez, J. T. (2001), Seguimiento por medio de la técnica de impedancia electroquímica de la protección catódica del acero de refuerzo en concreto modificado por un agente humectante, Tesis de maestría, UNAM, México, DF., 34-35.

Prato, M.R., González, A.T., Reyes, R. y Medina, R. (1995). Acta Científica Venezolana, Vol. 46, p 85.

Rodríguez, L. M., Genescá, J., Uruchurtu, y J., Hernández, I. (1999), Corrosividad Atmosférica., 1ra Ed, Plaza y Valdés, S. A. de C.V., México, 5-38.

Sáenz, C., Sepúlveda, E., and Matsuhiro, B. 2004. Journal of Arid Environments, 57, p 275.

Sagüés, A.A., Pech-Canal M. A., Shahid Al-Mansur, A. K. M. (2003), *Corrosion macrocell behavior of reinforcing steel in partially submerged concrete columns*, Corrosion Science, Vol. 45, 7-32.

Tebbj, K., Oudda, H., Hammouti, B., Benkaddour, M., El Kodadi M., and Ramdani, A. (2005), *Colloids and Surfaces A, Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 259, p 143.

Torres-Montes, L., Reyes-García, M., Gazzola, J., and Gómez, S. (2005), Materials Research Symposium Proceedings, Materials Research Society, Paper No. OO6.1. p.1.

Torres, Andres y Martinez, Miguel. (2001), Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad, Publicación Técnica # 181. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.

Torres, Andrés y Martínez, Miguel. (2002), Plan Nacional Evaluación de Puentes Dañados por Corrosión, Parte 1: Discriminación preliminar de los puentes que muestran daños por corrosión, Reporte 026/2002, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro.

Torres-Acosta, A.A., Martínez-Madrid, M., Loveday, D.C., and Silsbee, M.R. (2005), Paper 05269 Nace Corrosion 2005, *Symposium New Developments in the Protection of Steel in Concrete*, april 3 to 7, Houston, Texas; USA.

Torres-Acosta, A.A. (2007), *Opuntia-Ficus-Indica (nopal) mucilage as a steel corrosion inhibitor in alkaline media*, J. of Applied Electrochemistry, Vol. 37, pp. 835-841.

Trejo, D. and Monteiro, P. J. (2005), *Corrosion performance of conventional (ASTM A615) and low-alloy (ASTM A706) reinforcing bars embedded in concrete and exposed to chloride environments*, Cement and Concrete Research, Vol. 35, 562-571.

Uhlig, H. (1970). *Corrosión y Control de la corrosión*, 7ª.Ed, Editorial Urmo, España: 92-125, 155-165.

Vadillo, M. C. (2004), *Seguimiento del proceso de la corrosión del acero de refuerzo en pilotes de concreto*, Tesis de maestría, UNAM, México. D. F., 1-9, 22-27.

Vaysburd, A. (2001), *Galvashield embedded galvanic anodes for repair of concrete*, Concrete Innovations Appraisal Service (CIAS), CIAS Report, 01-1.

Whitmore, D. (2003). *Corrosion Protection Systems*, Vector Corrosion Technologies.

Whitmore, D., Abbott, S. (2003). *Nace Corrosion 2003*, Houston, Texas, paper 03301:1-8.

Wittmore, D. (2005), www.vector-corrosion.com

Beaudette, M. (2001), www.norcure.com

Yadav, A. P. Nishikata, A. and Tsuru, T. (2004). *Degradation mechanism of galvanized steel in wet-dry cyclic environment containing chloride ions*, Corrosion Science, Vol. 46, 361-376.

Anexos.

No aplica



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel. +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel. +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx