

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**Evaluación de estructuras de concreto reforzado  
mediante un modelo físico de simulación de oleaje.**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**  
P R E S E N T A  
**Mendoza García Salomón Francisco**

**MÉXICO, D.F.**

**2005.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

**Jurado asignado:**

**Presidente** Dr. José Bernardo Hernández Morales

**Vocal** Dr. Juan Genescá Llongueras

**Secretario** M. en C. Carlos Rosendo Arganis Juárez

**1º. Suplente** Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez

**2º. Suplente** I. Q. M. Carlos Rodríguez Rivera

Sitio donde se desarrolló el tema:

México D.F  
Ciudad Universitaria  
Facultad de Química  
Edificio "D"  
Departamento de Corrosión

**Asesor del tema:** \_\_\_\_\_

Dr. Juan Genescá Llongueras

**Sustentante:** \_\_\_\_\_

Salomón Francisco Mendoza García

---

**ÍNDICE**

<b>Resumen</b> .....	<b>6</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>7</b>
<b>Justificación</b> .....	<b>12</b>
<b>Objetivos</b>	
<b>a) Objetivo general</b> .....	<b>13</b>
<b>b) Objetivos particulares</b> .....	<b>13</b>
<b>Capítulo 1 Antecedentes</b>	
<b>1.1 Concreto</b>	
<b>1.1.1 Composición química del concreto</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1.2 Calidad física del concreto</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2.3 Tipos de deterioro</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2 El acero de refuerzo y sus propiedades</b>	
<b>1.2.1 Composición química</b> .....	<b>22</b>
<b>1.2.2 Certificado de un acero para construcción</b> .....	<b>23</b>
<b>1.3 Electroquímica de la corrosión</b>	
<b>1.3.1 Corrosión de acero embebido en concreto</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3.2 Celdas de concentración y aireación diferencial</b> .....	<b>25</b>
<b>1.3.3 Serie electromotriz</b> .....	<b>27</b>
<b>1.3.4 Diagramas de Pourbaix</b> .....	<b>28</b>

---

<b>1.4 Mecanismos de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto</b>	
<b>1.4.1 Cloruros</b> .....	<b>33</b>
a) Condiciones de exposición límite.....	<b>34</b>
b) Cloruros ligados y libres.....	<b>36</b>
<b>1.4.2 Carbonatación</b> .....	<b>37</b>
<b>1.5 Modelos físicos</b> .....	<b>40</b>

## Capítulo 2 Experimental

<b>2.1 Desarrollo de modelo físico para evaluación de concreto reforzado</b>	
<b>2.1.1 Modelo físico</b> .....	<b>45</b>
<b>2.1.2 Probetas</b> .....	<b>47</b>
<b>2.1.3 Agua de mar sintética</b> .....	<b>48</b>
<b>2.2 Técnicas electroquímicas para estimar el estado de corrosión del acero de refuerzo</b>	
<b>2.2.1 Mapeo de Potenciales</b> .....	<b>49</b>
<b>2.2.2 Mapeo de resistividades</b> .....	<b>50</b>
<b>2.2.3 Resistencia a la polarización</b> .....	<b>52</b>

## Capítulo 3 Resultados

<b>3.1 Resultado de experimentación</b>	
<b>3.1.1 Mapeo de potenciales</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1.2 Mapeo de resistividades</b> .....	<b>61</b>
<b>3.1.3 Envejecimiento electroquímico</b> .....	<b>66</b>
<b>3.1.4 Resistencia a la polarización</b> .....	<b>69</b>

---

3.1.5 Velocidad de corrosión.....	70
3.1.6 Intercambio de probetas.....	72
<b>3.2 Modelo matemático de penetración de cloruros</b>	
3.2.1 Justificación.....	73
3.2.2 Consideraciones para la realización del modelo.....	73
3.2.3 Metodología.....	74
3.2.4 Descripción de modelo matemático.....	75
3.2.5 Formulación matemática.....	76
3.2.6 Discretización.....	79
3.2.7 Análisis de sensibilidad.....	82
3.2.8 Resultados del modelo matemático.....	83
3.2.9 Validación del modelo matemático.....	85
3.2.10 Análisis de resultados para modelo matemático.....	87
 <b>Capítulo 4 Discusión</b>	
4.1 Discusión general.....	90
 <b>Capítulo 5 Conclusiones.....</b>	<b>102</b>
 <b>Capítulo 6 Referencias.....</b>	<b>104</b>
 <b>Apéndice 1.....</b>	<b>107</b>

## **Resumen**

El concreto reforzado con varillas de acero es un material de construcción ampliamente usado a nivel mundial, no solo por sus características de resistencia sino también por su versatilidad y estética. Sin embargo, las estructuras que lo emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles en mayor o menor grado a la corrosión. El problema en el deterioro de las estructuras de concreto debido a procesos de este tipo es serio e implica grandes costos. La habilidad para evaluar la corrosión de las varillas de refuerzo en estructuras y estimar la vida útil es tema de estudio en el ámbito mundial.

El problema de la corrosión sigue sin ser entendido completamente, debido a la complejidad del proceso. Para establecer más bases que permitan entender el fenómeno de la corrosión, se presentan algunos temas que ayudarán al lector a comprender las bases del fenómeno para el caso de un ambiente marino controlado como lo es un modelo físico.

En este trabajo se analiza el proceso de corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto sometidas a un ambiente que resulta por sí mismo agresivo, a causa de la acción de agitación del medio y que ha resultado en su degradación o destrucción. El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado, como la adherencia, lo que induce la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto que comprometen la integridad estructural.

Revisar y evaluar el potencial de daño en tales circunstancias, sus causas, los agentes que lo favorecen y sus efectos finales sobre las estructuras es el objetivo aquí planteado, para así delinear y establecer procedimientos generales para su prevención, control o reparación.

## **Introducción**

El concreto es el material de construcción más utilizado en las sociedades industrializadas a nivel mundial. Sus propiedades mecánicas y la poca necesidad de mantenimiento le han hecho de los materiales más competitivos. Sin embargo, en ambientes muy agresivos, la durabilidad del concreto reforzado se acorta debido a la corrosión de la armadura de acero.

Por la gran extensión de litoral mexicano (10,000 kilómetros de costas [1]), la corrosión provocada en las estructuras de concreto reforzado por el contacto con el agua de mar y la brisa marina es un tema que interesa de manera especial al sector constructor del país.

Existe una conciencia general en la práctica constructiva común respecto de las precauciones que deben seguirse en la fabricación de elementos y estructuras de concreto claramente expuestos a ambientes de carácter agresivo, por el deterioro que ocasiona el contacto directo con sustancias naturales como el suelo o el agua. Sin embargo, dichas prácticas no han sido lo suficientemente efectivas como para frenar el fenómeno de la corrosión en el país.

El concreto normalmente se utiliza como recubrimiento de las estructuras de acero al cual protege de la corrosión, ya que permite la formación de una barrera física que aísla la zona de contacto entre el acero y el medio. Esta barrera es muy estable, consta de varios estratos de óxido de hierro y cemento hidratado que se forman sobre el acero cuando éste entra en contacto con la parte alcalina del cemento, convirtiéndose el concreto en un medio ideal para proteger el acero. La eficacia del concreto ante medios agresivos depende fundamentalmente del espesor del recubrimiento y del diseño de la mezcla, dado que relaciones menores agua/cemento y altos contenidos de cemento garantizan un concreto impermeable y de elevada resistencia mecánica [2].

La corrosión de un material es un proceso de naturaleza electroquímica que se refiere al deterioro prematuro de los materiales metálicos por efecto de uno o varios agentes oxidantes. Lo que implica el deterioro de las propiedades del material.

Existen distintos tipos de corrosión y para que se lleven a cabo es necesario considerar el entorno del sistema de interés. El tipo de corrosión que se presente estará estrechamente ligado al ambiente y características del sistema. Entre los tipos principales de corrosión destacan: la corrosión homogénea, por picadura, filiforme,

asistida por esfuerzos, entre otras. Sin embargo, para que exista cualquier tipo de corrosión es necesaria la formación de una celda electroquímica, la cual consta de cuatro elementos básicos e indispensables. Dicha celda permite la disolución del material de interés (oxidación), el depósito de otra especie (reducción), y el transporte electrónico e iónico, por efecto de una diferencia de potencial producida por:

- 1) En un mismo material por distintas zonas de energía.
- 2) En materiales distintos por la distinta energía de cada uno de ellos.

La pasta de cemento y el acero de refuerzo son materiales que al estar en contacto permiten la formación de una celda electroquímica, en la que, el cemento permite el transporte iónico gracias a la saturación de los poros en la matriz por la humedad de los alrededores, mientras que el acero, por el gradiente de concentración a lo largo de la interfase acero-concreto, genera zonas anódicas y catódicas, además de permitir un transporte electrónico, que cierra el circuito de dicha celda.

Concretamente la mezcla de cemento y agua impide que los agentes externos actúen para que se produzca degradación en el acero, la barrera física natural formada en el acero debe ser rota para que se inicie la corrosión del acero, pasando de un estado pasivo a un estado activo. Cuando lo anterior sucede, el cambio va acompañado por un incremento del proceso de corrosión.

Este tipo de corrosión se presenta en condiciones de laboratorio, que generalmente son ideales. En la realidad el incremento no es tan marcado. Los mecanismos que dirigen a estos cambios son básicamente dos: primero la neutralización del ambiente adyacente al acero o proceso de carbonatación y segundo el rompimiento de la capa pasiva alrededor del acero por sustancias corrosivas tales como cloruros [3].

Así pues, se presentan serios deterioros estructurales por el ataque al acero de refuerzo en función de la cantidad de cloruros presentes en ambientes marinos con alta humedad relativa. En algunas circunstancias, el problema se agrava por la presencia de intensa y variada actividad industrial en la zona, como es el caso particular del Golfo de México y la costa del pacífico mexicano.

Algunas de las condiciones que dan origen y favorecen la corrosión del acero de refuerzo en ambientes marinos son: Principalmente el aumento en el contenido de humedad del concreto, que reduce su resistividad y, aunque reduce la penetración y difusión de oxígeno, resulta en la degradación acelerada del acero de refuerzo. Dicho

ingreso de especies está en función de la concentración de agentes corrosivos en los componentes del concreto y en las inmediaciones a este, que inician el ingreso y desarrollan cierto perfil de concentración en la matriz de la estructura, que resulta nocivo. El ión cloruro, como un ejemplo de especie corrosiva, al hallarse disuelto en agua en niveles mayores al 0.2 por ciento relativo a la masa de cemento, acelera el proceso de corrosión por efecto de transporte de masa [4]. Si además se cuenta con una excesiva porosidad, agrietamientos del concreto, o ambos, se permite la humectación del concreto y el ingreso de sales e iones despasivantes hacia la interfase acero-concreto. En ambientes con bajas temperaturas, la cristalización de sales dentro de poros, puede producir rupturas debidas a la presión ejercida por los cristales de cloruro de sodio. Al incrementarse la temperatura, se acelera la corrosión ya que afecta la solubilidad del oxígeno y la movilidad de los cloruros que participan en el proceso de corrosión. Todo lo anterior se agrava cuando la estructura presenta un reducido espesor del recubrimiento de concreto sobre el acero de refuerzo.

La pasta de cemento tiene un pH mínimo de 12.5 y el acero de refuerzo no se corroe en esa circunstancia, debido a la presencia de una película microscópica de óxido que evita la disolución anódica. No obstante, si el pH disminuye a menos de 10 por la acción de efectos tales como la carbonatación o el ingreso de otras especies desde la superficie del concreto, la corrosión puede iniciarse. El efecto de la carbonatación puede disminuir el pH a niveles de 8 o 9, resultando en corrosión del acero cuando están presentes la humedad y los iones cloruro [5].

En un ambiente marino, los iones cloruro del agua de mar se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto hasta llegar a la armadura. Cuando la concentración de los iones cloruro en la superficie del acero de las armaduras alcanza valores que exceden un nivel crítico ( $C_{CRIT}$ ), la protección de la armadura corre el peligro de dañarse y la corrosión puede desencadenarse. Cuando el acero de refuerzo se corroe, se reduce la sección transversal de la barra, ya que el hierro contenido en el acero reacciona con el oxígeno presente y se forma una capa de productos de corrosión (óxido o hidróxido de hierro) en el perímetro de la misma. El volumen ocupado por dicho óxido (o hidróxido) es mayor que el que ocupaba el acero original, creando presiones contra el concreto que rodea al acero y propicia la formación de grietas y desprendimientos del concreto. Estas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto además de ser antiestéticas, disminuyen el anclaje del concreto y la resistencia del elemento estructural.

En el agua de mar, se puede encontrar un amplio intervalo de concentraciones de sales disueltas, aunque siempre con una proporción constante de un constituyente a otro; las concentraciones son más bajas en las zonas frías o templadas que en las cálidas y resultan especialmente altas en zonas de aguas bajas con tasas excesivas de evaporación diurna. El agua de mar dada su elevada concentración de cloruros (más de 20,000 ppm, [6]), destaca como medio agresivo, porque favorece la corrosión del acero de refuerzo.

El agua de mar contiene aproximadamente 3.5% en peso de sales en las que predomina el cloruro de sodio, así como algunos minerales y materia orgánica, si a esto agregamos la humedad en donde el oxígeno es el primer agente corrosivo, estamos ante el ambiente ideal para el proceso de corrosión.

Por todas las características anteriores, el ambiente marino es el ambiente ideal para que se lleve a cabo el fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, aún existen factores que agravan su deterioro y que pone en riesgo a la estructura. Refiriéndonos al efecto del oleaje del mar, el cual genera zonas con distintas características y que acompañadas de los factores estructurales del concreto disminuyen la vida útil.

En estas condiciones, se generan tres tipos de zonas: la primera, una zona completamente sumergida de la estructura, que puede presentar algún grado de corrosión no muy alto, en el que el acero se corroe en pequeñas proporciones, aún cuando el nivel de cloruros en esta sección puede exceder el límite requerido para iniciar la corrosión en el acero de refuerzo. La disponibilidad de oxígeno para esta zona en la interfase concreto-acero se convierte en un factor de control, ya que la difusión del oxígeno en concreto totalmente saturado es muy baja y solo puede soportar bajas cantidades de corrosión.

La segunda zona generada, la zona intermedia o zona de salpique, resulta ser la más importante desde el punto de vista de la corrosión, se encuentra comprendida entre la alta y baja marea. En esta zona existe un continuo humedecimiento seguido por un secado, que provee al concreto tanto de altas concentraciones de cloruros como de suficiente oxígeno. Dicha situación tiende a ser peor por el desarrollo de macroceldas entre regiones altas de la estructura de concreto, las cuales aún no sufren de corrosión, pero disponen de oxígeno en grandes cantidades y con la presencia de cloruros terminan por corroer esta zona.

Por último la generación de una zona seca, inmediata a la zona de salpique y que generalmente presenta un menor grado de corrosión debido a dos causas; primera, los cloruros son transportados allí por capilaridad y por viento en menor cantidad y segunda, el contenido de humedad del concreto es bajo.

La mayoría de los daños ocasionados a las estructuras semi-sumergidas se presenta en la zona de salpique, y es allí hacia donde se han dirigido las investigaciones tendientes a dar protección.

El éxito alcanzado mediante la utilización de la protección catódica contra la corrosión, en losas de puentes y muchas otras estructuras de concreto reforzado, ha hecho que esta protección llame la atención para ser utilizada también en las subestructuras marinas.

La corrosión en objetos y en estructuras metálicas expuestas es muy común, siendo observable con claridad, por lo que permite tomar medidas oportunas para evitar su deterioro. Mientras que en las estructuras de concreto reforzado el fenómeno permanece encubierto y se descubre el daño, la mayoría de las veces, cuando ya es irreparable. Por otro lado, se sabe también que la corrosión bajo tensión en aceros de pre-esfuerzo genera agrietamientos que pueden provocar el colapso súbito de las estructuras.

Podría pensarse que únicamente países subdesarrollados presentan este tipo de problemas, sin embargo el problema se presenta a nivel mundial. Cabe mencionar, que tan solo en el continente americano las fallas por corrosión bajo tensión en los aceros, es importante y como un ejemplo se encuentran las siguientes obras:

En agosto de 1967 en Estados Unidos, el colapso del puente Silver sobre el río Ohio, que costo la vida de 46 personas, por agrietamientos en barras de tipo Y, que soportan los cables de los que cuelga el tablero desde los cables maestros o principales. [7].

En el año de 1980 en México, el colapso de la techumbre del auditorio Benito Juárez en la Ciudad de Guadalajara, Jalisco, que pudo costar la vida a más de 10,000 personas [5].

En Maracaibo, Venezuela, en 1981 la sustitución de mas de 1,300 toneladas de acero de los cables del puente atirantado que se encuentra en este lugar, debido al deterioro por corrosión bajo tensión [8].

## **Justificación.**

Preocupados por esta situación se plantea el problema y se ataca a nivel laboratorio, bajo condiciones controladas, con el diseño de un modelo físico que permita evaluar estructuras de concreto y observar el efecto del oleaje sobre la vida útil de las estructuras.

La comunicación entre comunidades apartadas, lograr un comercio y transporte más eficiente, así como el ahorro de tiempo para viajar de un lugar a otro, son factores que implican la construcción de obras resistentes y durables, como son los puentes. Este tipo de conexión, se encuentra frecuentemente semi-sumergida, (esto es, sus bases o pilotes se encuentran en contacto con algún tipo de electrolito, ya sea ríos, lagos o mares), en cuyo caso existirá una hidratación de la matriz de concreto que afectará en algún momento la estructura de refuerzo, siendo este un grave problema por sus consecuencias a largo tiempo.

Una hipótesis para este tipo de problema es que el movimiento del electrolito en el cual se encuentra inmersa parte de la estructura, en forma de oleaje altera al ritmo de deterioro del concreto y del acero de refuerzo, por la generación de zonas con distinto grado de humedad, haciendo necesaria la reparación del inmueble, involucrando gastos extras al mantenimiento.

De esta forma es necesario comprender el fenómeno e investigar en que grado se incrementará dicho deterioro, con el fin de tomar las medidas pertinentes. Con este motivo, se plantea el diseño de un modelo físico de simulación de oleaje que permite generar las distintas zonas de humedad y cuyos resultados serán de utilidad en la predicción de la vida útil de una estructura de concreto bajo las condiciones mencionadas.

## **Objetivos.**

### **a) Objetivo general.**

Evaluar y analizar la corrosión en probetas de concreto reforzado sumergidas parcialmente en agua de mar sintética por efecto del movimiento del electrolito en forma de oleaje, que genera tres zonas con distintas características. Los resultados obtenidos servirán para delinear y proponer procedimientos generales para su prevención, control o reparación.

### **b) Objetivos particulares**

Evaluar, mediante técnicas electroquímicas, el deterioro provocado a estructuras de concreto armado parcialmente sumergidas, en las diferentes zonas generadas a partir de un modelo físico de simulación de oleaje.

Estimar el efecto del oleaje del electrolito en la vida útil de las probetas de concreto mediante el modelo físico propuesto.

Analizar el comportamiento general de corrosión mediante el uso de un modelo matemático que simule difusión de cloruros bajo condiciones de oleaje.

---

## CAPÍTULO 1 Antecedentes

### 1.1 Concreto.

El concreto consiste de una mezcla de agregados pétreos naturales o de producto de trituración unidos por medio de una pasta de cemento y agua. Los agregados pueden ser finos como las arenas con tamaños menores a  $\frac{1}{4}$  de pulgada o gruesos, mayores a  $\frac{1}{4}$  de pulgada de tamaño. La pasta se compone de cemento, agua y aire atrapado y puede constituir entre el 25 y 40% del volumen total del concreto [5].

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino que es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos conforman el 90% o más del peso del cemento Portland y son: el *silicato tricálcico* ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), en forma abreviada  $\text{C}_3\text{S}$ , el *silicato dicálcico* ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) en forma abreviada  $\text{C}_2\text{S}$ , el *aluminato tricálcico* ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con forma abreviada  $\text{C}_3\text{A}$  y finalmente el *ferrialuminato tetracálcico* ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) con forma abreviada  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto. Las propiedades ingenieriles del concreto fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional, dependen principalmente del gel del silicato de calcio hidratado, el cual es la médula del concreto.

#### 1.1.1 Composición química del concreto.

La composición química del silicato de calcio hidratado es en cierto modo variable, pero contiene cal ( $\text{CaO}$ ) y sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en una proporción del orden de 3:2; el área superficial del hidrato de silicato de calcio es de unos 3000 metros cuadrados por gramo. Sus partículas son tan diminutas que solamente pueden ser vistas en un microscopio electrónico. En la pasta de cemento ya endurecida, estas partículas forman uniones enlazadas entre las otras fases cristalinas y los granos sobrantes de cemento sin hidratar; también se adhieren a los granos de arena y a piezas de agregado grueso, cementando todo el conjunto. La formación de esta estructura es la acción cementante de la pasta y es responsable del fraguado, del endurecimiento y del desarrollo de resistencia.

Tabla 1 Composición típica de un cemento Portland ordinario [9].

Compuesto	Porcentaje (%)
SiO <sub>2</sub>	22.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.45
CaO	67.1
Na <sub>2</sub> O	0.13
K <sub>2</sub> O	0.72
SO <sub>3</sub>	2.3

Cuando el concreto fragua, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el concreto endurecido contiene poros llenos de agua y aire, mismos que no tienen resistencia alguna. La resistencia mecánica se encuentra en la parte sólida de la pasta, en su mayoría en el hidrato de silicato de calcio y en las fases cristalinas.

### 1.1.2 Calidad física del concreto.

La calidad física del concreto se mide por su resistencia mecánica, que puede referirse a la compresión axial o a la resistencia a la flexión y depende mucho de la calidad de la pasta. Esta a su vez, depende de la relación a/c utilizada, del grado de hidratación alcanzado por el cemento (curado), necesario para obtener la propiedad cementante y para desarrollar la resistencia potencial y de la calidad del cemento y agua utilizados.

Las mezclas de consistencia fluida son adecuadas para la mayoría de las obras, y la facilidad para vaciar y compactar el concreto en la cimbra se llama 'trabajabilidad'. Un concreto debe ser trabajable, pero sin 'sangrar', ni segregarse en forma excesiva.

La resistencia mecánica del concreto se debe a las reacciones de hidratación del cemento, debido a la cristalización progresiva de sus componentes que forman un gel o pasta que rodea a los agregados, uniéndolos y formando un conglomerado. Tanto la resistencia mecánica como la permeabilidad del concreto son función de la relación agua cemento (a/c). Así, cuanto más baja sea esta relación, más alta será la resistencia y menor será la permeabilidad [10].

La resistencia del concreto también es función de la porosidad. Con una pasta poco porosa, se obtendrá un concreto más resistente. Por lo tanto, al mezclar el concreto no se debe usar una cantidad mayor de agua que la necesaria para fabricar un concreto plástico y trabajable. Aún entonces, el agua empleada es usualmente mayor que la que se requiere para la completa hidratación del cemento. La relación a/c mínima (en peso) para la hidratación total es aproximadamente de 0.22 a 0.55.

El concreto se caracteriza por tener de 10 a 30% de porosidad, la cual depende principalmente de la relación a/c. Esta porosidad es la vía que utilizan los agentes agresivos para iniciar la degradación de las estructuras de concreto reforzado.

La hermeticidad de un concreto se define a menudo como la capacidad de refrenar o retener el agua sin escapes visibles. La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gas, iones, etc.). Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven más hermético [11].

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. Una disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a la saturación, al ataque de sulfatos, cloruros y otros productos químicos [11].

Esta propiedad también afecta la capacidad de destrucción por congelamiento en condiciones de saturación. Aquí la permeabilidad de la pasta es de particular importancia porque la pasta recubre a todos los constituyentes del concreto. La permeabilidad de la pasta depende de la relación a/c y del grado de hidratación del cemento o duración del curado húmedo. Un concreto de baja permeabilidad requiere de una relación a/c baja y un periodo de curado húmedo adecuado. La inclusión de aire ayuda a la hermeticidad aunque tiene un efecto mínimo sobre la permeabilidad que aumenta con el secado.

Otra propiedad que se ve afectada directamente por la humedad del concreto es la resistividad. Se define como la resistencia de un conductor con una longitud de 1cm de arista y sección transversal de  $1\text{cm}^2$  y puede ser responsable del incremento en la velocidad de corrosión.

Se cuenta con una resistencia mínima cuando el sistema tiene una baja resistividad (o una alta conductividad) y cuando la distancia es pequeña.

La resistividad en concretos oscila, dependiendo de la relación a/c, la porosidad de la matriz y del grado de humectación, pero tiene un valor aproximado a los 10 k $\Omega$ cm o mayores dependiendo del medio en cuestión. El concreto será más o menos agresivo dependiendo de los niveles de resistividad. Estos valores se muestran en la tabla 2 [8].

Tabla 2 Agresividad del concreto en función de la resistividad del concreto [8].

Intervalo de resistividad ( $\Omega$ -cm)	Agresividad del hormigón
<200	Baja
20 a 200	Moderada
<20	Alta

En una pasta endurecida madura se mantienen rangos de humedad de 0.1x10E-12cm/s, para relaciones a/c que varía de 0.3 a 0.7. La permeabilidad de rocas comúnmente utilizadas como agregado para concreto varía desde aproximadamente 1.7x10E-9 hasta 3.5x10E-13cm/s. La permeabilidad de un concreto maduro de buena calidad es de aproximadamente 1x10E-10cm/s.

Una relación a/c baja y un periodo de curado adecuado reducen la permeabilidad de manera significativa.

Las relaciones a/c bajas también reducen la segregación y el sangrado, contribuyendo adicionalmente a la hermeticidad. Para ser hermético, el concreto también debe estar libre de agrietamientos y de celdillas.

En México, las propiedades que el concreto debe de cumplir y que son requeridas por la estructura y el medio ambiente donde se construyen, están expresadas en las normas del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.T. Tales propiedades son las siguientes: El Concreto se entregará por metro cúbico recién mezclado, conforme a la especificación NMX-C-155-ONNCCE, señalándose la resistencia mecánica, que puede definirse como a la compresión simple o a la flexión como módulo de ruptura, en MPa ó en Kg/cm<sup>2</sup>, a una edad definida como por ejemplo, 3, 7, 28 días determinada como se indica en la Norma NMX-C083-ONNCCE o en la NMX-C-191 respectivamente.

### 1.1.3 Tipos de deterioro.

Respecto al tipo de deterioro del concreto, la durabilidad se define como la resistencia a la acción del entorno, a los ataques químicos, al clima o a cualquier otro proceso de deterioro. Causas mecánicas como impactos, explosiones, sismos,

huracanes o fuerzas internas ocasionadas por productos de corrosión, que se manifiestan en agrietamientos, deformaciones excesivas, vibraciones, etc. Deterioro por naturaleza, debido a reacciones de los materiales del concreto que causan expansión y por lo tanto, agrietamiento. Otros, como el aumento de porosidad por altas cantidades de alúmina, que produce una reducción de la resistencia mecánica o por reacciones de los agregados con los álcalis, cuyas reacciones producen una pasta que absorbe cantidades considerables de agua con un aumento en su volumen y un consecuente agrietamiento.

Cuando el concreto está en estado fresco se presentan problemas por cimbrado, colado y el acabado del concreto en su estado plástico. Un mal cimbrado, carencia, insuficiencia del acero de refuerzo, vibrado inadecuado, falta de curado, contracción de volumen debido al asentamiento de sólidos, descimbrado previo, etc, son los principales factores que promueven la formación de grietas.

El clima es uno de los factores más importantes en el deterioro del concreto; por ejemplo, en climas cálidos se obtienen menores resistencias debido a la deficiencia de agua. Se tiene una menor durabilidad debido al agrietamiento y un mayor peligro de corrosión del acero de refuerzo, por efecto de la difusión de especies corrosivas.

El concreto presenta una buena protección al acero de refuerzo cuando se encuentra bien fabricado y en óptimas condiciones, proporcionando la alcalinidad necesaria para mantener la capa pasiva del acero, la cual lo protege de la corrosión. Sin embargo, la presencia de agrietamientos constituye un camino que facilita el ingreso de humedad, oxígeno y, en general, agentes que aceleran la corrosión.

La carbonatación por el bióxido de carbono presente en el aire y que está en contacto con el concreto reacciona con los hidróxidos que hay en la matriz de éste, permitiendo una disminución de la alcalinidad y reduciendo su eficacia como medio protector. Cuando los cloruros están presentes desde el agua de amasado o penetran desde el medio ambiente el concreto permite la despasivación.

Los contaminantes absorbidos por el concreto se mantienen cautivos en los poros para convertirse en especies degenerativas (como los sulfatos y nitratos en algunas áreas), creando un rápido reblandecimiento y deterioro del concreto.

El álcali está presente en todo concreto, disuelve las sales alcalinas y aparece en la superficie como una solución destructiva, siendo más dañino con la humedad. En pisos de concreto suspendidos y adecuadamente ventilados, no se encuentra humedad en cantidades problemáticas. Donde el concreto está en contacto directo con el suelo o el espacio está pobremente ventilado, la humedad existe por la acción capilar.

La dificultad más seria causada por las soluciones alcalinas es la reacción química de "*saponificación*". Esta es esencialmente la misma reacción que ocurre cuando algunos aceites o ácidos grasos se mezclan con álcali, como en la manufactura del jabón. A pesar de que las condiciones de humedad y álcali varían mucho, siempre hay suficiente humedad en el suelo y álcali en el concreto para presentar un "problema de álcali" en lugares afectados por la humedad del suelo. Nunca es seguro asumir que una losa de concreto estará siempre seca porque ha estado seca por varios años. En muchos casos un piso de concreto puede parecer seco porque el contenido de humedad es muy pequeño y se evapora apenas toca la superficie, pero cuando se le aplica una capa para pisos, se evita o se retarda la evaporación y la solución alcalina se junta bajo la capa o cubierta del piso destruyendo la cubierta.

## **1.2 El acero de refuerzo y sus propiedades.**

El acero como material estructural tiene muchas ventajas como lo son: su alta resistencia por unidad de peso lo que implica la ligereza de las estructuras, lo que es de gran importancia en puentes de grandes claros. Cuenta con uniformidad microestructural, que le proporciona propiedades relativamente homogéneas y que no cambian apreciablemente con el tiempo como es el caso de las estructuras de concreto reforzado. Lo anterior también le brinda al acero una larga durabilidad, siempre y cuando el mantenimiento de las estructuras sea adecuado.

Una propiedad muy importante en los aceros es la ductilidad, lo cual se refiere a la capacidad que tiene el material de soportar grandes deformaciones sin fallar bajo esfuerzos de tensión. La naturaleza dúctil de los aceros estructurales comunes les permite fluir localmente, evitando así fallas prematuras. Además, los aceros estructurales tienen alta tenacidad, es decir, pueden absorber energía en grandes cantidades.

Otra ventaja del acero estructural es la gran facilidad para unir diversos miembros por medio de varios tipos de conectores como son la soldadura, los tornillos

---

o los remaches. Lo anterior da la posibilidad de prefabricar los miembros de una estructura para hacer más eficiente el montaje.

**Antecedentes**

Desde el punto de vista de su fabricación, los aceros tienen una gran capacidad de laminarse en gran cantidad de tamaños y formas. En función de sus dimensiones y de la calidad de la aleación del acero, entre otros factores, es posible brindar al acero una buena resistencia a la fatiga. Generalmente, los miembros estructurales más convenientes son aquellos con grandes momentos de inercia en relación con sus áreas.

Una vez que ha prestado un servicio y en caso de ser desechado se tiene la posibilidad de venderlo como "chatarra" y que sea reciclado para aceros que requieren menor calidad u otras especificaciones.

Una de las desventajas del acero como material estructural, es el costo de mantenimiento. La mayor parte de los aceros son susceptibles a la corrosión al estar expuestos al agua y al aire y, por consiguiente, deben pintarse periódicamente u ofrecerles otro tipo de protección contra estos embates. El costo de la protección contra el fuego representa un gasto excesivo, aunque solo para cierto tipo de construcciones. Aunque algunos miembros estructurales son incombustibles, su resistencia se reduce considerablemente durante los incendios.

Algunos aceros tienen cierta susceptibilidad al pandeo. Entre más largos y esbeltos sean los miembros a compresión, mayor es el peligro de pandeo. Como se indicó previamente, el acero tiene una alta resistencia por unidad de peso, pero al utilizarse como columnas no resulta muy económico ya que debe usarse bastante material, solo para hacer más rígidas las columnas contra el posible pandeo, sin embargo esto debe estar considerado dentro del diseño de la estructura a fabricar.

Las varillas de refuerzo se realizan bajo especificaciones generales para barras de acero grado 42 conformadas superficialmente para la construcción sin calidad soldable bajo las normas ASTM-A615 y su equivalente mexicana NMX-C-407-ONNCCE-2001 y para varillas con calidad soldable bajo la norma ASTM A706 y su equivalente NMX-B-457, NMX-B-6, [12].

Dichas normas indican que en la fabricación de varillas de acero para la construcción deberán usar acero con límite de fluencia característico, mayor o igual de 4200 Kg/cm<sup>2</sup> o 412 MPa. Con una resistencia a la tensión mínima de 5300Kg/cm<sup>2</sup> o 617MPa, con una dureza natural o dureza mecánica [13].

La sección transversal de las barras puede ser circular, ovalada, etc, mientras cumplan con las especificaciones anteriores. La superficie deberá ser especialmente conformada (corrugada) para aumentar su adherencia con el concreto.

**Antecedentes**

La unión de varillas puede hacerse de manera mecánica, con varios tipos de traslapes, amarres, abrazaderas, y en algunos casos cuando las varillas son gruesas la unión puede lograrse mediante soldadura de arco eléctrico. Al unir varillas delgadas se recurre frecuentemente al traslape, el cual usan los albañiles en construcciones pequeñas. En edificios grandes en donde se emplean varillas más gruesas no es posible traslaparlas así que se unen con mucha frecuencia mediante la soldadura de arco eléctrico.

La soldadura de arco eléctrico consiste en unir dos piezas de acero mediante el acero fundido producido por el flujo de una corriente eléctrica a través de un electrodo, el cual consiste en una varilla de acero de bajo carbono recubierta con una mezcla de compuestos estabilizan el arco eléctrico y generan una atmósfera protectora que evita la formación de óxidos. El paso de la corriente eléctrica produce la fusión de las piezas que al enfriar y solidificar permanecerán unidas.

La clasificación de las varillas depende del fabricante, sin embargo lo más común es utilizar el diámetro de las mismas, una de estas clasificaciones se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de varilla de acero [13].

Designación de medida del diámetro	Diámetro Nominal		Masa Nominal		Número aprox. de varillas por tonelada	Doble a 180°
	Nos.	Pulgadas	mm	lb/ft		
3	3/8	9.5	0.376	0.560	150	3.5 d
4	1/2	12.7	0.668	0.994	84	3.5 d
5	5/8	15.9	1.043	1.552	53	3.5 d
6	3/4	19.1	1.502	2.235	37	5.0 d
8	1	25.4	2.670	3.973	21	5.0 d
10	1 1/4	31.8	4.171	6.225	13	7.0 d
12	1 1/2	38.1	5.988	8.938	9	8.0 d

Las varillas deberán cumplir con ciertos requerimientos mecánicos, uno de los más importantes es el porcentaje de alargamiento, cuyo requerimiento se observa en la tabla 4 y se discutirá con mayor detalle más adelante [13].

La tolerancia en masa no deberá exceder (+/-) 6% en pieza y (+/-) 3.5% en lote respecto a la masa nominal.

Tabla 4. Alargamiento mínimo respecto al número o espesor de varilla [13].

Alargamiento en 200 mm mínimo	
Varillas #	(%)
3, 4, 5, 6	9
8	8
10 y 12	7

### 1.2.1 Composición química.

Los aceros estructurales deben cumplir con cierta composición química y según su utilización se clasifica en dos grupos:

**I)** Aceros sin exigencias de soldabilidad. Estos aceros pueden también ser soldados obteniendo resultados satisfactorios, utilizando métodos de soldaduras especiales, o métodos corrientes con precauciones especiales. Sin embargo, deberán presentar una composición química en los análisis de colada y comprobación para los elementos de azufre y fósforo que será la siguiente (tabla 5):

Tabla 5. Porcentaje máximo de azufre y fósforo del acero para varillas sin exigencia de soldabilidad, [14].

	Análisis de cuchara %máximo	Análisis de comprobación %máximo
Azufre	0.050	0.058
Fósforo	0.040	0.048

**II) Aceros con exigencia de soldabilidad o con garantía de soldabilidad.** Los cuales se pueden soldar por los métodos corrientes de soldadura. Este tipo de acero deberá presentar la composición química siguiente (tabla 6):

Tabla 6. Porcentaje de elementos del acero para varillas con exigencia de soldabilidad, [14].

	Análisis de cuchara %máximo	Análisis de comprobación %máximo
<b>Carbono</b>	0.300	0.330
<b>Manganeso</b>	1.500	1.550
<b>Azufre</b>	0.045	0.053
<b>Fósforo</b>	0.035	0.043
<b>Silicio</b>	0.500	0.550

El carbono equivalente del análisis químico de colada del acero calculado según la fórmula siguiente no debe exceder el valor de 0.550 %.

Carbono equivalente:

$$C_{eq} = \%C + \% \frac{Mn}{6} + \% \frac{Cu}{40} + \% \frac{Ni}{20} + \% \frac{Cr}{10} - \% \frac{Mo}{50} - \% \frac{V}{10} \quad (1)$$

### 1.2.2 Certificado de un acero para construcción.

Cabe detallar que las barras de clase 2, serán suministradas por convenio previo entre productor y usuario y se adjuntará a cada partida, un certificado de fabricación en el que constará [15]:

- 1) El nombre del cliente y el tipo de material.
- 2) Las características mecánicas.
- 3) Composición química de colada para verificar el carbono equivalente.
- 4) **Ensayo de tracción:** con un límite de fluencia característico de 4200 Kg/cm<sup>2</sup>, tensión característica de rotura mayor o igual a 5000 Kg/cm<sup>2</sup>.
- 5) **Alargamiento característico** de rotura medido sobre 10 veces el diámetro, mayor o igual de 12% para barras de dureza natural y mayor o igual de 10% para barras de dureza mecánica.

**6)** Cuando el **límite de fluencia** no se acusa directamente se tomará como tal, la tensión que produce un alargamiento permanente de 0.2% llamado límite de fluencia convencional.

**7) Ensayo de doblado** para las barras de dureza mecánica: Se efectuarán sobre mandriles de diámetro 3 veces el de la barra. Para barras de dureza natural el ensayo se efectuará sobre mandriles de diámetro 3.5 el diámetro de la barra, para barras de diámetro igual o menor de 25 milímetros; sobre mandriles de diámetro 5 veces el diámetro de la varilla, para barras de diámetros entre 25 y 32 milímetros y sobre mandriles de diámetro 7d para barras de diámetro mayores de 32 milímetros. En todos los casos en ángulo será de 180°, no debiendo presentar fisuras en la superficie exterior del mismo.

**8)** En casos de barras obtenidas por dureza mecánica el **ensayo de torsión** no tendrá un paso mayor de 12 veces el diámetro de las mismas.

### **1.3 Electroquímica de la corrosión**

En una celda electroquímica se genera una corriente a partir de una reacción redox en donde la sustancia oxidante esta separada de la reductora de manera que los electrones deben viajar a través de un conductor eléctrico desde la sustancia reductora hasta la oxidante. En esta celda el agente reductor pierde electrones, oxidándose. Dicha oxidación tiene lugar en el ánodo. En el otro electrodo la sustancia oxidante gana electrones y por lo tanto se reduce. Esta semi-reacción se lleva a cabo en el cátodo y en este electrodo se ocurre la reacción de reducción.

Así pues, los cuatro elementos básicos son el ánodo o superficie metálica en donde se lleva a cabo la oxidación y la liberación de electrones, el cátodo o superficie en donde se lleve a cabo la reducción, y el consumo de electrones producidos en el ánodo por determinados iones presentes en el electrolito. Un conductor electrónico o cable que permita el transporte de electrones del ánodo hacia el cátodo. Y un electrolito o sustancia que permita el transporte de carga a través de los iones [16].

La corriente eléctrica fluye desde el ánodo hacia el cátodo debido a una diferencia de potencial entre los electrodos. La diferencia de potencial eléctrico se mide de forma experimental con un voltímetro donde la lectura es el voltaje de la celda.

### **1.3.1 La corrosión de acero embebido en concreto.**

Está se lleva a cabo, debido a la formación de una celda electroquímica siendo el electrolito, la matriz de concreto o en todo caso el agua de mar que se ha filtrado a través de los poros del concreto y que además permite el transporte de especies despasivantes de zonas de alta concentración hacia zonas de menor concentración. En la varilla de refuerzo coexisten, debido a una diferencia de concentración, el ánodo y el cátodo, además de que el refuerzo mismo es un conductor eléctrico.

En la mayoría de los casos, las estructuras de concreto reforzado se encuentran secas y en ambientes de baja humedad en donde el transporte de especies agresivas es mínimo. Sin embargo, cuando se encuentra cerca de ambientes de humedad relativa alta (aproximadamente 80%) como es el caso de los ambientes marinos, el concreto tiende a humectarse, permitiendo un mayor flujo hacia la interfase acero-concreto, acelerando la disolución anódica.

Cuando el concreto se encuentra totalmente seco se presenta el fenómeno difusivo para especies como el oxígeno y el bióxido de carbono, y el acero de refuerzo presenta un daño mínimo ya que dicha difusión es relativamente lenta; cuando el concreto alcanza cierto nivel de humedad (concreto húmedo), la presencia de agua en la interfase activa la corrosión del acero aunque se disminuye el acceso de las dos especies anteriores; finalmente cuando el concreto se encuentra totalmente hidratado la difusión de oxígeno y de CO<sub>2</sub> son prácticamente nulas, mientras que se favorece la reacción de reducción del agua y la difusión de otras especies, como la del ion cloruro,[5].

### **1.3.2 Celdas de concentración y aireación diferencial.**

Lo anterior genera en cada una de estas zonas una celda de concentración diferencial, dicha celda está formada por celdas de iguales soluciones pero diluidas en diferentes proporciones. Al ser de diferentes concentraciones, una de las celdas estará más concentrada que la otra, y la pila tratará de equilibrar esta desproporción. La forma en que lo hace es disminuyendo la concentración de la celda con mayor proporción y aumentando la de menor.

Esto quiere decir que si la solución de mayor concentración disminuye, la misma se reduce, pues los electrones viajan para unirse con los iones, para formar átomos sobre el electrodo de la otra celda. La celda de menor concentración irá en aumento por esta formación de átomos, pues la solución se oxida, liberando electrones que al pasar a la misma, aumentan la concentración de ella.

A lo largo de la varilla de refuerzo y por los distintos niveles de humectación se generarán celdas de aireación diferencial. La cual es una pila formada por soluciones iguales en concentraciones iguales. La diferencia con las otras pilas está en que en una de las celdas tendrá una mayor concentración de oxígeno, que produce una diferencia de potencial en la celda.

En el sistema en cuestión, la concentración de oxígeno a lo largo de la barra de refuerzo no es homogénea debido a que la probeta de concreto se encuentra parcialmente sumergida, permitiendo una mayor concentración de oxígeno en la zona seca de la matriz de concreto [17].

Hasta este momento se ha visto como el nivel de humedad en una estructura de concreto armado afecta a sus distintas propiedades y afecta directamente al acero de refuerzo, el cual en mayor o en menor cantidad sufre los embates de la corrosión. Un parámetro importante a determinar es la velocidad con la que el material se deteriora y, si es posible, determinar en que zonas se llevan a cabo los daños mas graves. De manera cualitativa, utilizando la tabla 7, es posible estimar el nivel de daño que es probable encontrar en una estructura de concreto armado con cierto grado de humedad. Dicho daño está en función de un aspecto cinético, el cual determina la velocidad de corrosión.

Tabla 7 Valores típicos de la velocidad de corrosión para acero embebido, en función de las condiciones de exposición [18].

<b>Nivel de daño</b>	<b>Vcorr (mm/año)</b>	<b>Condición del concreto</b>
Muy leve	<1	Muy seco sin contaminación de cloruros
Leve	1-5	Seco, carbonatado o poco contaminado con cloruros
Moderado	5-10	Húmedo, carbonatado o poco contaminado con cloruros
Alto	10-100	Muy Húmedo, carbonatado o contaminado con cloruros
Muy alto	>100	Muy Húmedo, carbonatado o muy contaminado con cloruros

Para explicar los mecanismos anteriores se requiere de algunas herramientas de electroquímica que permiten comprender el fenómeno y determinar la velocidad del deterioro.

### 1.3.3 Serie electromotriz.

Una de las herramientas más básicas para el análisis de un sistema electroquímico es la serie electromotriz, que indica el potencial de media celda de los metales respecto al electrodo de referencia de hidrógeno (ENH), tomando en cuenta aquellos equilibrios electroquímicos que involucran a los metales y a sus iones, o sea para reacciones que sólo dependen del potencial. Esta serie ayuda a explicar el por qué se presenta la disolución anódica, cuando se presentan ciertas especies dentro de un sistema [17].

Ya se mencionó que para presentarse el fenómeno de corrosión debe existir la formación de una celda electroquímica y para ello el ánodo y el cátodo deberán formar un par galvánico, la serie electromotriz indica si dos metales puros formarán dicho par y que par redox será el predominante. Así, dos metales formarán un par galvánico al presentar una diferencia de potencial entre ellos. De esta manera, entre más alejados se encuentren dos metales dentro de la serie electromotriz, mayor será la diferencia de potencial y la corrosión se presentará con mayor facilidad.

Una de las limitaciones más importantes de esta serie, es que no toma en cuenta el efecto de las películas de óxido, que se forman sobre la superficie de los metales.

Es posible que al instalar cierto sistema en el que interactúan dos o más materiales metálicos nos preguntemos si el metal es adecuado para la instalación de cierto sistema. La respuesta a lo anterior se encuentra al analizar la relación entre la variación de la energía libre de reacción del material. La suma de los cambios de energía libre de una par de materiales nos da la variación total de energía libre en el proceso de corrosión.

$$\Delta G = -nFE \quad (2)$$

en donde  $\Delta G$  es la energía libre,  $n$  es el número de electrones transportados, es la constante de Faraday y  $E$  es el potencial. Esta ecuación representa la cantidad máxima de trabajo útil que se puede obtener de una reacción química que se ha transformado en eléctrica. Si este cambio de energía libre es negativo, entonces la corrosión tendrá lugar espontáneamente y esta diferencia es directamente proporcional al potencial de celda generado [16].

Tabla 8. Serie electromotriz [16].

Reacción en equilibrio	E vs ENH (volt)
$\text{Au}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Au}$	+ 1.7
$1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2\text{O}$	+ 1.23
$\text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Pt}$	+ 1.20
$\text{Ag}^+ + \text{e}^- = \text{Ag}$	+ 0.80
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Cu}$	+ 0.34
$2\text{H}^+ + \text{e}^- = \text{H}$	+ 0.00 por definición
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Ni}$	- 0.25
$\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Fe}$	- 0.44
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Cr}$	- 0.70
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Zn}$	- 0.76
$\text{Al}^{3+} + 3\text{e}^- = \text{Al}$	- 1.66
$\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- = \text{Mg}$	- 2.38

De acuerdo a la International Union for Pure and Applied Chemistry (IUPAC), los metales "Nobles" tienen un potencial más positivo y por lo tanto sufren un mínimo de corrosión, mientras que los metales "activos" son los que tienen un potencial más negativo (en comparación con los metales nobles) y se corroen más fácilmente [17].

Cuando se tiene un par metálico, el metal "pasivo" es el que posee alguna forma de película protectora sobre su superficie, como es el caso de los aceros inoxidable, el aluminio, el titanio, el cobre y otros metales. El metal "activo" es un metal desnudo, sin película protectora. El estado activo está asociado con un potencial más negativo que el correspondiente a un estado pasivo.

#### 1.3.4. Diagrama de Pourbaix.

El estado de energía de un metal en una disolución electrolítica es fuertemente influido por el pH de la disolución y las características particulares del metal. Bajo estas consideraciones, Marcell Pourbaix desarrolló una forma sencilla de representar reacciones en un plano, tomando como coordenadas el pH y el potencial electroquímico; el diagrama resultante es: el Diagrama de Pourbaix o diagrama de estabilidad termodinámica. En estos diagramas, los parámetros potencial E y pH son mostrados en gráficas para los diversos equilibrios sobre coordenadas cartesianas normales con E

como eje vertical u ordenada y el pH como eje horizontal o abscisa. El diagrama toma en cuenta los equilibrios electroquímicos y químicos de metales en agua. Los datos de estos equilibrios contenidos en los diagramas potencial-pH se consideran de tal valor que éstos han sido preparados para la mayoría de los metales en un atlas [16].

Las reacciones de reducción del hidrógeno y del oxígeno son importantes en el proceso de corrosión, por lo tanto sus equilibrios están contenidos en todos los diagramas de Pourbaix.

La reacción del agua se representa mediante dos semi-reacciones:



La actividad del agua es unitaria por ser el disolvente. Si las fugacidades del hidrógeno y el oxígeno toman el valor unitario, es factible calcular sus potenciales de electrodo mediante la ecuación de Nerst:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{ox}{red} \quad (5)$$

donde, E = el potencial electroquímico de cada reacción, en Volts.

Para el Hidrógeno:

$$E = 0 + 0.0591 \ln |H^+| = -0.059 pH \quad (6)$$

Para el oxígeno:

$$E = 1.23 + 0.0591 \ln \left( \frac{(O_2)^{1/2} (H^+)^2}{H_2O} \right) = 1.23 - 0.0591 pH \quad (7)$$

$E^0$  = Potencial electroquímico de cada reacción a 298 °K y una atmósfera de presión, en Volts

R = Constante de los gases, en (cal\*mol<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>)

T = Temperatura en la escala absoluta en K.

n = Número de electrones intercambiados en una reacción.

F = Constante de Faraday, en (cal\*Volt<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>)

El diagrama de Potencial-pH del agua queda como se muestra en la figura 1.1. Las diagonales paralelas limitan la región de pH y potencial entre los cuales el agua se mantiene como un compuesto estable.

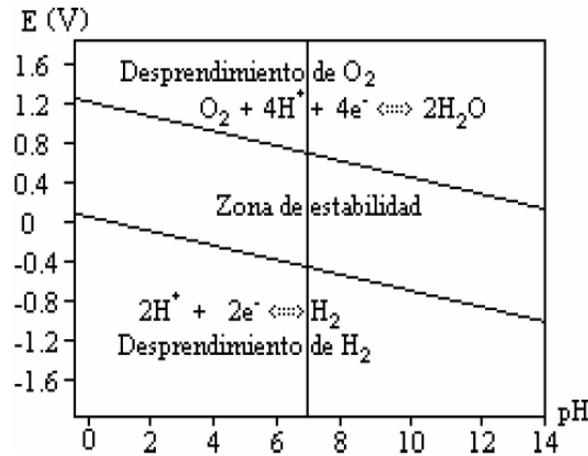


Figura 1.1, Diagrama de Pourbaix del agua [2]

Para explicar el comportamiento del sistema en cuestión se toma en cuenta el diagrama de Pourbaix que toma como elemento al hierro (Figura 1.2). El potencial se determina mediante la ecuación de Nernst. Se considera en los cálculos una actividad de  $10^{-6}$  molar debido a que se estableció que a este valor las interacciones con el metal son despreciables.

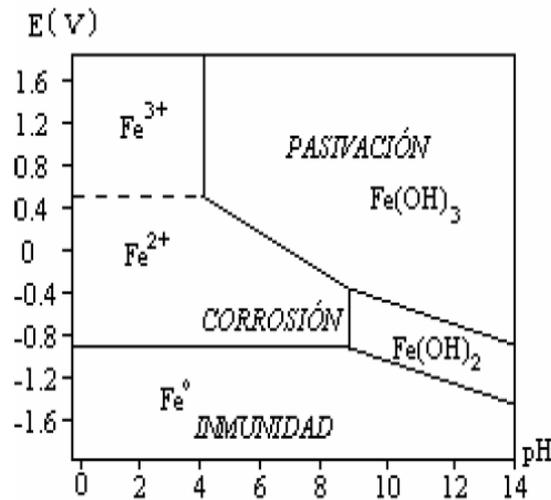


Figura 1.2, Diagrama de Pourbaix para el hierro [2].

De acuerdo con el diagrama de Pourbaix para el hierro, el cual define zonas en las que las especies químicas pueden estar como sólidos insolubles ( $\text{Fe}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) y solubles, como iones ( $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ ). Las zonas se dividen en: zona de pasivación, de inmunidad y de corrosión.

En la *Zona de pasividad*, los hidróxidos de hierro forman una capa protectora en la superficie del metal, que reduce la actividad química y por lo tanto la velocidad de corrosión.

De otra forma, la pasivación se refiere a la pérdida de reactividad química bajo ciertas condiciones ambientales, que impiden la disolución anódica. En el caso de la corrosión electroquímica, algunos productos de corrosión, los cuales pueden ser solubles o insolubles en el electrolito, generan películas que protegen al ánodo contra la corrosión atmosférica.

En la *Zona de inmunidad* del diagrama la especie termodinámicamente estable es el  $\text{FeO}$ , por lo tanto el metal es inmune y no sufre corrosión.

Finalmente en la *Zona de corrosión* las especies estables del hierro se encuentran como iones, por lo tanto es una condición propicia para la disolución del metal.

En el diagrama Eh-pH para el hierro y el acero, se muestra una zona de inmunidad para pH inferiores a 11, a partir de un potencial estándar de  $-0,53 \text{ V}$  con respecto al electrodo normal de hidrógeno, o  $-0,85 \text{ V}$  con respecto a la pila de cobre/sulfato de cobre, que constituye el fundamento de la protección catódica.

La presencia de una zona de protección pasiva, se traduce en corrosión en ambientes ácidos. La presencia de cloruros, genera una pasivación imperfecta, dependiendo de la concentración de éste, y por tanto, corresponde a la presencia de corrosiones locales, como por ejemplo las picaduras.

Es importante destacar que estos diagramas únicamente ofrecen información termodinámica del sistema y no de la cinética de los procesos. Para tomar en cuenta la cinética del proceso se utilizan los diagramas de Evans-Tafel, los cuales explican que bajo determinadas circunstancias la superficie inestable de un metal que está experimentando una corrosión activa puede volverse pasivo y estable, aumentando el potencial en sentido positivo. Este fenómeno es una Pasivación forzada.

Por ejemplo, si se toma el hierro como metal que se corroe, las gráficas experimentales en que se representa la densidad de corriente en función del potencial

presentan una forma interesante. Cuando a partir del potencial de corrosión, el potencial se vuelve más positivo, se incrementa la corriente de corrosión, pero para un determinado potencial, la curva densidad de corriente-potencial cambia de sentido y empieza a decrecer rápidamente con el potencial creciente, esta disminución de la disolución con el aumento del potencial es una tendencia opuesta a la esperada. La disolución del metal está sujeta a una clara inhibición al potencial correspondiente al máximo de la curva, el cual será el potencial de pasivación.

Pasivado el metal, las intensidades que fluyen son de cien a mil veces menores que la corriente de disolución en el máximo de la región corriente-potencial en que crece la corriente de corrosión con el aumento del potencial. Ha cesado totalmente la corrosión y el metal ha quedado protegido anódicamente extrayendo electrones del metal en lugar de inyectarlos como en el proceso catódico. Pero lo más importante es que la protección anódica del metal susceptible de corroerse, puede efectuarse mediante el paso de un número muy bajo de coulombs en comparación con el que se necesita para la protección catódica y no conduce, en modo alguno al desprendimiento de hidrógeno que penetre en el metal y lo perjudique, lo cual es posible que ocurra durante el proceso de protección catódica.

## 1.4 Mecanismos de corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto

Una vez establecidos los puntos primordiales en los que se deberá poner especial cuidado para obtener una estructura de carácter durable y entender el fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto, es necesario exponer los principales mecanismos de corrosión.

Ya se ha mencionado antes, que el ingreso de ciertas especies químicas, disminuyen la capacidad de protección natural que brinda el concreto al acero de refuerzo; enseguida se presentarán los mecanismos principales, los cuales serán de utilidad para un posterior análisis de los resultados experimentales.

### 1.4.1 Cloruros

La presencia de cloruros encamina a una situación de corrosión localizada en el acero de refuerzo. El ingreso de cloruros se puede llevar a cabo de distintas formas, ya sea desde la fabricación del concreto por el uso de aditivos, por el uso de materiales contaminados o por penetración desde el exterior cuando el concreto se encuentra expuesto a medios que los contienen, como por acción capilar desde el agua de mar por la red de poros.

En estructuras semi-sumergidas los cloruros penetran por difusión, la cual es provocada por el gradiente de concentraciones. Es posible modelar dicha penetración de acuerdo con ciertas simplificaciones y haciendo uso de la segunda ley de difusión Fick, lo cual se explicará mas adelante.

Una vez que los cloruros han ingresado desde la superficie hasta la interfase acero-concreto, destruyen la capa pasiva y provocan la corrosión del acero de refuerzo y permiten una reducción sustancial de la sección transversal de las varillas de refuerzo por efecto de corrosión localizada. La reducción de las varillas puede llegar a ser hasta del 100% en casos graves, causando daños estructurales aún cuando este fenómeno se sitúe en pequeñas zonas [19].

Existen varias teorías que explican la destrucción de la capa pasiva. Una de las más acertadas es la que propone la formación de un compuesto de cloruros libre con los iones de hierro:



Este compuesto difunde hacia otra zona alejada del ánodo en donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son mas altos; en ese lugar el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de fierro y libera los iones cloruro de acuerdo con la reacción:



Como existe una alta concentración de fierro en la interfase y debido a que la penetración de cloruros continúa durante un tiempo indefinido, el proceso puede continuar haciendo migrar los iones de fierro desde el acero y reaccionando con el oxígeno para formar óxido o hidróxidos. Esto hace que la corrosión se propague a lo largo del acero de refuerzo, desarrollando picaduras graves en el acero [5].

En teoría únicamente participarán los cloruros libres, sin embargo es posible que los cloruros ligados se desestabilicen y regresen a la solución por efecto de la carbonatación, participando del mecanismo antes mencionado.

Es necesario que exista un nivel umbral de cloruros para que sea posible la destrucción de la capa pasiva. El valor de este nivel umbral depende de ciertos factores como:

- El proporcionamiento de concreto
- Tipo de cemento
- Relación a/c
- Contenido de sulfatos
- Tiempo y condiciones de curado
- Medio ambiente
- Tipo de acero y sus características superficiales

Es por lo anterior que no se puede establecer aun con precisión el valor de la concentración umbral de cloruros para cierto tipo de concreto. Sin embargo existen valores que se han establecido de acuerdo con investigaciones anteriores y que se han establecido como reglamentos de construcción [4].

#### **a) Condiciones de exposición límite.**

Estas condiciones hasta ahora varían de un autor a otro y dependen de la forma de evaluación que cada autor plantea. Sin embargo, cada una de ellas aporta un poco más al entendimiento del problema y aproxima a dar una solución más cercana a la realidad.

Las condiciones de cloruros límite se pueden definir como la cantidad de cloruros en la superficie del acero que produce un riesgo de corrosión. Se requieren para determinar la causa del deterioro sobre la estructura y para determinar la vida útil o residual de la estructura.

El contenido límite de cloruros se expresa como el porcentaje por peso de cemento (%Cl ppc), en porcentaje por peso de concreto (%Cl pp de concreto), o en kilogramos por metro cúbico de concreto (KgCl/m<sup>3</sup>).

Las investigaciones en México mencionan un nivel de 1 y 2 KgCl/m<sup>3</sup> de concreto bajo ciertas circunstancias [5].

El nivel de cloruros se encuentra en función de la cantidad de iones hidroxilo en solución y el cociente Cl/OH es el factor más importante para determinar si aún se encuentra pasivado el acero de refuerzo (valor límite Cl/OH=0.61)[4].

Tuutti establece el nivel máximo del cociente Cl/OH, además de un nivel de corrosión máximo relacionado con la aparición de grietas sugiriendo un nivel de iniciación y otro de propagación [20]. El primero se refiere al tiempo en que los cloruros y el CO<sub>2</sub> penetran desde la superficie hasta la interfase acero-concreto, hasta alcanzar un nivel iniciador de corrosión. El segundo, el periodo de propagación, será entonces, el tiempo en el cual inicia la despasivación y se propaga la corrosión en forma significativa.

La vida útil o de servicio está dada a su vez por el tiempo requerido para el transporte de cloruros desde la superficie del concreto hasta la superficie del acero de refuerzo en cantidades significativas.

Un modelo matemático permite conocer el perfil de concentraciones respecto al tiempo en la superficie del acero de refuerzo, sin embargo es necesario un trabajo mas profundo para poder utilizar este modelo como una herramienta para determinar la vida útil y residual de toda una gama de concretos, debido a la complejidad de cada estructura.

La fase inicial está influida por una serie de factores, aún cuando la velocidad de penetración de cloruros depende esencialmente de la densidad del concreto, de la capacidad de mezcla de los cloruros, de la concentración en la superficie y del mecanismo de transporte. Este parámetro es descrito por el coeficiente de difusión que evalúa la medida de la distribución del cloro en el concreto. La capacidad de mezcla del cloro depende a la larga del tipo de concreto usado, de la relación agua/cemento y de los aditivos que se agregan al concreto [5].

#### **b) Cloruros ligados y libres.**

Los cloruros totales en el concreto se pueden subdividir químicamente en cloruros **ligados** y cloruros **libres**. Esta distinción resulta importante ya que, como ya se ha mencionado, son los cloruros libres los responsables de la corrosión del acero de refuerzo [5].

Los cloruros ligados están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión; por lo tanto, los límites en las especificaciones deben aplicarse al contenido de cloruros libres en lugar de al contenido total o soluble en ácido. No obstante, con los datos de las actuales investigaciones no es posible calcular con precisión su proporción en relación con el contenido total de cloruros, ya que varía con los cambios en el contenido de cloruros totales, aunque, considerando que el cloruro libre es soluble en agua, se lo puede extraer y así determinar su proporción [21].

La corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto se origina por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad en las proximidades de las barras, pero la existencia de cloruros libres en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso, debido al transporte de masa generado por la formación de un compuesto inestable con el hierro del acero Figura 1.3.

La variación en la disponibilidad de oxígeno y humedad por efecto del oleaje es un aspecto importante en la presente investigación. En este caso y debido a su alto contenido de cloruros, el agua de mar y su oleaje representan un elemento agresivo para el concreto y acelera el fenómeno de la corrosión sobre el acero de refuerzo. Además, en las franjas costeras la brisa marina acarrea importantes contenidos de humedad que naturalmente, lleva en sí cloruros. De esta manera, estructuras que no están en contacto directo con el agua de mar, sufren igualmente sus embates.

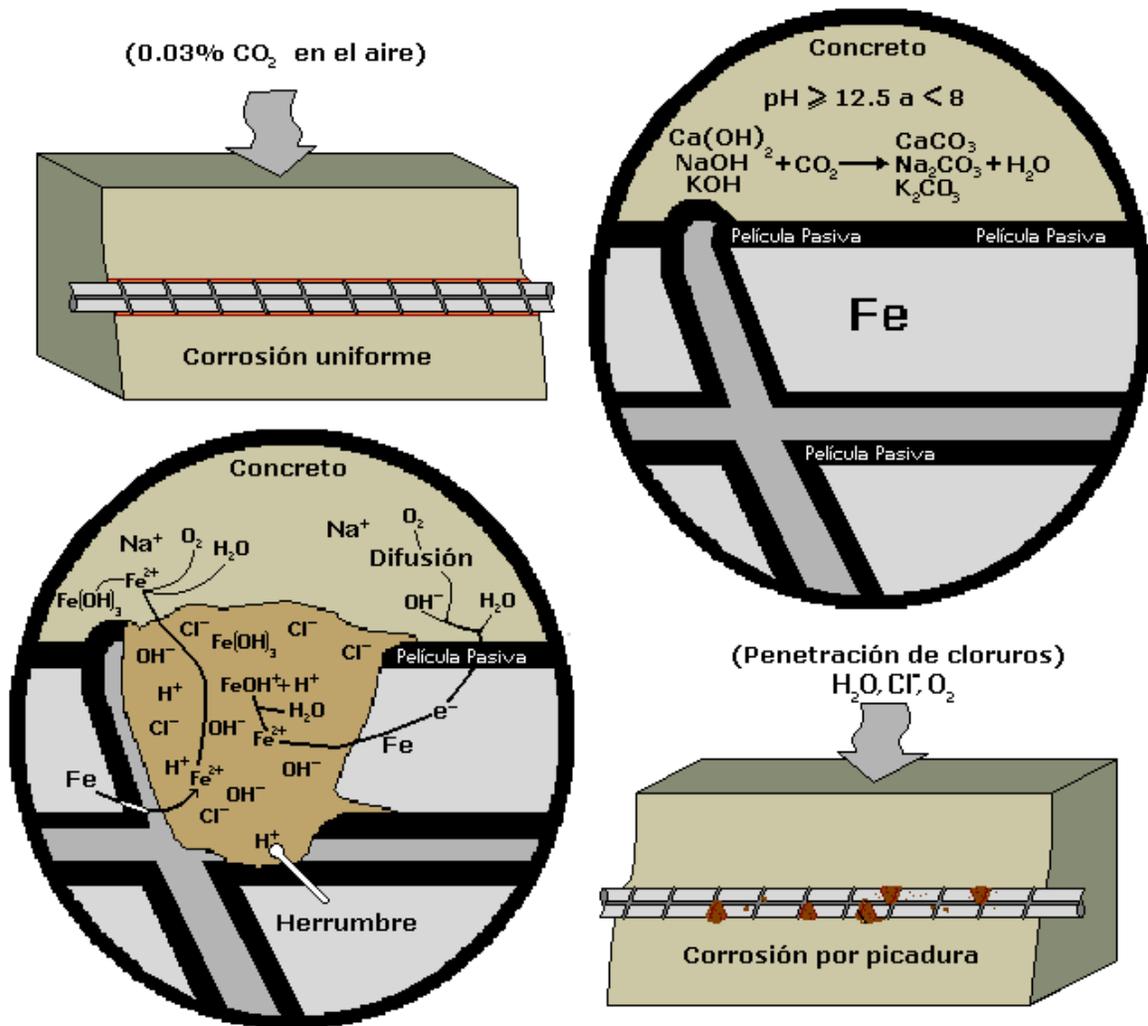


Figura 1.3 Mecanismos de carbonatación de concreto reforzado y penetración de cloruros.

### 1.4.2 Carbonatación

El hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación de los silicatos y los óxidos de sodio y de potasio (álcalis) presentes en el cemento. Hacen que el pH de la solución en los poros del concreto se encuentre entre 12.5 y 13.5 lo cual forma una capa pasivante que preserva al acero aun cuando los niveles de humedad son altos.

La destrucción de esta capa pasivante provoca una corrosión de tipo localizado y una reducción de la alcalinidad del medio que permitirá la disolución completa de esta capa, que permite a su vez, una corrosión homogénea.

El concreto es un material poroso, que permite hablar de dos fases: una sólida de minerales hidratados y una líquida que está contenida en los poros. Esto propicia el ingreso de especies que por medio de un proceso electroquímico que se lleva a cabo en la interfase electrodo-electrolito, alejan al material del equilibrio, provocando la formación de una celda electrolítica, con la existencia de ánodos y cátodos dando como resultado su disolución.

Cuando en los poros del concreto existe la presencia de hidróxido de calcio, que es un compuesto que tiene una solubilidad limitada y el volumen de los productos de hidratación permanece como una sustancia sólida embebida en la pasta del cemento, se mantiene a la solución en un pH alto.

El proceso de corrosión en concreto se lleva a cabo mediante las reacciones parciales:



La primera ecuación libera electrones los cuales fluyen a través de la misma varilla hacia las zonas catódicas, en donde se consumen en una reacción de reducción, dependiendo de la cantidad de oxígeno y del pH del electrolito, es decir a pH alcalino se llevará a cabo la reacción (11) y a pH bajo o ácido, la reacción que se lleva a cabo será (12):



El circuito electroquímico se cierra con especies cargadas, como los iones hidroxilo y los iones ferrosos se transportan en el concreto hacia las zonas catódicas que serán las de menor concentración de estos iones.

La concentración típica de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es de 0.03%, tiene un carácter ácido y reacciona con el concreto húmedo (carbonatación), gracias al pH de este.

El aire que está en contacto con la superficie del concreto penetra por los poros capilares y el CO<sub>2</sub> que contiene reacciona rápidamente con los hidróxidos en la solución de los poros (figura 1.3).



El aire que entra en los poros ya no contiene dióxido de carbono y crea entonces una diferencia de concentración que produce la difusión de dióxido de carbono al interior.

Los productos precipitados durante la reacción del dióxido de carbono con los hidróxidos en la superficie del concreto disminuyen la permeabilidad y reducen el pH de la solución del poro. Al continuar la carbonatación, la fase sólida de la pasta de cemento reacciona con el CO<sub>2</sub> desligando los cloruros de los cloroaluminatos incrementando el peligro de corrosión [5].

Al llegar el frente de carbonatación al refuerzo, la capa pasiva se destruye, dejándolo como si estuviera al aire libre pero con el agravante de la humedad en la cercanía, lo cual produce una reducción de la sección transversal de la barra y una cantidad significativa de productos de corrosión que produce esfuerzos en el interior del concreto que agrietan el recubrimiento.

Algunos modelos matemáticos indican que el fenómeno sigue una tendencia parabólica e indica que la profundidad de carbonatación es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición, como lo muestra la ecuación (15).

$$x = k\sqrt{t} \tag{15}$$

donde x es la profundidad, k es una constante que depende del tipo de cemento, la relación a/c, las proporciones de cemento y las características del medio ambiente y t es el tiempo de exposición.

## **1.5 Modelos Físicos**

Los modelos físicos, matemáticos y conceptuales son medios para comprender fenómenos que ocurren en la naturaleza. Los modelos físicos son obvios para cualquier persona desde los niños hasta los adultos, de modo que se usan para presentarles el concepto de modelo.

Desde pequeños estamos en contacto con modelos que representan la realidad en pequeña escala, esto es, son representaciones básicas de objetos que nos ayudan a comprender la realidad. Un ejemplo de esto es el caso de los juguetes, como un pequeño automóvil o un muñeco los cuales cuentan con las características básicas de un automóvil real o una persona y ambos, tienen la función de educar y entretener a un menor.

En la naturaleza, la mayor parte de las variables como tamaño, distancia, peso, temperatura, etc., muestran diferencias inmensas de magnitud. Los diversos aspectos de la naturaleza se modifican con distinta rapidez cuando cambia la escala, y por consiguiente, también varían las relaciones entre ellos. El ejemplo que se muestra con más claridad es cuando algo cambia de tamaño, su volumen crece en desproporción con su área, así, las propiedades que dependen del volumen, como masa y capacidad calorífica, aumentan con más rapidez que las que dependen del área, como la una superficie de enfriamiento. En todos los casos es necesario presentar la escala de manera explícita para comprender los efectos que sufren al cambiarlas en un modelo.

De tal manera que los modelos físicos son una herramienta importante del ingeniero para el diseño de sistemas más eficientes, optimizar lo ya diseñado o solucionar algún problema del sistema de estudio. Las teorías o modelos físicos proporcionan un marco de comprensión de los fenómenos físicos observados y la capacidad de predecir nuevas observaciones, en general los modelos toman en cuenta las componentes físicas, biológicas y químicas del sistema, cuyo papel esencial aparece en cada sistema y proporcionan una buena aproximación al representar el problema o situación de forma palpable.

En el caso de la ingeniería de corrosión, los modelos físicos y matemáticos, resultan de vital importancia ya que evitan principalmente costos y largos tiempos de experimentación, encaminándonos a soluciones prácticas.

El modelo físico se ha utilizado en las últimas dos décadas de manera eficaz, siendo una herramienta que resuelve problemas, cuando se desea realizar mediciones

directas en un sistema. Existen básicamente tres tipos de modelos físicos: modelos estrictos, de correspondencia y cualitativos [22].

Los modelos estrictos, en donde las mediciones cuantitativas realizadas se traducen mediante la aplicación de una escala adecuada para describir el comportamiento del sistema. Se pueden escalar directamente.

Los modelos de correspondencia, usan un método menos riguroso que verifica la aplicación de los modelos matemáticos a través de mediciones realizadas en un sistema físico que muestra alguna correspondencia con la situación real. Es decir, no son tan rigurosos como los anteriores.

Finalmente, los modelos cualitativos son aquellos en los que con solo unos cuantos experimentos diseñados para el propósito, se obtienen resultados con los cuales se obtiene una idea cualitativa de los regímenes principales que puedan caracterizar al sistema.

Los modelos físicos escalados adecuadamente se pueden utilizar para deducir el comportamiento de un prototipo (unidad industrial real), evitando la necesidad de construir modelo matemático elaborado.

Los modelos físicos y los simuladores en tiempo real, implican plazos y costos mayores que los estudios en modelo numérico, costos que, en todo caso, son irrelevantes respecto al costo de la obra futura. Las medidas en la naturaleza y la experimentación "in situ" son los recursos que más dificultades, tiempo y costo llevan, pero son fundamentales para que los modelos -físicos y numéricos- y la simulación sean representativos de lo que ocurre en la realidad.

Otro tipo de modelos son los modelos lógicos basados en objetos. En estos modelos la entidad-relación se basa en una percepción del mundo compuesta por objetos, llamados entidades, y relaciones entre ellos. Las entidades se diferencian unas de otras a través de atributos. El orientado a objetos también se basa en objetos, los cuales contienen valores y métodos, entendidos como órdenes que actúan sobre los valores, en niveles de anidamiento.

Los modelos matemáticos son instrumentos flexibles y de bajo costo, que facilitan el análisis rápido de diversas alternativas en planta y que siempre son de gran utilidad cuando se apegan a la realidad, sin embargo, comúnmente consideran demasiadas simplificaciones debido a la complejidad matemática de ciertos sistemas. Los modelos matemáticos pueden ser validados a través de los datos que proporcionan los modelos físicos.

El modelaje físico también cuenta con ciertas desventajas entre las que se encuentra esencialmente la fabricación. Se requiere que dicho modelo guarde la relación en tamaño y forma con el sistema de interés original, con el fin de obtener datos confiables que se puedan escalar posteriormente al sistema real. Otro requerimiento es el poder observar el fenómeno a través del material de fabricación, como en el caso de los modelos fabricados de materiales acrílicos o realizar mediciones adecuadas en lugares de difícil acceso por la naturaleza del fenómeno de interés, como la medición del perfil de velocidades de agitación o temperaturas dentro de un horno, en donde la temperatura lo impide y en cuyo caso se requerirá de un fluido que trabaje en frío o con una temperatura manejable. Nuevamente y como en muchos casos de experimentación también se presenta el problema del costo, ya que regularmente los materiales de construcción muchas veces se encuentran cerca de alcanzar el costo de una pieza original del sistema o por la naturaleza del material superan dicho costo.

La teoría de los modelos físicos [23] se basa en que a partir de las magnitudes fundamentales como la longitud (L), el tiempo (t) y la masa (M), las restantes que intervienen en la mecánica de fluidos quedan predeterminadas (magnitudes derivadas) y que en este sistema (L-t-M) las ecuaciones hidrodinámicas del fluido son adimensionales y por lo tanto se mantienen invariantes frente a una transformación del tipo:

$$L_p = \lambda L_m \quad t_p = \lambda_t t_m \quad M_p = \lambda_M M_m$$

donde  $m$  se refiere al modelo y  $p$  al prototipo.

De esta manera, si se conoce el comportamiento en el modelo (sistema  $L_m-t_m-M_m$ ) de un determinado fenómeno, teóricamente es posible deducir el de dicho fenómeno en el prototipo o unidad industrial (sistema  $L_p-t_p-M_p$ ), sin más que utilizar para cada magnitud el cambio de escala según los valores de los parámetros  $\lambda$ ,  $\lambda_t$  y  $\lambda_M$  adoptados en la transformación anterior.

---

En dicha transformación cada ecuación representa lo que en la teoría de modelos físicos se conoce como "semejanzas modelo-prototipo". La primera de ellas es la "semejanza geométrica", la segunda la "semejanza cinemática" y la tercera la "semejanza dinámica".

**Antecedentes**

La "semejanza geométrica" determina que la relación de dimensiones homólogas modelo-prototipo es constante, denominándose a dicha relación "escala geométrica" o simplemente "escala" (I). En esta semejanza sólo influyen aspectos de forma, destacándose los detalles geométricos y la rugosidad superficial, los cuales representan una primera dificultad para que la semejanza modelo-prototipo sea completa.

La "semejanza cinemática" implica la similitud de movimientos modelo-prototipo, lo que junto a la semejanza geométrica determina que las trayectorias de partículas homólogas modelo-prototipo sean semejantes.

La "semejanza dinámica" entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente semejantes supone la constancia de la relación de masas y, por lo tanto, de fuerzas en elementos homólogos. La relación entre masas es la "escala de masas (IM)".

Como se ha indicado, las ecuaciones de la hidrodinámica permanecen invariantes en la transformación modelo-prototipo, pero no ocurre lo mismo con el fluido, que no se puede reproducir a escala. Sus características físicas (densidad, viscosidad, etc.), a efectos del modelo, cambian respecto a las que tiene en el prototipo de acuerdo con las escalas elegidas (I, It, IM).

Es imposible lograr una semejanza geométrica completa por la dificultad de reproducir plenamente forma y rugosidad. Con la semejanza dinámica este problema aumenta, pues la relación entre las fuerzas que actúan en el prototipo (gravedad, viscosidad, tensión superficial, elásticas y de presión) y en el modelo no se mantiene constante, ni su importancia en ambos sistemas es la misma. Sin embargo, en la práctica, una "semejanza dinámica parcial", basada en las fuerzas predominantes en cada caso es suficiente para que el modelo facilite la solución del problema que con el ensayo se busca, surgen así los diversos criterios de "semejanza dinámica parcial" o simplemente de "semejanza parcial" existentes.

En esta semejanza parcial dos de sus escalas, tiempo y masa (It, IM), quedan prefijadas al determinar la fuerza preponderante en el fenómeno y el fluido a utilizar, por lo que la única escala a elegir es la geométrica (I). Esto se realiza de forma que el modelo tenga las dimensiones necesarias para que los ensayos sean representativos

---

de la realidad, habida cuenta, entre otros factores, del tamaño del prototipo, del espacio disponible, de las prestaciones de los equipos.

**Antecedentes**

Por lo tanto, una vez elegida la escala geométrica ( $l$ ) y la semejanza parcial, utilizando el análisis dimensional, pueden determinarse las otras dos escalas ( $l_t$ ,  $l_M$ ) así como con las magnitudes derivadas.

Las semejanzas parciales, según lo indicado, se establecen analizando cuál es la fuerza dominante en el fenómeno a estudiar, a fin de su reproducción fidedigna en el modelo. Ello determina en el resto de fuerzas desviaciones con el prototipo, aparecen así los "efectos escala", que, en cada caso, han de ser analizados para asegurar la validez de los resultados del ensayo. Para ello conviene que la escala sea la mayor posible.

En el presente caso, el modelo físico planteado ayuda a representar el oleaje del mar presente en pilotes de concreto que mantienen o sostienen un puente de concreto reforzado y que a su vez promueve el fenómeno de corrosión en el acero de refuerzo. De manera que se cumple con los requerimientos de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, evitando de manera importante el efecto de escala por ser un modelo suficientemente grande que asemeja más nuestra realidad o en todo caso lo suficiente para el efecto que se pretende analizar.

## CAPÍTULO 2 Experimental

### 2.1 Desarrollo del modelo físico para evaluación de concreto reforzado

#### 2.1.1 Modelo Físico.

Con el fin de conocer el efecto del oleaje en el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo y la vida útil de estructuras de concreto, además de conocer la forma en que penetran especies nocivas (en este caso cloruros), se desarrolló un modelo físico que simula oleaje de forma continua a través de cierto mecanismo y que genera las tres zonas de importancia para el estudio de la corrosión.

El modelo físico consiste en un recipiente de material acrílico el cual contiene un volumen de agua de mar sintética (3% de NaCl). El fluido se agita simulando oleaje y generando tres zonas de importancia: 1) una zona de secado y mojado o zona de salpique, 2) una zona seca y 3) una zona totalmente inmersa en el electrolito o zona mojada.

La hipótesis del problema es que se tendrá un mayor deterioro en la zona de salpique, debido a una mayor difusión de especies agresivas y también al efecto de secado y mojado, que permite una mayor disponibilidad de oxígeno que en la zona sumergida. En esta última el deterioro será menor debido a un mayor grado de saturación de la probeta que impedirá el ingreso de especies gaseosas al interior de la probeta y solo permitirá el ingreso de cloruros.

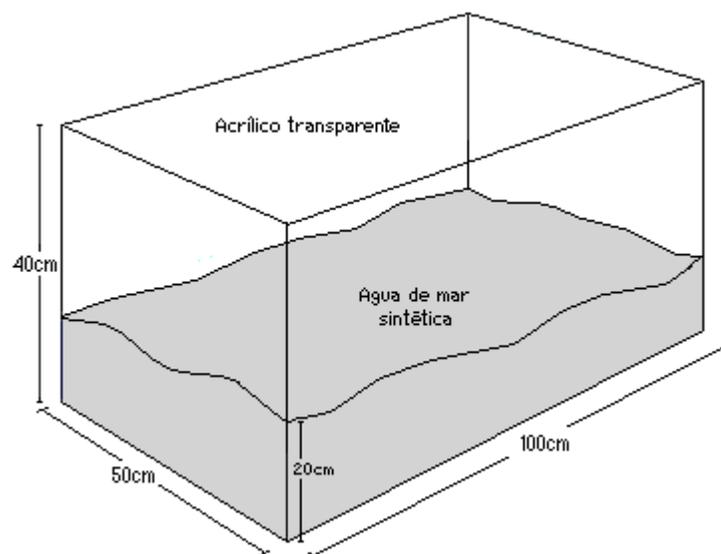


Figura 2.1, Dimensiones de recipiente para evaluación de probetas de concreto.

Por último se espera un menor deterioro del acero de refuerzo por una velocidad de difusión menor de especies despasivantes. En la figura 2.1 se muestra el dispositivo utilizado.

El modelo utilizado cuenta con las dimensiones mínimas para soportar una probeta de concreto, las cuales se muestran en la figura 2.1 y mantiene un oleaje continuo durante 14 horas diarias. Las 10 horas restantes el electrolito se mantiene estable.

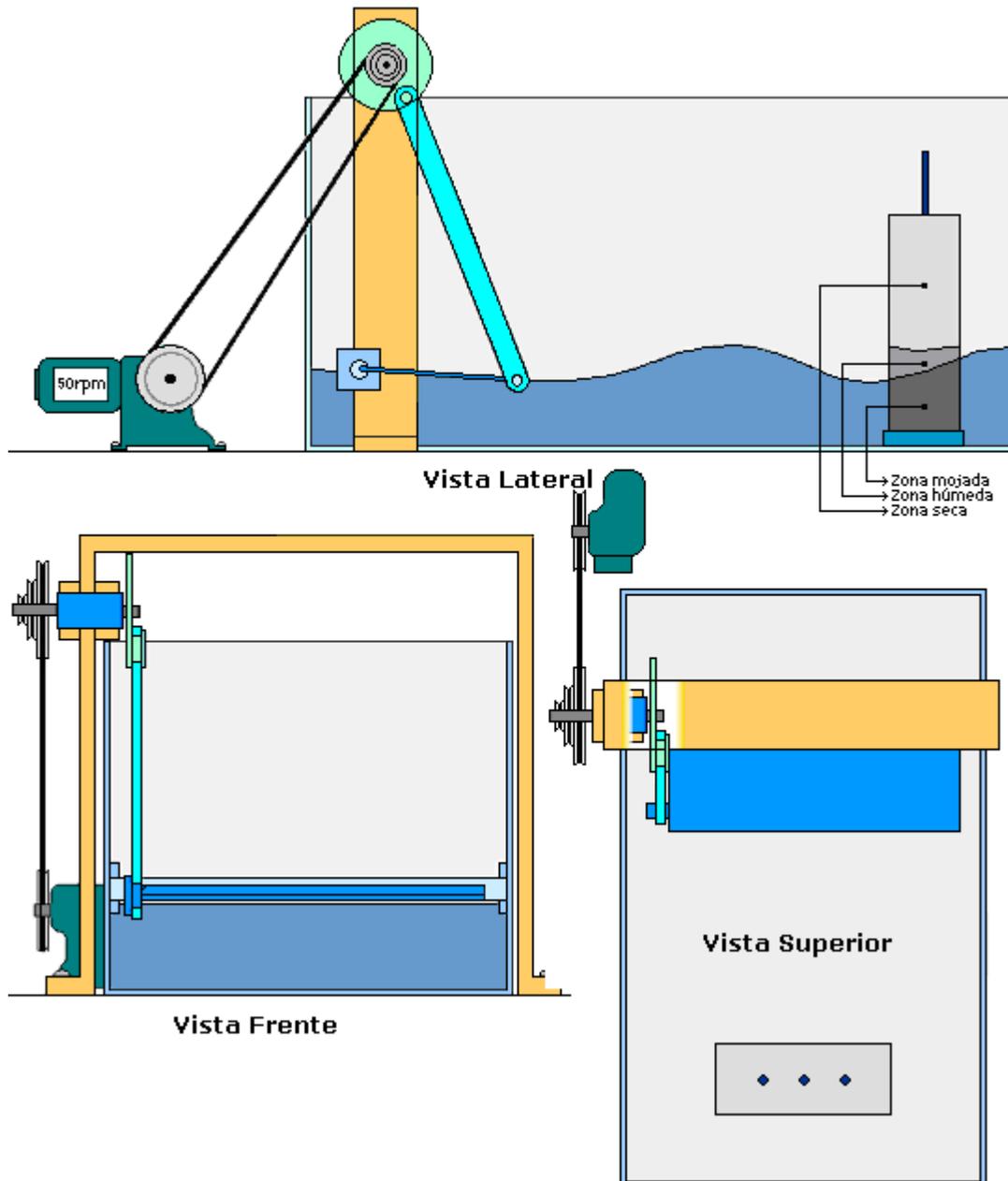


Figura 2.2, Modelo físico que simula oleaje en un electrolito y genera las 3 zonas de interés.

El sistema se mantiene agitado gracias a un sistema de poleas, el cual es activado por un motor de pocas revoluciones (moto-reductor) alimentado con corriente alterna, y por un sistema mecánico que a través de una pala agita el electrolito del mismo modo que lo haría un remo como se observa en la figura 2.2.

La frecuencia de oleaje se controla cambiando el diámetro de la polea que impulsa la pala a cualquiera de sus 3 posiciones y alejando del centro el brazo que impulsa la pala. Así el sistema cuenta con 9 frecuencias distintas, que permiten evaluar probetas con diferentes dimensiones, rehiriéndonos a la altura de la probeta.

### 2.1.2 Probetas

Las probetas de concreto reforzadas tienen dimensiones de 25cm de altura, 20cm de ancho y 10cm de espesor. Están fabricadas con cemento portland puzolánico bajo una relación a/c de 0.45, a 28 días de curado y cuentan con refuerzo de acero. Dichas probetas se muestran en la figura 2.3. Cada espécimen cuenta con tres varillas corrugadas para construcción grado 42, colocadas de manera vertical de 30cm de largo, dos varillas horizontales de 20cm de longitud, todas con sección transversal circular con espesor de 3/8 de pulgada, formando una malla, que está unida a través de alambre recocido, lo que permite el contacto eléctrico entre las barras. La superficie del concreto es poco porosa, de alta resistencia, se muestra fotografía en la figura 2.4.

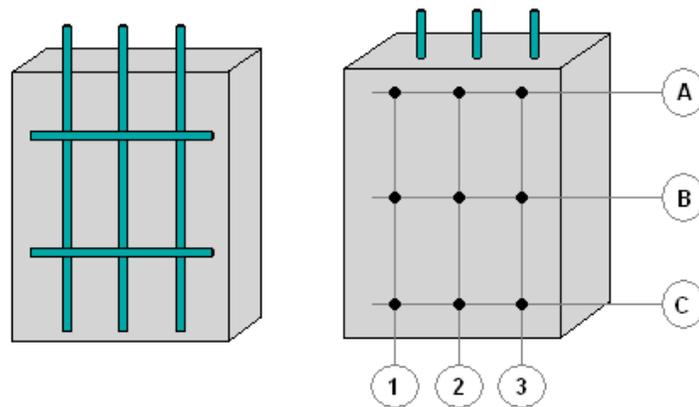


Figura 2.3, Corte transversal de una probeta de concreto armado y puntos de medición de potenciales.

Figura 2.4 (izq.), Fotografía de una de las probetas evaluadas.

### **2.1.3 Agua de mar sintética**

Como ya se ha mencionado las probetas fueron sumergidas dentro de un electrolito de naturaleza sintética, ya que conserva las características principales del agua de mar, sin los componentes que genera la relación con todo un ecosistema, como el plancton, las bacterias además de la relación con la fauna, que de alguna u otra manera alteran el deterioro de las estructuras de concreto. Además el agua de mar sintética utilizada, permite mantener el volumen, la densidad, y la concentración de todas las especies estable o reemplazar el electrolito en el caso de ser necesario.

Las sales utilizadas para generar el electrolito de la marca SALT siguen la norma ASTM **D1141 86** (Apéndice 1) para agua de mar sintética, además estas sales tienen un bajo costo comparado con los que implica la fabricación del electrolito con sales grado reactivo [24].

Este electrolito es fácil de mantener bajo las mismas condiciones de alcalinidad, densidad o gravedad específica y temperatura, lo cual es útil cuando se desea controlar alguna variable en especial sin preocuparse del efecto de otros elementos del sistema.

## 2.2 Técnicas electroquímicas utilizadas para estimar el estado de corrosión del refuerzo.

### 2.2.1 Mapeo de Potenciales.

Para tener un estimado del estado de las probetas de concreto se realizó un mapeo de potenciales previo a la inmersión de las probetas en el electrolito y durante toda la evaluación de las probetas de forma diaria retirando la probeta del medio durante la medición, dichos datos se reportan mas adelante.

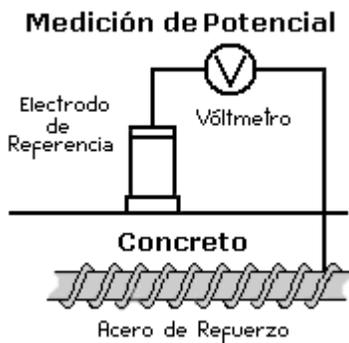


Figura 2.5 (izq.), circuito para medición de potencial en una estructura de concreto armado.

El mapeo se realizó mediante el uso de electrodos de referencia cobre-sulfato de cobre ( $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ ) en nueve puntos sobre las probetas. Para tomar la lectura diaria de potenciales (Figura 2.5) y asegurar que la lectura fuese en el mismo punto a lo largo de la evaluación diaria y con la mayor facilidad, se diseñó una placa que mantiene unidos y en las posiciones de interés a los electrodos de referencia. A través de una caja de switches, (Fig.2.6) la cual sigue el diagrama que se muestra en la figura, es posible conectar un voltímetro a la estructura de refuerzo para medir su potencial de corrosión.

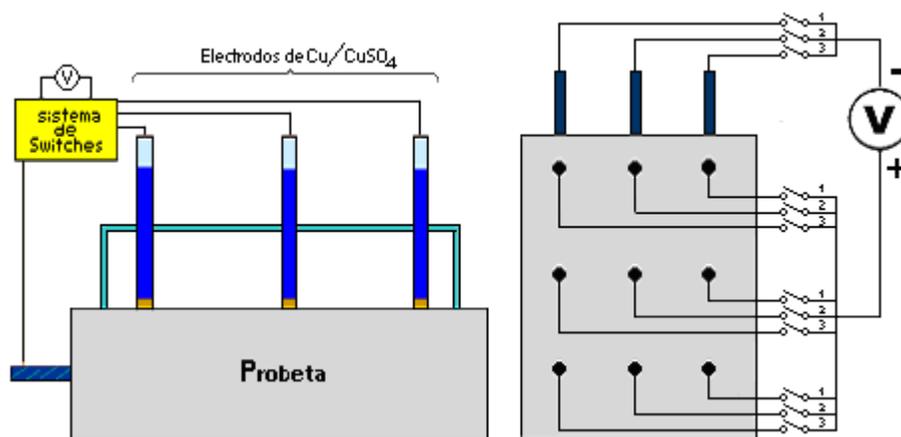


Figura 2.6. Vista lateral de dispositivo para medir potenciales en probetas y diagrama que sigue la caja de switches utilizada para realizar mediciones una a una.

### 2.2.2 Mapeo de resistividades.

De manera similar se llevó a cabo sobre las probetas una prueba de resistividad por medio de un equipo NILSSON modelo 400 para resistividad en suelos. Esto último se realizó a través del método Wenner de los cuatro electrodos, (Figura 2.9) con la variación de que se sustituyeron los electrodos de acero por electrodos de cobre sulfato de cobre con el fin de no dañar las probetas al tener que perforarlas, lo cual podría favorecer el deterioro de las mismas.

La frecuencia de la prueba también fue semanal y se realizó a cinco alturas distintas partiendo desde la base de la probeta, siendo las alturas 3, 8, 13, 18 y 23cm de altura.

Finalmente para verificar que los datos obtenidos mediante el método de los cuatro electrodos con electrodos de referencia Cu/CuSO<sub>4</sub> fueran verídicos, se realizó la prueba de manera regular, es decir, se perforaron las probetas y se realizó la prueba insertando los electrodos de acero en la superficie de la probeta a las mismas alturas, cuidando que la profundidad a la que se insertan los electrodos fuese la misma con un valor del 10% la separación de los electrodos, esto es 2.5 milímetros. Esto último se realizó al estimar que no se requería de ninguna prueba adicional para realizar el presente trabajo y que se podrían dañar las probetas. Los datos obtenidos se reportan más adelante.

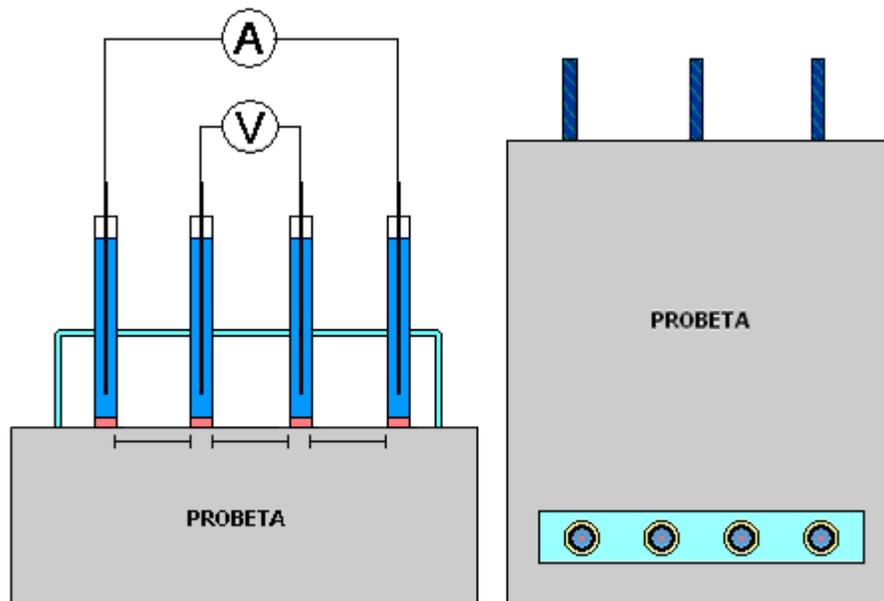


Figura 2.9. El esquema muestra como se administra la corriente en una probeta de concreto a través del equipo Nilsson para resistividad de suelos.

**El método Wenner o de los cuatro electrodos** (ASTM G 57 95) el cual consiste en apoyar cuatro electrodos con las mismas características en línea recta y de forma equidistante, para que por los electrodos de los extremos fluya una corriente que genera una diferencia de potencial detectada y medida por los electrodos internos del arreglo, obteniendo como resultado la resistencia del suelo al paso de la corriente, lo cual es transformado a un valor de resistividad a través de la ecuación 14:

$$\rho = 2\pi a \frac{E}{i} \quad (14)$$

En donde  $a$  es la distancia de separación de los nodos,  $E$  es el potencial entre los electrodos e  $i$  es la corriente suministrada por los electrodos de los extremos.

La resistividad corresponde a una resistividad promedio, aproximada al espaciado entre los electrodos.

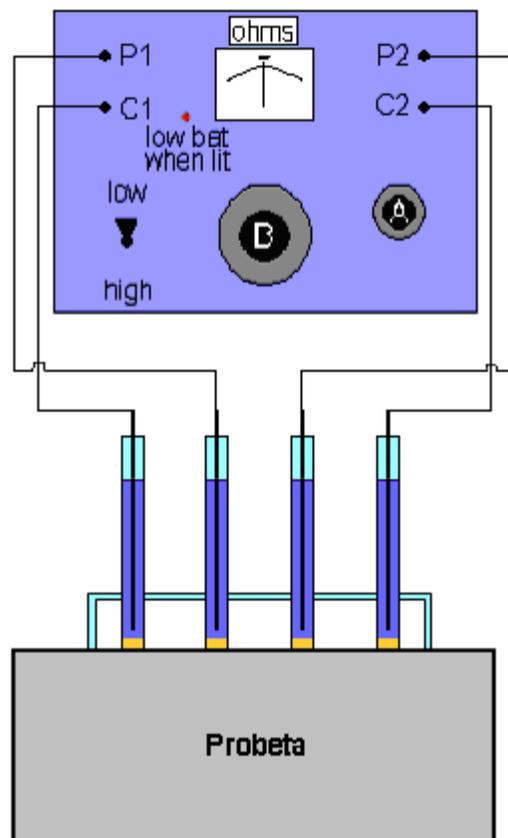


Figura 2.10. Conexiones para medición de resistividad a través del equipo Nilsson, por el método Wenner.

### **2.2.3 Resistencia a la polarización o Polarización lineal.**

Esta técnica ha sido muy utilizada durante los últimos 50 años, por ser una técnica muy sencilla. Sin embargo, existen actualmente técnicas más desarrolladas que aportan información mecanística, con el uso de instrumentación más cara, pero no han sido capaces de desplazar a esta técnica de un lugar importante en la Ingeniería de Corrosión.

La técnica se basa en la ecuación de Stearn & Geary de 1957, que relaciona las pendientes de Tafel con la velocidad de corrosión, con ciertas limitaciones. Es decir, debe existir un comportamiento tafeliano del sistema electroquímico para que esta ecuación pueda ser aplicable [26].

Debido a que la ecuación es el resultado de la aproximación de bajo campo a la ecuación de Butler- Volmer y por ese motivo se debe utilizar solo para control activacional o por transferencia de carga. Sin embargo existe una aproximación ingenieril que puede ser utilizada en sistemas controlados por difusión o transferencia de masa. Siendo necesario aclarar que se trata solo de una aproximación [26].

Para determinar la velocidad de corrosión de las barras de acero se realizó la prueba  $R_p$  (resistencia a la polarización), prueba de bajo campo que no perturba el sistema y la cual, consiste en aplicar un sobre-potencial, el cual fue de 20mV en sentido catódico y posteriormente en sentido anódico, registrando la respuesta del sistema como una señal de corriente. La pendiente de la recta formada al graficar los tres puntos obtenidos (potencial de reposo, catódico y anódico) es el valor de resistencia a la polarización o  $R_p$ . A partir de este valor, es posible calcular la velocidad de corrosión del acero de refuerzo, que a su vez es necesario para calcular la vida útil de la estructura de concreto en cuestión.

La prueba se realizó utilizando un potenciostato-galvanostato ELECTRÓNICA VIMAR modelo PG-2EV, cuyo esquema se muestra en la figura 2.7. Se utilizó un electrodo de referencia calomel saturado (ECS) y una malla de acero inoxidable como contra-electrodo.

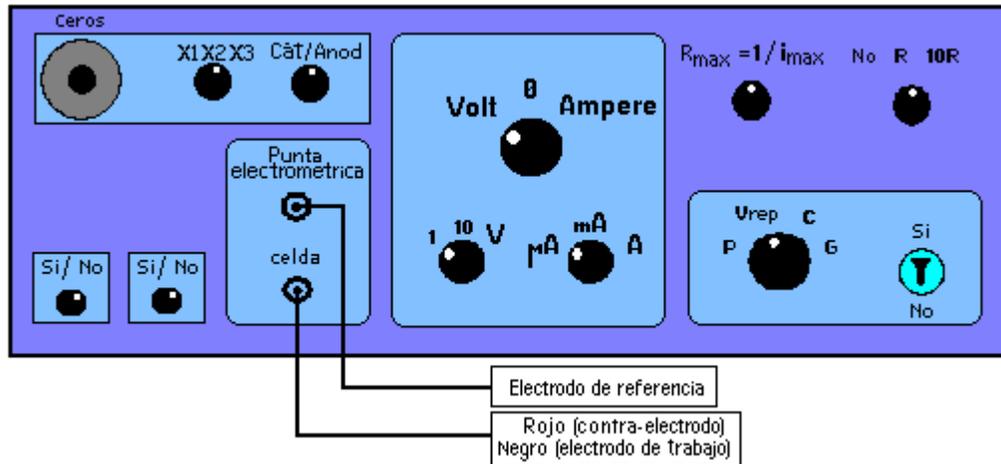


Figura 2.7 . Diagrama de un potenciostato- galvanostato VIMAR modelo PG 2EV para medir la resistencia a la polarización.

El arreglo mediante el cual se determinó el valor de  $R_p$  es el que se muestra en la figura 2.8; la frecuencia de la prueba fue semanal y las probetas fueron evaluadas inmersas en el agua de mar sintética. Los resultados obtenidos se reportan mas adelante.

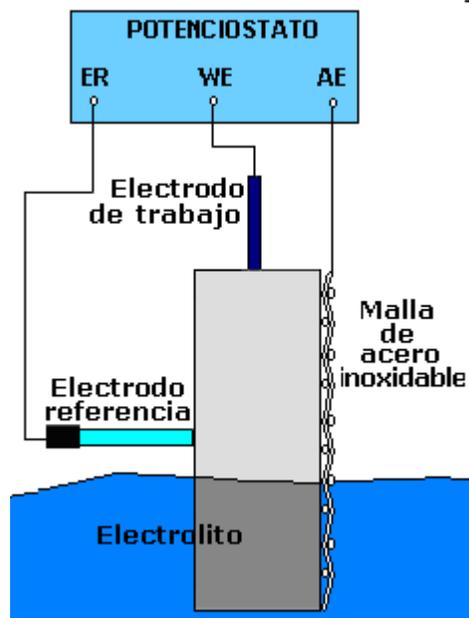


Figura 2.8. Arreglo para medición de la  $R_p$ .

## CAPÍTULO 3 Resultados.

### 3.1 Resultados experimentales.

#### 3.1.1 Mapeo de potenciales

Los resultados experimentales obtenidos al realizar un mapeo de potenciales de manera diaria, se muestran mediante los siguientes gráficos. Para ello fue necesario clasificar las probetas de forma adecuada para identificar el punto correspondiente a la medición.

Las mediciones se realizaron sobre la superficie principal de la probeta que se muestra en la figura 3.1, la cual se denominó como cara A. Como ya se mencionó en la sección anterior, fueron evaluadas 3 probetas y cuya clasificación está reportada en la tabla 8.

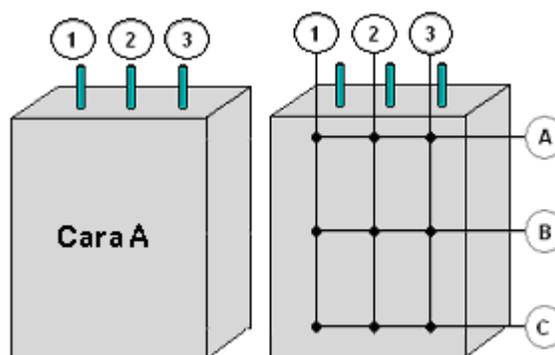


Figura 3.1. Posición para mediciones en la cara A de cada probeta.

Tabla 8. Clasificación de probetas y el medio ambiente de evaluación.

Probeta Número	Identificación	Electrolito	Gravedad Específica	pH <sub>electrolito</sub>
1	PT	-----	-----	-----
3	PE	Estable	1.022	7
4	PO	Oleaje	1.022	7

El número asignado a cada probeta se debe a que en un principio se evaluaron cinco probetas de las cuales se eligieron tres debido a que presentaban potenciales y estado físico similares. Para facilitar la identificación de las probetas, referiremos a la probeta testigo por sus iniciales (PT), la probeta con electrolito estable (PE) y finalmente la probeta con electrolito en oleaje como (PO).

A continuación se muestran de forma gráfica los resultados obtenidos por la medición de potencial (Figura 3.2) para la probeta testigo. En dicho gráfico se observa una clara diferencia entre los potenciales de la parte superior e inferior, cabe destacar que se muestra este gráfico solo para tener idea del comportamiento general de la probeta durante todo el periodo de evaluación.

La serie en la figura 3.2, y en las figuras subsecuentes se refiere a la posición de medición en la probeta. El primer dígito de la serie hace referencia al número de probeta, el segundo dígito al número de varilla medida y por último una letra hace referencia a la posición, siendo A para la posición superior, B para la posición media y C para la posición inferior de la probeta, sobre la cara A. Por ejemplo la serie 11A, se refiere a la probeta 1 o PT, medición en la varilla 1 que es la primera varilla de izquierda a derecha de la probeta por la cara A y finalmente en la posición superior o posición A.

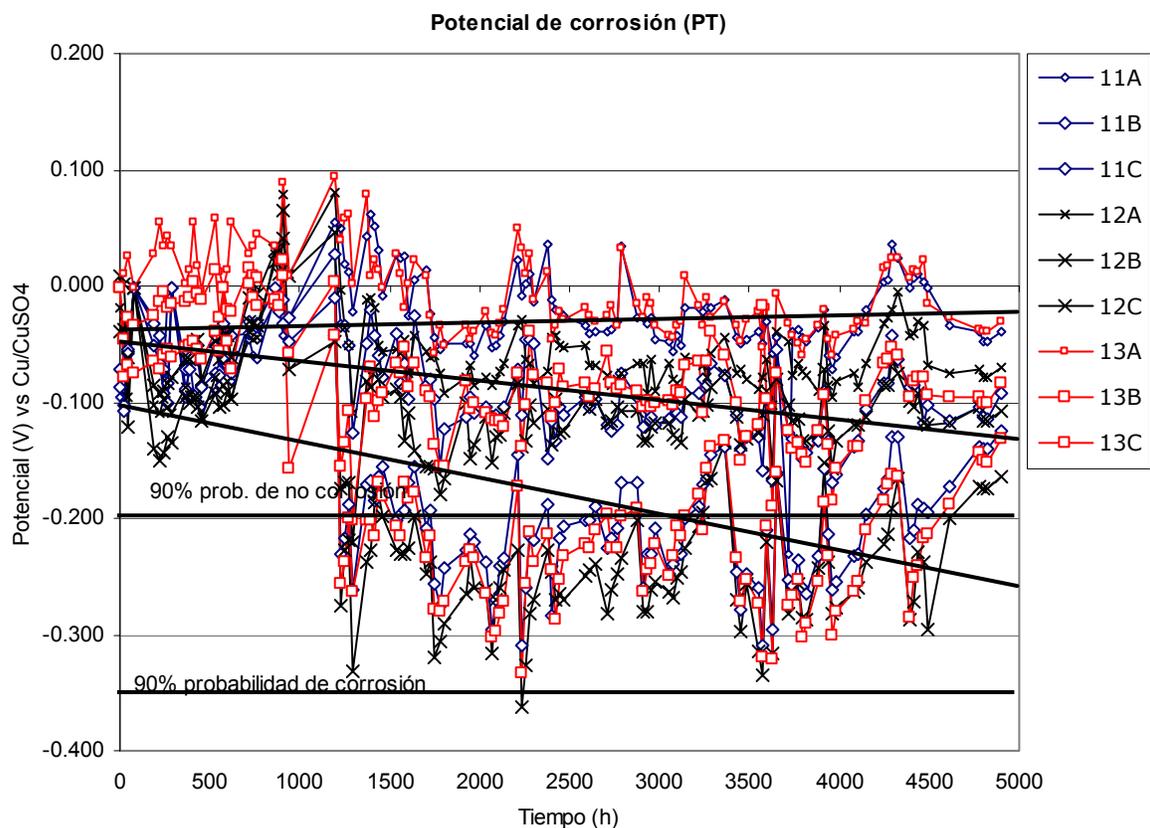


Figura 3.2. Variación de los potenciales de corrosión en la probeta testigo durante el periodo de evaluación. Se observa en general, un agrupamiento de las posiciones superior, media e inferior.

En las figuras siguientes se observa el comportamiento general a lo largo del periodo de evaluación. Ambas figuras muestran un cambio radical de potencial aproximadamente a las 1000 horas de evaluación, lo cual se debe a que la probeta se encontraba seca (0 a 1000hrs); al sumergir la probeta y en cuestión de horas su potencial se ve alterado hacia potenciales más negativos como se observa en las figuras 3.3 y 3.4. Para hacer un análisis más detallado se presentan las figuras 3.5 y 3.6 en las que se observa con mayor claridad la diferencia de potencial entre cada una de las posiciones evaluadas, que se analizarán más tarde.

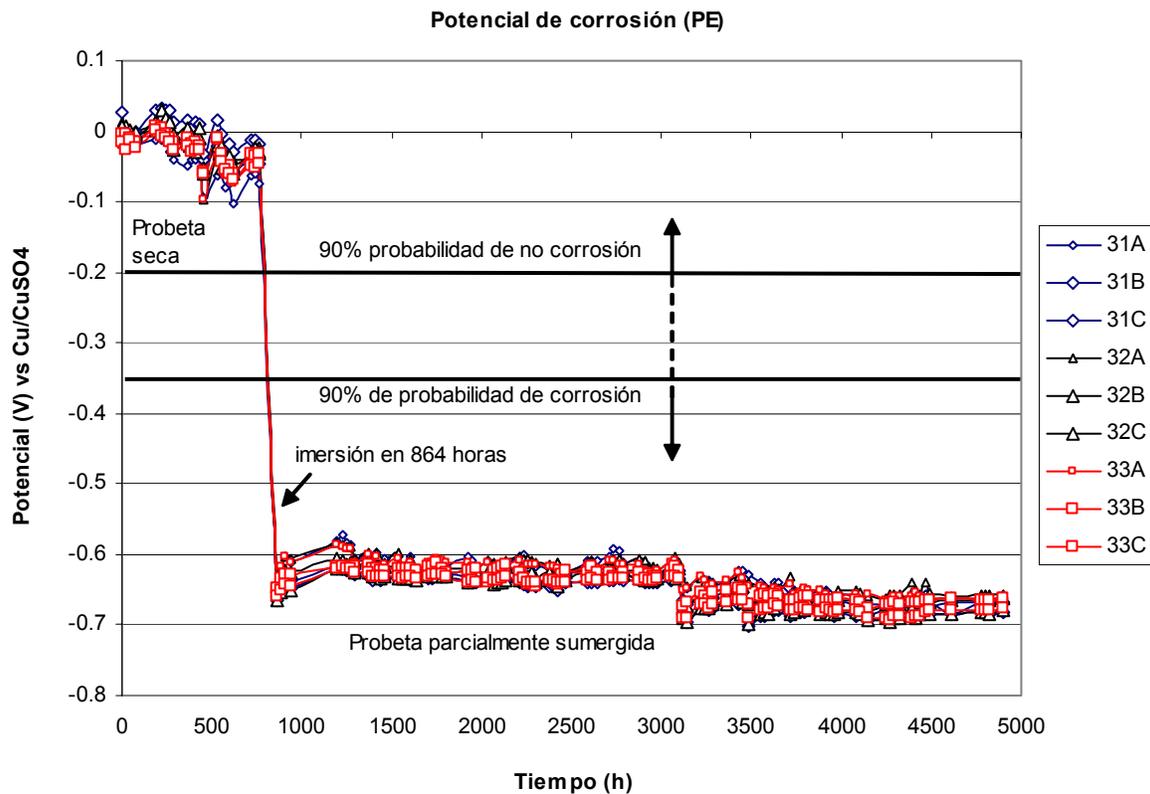


Figura 3.3. Variación de los potenciales de corrosión en la Probeta 3 semi-sumergida sin oleaje, comportamiento general por inmersión.

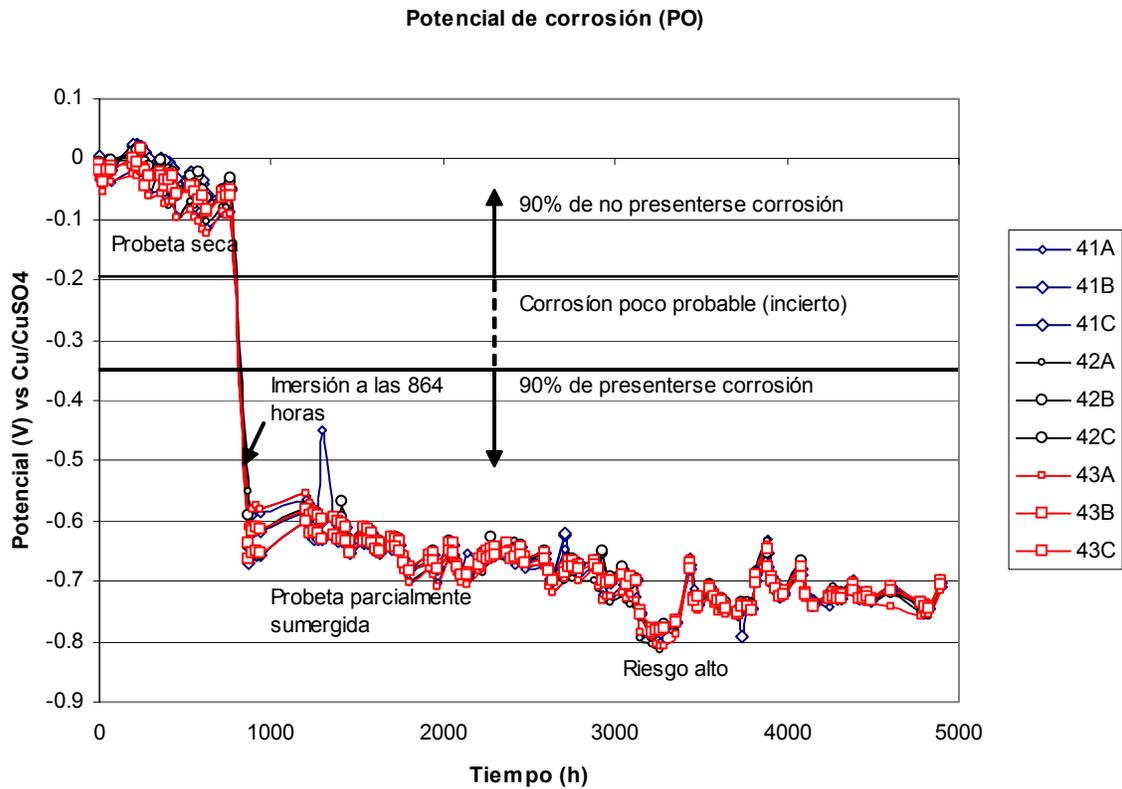


Figura 3.4. Variación de los potenciales de corrosión en la Probeta 4 semi-sumergida con oleaje, comportamiento general por inmersión.

La probeta 3 (PE) que se mantuvo semi-sumergida en un electrolito sin oleaje muestra un comportamiento más regular respecto a la probeta 4, oscilando en valores de potencial cercanos a los  $-0.600\text{V}$ , PO presenta mayor oscilación en los valores de potencial, debidos al oleaje del electrolito.

Para determinar el estado probable de corrosión en las probetas respecto a su potencial se establecen los límites en función de la tabla 9, que muestra la norma ASTM C876-87. Esta tabla se encuentra referida al electrodo de Cu/CuSO<sub>4</sub> y es de uso común para prácticas de campo, debido a su fácil manejo y a que nos presenta el tipo de ambiente al que se encuentran referidos dichos potenciales.

Tabla 9, Criterio de valoración de potenciales del acero en hormigón [8].

Condición	Potencial (V) vs Cu/CuSO <sub>4</sub>	Observaciones	Riesgo de daño
Estado pasivo	+0.2 a -0.2	Ausencia de cloruros pH>12.5 H <sub>2</sub> O (HR↑)	Despreciable
Corrosión localizada	-0.2 a -0.6	Cl <sup>-</sup> , O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	-0.15 a -0.6	Carbonatado O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (HR↑)	Moderado alto
	+0.2 a -0.15	Carbonatado O <sub>2</sub> , seco, (HR↓)	Bajo
	-0.4 a -0.6	Cl <sup>-</sup> elevado, H <sub>2</sub> O ó carbonatado, H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Alto
Corrosión uniforme	<-0.6	Cl <sup>-</sup> ↑, H <sub>2</sub> O↑ (sin O <sub>2</sub> )	Despreciable

De acuerdo con la norma ASTM C876-91 [25] se estima la probabilidad de corrosión de acuerdo con la tabla 10 en función de los potenciales y cuyos límites se aprecian en las figuras anteriores. Esta tabla sirve de apoyo a la anterior (tabla 9).

Tabla 10, Probabilidad de corrosión según ASTM C876-91, [25].

Potencial vs Cu/CuSO <sub>4</sub> (V)	Probabilidad de corrosión
>-0.200	90% de no corrosión
-0.200 a -0.350	corrosión poco probable (incierto)
<-0.350	90% de probabilidad de corrosión

Los gráficos siguientes (3.5 y 3.6) se refieren a PT, PE y PO respectivamente, y muestran el comportamiento en la varilla central y en las 3 diferentes posiciones de evaluación. En ellos es posible apreciar que las posiciones superiores presentan una diferencia de potencial significativa respecto a la posición inferior, siendo ésta última la más deteriorada.

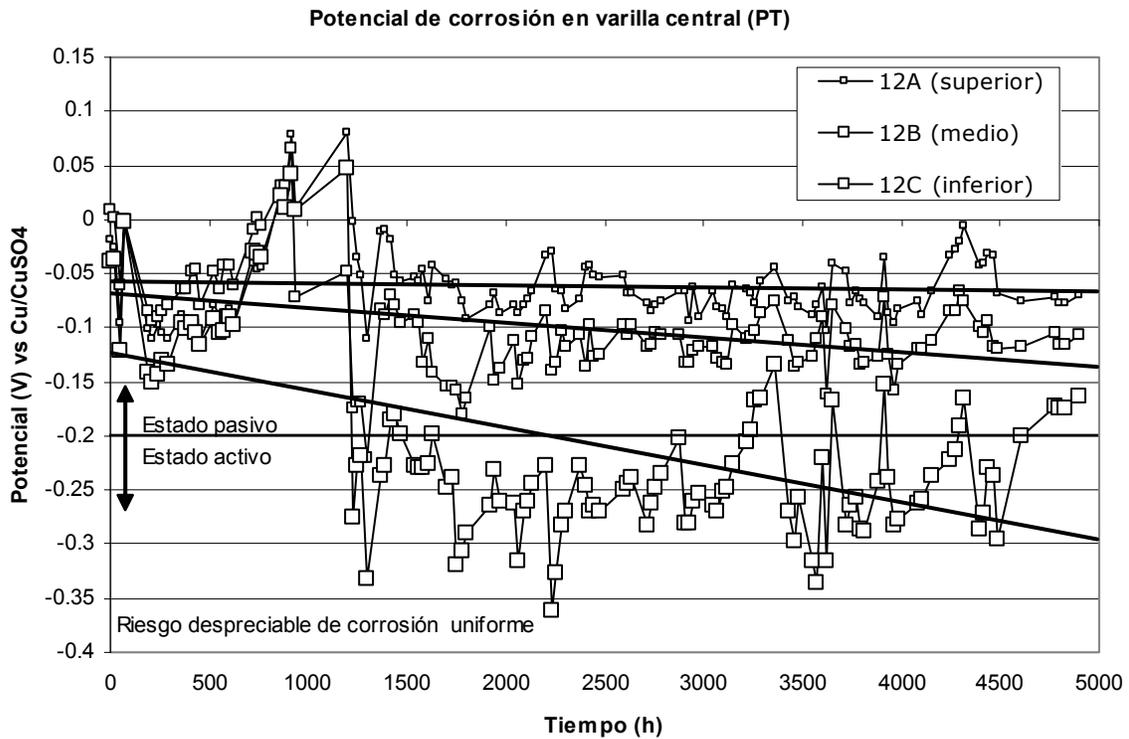


Figura 3.5. Variación de los potenciales en la Probeta 1 varilla central (2), en las tres posiciones evaluadas.

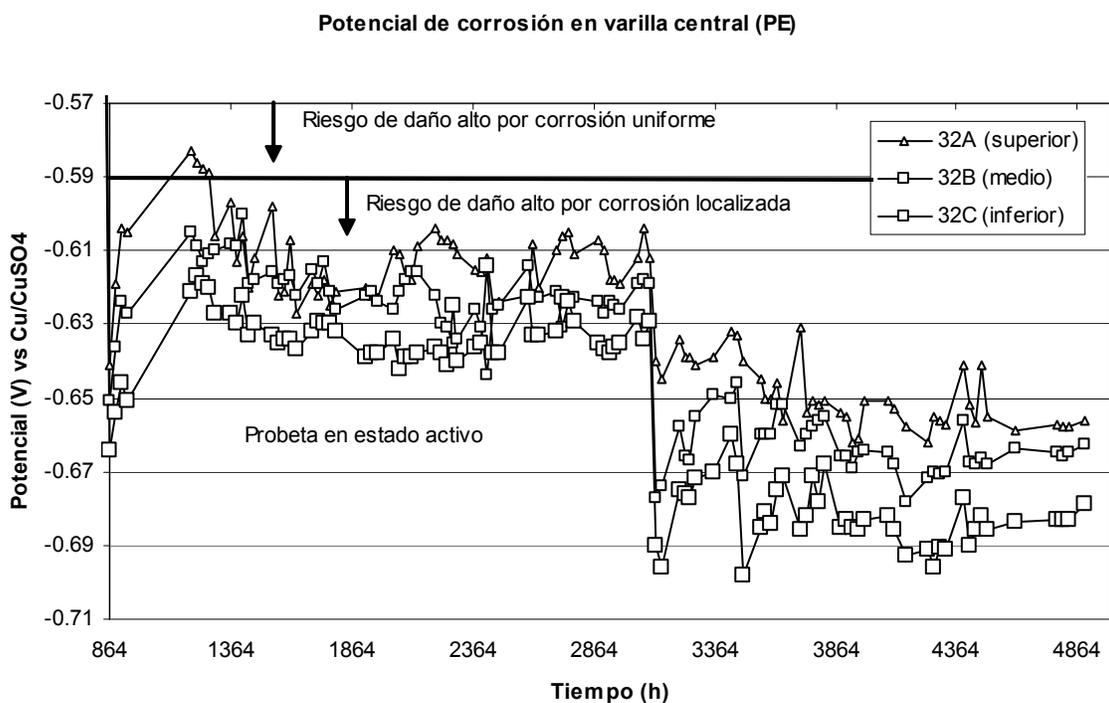


Figura 3.6. Variación de los potenciales en la Probeta 3 varilla central (2), en las tres posiciones evaluadas.

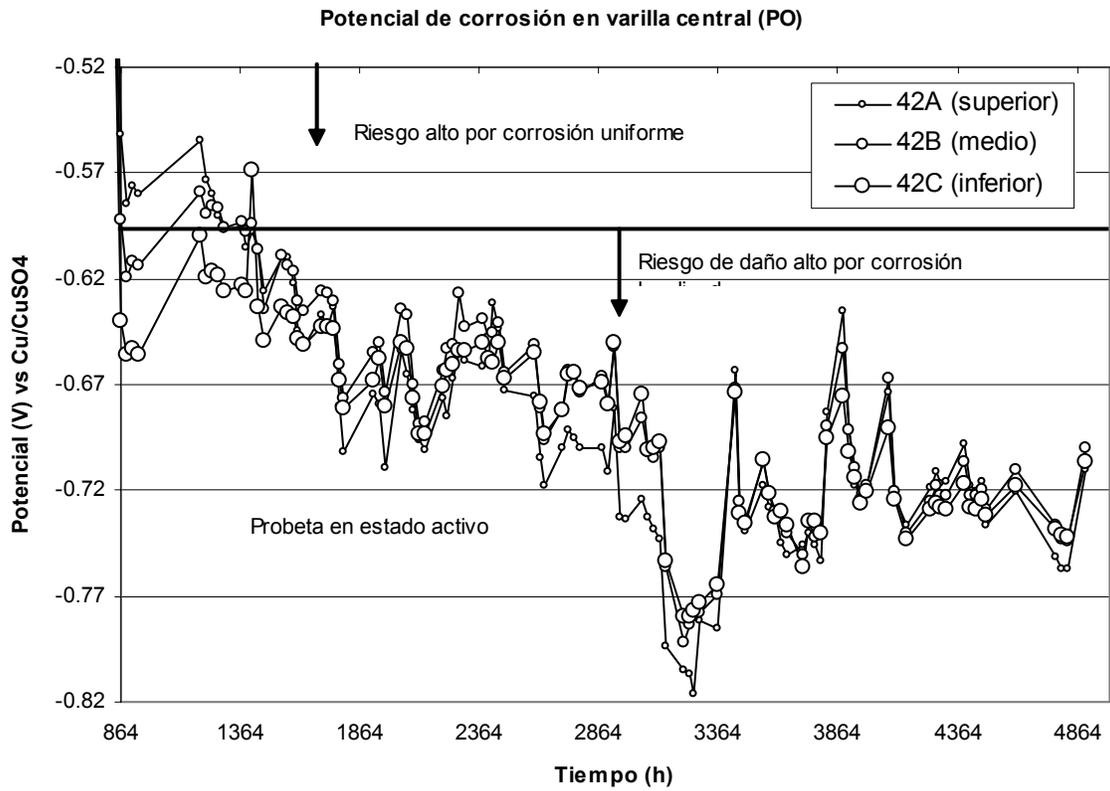


Figura 3.7. Variación de los potenciales en la Probeta 4 varilla central (2), en las tres posiciones evaluadas.

### 3.1.2 Mapeo de resistividades

Las lecturas de resistividad fueron registradas a través del equipo Nilsson ya mencionado, se realizaron partiendo de la base, a 3cm de ésta y hacia la parte superior con espaciamientos sucesivos de 5cm. Las siguientes figuras muestran un comportamiento general en cada probeta (3.8, 3.9, 3.10).

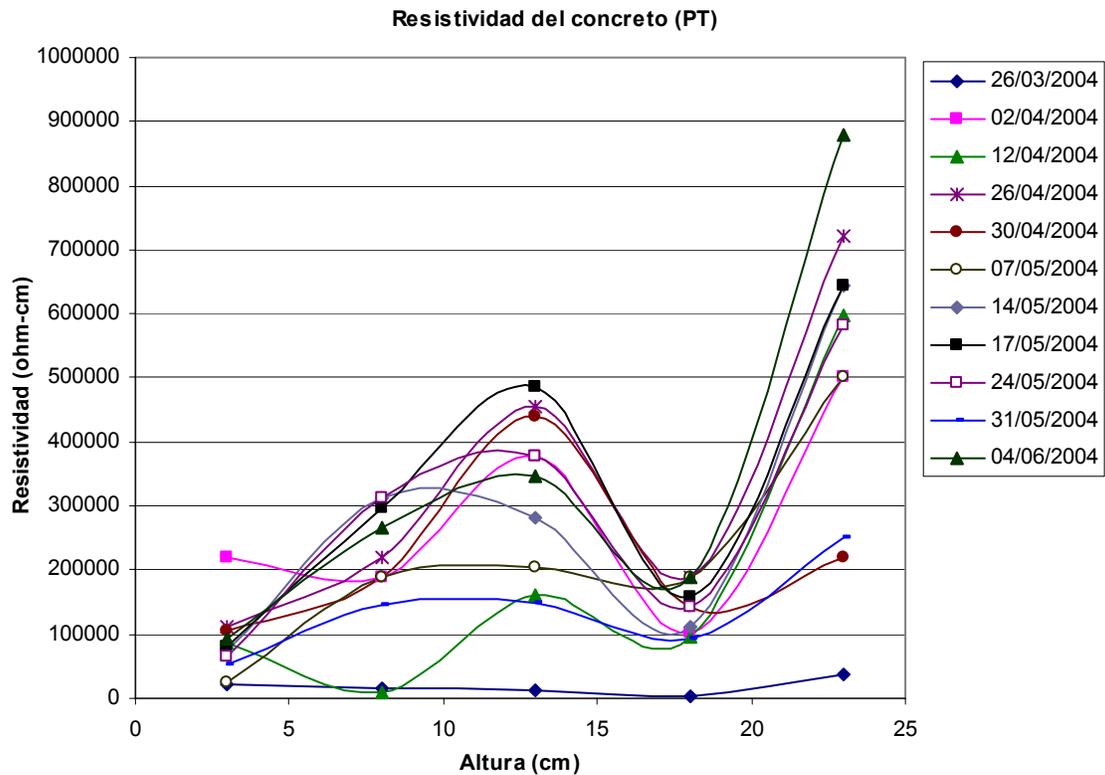


Figura 3.8. Comportamiento general de la resistividad de la Probeta testigo a distintas alturas.

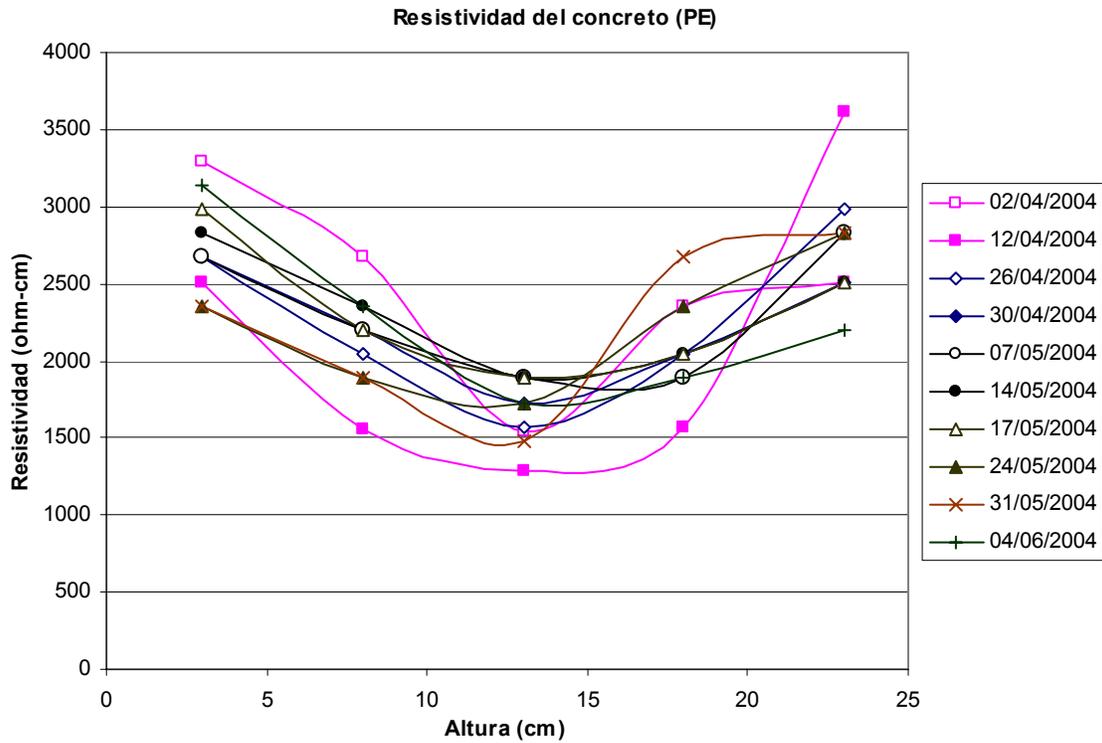


Figura 3.9. Comportamiento general de la resistividad en la Probeta 3 a distintas alturas.

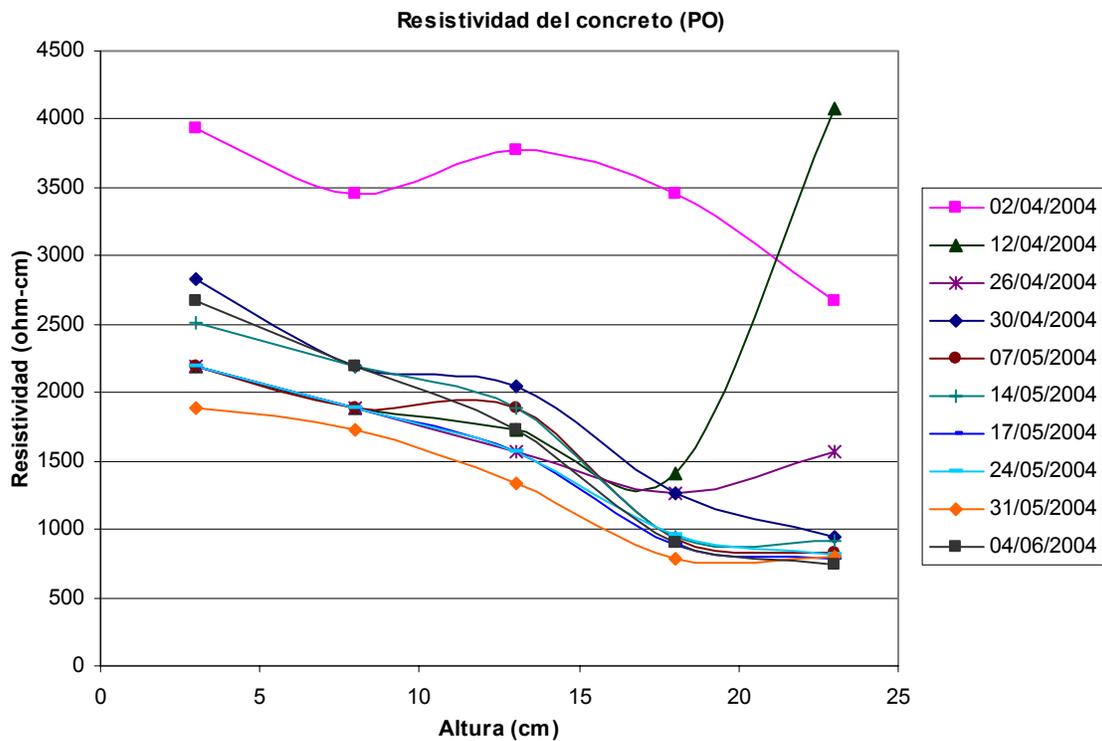


Figura 3.10. Comportamiento general de la resistividad en la Probeta 4 a distintas alturas.

Las figuras anteriores únicamente muestran el comportamiento general de las probetas, se observa que además de hallar una variación de dicho parámetro con la altura, también es importante la variación de la propiedad con el tiempo por lo cual se elaboraron las siguientes figuras que nos darán una idea de esta dependencia, útil para el análisis de resultados.

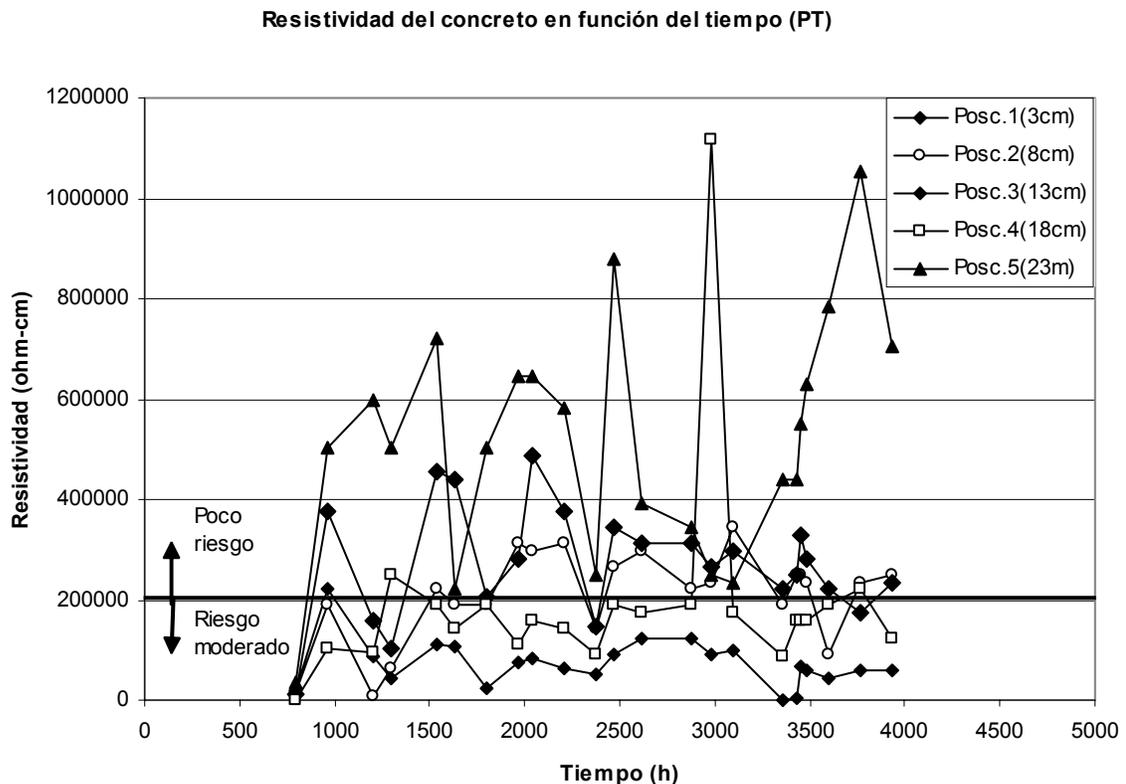


Figura 3.11. Resultados de resistividad en función del tiempo en la probeta testigo y riesgo de corrosión.

Existe una gran diferencia en los valores de resistividad de una estructura seca y una estructura húmeda o saturada, así los valores de la probeta seca muestra valores de magnitud de  $10^5 \Omega\text{-cm}$  (Figura 3.11), mientras que las probetas húmedas muestran una variedad de valores los cuales oscilan entre 500 y 5000 ohms-cm, (Figuras 3.12 y 3.13) de estos valores depende en gran cantidad el grado de deterioro que es susceptible a sufrir una estructura, de ahí que se le dé tanta importancia a este parámetro para su control.

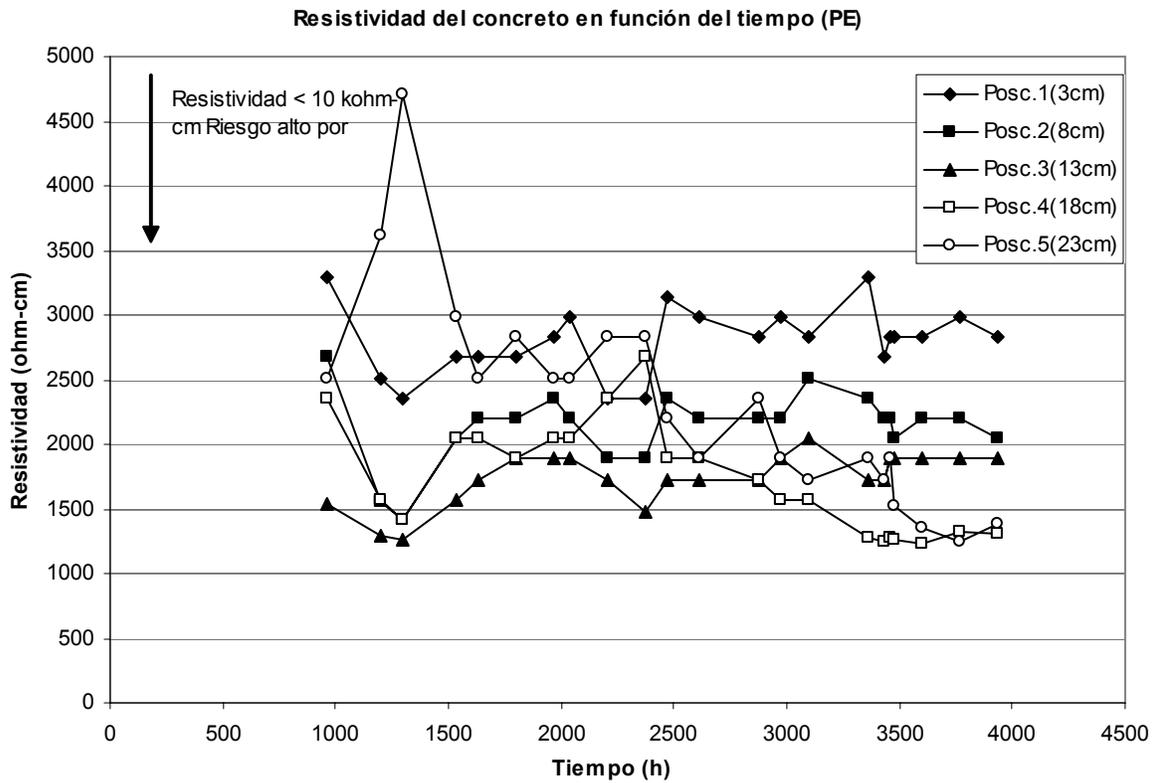


Figura 3.12. Resistividad en función del tiempo en PE con electrolito estable y criterio de riesgo de corrosión.

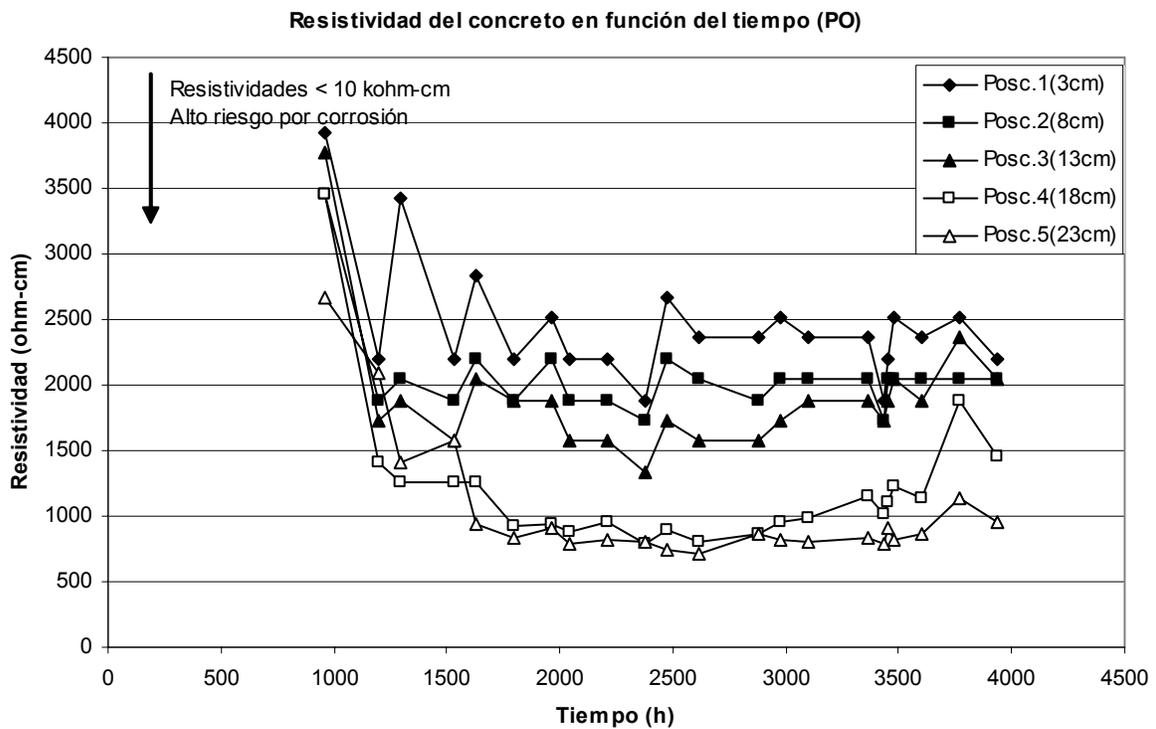


Figura 3.13. Resistividad en función del tiempo en PO con electrolito oleaje y criterio de riesgo de corrosión.

El método utilizado para hallar el valor de la resistividad del concreto, como ya se mencionó, fue el método Wenner de los 4 electrodos con la diferencia de utilizar electrodos de Cu/CuSO<sub>4</sub> ya que es método no destructivo. De tal manera, para tener una seguridad plena de que el método es confiable, al finalizar todas las pruebas electroquímicas y una vez que las probetas ya no fueron útiles, se realizó la medición introduciendo electrodos de acero en la matriz de la probeta. La diferencia en los valores de ambas pruebas es prácticamente nula conforme la humedad en la probeta va en aumento, como se puede verificar en la tabla 11.

Tabla 11, Diferencia entre los valores de resistividad medidos a través del método Wenner variando el tipo de electrodos utilizados.

<b>Posición Probeta 1</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Valor medido electrodos Cu/CuSO<sub>4</sub> (Ωcm)</b>	<b>Valor medido con electrodos de acero (Ωcm)</b>	<b>Diferencia entre ambos valores (Ωcm)</b>
<b>1</b>	3	106814.15	155508.84	48694.69
<b>2</b>	8	188495.56	392699.08	204203.52
<b>3</b>	13	251327.41	251327.41	0
<b>4</b>	18	157079.63	219911.49	62831.86
<b>5</b>	23	1068141.50	1021017.61	47123.89
<b>Posición Probeta 3</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Valor medido electrodos Cu/CuSO<sub>4</sub></b>	<b>Valor medido con electrodos de acero</b>	<b>Diferencia entre ambos valores</b>
<b>1</b>	3	3455.75	2827.43	628.32
<b>2</b>	8	2513.27	2356.19	157.08
<b>3</b>	13	2042.04	1884.96	157.08
<b>4</b>	18	1209.51	1083.85	125.66
<b>5</b>	23	785.40	769.69	15.71
<b>Posición Probeta 4</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Valor medido electrodos Cu/CuSO<sub>4</sub></b>	<b>Valor medido con electrodos de acero</b>	<b>Diferencia entre ambos valores</b>
<b>1</b>	3	2356.19	2356.19	0
<b>2</b>	8	2042.04	2042.04	0
<b>3</b>	13	1570.80	1445.13	125.67
<b>4</b>	18	1021.02	989.60	31.42
<b>5</b>	23	1005.31	989.60	15.71

Es apreciable que cuando las probetas no están hidratadas la variación en las mediciones es significativa mientras que al estar bien hidratadas o en cualquier caso con la red de poros saturados, la variación en la medición tendrá menor error asociado, debido a que la probeta conduce con mayor facilidad la corriente.

### 3.1.3 Envejecimiento electroquímico

Se realizó un envejecimiento a las probetas con la ayuda de un potencióstato-galvanostato. Esto se realizó con el fin de acelerar el proceso de corrosión en el acero de refuerzo.

Para ello se tomó el valor de la corriente de corrosión un momento previo al envejecimiento y se consideró que dicha velocidad se mantiene estable durante todo un año (Tabla 12). De ese modo es posible suministrar una densidad de corriente continua que pasa en un año por el sistema, o en un tiempo tan corto como se desee sin embargo el tiempo elegido fue aproximado a tres horas. Lo anterior se debe a que al suministrar la corriente al sistema, también se genera la formación de productos de corrosión de manera abrupta. Esto significa que se generan esfuerzos internos debido al volumen de los productos de corrosión. Para evitarlo anterior, el envejecimiento debe realizarse de la forma menos agresiva, que sería, la menor densidad de corriente en el mayor tiempo posible. De tal manera se realizó el envejecimiento simulando un año en cada ocasión, en el tiempo antes mencionado (3hrs), los resultados se muestran en la figura 3.14.

Tabla 12, Valores para calcular en el envejecimiento en probetas semi-sumergidas

	<b>PE</b>	<b>PO</b>
<b><math>I_{corr}</math> (mA/año)</b>	1.18E-3	1.46E-3
<b>1 año (s)</b>	3.15E7	3.15E7
<b>Coulombs</b>	37455.70	46158.30
<b>Corriente a suministrar (mA)</b>	3.78	6.41

Se observa que la caída de potencial no es homogénea durante el tiempo de experimentación, lo cual se debe a que el envejecimiento se realizó de manera escalonada para evitar la generación abrupta de productos de corrosión, es decir, se administró un quinto de la corriente total administrada al sistema, durante los primeros cinco minutos incrementando un quinto mas los siguientes cinco minutos y sucesivamente hasta llegar al valor mas alto de corriente a suministrar (Figura 3.15). Posteriormente la corriente administrada se mantuvo en este valor hasta el tiempo total de experimentación para disminuir la corriente de la misma manera y cubrir de esta manera el área total bajo la curva.

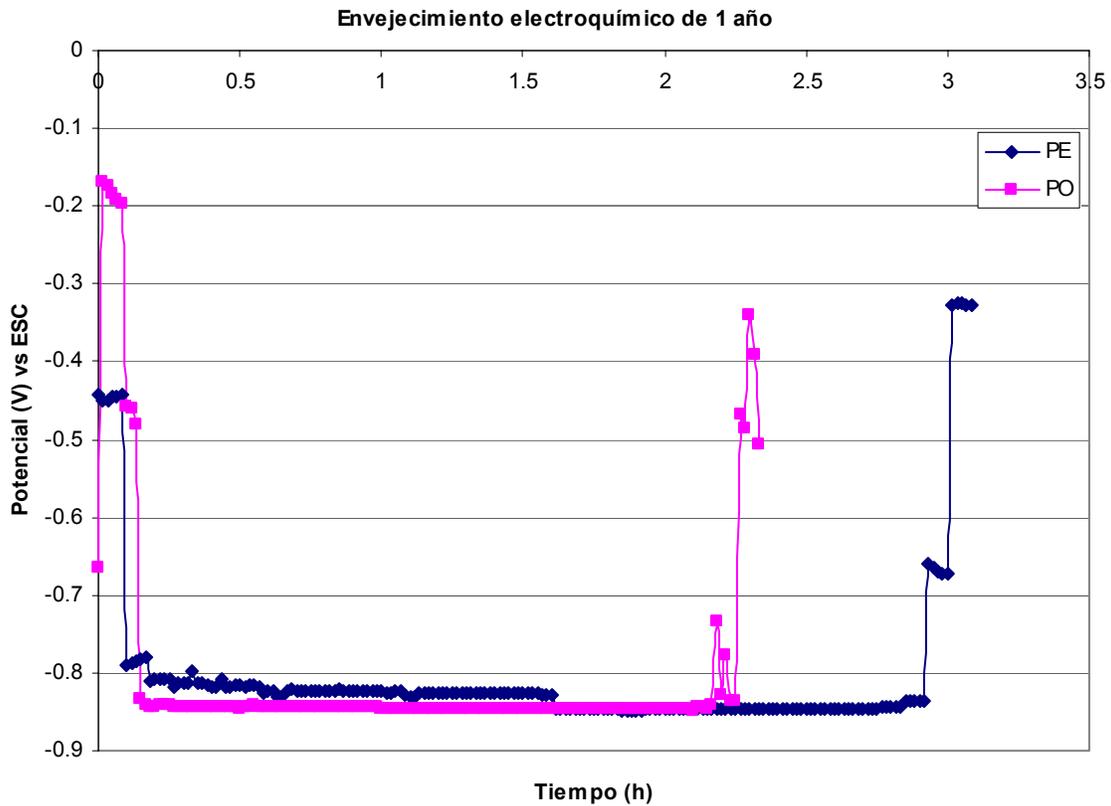


Figura 3.14. Variación del potencial durante el envejecimiento electroquímico a concreto reforzado.

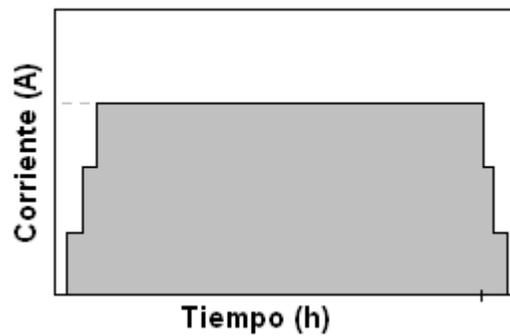


Figura 3.15. Tiempo de experimentación escalonado para envejecimiento electroquímico a un año.

El potencial de reposo fue afectado por el suministro de corriente al sistema. Por ello la siguiente figura muestra como se recupera el potencial cuando se suspende la corriente (Figura 3.14). Se observa que el sistema se ha dañado por efecto de la densidad de corriente, estableciendo su potencial de reposo cercano a los -0.7 V.

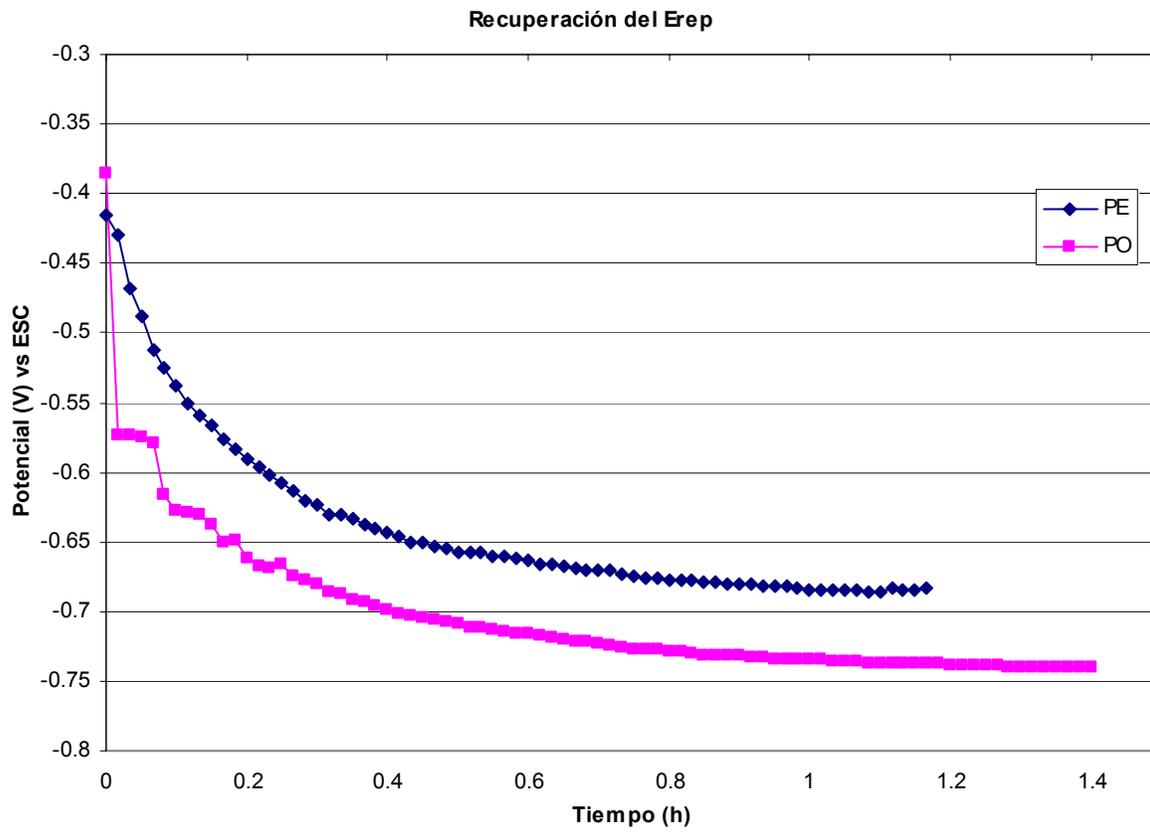


Figura 3.16. Recuperación del potencial de reposo después del envejecimiento electroquímico.

### 3.1.4 Resistencia a la polarización

El fin de realizar la prueba de resistencia a la polarización o polarización lineal ( $R_p$ ) es conocer de manera indirecta la velocidad de corrosión del sistema y la posible variación de este parámetro en función del tiempo.

Físicamente el valor de  $R_p$  indica que tan difícil es polarizar la armadura del concreto, es decir, una resistencia baja implica una densidad de corriente mayor que a su vez se refleja en una alta disolución de material anódico, de modo contrario una alta resistencia implica una menor densidad de corriente que implica una disolución anódica lenta. Por la naturaleza del sistema esta resistencia va cambiando en función del tiempo como se espera observar en el caso en las probetas evaluadas, lo que indica una variación en la velocidad de corrosión que deteriora el acero de refuerzo con mayor o menor facilidad. En general, esta resistencia va disminuyendo con el tiempo debido a la destrucción de la capa pasiva y a la disolución anódica, por efecto de la saturación de la probeta.

La  $R_p$  fue calculada a partir de los potenciales y las corrientes anódica y catódica (15) y su variación se muestra en la figura 3.17.

$$R_p = \frac{E_{anod} - E_{catod}}{I_{anod} - I_{catod}} \quad (15)$$

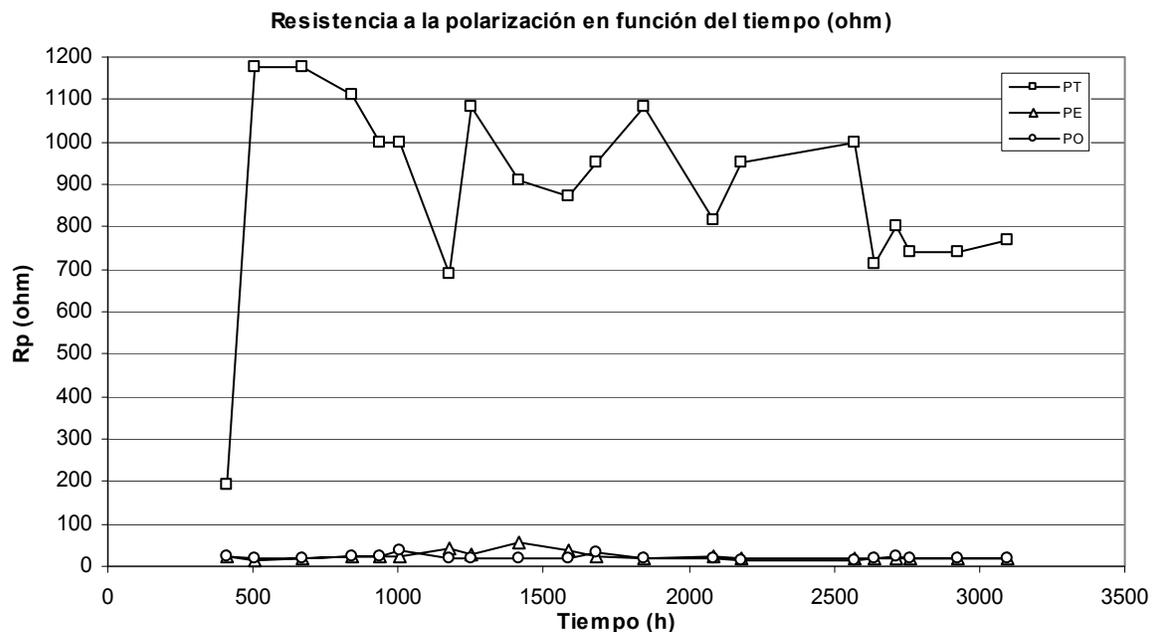


Figura 3.17. Resistencia a la polarización en función del tiempo de las 3 probetas analizadas.

### 3.1.5 Velocidad de corrosión

A partir del valor de  $R_p$  es posible obtener la corriente de corrosión a través de la ecuación desarrollada por Stearn & Geary, cuando el sistema está controlado por transferencia de carga (16).

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (16)$$

Donde el valor de  $B$  es una constante con valor de 0.026 V y representa la relación entre las pendientes anódica y catódica del sistema, lo cual no es del todo cierto ya que cada sistema tiene un valor asociado distinto, pero se ha optado por hacer una aproximación suponiendo que ambas pendientes tienen un valor de 0.120 V/década, que para fines prácticos dicho valor logra una buena aproximación [26].

Para este caso la corriente de corrosión fue calculada de acuerdo con la ecuación de Stearn & Geary (16) la cual se aplica a sistemas controlados por transferencia de carga. Sin embargo, se sabe que en el sistema existe control difusional, para lo cual se utiliza la ecuación (17). Esta ecuación ha sido usada por varios autores como Carmen Andrade, Feliu y otros en España y dichos autores opinan que los valores que se obtiene de velocidad de corrosión son adecuados cuando se comparan con ensayos gravimétricos. De tal modo, la velocidad de corrosión se calcula a través de ambas expresiones.

$$i_{corr} = \frac{b_a}{2.303R_p} \quad (17)$$

donde  $b_a$  es la pendiente anódica.

Una vez calculado el valor de  $R_p$  y mediante la ecuación 18, es posible determinar la velocidad de corrosión para cada tiempo de evaluación del sistema. El valor de la velocidad de corrosión permite además, calcular la vida útil de la estructura en años y con ello estimar el tiempo requerido para proteger la estructura (figura 3.18).

Partiendo de lo anterior la velocidad de corrosión será:

$$V_{corr} = \left( \frac{I_{corr}(A)}{Area(cm^2)} \right) \left( \frac{eq}{C(A \cdot s)} \right) \left( \frac{mol}{eq} \right) \left( \frac{g}{mol} \right) \left( \frac{cm^3}{g} \right) \left( \frac{mm}{cm} \right) \left( \frac{s}{año} \right) = \left( \frac{mm}{año} \right) \quad (18)$$

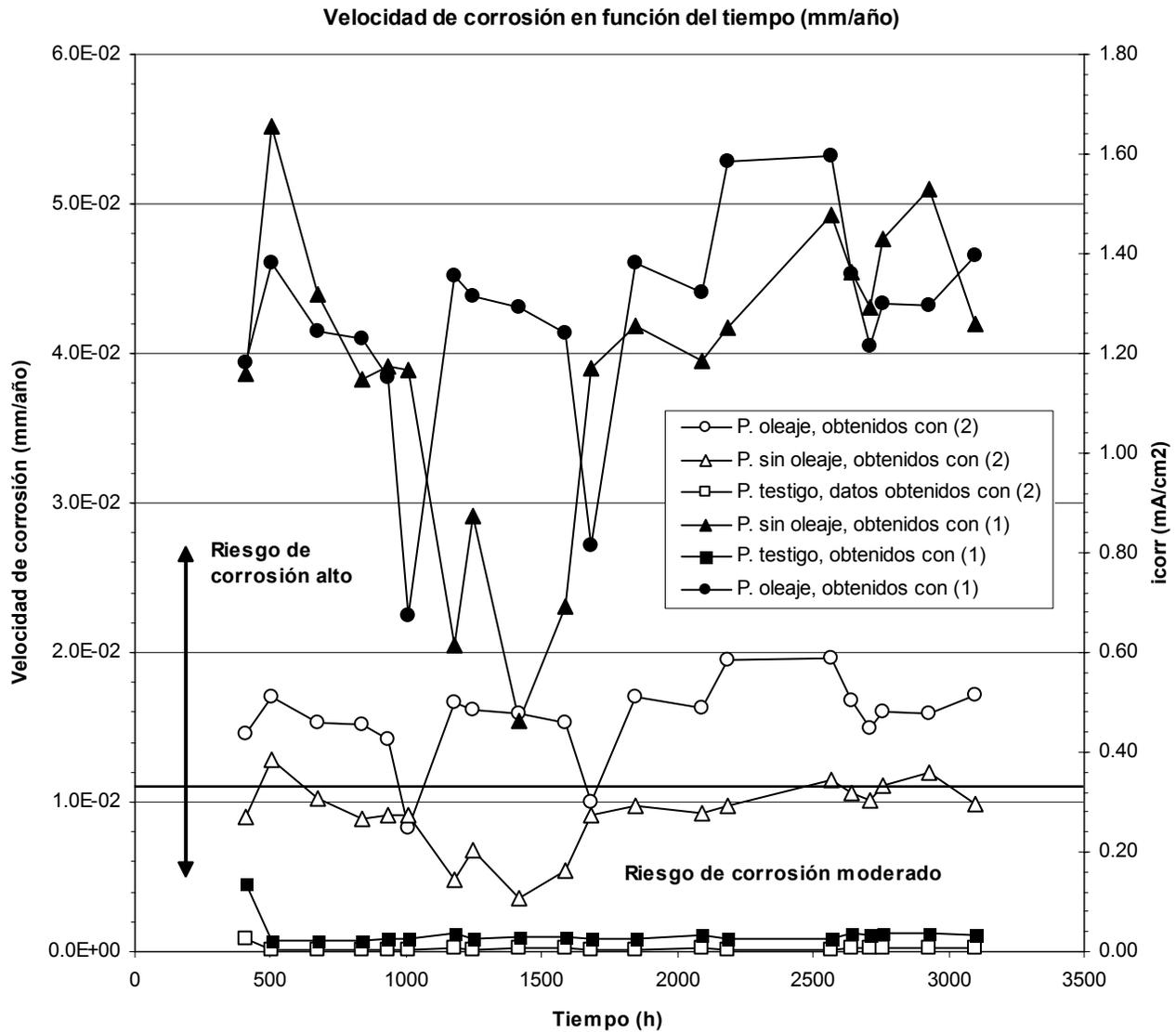


Figura 3.18. Velocidad de corrosión de las probetas evaluadas en función del tiempo. En el eje secundario (Y) es posible apreciar los valores de la densidad de corriente correspondiente. Además es posible observar el riesgo de corrosión de la estructura que coincide con el criterio de la tabla 7 [8].

### 3.1.6 Intercambio de probetas

Con el fin de verificar que se trata del efecto del oleaje el que promueve el deterioro de las probetas y no solo el efecto estructural, o que se trate de un efecto de la heterogeneidad en la matriz de concreto, se realizó un intercambio de electrolito entre las probetas PE y PO; es decir, la probeta con electrolito estable fue sumergida en el electrolito con oleaje y viceversa.

Posteriormente se procedió a medir hora a hora la variación en el potencial de corrosión, en las posiciones de evaluación habituales. Los resultados de esta prueba son muy interesantes y se muestran en la figura 3.19, en donde es posible apreciar que además de haber un cambio muy rápido la diferencia de potencial entre probetas es considerable, constatando que es el efecto del oleaje el responsable del deterioro del acero de refuerzo.

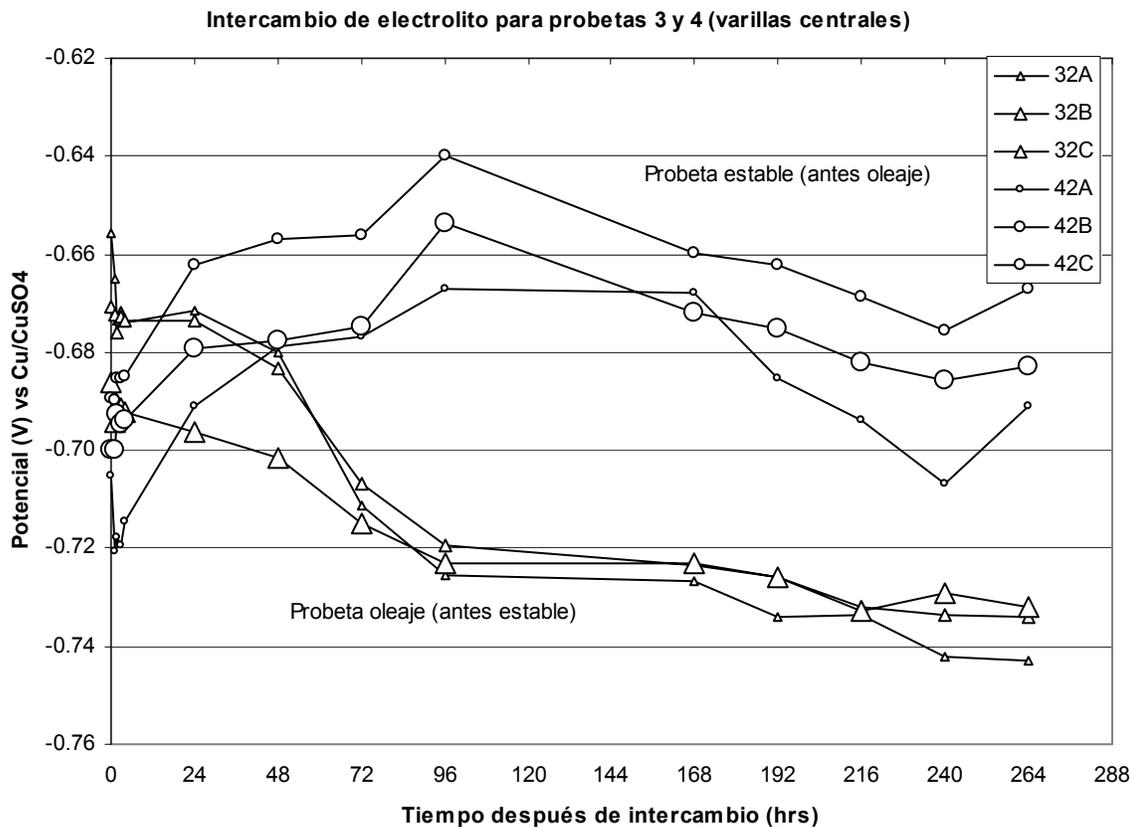


Figura 3.19. Variación del potencial de corrosión de las PE y PO después del intercambio de electrolito. Es posible observar se activan los potenciales como en la probeta 3 (PE) y se observa el comportamiento contrario en la probeta 4 (PO).

## **3.2 Modelo matemático de penetración de cloruros**

### **3.2.1 Justificación.**

El modelado matemático es una herramienta de gran ayuda para la ingeniería de corrosión. Los resultados arrojados por un modelo, comparados y validados mediante datos experimentales son de utilidad para el estudio y seguimiento de los procesos de corrosión aplicados a estructuras de concreto armado, son aún más útiles cuando reflejan con mayor nitidez la realidad del problema, lo anterior evita fuertes gastos de experimentación, además del uso de una importante cantidad significativa de tiempo.

Es importante que el modelo tenga la mayor flexibilidad al ser capaz de considerar la mayor cantidad de variables. En este caso, un modelo bien realizado ayudará a la predicción de la vida útil de la armadura de refuerzo en concreto, y será de gran ayuda si se considera el costo de las estructuras y el beneficio de mantenerlas en buen estado.

La predicción temprana de la concentración de cloruros que se acumulan en la matriz de concreto y que son capaces de causar daño a la armadura de refuerzo ayudará a conocer el tiempo para obtener la concentración umbral de cloruros en la interfase acero-concreto y funcionará como alternativa a la experimentación en este tipo de sistemas.

### **3.2.2 Consideraciones para la realización del modelo**

En el presente trabajo fueron considerados dos tipos de geometría para probetas de concreto armado, sin embargo el sistema en esencia es el mismo ya que se refiere a probetas semi-sumergidas en un electrolito que contiene cloruros. De ahí que se considere:

- Geometría cilíndrica y geometría rectangular.
- Acopla la dificultad de la naturaleza del fenómeno con el modelo, introduciendo un ciclo de mojado y secado en la superficie del concreto que varía la concentración en la matriz del concreto debido al gradiente de concentración.
- Considera la transferencia de masa en función del tiempo del ión cloruro por difusión y otros parámetros como las dimensiones de la probeta, la concentración del electrolito, el nivel de este y su movimiento.

- Soluciones estándar de la ecuación de Fick (2ª ley) en dos dimensiones.
- Predice el perfil de concentración de cloruros en la matriz del concreto a través del tiempo. Cuya aproximación es una propuesta útil para estimar la vida útil de las estructuras de concreto armado.
- Electrolito en estado de oleaje y electrolito estático
- Permite modificar la concentración del electrolito, manteniéndola constante durante el tiempo de evaluación, suponiendo que la superficie de la probeta adquiere esta concentración al contacto.
- Concentración es constante de acuerdo con la estación del año
- Solo los cloruros libres influyen en la degradación del concreto reforzado, debido a la corrosión de la varilla embebida. Estos están disueltos en el agua del poro.
- Elemento de geometría simple que no forma par galvánico con alguna parte de la estructura. El elemento tiene una distribución homogénea de poro a lo largo de la misma.
- Efectos de agrietamiento ignorados.
- Actividad del ión cloruro constante, a lo largo del tiempo, temperatura constante y carbonatación despreciable.
- Difusión de  $\text{Cl}^-$  bidireccional.

### **3.2.3 Metodología**

- Planteamiento del problema y objetivo.
- Delimitar el sistema a evaluar.
- Formulación matemática.
- Establecer las condiciones inicial y de frontera.
- Desarrollo de la discretización.
- Hallar el criterio de estabilidad para cada ecuación nodal.
- Desarrollo del modelo y programación del mismo en QBASIC con el fin de obtener los perfiles de concentración en dos dimensiones.
- Validación del programa mediante resultados experimentales.

- Análisis y discusión de gráficos obtenidos.
- Conclusiones.

### 3.2.4 Descripción de modelo matemático

Para la realización del modelo matemático, se analizarán probetas de geometría cilíndrica y rectangular (Figura 3.20), con posibilidad de variar las condiciones de la probeta así como sus dimensiones, altura, espesor o diámetro de concreto, el diámetro o ancho de la probeta y el diámetro de la varilla de refuerzo. Se considera flujo bidimensional.

Será capaz de predecir las concentraciones para una malla de 10 por 10 nodos, en cada intersección y para cualquier intervalo de tiempo deseado. El tipo de método que se utilizará para solucionar las ecuaciones resultantes será el método de diferencias finitas en el modo implícito y debido a que en el proceso de difusión de cloruros el coeficiente de difusión es importante, este será la única propiedad variable, dándole flexibilidad al usuario en un modo constante o variable. Cabe aclarar que otros parámetros importantes afectan el valor del coeficiente de difusión como la relación agua/concreto, la temperatura, y la porosidad entre otros, pero debido a la escasez de tiempo para hacer un modelo mas detallado, estos parámetros serán omitidos al utilizar un coeficiente de difusión efectivo. En el caso que se desee usarse constante, dicho coeficiente contiene los parámetros necesarios que cambian el orden de éste, con el fin de acercar los resultados a la realidad.

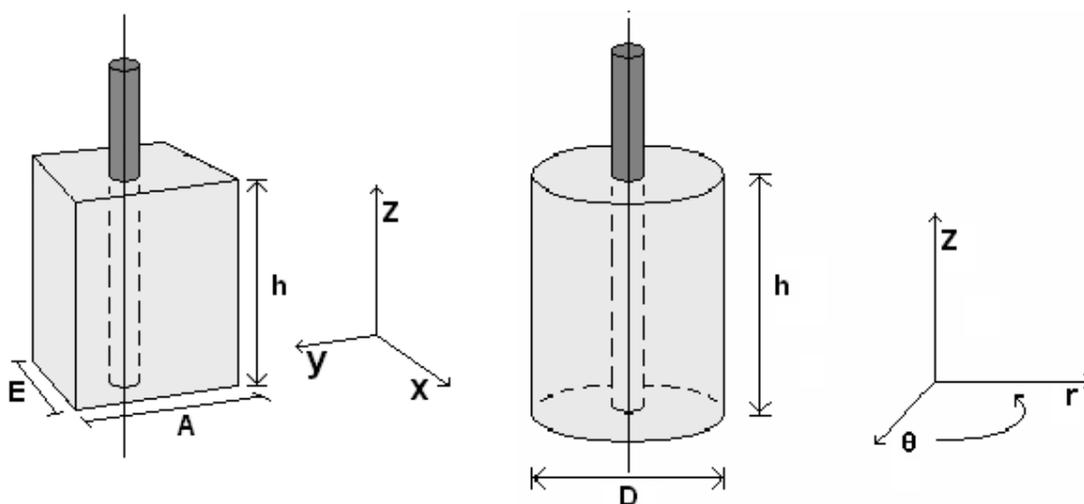


Figura 3.20. Sistema de coordenadas para cada probeta considerada.

### 3.2.5 Formulación matemática

Partiendo de la ecuación de continuidad para el ión cloruro, (identificado como A en las ecuaciones siguientes) en coordenadas cilíndricas y coordenadas rectangulares para cada uno de los casos, respectivamente, se tiene:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rN_A) + \frac{1}{r} \frac{\partial N_A}{\partial \theta} + \frac{\partial N_A}{\partial z} = R_A \quad \text{Coordenadas cilíndricas (caso1)} \quad (19)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial N_A}{\partial x} + \frac{\partial N_A}{\partial y} + \frac{\partial N_A}{\partial z} = R_A \quad \text{Coordenadas rectangulares (caso2)} \quad (20)$$

Cancelando el término que considera la reacción química en (19) y (20), ya que el sistema ocurre una reacción química heterogénea, la cual se considera como una condición de frontera, cancelando el término en  $\theta$  en el caso 1 y cancelando el término en "y" en el caso 2 debido a que se considera que no existe difusión en dicha dirección, las ecuaciones que se obtienen son:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rN_A) + \frac{\partial N_A}{\partial z} = 0 \quad (\text{caso 1}) \quad (21)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial N_A}{\partial x} + \frac{\partial N_A}{\partial z} = 0 \quad (\text{caso 2}) \quad (22)$$

La figura 3.21 muestra las áreas consideradas en cada sistema para realizar los balances, de acuerdo con las ecuaciones anteriormente definidas, se observa que las condiciones de frontera, son similares para ambos sistemas.

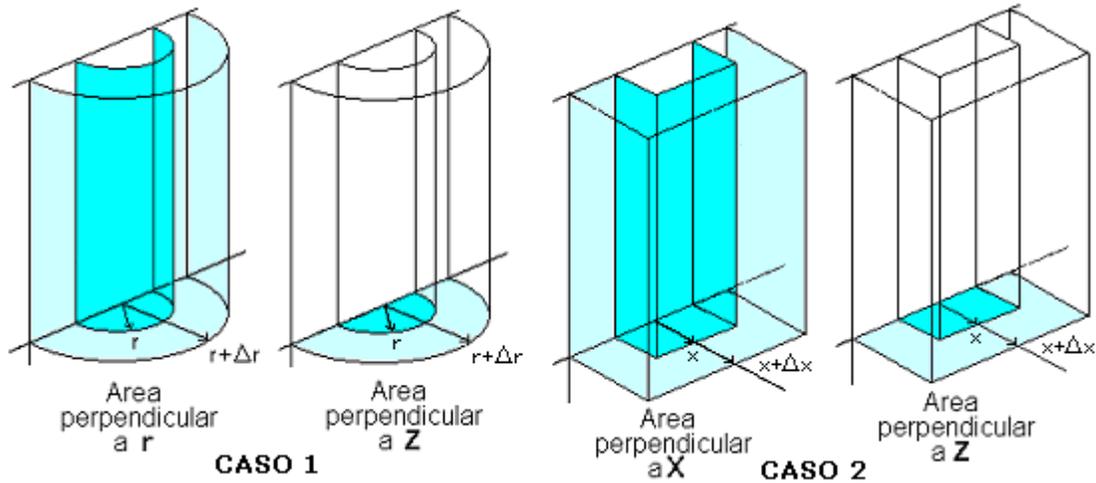


Figura 3.21. Áreas de flujo consideradas para realizar los balances en cada sistema.

### Definiendo las ecuaciones nodales:

Para ambos sistemas se consideran nueve tipos de nodos diferentes, y su clasificación se muestra en Figura 3.22.

El modelo supone que los nodos que se encuentran en contacto con el electrolito adquieren la concentración de cloruros del mismo de manera inmediata, definiendo así a esa condición de frontera. De tal manera los nodos  $(1,1)$ ,  $(i,1)$ ,  $(n,1)$  y  $(n,j)$ , adquieren la concentración del electrolito, la cual se mantiene constante durante la evaluación (Figura 3.22).

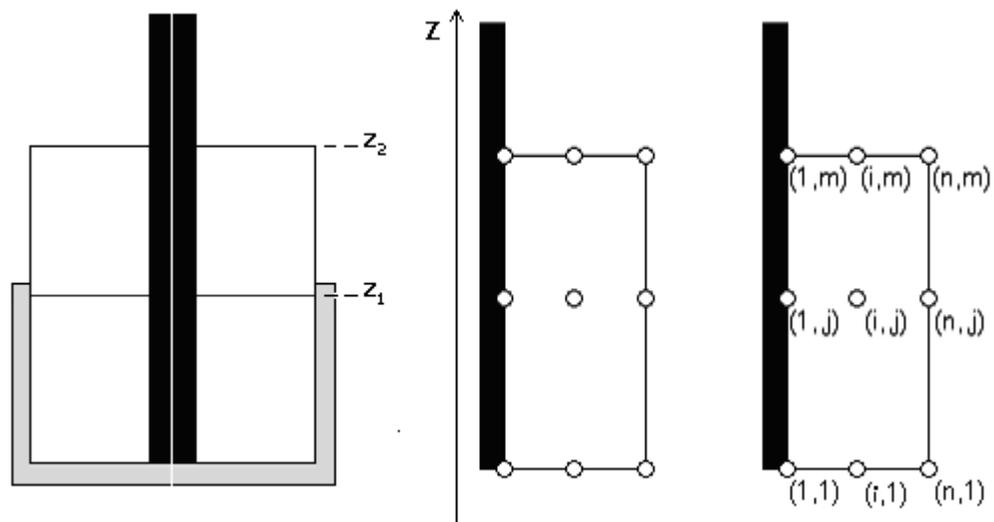


Figura 3.22. Corte transversal de la probeta. Nueve tipos de nodos considerados. Clasificación de nodos para la discretización.

Realizando el balance para el nodo (1,j).

$$E + G = S + Ac \quad (23)$$

Debido a que no hay salidas, ni generación en ninguno de los nodos, se tiene en geometría cilíndrica para el nodo (1,j):

$$E = Ac \quad (24)$$

Siendo la entrada y la acumulación:

$$E = N_{Cl,z(1,m) \rightarrow (1,j)} A_{\perp Z(1,j)} + N_{Cl,r(i,j) \rightarrow (1,j)} A_{\perp r(1,j)} + N_{Cl,z(1,1) \rightarrow (1,j)} A_{\perp Z(1,j)} \quad (25)$$

$$Ac = \frac{dC}{dt} V_{(1,j)} \quad (26)$$

Desarrollando el término de flux

$$N_{Cl,z(1,m) \rightarrow (1,j)} = -D \frac{dC_{Cl}}{dz} = -D \frac{C_{Cl,(1,j)}^t - C_{Cl,(1,m)}^t}{\Delta z} \quad (27)$$

$$N_{Cl,z(1,1) \rightarrow (1,j)} = -D \frac{dC_{Cl}}{dz} = -D \frac{C_{Cl,(1,j)}^t - C_{Cl,(1,1)}^t}{\Delta z} \quad (28)$$

$$N_{Cl,r(i,j) \rightarrow (1,j)} = -D \frac{dC_{Cl}}{dr} = -D \frac{C_{Cl,(1,j)}^t - C_{Cl,(i,j)}^t}{\Delta r} \quad (29)$$

La expresión para el término del área en paredes y tapas de un cilindro así como el volumen de cada nodo será:

$$A_{\perp r(1,1)} = \pi(r + 0.5\Delta r)\Delta z \quad \text{Paredes} \quad (30)$$

$$A_{\perp z(1,1)} = \pi[(r + 0.5\Delta r)^2 - r^2] = \pi(r^2 + 0.5\Delta r^2 - r^2) = 0.5\pi\Delta r^2 \quad \text{Tapas} \quad (31)$$

$$V_{(1,1)} = A_{\perp z(1,1)}\Delta z = [0.5\pi\Delta z\Delta r^2] \quad (32)$$

Finalmente el término de la variación de la concentración de cloruros respecto al tiempo, tenemos en la ecuación (32):

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C_{Cl,(1,1)}^{t+\Delta t} - C_{Cl,(1,1)}^t}{\Delta t} \quad (33)$$

La ecuación obtenida mediante este tipo de balance para cada nodo se discutirá en el siguiente punto.

### 3.2.6 Discretización

El método con el cual se dará solución al problema de difusión bidireccional en un sólido de concreto reforzado es por medio del método de diferencias finitas explícito, para lo cual se requiere una discretización adecuada del sistema.

De acuerdo con lo anterior el número total de balances dependerá de las zonas y/o las posiciones de la probeta que están en contacto con el electrolito ya que esto determinará el tipo de nodos generados. Así, los nodos  $(i, j)$  con  $i = 1$  hasta  $n$ , que están en contacto con el electrolito (nodos base o fondo de la probeta), tendrán una concentración:

$$\mathbf{C.F (i,1) = C_e}$$

Donde  $C_e$  es la concentración del electrolito.

Del mismo modo los nodos  $(n, j)$  con  $j = 1$  hasta el nivel del electrolito  $z_1$ , ver figura 3.22.

$$\mathbf{C. F. (n, j) = C_e}$$

es decir, la condición de frontera es válida hasta los nodos del costado de la probeta que están en contacto con el electrolito.

Para los nodos restantes, es decir, para los nodos  $(n, j)$  con  $j = z_1$  hasta  $(m-1)$ , que son los nodos de la misma pared que no se encuentran en contacto con el electrolito, la condición de frontera está definida por:

$$\mathbf{C. F. (n, j) = N_{r(n,j)} = 0}$$

La tapa superior de la probeta; nodos  $(i, m)$ , con  $i = 1 \dots n$ , estará definida por la condición de frontera:

$$\mathbf{C.F. (i, m) = N_{z(i,m)} = 0}$$

Finalmente la pared aislada que está en contacto con la varilla de acero, es decir, los nodos  $(1, j)$  con  $j = 2 \dots (m-1)$ , estará definida por la condición de frontera:

$$\mathbf{C. F. (1, j) = N_{r(1,i)} = 0}$$

De este modo, el modelo matemático utiliza las siguientes condiciones iniciales y de frontera para resolver cada ecuación en geometría cilíndrica (Tabla 13).

Tabla 13, Condiciones iniciales y de frontera utilizadas para el modelo matemático.

<b>Condiciones iniciales y de frontera</b>				
<b>CI</b>	$t = 0$	$r_0 < r < R$	$0 < Z < z_2$	$C_{Cl} = 0$
<b>CF1</b>	$t > 0$	$r = r_0$	$0 < Z < z_2$	$N_{r(1,i)} = 0$
<b>CF2</b>	$t > 0$	$r = R$	$0 < Z < z_1$	$C_{Cl} = C_e$
<b>CF3</b>	$t > 0$	$r = R$	$z_1 < Z < z_2$	$N_{r(n,j)} = 0$
<b>CF4</b>	$t > 0$	$Z = 0$	$r_0 < r < R$	$C_{Cl} = C_e$
<b>CF5</b>	$t > 0$	$Z = z_2$	$r_0 < r < R$	$N_{z(i,m)} = 0$

### Ecuaciones.

Para simplificar cada uno de los balances en geometría cilíndrica se establece que las variables E y F que representan la siguiente relación.

$$E = -\frac{D_{Cl}}{\Delta z} \quad (34)$$

$$F = -\frac{D_{Cl}}{\Delta r} \quad (35)$$

donde  $D_{Cl}$  es el coeficiente de difusión de cloruro en concreto y  $\Delta z$  y  $\Delta r$  son los incrementos en la dirección  $z$  y  $r$  respectivamente.

La ecuación (36) para nodos de tipo (1, j) resulta de sustituir las ecuaciones (25) a (33) respectivamente en la ecuación de balance (24) y realizando el despeje de la variable de interés, que para este caso se refiere a la concentración a un tiempo (t+1). Obteniendo la ecuación de balance (36).

$$CF_{1,j}^{t+\Delta t} = C_{1,j}^t \left[ \frac{\Delta t}{V_{1,j}} (2EB_{1,j} + FA_{1,j}) + 1 \right] - \frac{\Delta t}{V_{1,j}} \left[ EB_{1,j} (C_{1,(j+1)}^t + C_{1,(j-1)}^t) + FC_{1,j}^t A_{1,j} \right] \quad (36)$$

El criterio de estabilidad de cada ecuación es necesario ya que evita el desbordamiento del método de diferencias finitas y para los nodos de tipo (1, j) se obtiene de la forma de la ecuación (37)

$$\Delta t_{\max} = \left[ \frac{V_{1,j}}{(2EB_{1,j} + FA_{1,j})} \right] - 1 \quad (37)$$

Ecuación (38) para nodos de tipo (i,j) (38)

$$CF_{i,j}^{t+\Delta t} = C_{i,j}^t \left[ \frac{\Delta t}{V_{i,j}} (F(A_{(i-1),j} + A_{i,j})) + 2EB_{i,j} + 1 \right] - \frac{\Delta t}{V_{i,j}} \left[ EB_{i,j} (C_{i,(j+1)}^t + C_{i,(j-1)}^t) + F(A_{(i-1),j} C_{(i-1),j}^t + A_{i,j} C_{(i+1),j}^t) \right]$$

Criterio de Estabilidad para nodos de tipo (i,j)

$$\Delta t_{\max} = \left[ \frac{V_{i,j}}{F(A_{(i-1),j} + A_{i,j}) + 2EB_{i,j}} \right] - 1 \quad (39)$$

Ecuación y criterio de estabilidad para el nodo (n,j) seco (40)

$$CF_{(n,j)}^{t+\Delta t} = C_{n,j}^t \left[ \frac{\Delta t}{V_{n,j}} (FA_{(n-1),j} + 2EB_{(n,j)}) + 1 \right] - \frac{\Delta t}{V_{n,j}} \left[ EB_{n,j} (C_{n,(j+1)}^t + C_{n,(j-1)}^t) + FC_{(n-1),j}^t A_{(n-1),j} \right]$$

Criterio de Estabilidad para el nodo anterior (n,j)

$$\Delta t_{\max} = \left[ \frac{V_{n,j}}{FA_{(n-1),j} + 2EB_{(n,j)}} \right] - 1 \quad (41)$$

Ecuación y criterio de estabilidad para el nodo (1,m)

$$CF_{1,m}^{t+\Delta t} = C_{1,m}^t \left[ \frac{\Delta t}{V_{1,m}} (FA_{1,m} + EB_{1,m}) + 1 \right] - \frac{\Delta t}{V_{1,m}} \left[ (FA_{1,m} C_{2,m}^t + EB_{1,m} C_{1,(m-1)}^t) \right] \quad (42)$$

Criterio de Estabilidad

$$\Delta t_{\max} = \left[ \frac{V_{1,m}}{(FA_{1,m} + EB_{1,m})} \right] - 1 \quad (43)$$

Ecuación y criterio de estabilidad para el nodo (n,m)

$$C_{n,m}^{t+\Delta t} = C_{n,m}^t \left[ \frac{\Delta t}{V_{n,m}} (FA_{(n-1),m} + EB_{n,m}) + 1 \right] - \frac{\Delta t}{V_{n,m}} \left[ FA_{(n-1),m} C_{(n-1),m}^t + EB_{n,m} C_{n,(m-1)}^t \right] \quad (44)$$

Criterio de Estabilidad

$$\Delta t_{\max} = \left[ \frac{V_{n,m}}{(FA_{(n-1),m} + EB_{n,m})} \right] \quad (45)$$

Ecuación y criterio de estabilidad para nodos tipo (i,m) (46)

$$C_{i,m}^{t+\Delta t} = C_{i,m}^t \left[ \frac{\Delta t}{V_{i,m}} (F(A_{(i-1),m} + A_{i,m})) + EB_{i,m} + 1 \right] - \frac{\Delta t}{V_{i,m}} (F(A_{(i-1),m} C_{(i-1),m}^t + A_{i,m} C_{(i+1),m}^t) + EB_{i,m} C_{i,(m-1)}^t)$$

Criterio de Estabilidad.

$$\Delta t = \left[ \frac{V_{i,m}}{F(A_{(i-1),m} + A_{i,m}) + EB_{i,m}} \right] - 1 \quad (47)$$

De una manera similar se hallaron las ecuaciones para cada nodo en geometría rectangular, así como el delta de tiempo máximo que evita el desbordamiento del modelo.

En el modelo matemático para probetas rectangulares, básicamente se estableció solo la simulación de oleaje con una relación de tipo sinusoidal que ejerce su efecto en la superficie de la probeta y que afecta de alguna forma a los nodos internos, simulando que la probeta es mojada y que al siguiente tiempo, el agua sufre cierto escurrimiento que logra que la concentración de cloruros en la superficie aumente y disminuya de forma cíclica. La relación utilizada se presenta a continuación:

$$C_{n,j}^{t+\Delta t} = C_e \sin\left(\frac{\pi}{2} t\right) \quad (48)$$

### **3.2.7 Análisis de sensibilidad**

El primer problema con la sensibilidad del programa se debe al lenguaje de programación ya que por ser muy básico no se puede obtener curvas mas detalladas. El programa solo soporta arreglos de 10×10 elementos o el equivalente a 64kb. Pero a pesar de que la definición no es muy buena, se obtiene una buena aproximación.

Alteraciones en el coeficiente de difusión no modifica a los resultados; esto se verifica en el mismo programa, ya que éste cuenta con la opción para usar un coeficiente de difusión constante o variable que permite realizar correr el programa, sin alteraciones por este parámetro.

En el caso de modificar las dimensiones de la probeta o modificar la concentración del electrolito, no hay desestabilidad del programa pues los valores decrecen al aumentar la altura de la probeta, de manera razonable y nunca se rebasa la concentración del electrolito.

Un parámetro que puede influir en desestabilizar el programa es el delta de tiempo ( $\Delta T$ ), ya que si se desea utilizar un  $\Delta T$  mayor al que se ha calculado por el programa, encontramos un desbordamiento, ya que se está resolviendo un problema de diferencias finitas, es por ello que se calcula un delta de tiempo máximo ( $\Delta T_{max}$ ) para cada una de las ecuaciones y con el fin de evitar dicho desbordamiento se utiliza el valor mínimo de todas las ecuaciones.

### 3.2.8 Resultados del modelo matemático

Debido a que el sistema de estudio principal se refiere a un sistema de coordenadas rectangulares, los resultados que se muestran a continuación arrojados por el programa son para probetas con dicha geometría, con electrolito estable y en oleaje.

Los resultados arrojados por el programa de QBasic realizado para predecir perfiles de concentración para probetas semi-sumergidas rectangulares con electrolito en estado de estable se muestran en la figura 3.23, es posible observar en ellas como aumenta la concentración respecto al tiempo de exposición.

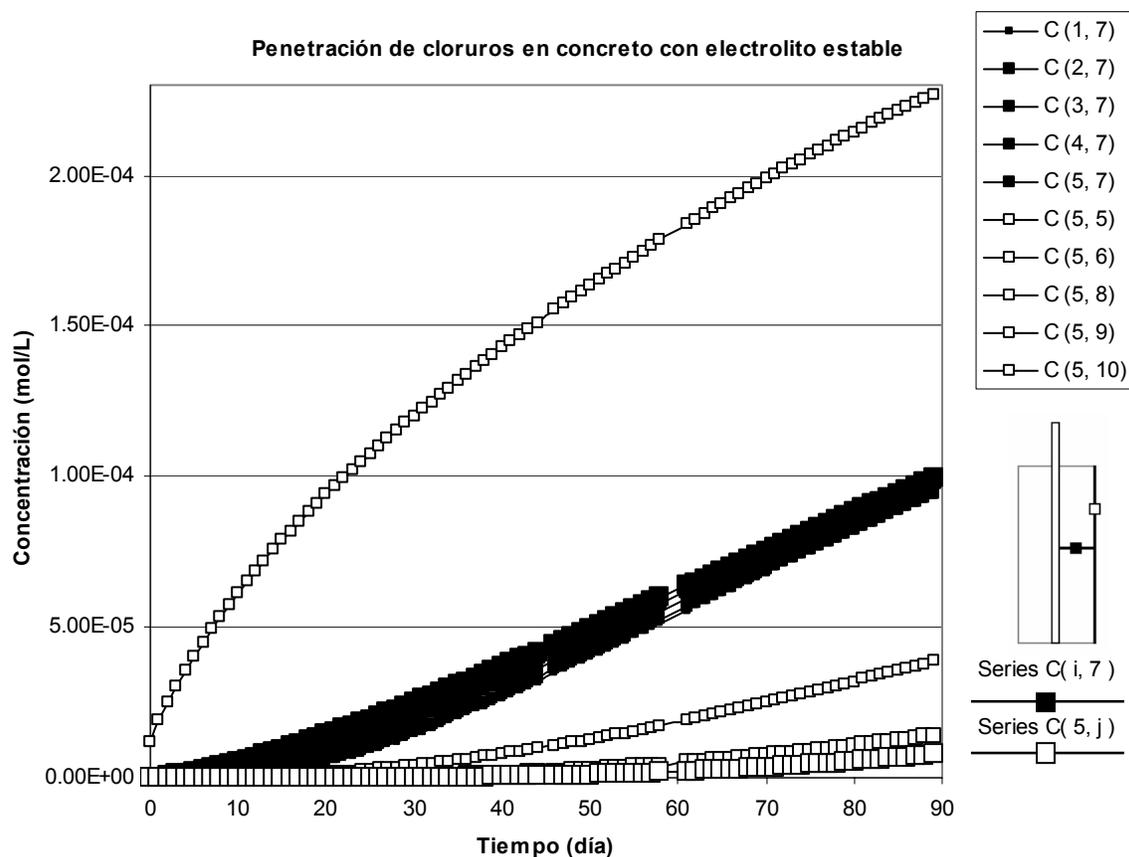


Figura 3.23. Resultados de programa para penetración de cloruros en probeta rectangular durante 3 meses con electrolito estable.

Además de considerar penetración de cloruros por capilaridad con electrolito en estado estable, se realizó una modificación que permite simular una probeta semi-sumergida con electrolito en oleaje y la figura 3.24 muestra, los perfiles de concentración para las posiciones mas representativas en una evaluación simulada por el modelo en un tiempo de 3 meses.

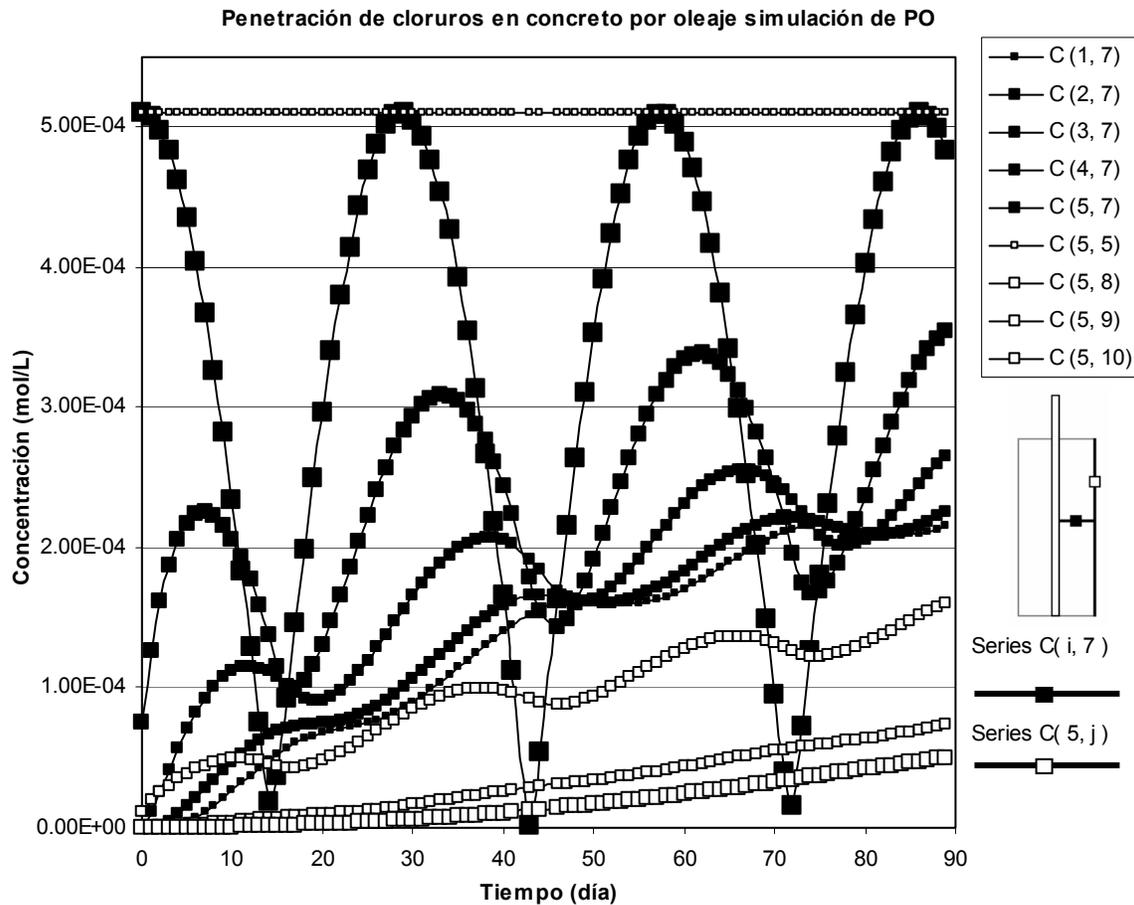


Figura 3.24. Perfiles de concentración de cloruros por efecto de oleaje del electrolito en probeta rectangular semi-sumergida.

En la figura 3.24 es posible observar la oscilación de la concentración de cloruros en la zona de oleaje (posiciones  $(i, 7)$ ,  $i = 1, \dots, 5$ ), el aumento de la concentración de cloruros de manera progresiva en la zona superior de la probeta (posiciones  $(5, j)$ ,  $j = 5, \dots, 10$ ) y la concentración estable de cloruros en la zona mojada de la probeta (posición  $(5, 5)$ ), omitiendo las posiciones por debajo de el punto  $(5, 5)$  debido a que tienen la misma concentración constante a lo largo del tiempo.

La oscilación de la concentración en las posiciones interiores de la probeta se deben a el efecto de la posición externa  $(5, 7)$  que se encuentra en ciclos de mojado y secado de manera cíclica durante todo el tiempo de evaluación.

### 3.2.9 Validación de modelo

Para la validación del modelo de penetración de cloruros se utilizarán los valores presentados por Jesús Chávez M. [27], quien realizó experimentos para hallar perfiles de concentración en probetas de concreto de 7cm de diámetro por 15cm de alto por el método del ión selectivo y en cuya primera fase del experimento se encontraron los valores de la concentración de cloruros por peso de muestra en condición de curado por 1, 3 y 7 días, en 30 días de experimentación; los resultados se muestran en la tabla. Estos valores representan la concentración inicial ( $C_0$ ) antes de la prueba de inmersión.

Tabla 14, Concentración de cloruros en el experimento de Jesús Chávez [27].

Tabla N°.1 Concentración de cloruros por peso de cemento después del curado para diferentes relaciones agua/cemento					
Relación agua/cemento w/c	tiempo de curado (días)	Concentración de cloruros (% Cl/ peso de cemento)			Promedio (% Cl/ peso de muestra)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
0,45	1	0,0255	0,0158	0,0269	0,02273
	3	0,0155	0,0260	0,0206	0,0207
	7	0,0188	0,0172	0,0263	0,02076
0,50	1	0,0250	0,0233	0,0172	0,02183
	3	0,0190	0,0256	0,0135	0,01936
	7	0,0159	0,0287	0,0185	0,02103
0,55	1	0,0210	0,0193	0,0236	0,0213
	3	0,0156	0,0174	0,0164	0,01646
	7	0,0189	0,0259	0,0193	0,02136
0,60	1	0,0193	0,0135	0,0220	0,01826
	3	0,0174	0,0214	0,0143	0,0177
	7	0,0179	0,0165	0,0169	0,0171
0,65	1	0,0161	0,0206	0,0211	0,0193
	3	0,0148	0,0279	0,0191	0,0206
	7	0,0255	0,0284	0,0250	0,0263

Los resultados de las mediciones de las concentraciones de cloruros en las probetas de concreto sumergidas durante 30 días en una solución de agua tridestilada con 35.5 g/l de NaCl (agua de mar sintética) en función de la profundidad de penetración para cada relación agua /cemento, se muestran en la figura extraída de la referencia [27], que es la figura 3.25.

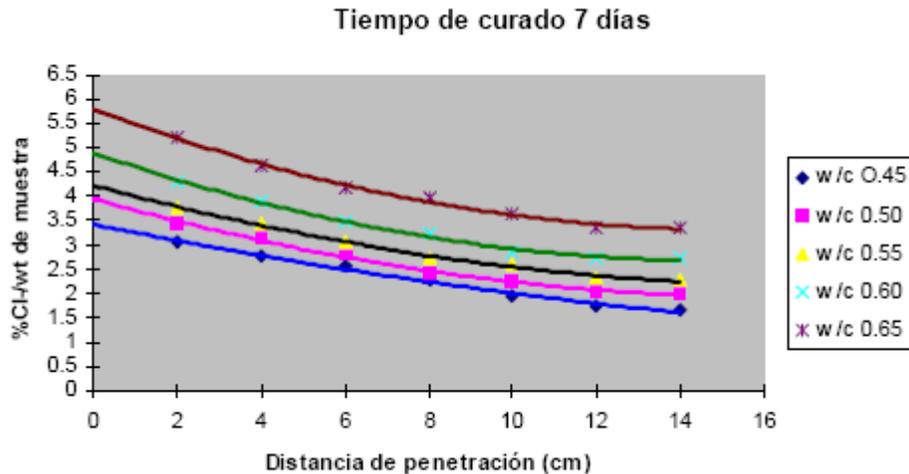


Figura 3.25. Resultados de Jesús Chávez utilizados para validación de modelo, la curva de interés es la curva inferior relación a/c = 0.45 [27].

Únicamente se presenta este gráfico debido a que el sistema de interés es la relación a/c = 0.45 y el tiempo de curado de 7 días, que se ajusta a las condiciones analizadas en el presente trabajo.

Los valores promedios de la concentración inicial de cloruros por peso están dentro del rango 3.42 hasta 5.80 %Cl<sup>-</sup>/wt de la muestra (tabla 15). Estos valores están por debajo de la concentración umbral que es del 4%, concentración basada en el contenido de cemento y aceptada por muchos países, especialmente de Latinoamérica. Esta concentración puede provenir de la composición química del cemento o de la composición química del agua empleadas y que se encuentran combinadas probablemente con las fases aluminicas y/o ferríticas del cemento.

Tabla 15, Tabla extraída del trabajo de J. Chavez, y muestra valores de la concentración superficial de cloruros en %Cl/peso de muestra, obtenidos por interpolación gráfica [27].

Relación agua/ cemento					
Tiempo de curado	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
1 día	3.31	3.32	3.39	4.19	4.22
3 días	3.59	3.80	4.11	4.30	5.70
7 días	3.42	3.95	4.23	4.90	5.80

### 3.2.10 Análisis de resultados para modelo matemático

Es posible observar desde el primer momento que las gráficas que se obtienen mediante el modelo de penetración de cloruros con coeficiente de difusión constante y con el electrolito sin oleaje son muy parecidas a las que obtiene Chávez [27], esto es debido a que el modelo está diseñado de forma bidimensional y aunque hace ciertas simplificaciones, estas se encuentran justificadas al hacer la comparación con datos experimentales. Para hacer un análisis más detallado es necesario realizar una evaluación con el programa, que se ajuste a las dimensiones del problema experimental y comparar.

Por lo anterior se ha decidido realizar una evaluación con el programa desarrollado, que simula una probeta cilíndrica sumergida durante 30 días en un electrolito estable con concentración constante de 35.5 g NaCl/L de agua, y cuyos resultados se muestran para una comparación más clara en la figura 3.26.

Tabla 16, Concentraciones en función de la distancia calculadas a través de el programa, considerando las mismas dimensiones que la referencia [27].

Distancia (cm)	Concentración (%Cl/wm)	Relación (a/c)
0.00	0.0337	0.45
1.67	0.0205	
3.33	0.0104	
5.00	0.0044	Tiempo de curado
6.67	0.0016	7 días
8.33	0.0005	
10.00	0.0001	
11.67	3.21E-05	Promedio
13.33	7.01E-06	0.00714
15.00	2.58E-06	

Los resultados calculados por el programa se muestran en la Tabla 16. Se reportan solamente los datos que corresponden al eje axial de la probeta ya que son los que más se ajustan a un flujo unidireccional y tienen menor efecto de los nodos en la dirección radial.

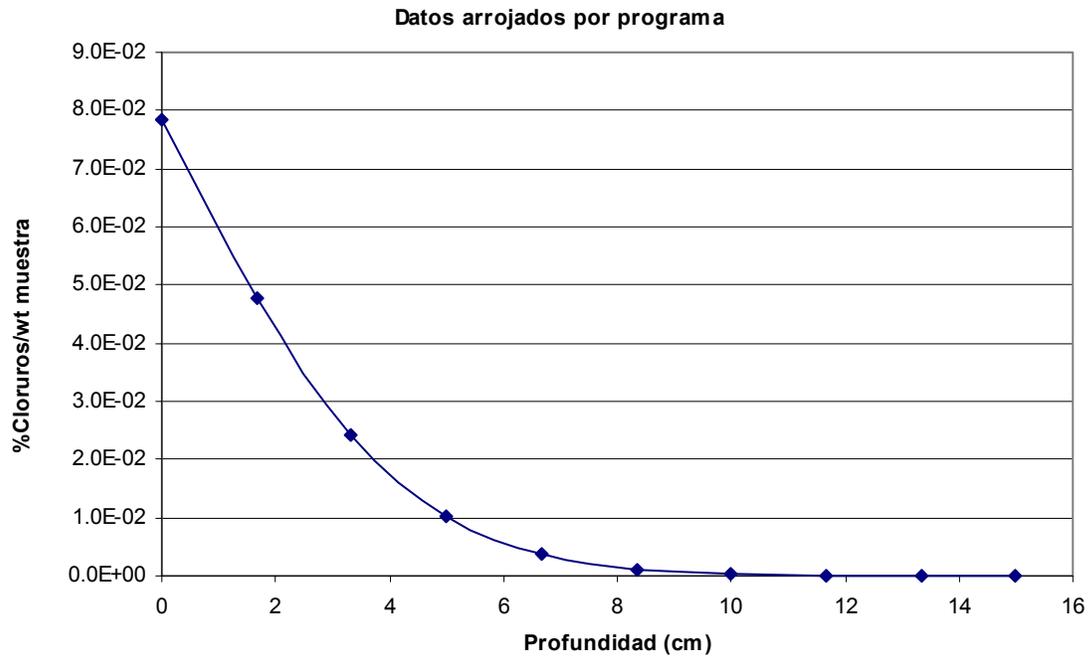


Figura 3.26. Perfil de concentración a lo largo de la probeta de 7cm de diámetro y 15cm de altura

Al realizar el análisis de los datos calculados por el programa es posible percibir que existen diferencias muy marcadas en los contenidos de cloruros a partir de los 8cm de altura, lo cual se debe a que Jesús Chávez utiliza parafina en sus probetas con el fin de lograr que el flujo se adecuó a un flujo unidireccional, el cual se puede resolver fácilmente de forma analítica.

Para evitar este problema, se ejecutó el programa, con una probeta de las mismas dimensiones, semi-sumergida, pero con un nivel de electrolito de 0.1cm, lo que hace que el flujo sea prácticamente unidireccional, esto se observa con mayor claridad cuando se analiza el perfil de concentraciones para toda la probeta (Figura 3.27).

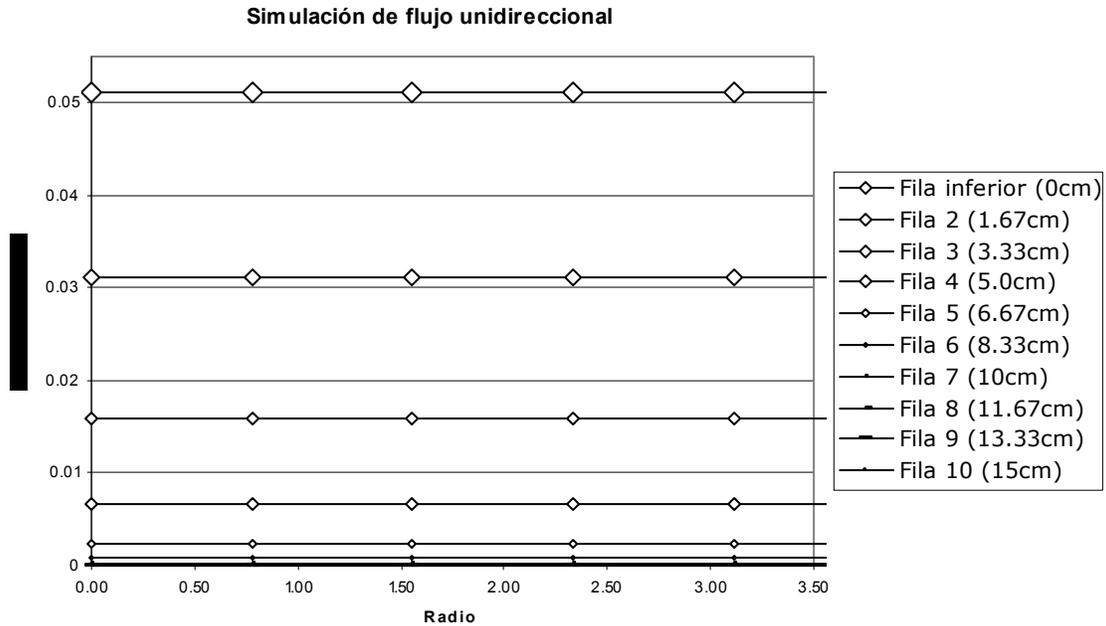


Figura 3.27. Concentración de cloruros en función del radio de la probeta. El nivel del electrolito es muy bajo y la penetración de cloruros parece ser unidireccional.

Los datos que se reportan en la Tabla 14 y en la figura 3.25 (Concentración de cloruros en el experimento de Jesús Chávez), al ser comparados con los datos de la Tabla 16, (Concentraciones en función de la distancia calculadas a través de el programa), se encuentran valores similares en las primeras posiciones, tanto en magnitud como el tendencia, lo que hace pensar que el efecto de capilaridad es significativo en los datos experimentales. Sin embargo, para fines prácticos la concentración superficial y hasta el nodo 5 es muy parecida, lo que proporciona validez al modelo aquí planteado, tomando en cuenta que solo considera penetración de cloruros por difusión.

---

## **CAPÍTULO 4 Discusión**

### **4.1 Discusión general**

La base para el análisis de datos obtenidos experimentalmente son los datos de mapeo de **potenciales de corrosión**, ya que es mediante este tipo de prueba que se tiene una idea del estado actual de cualquier tipo de estructura reforzada por varillas de acero. Es mediante estos valores que se procede a realizar otro tipo de pruebas más detalladas y que ofrecen mayor información para proceder a una posible reparación de la estructura.

De esta manera, al monitorear los potenciales de las probetas de concreto reforzado antes de exponerlas al electrolito, es evidente que, a pesar de tener cierto contenido de cloruros desde el amasado de la mezcla, estas pequeñas estructuras mostraron un comportamiento pasivo, debido entre otras cosas a la protección natural que brinda el concreto al acero de refuerzo, a la baja movilidad iónica y a la baja disponibilidad de oxígeno, entre otros factores, como se observa en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4.

Una vez que las probetas han sido sumergidas, es posible verificar que ciertos factores controlan la corrosión del acero, entre los cuales destacan, la humectación y la saturación por el electrolito, debida a la cantidad y distribución de poros en la matriz del concreto. Lo anterior es evidente ya que a las pocas horas de haberlas sumergido y al presentarse la hidratación del concreto, los potenciales se activan desplazándose hacia valores más negativos, indicando la inmediata inestabilidad de la capa pasiva por efecto de la movilidad iónica, que altera la capa pasiva. Se presume que la presencia de agua en la matriz de concreto tiene control en la degradación de la estructura, ya que al estar en presencia del acero, la reducción del agua se convierte en un factor condicionante.

Algunas de las especies de mayor importancia para que se presente la disolución anódica son, cloruros, sulfatos, bióxido de carbono (superficial), oxígeno disuelto en electrolito que satura los poros de la matriz de concreto, entre otros. Sin embargo el ingreso de estas especies está controlado directamente por la humectación de la probeta.

Al sumergir las probetas, la presencia de agua y oxígeno alrededor del acero permite la disolución anódica acelerada por efecto de las reacciones 10 y 11 que se muestran más adelante.

La reacción catódica demanda una gran cantidad de electrones pero mantiene alcalino el medio. Al existir la presencia de dióxido de carbono, el comienzo de la acidificación del medio circundante al acero de refuerzo es inevitable. De acuerdo con las especies que se encuentran presentes en el sistema, se establece una diferencia de potencial con el acero, que genera una celda electroquímica y la disolución anódica de éste, tal como se muestra en la Figura 4.1 y mediante las ecuaciones 10 y 11.



Al encontrarse los iones en una baja concentración, estos tendrán una mayor movilidad al igual que en una solución diluida, por ello la pronta inestabilidad de la capa pasiva; es decir, al no haber demasiados iones, disminuye la cantidad de choques entre iones, permitiendo un libre tránsito de estos. Sin embargo, lo anterior dependerá del nivel de hidratación de la probeta, así pues, la mayor movilidad de los iones se alcanzará cuando la probeta se encuentre totalmente saturada.

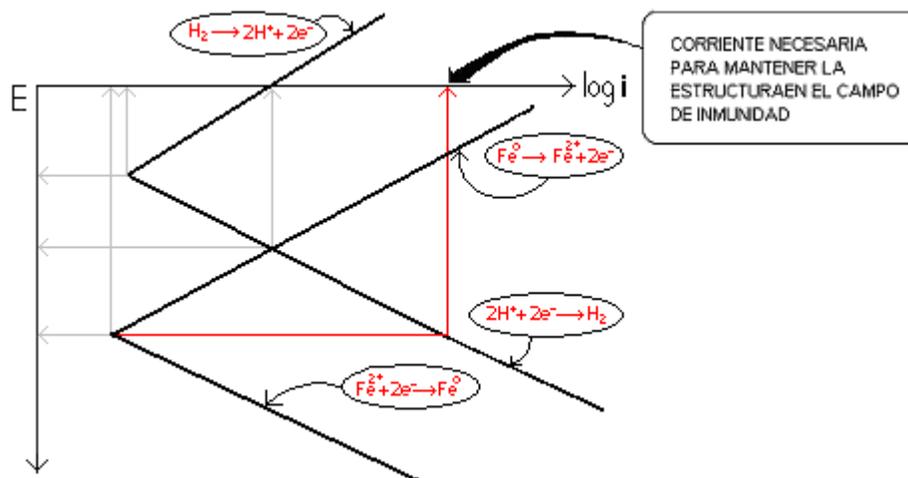
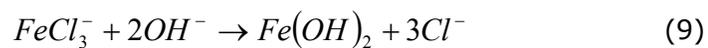
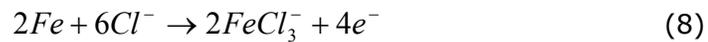


Figura 4.1, Disolución anódica de las barras de acero por efecto de la evolución de hidrógeno al perder alcalinidad del medio circundante.

Al no haber movilidad iónica por la baja hidratación, o bien un transporte de masa limitado, el acero de refuerzo es capaz de formar una película pasivante que impida su deterioro, sin embargo al humectarse la probeta los iones cuentan con un medio para desplazarse por efecto de la diferencia de concentración aproximándose a la interfase acero-concreto, para formar una especie cargada ( $FeCl_3^{-}$ ), que por

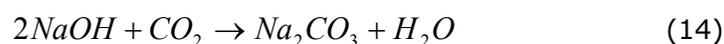
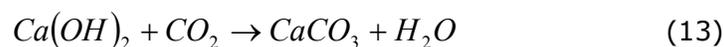
contradifusión llegará a otra zona con mayor concentración de iones  $\text{OH}^-$ , para generar una especie mas estable ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), liberando los iones  $\text{Cl}^-$ , y logrando que el proceso se lleve a cabo una y otra vez y agravándose por efecto del aumento en la concentración de cloruros a través del tiempo.

Una vez que se ha alcanzado una concentración suficiente de iones cloruro capaz de desestabilizar la capa pasiva, el mecanismo de reacción se representa a través de las siguientes reacciones, que tienen lugar alrededor de la interfase:



Una colaboración de la reducción del agua y el mecanismo de acción de los cloruros, explican el valor del potencial de corrosión al rededor de los -0.6V. Sin embargo, es claro que el efecto del oleaje aumenta y acelera la difusión de cloruros, acercando el valor del potencial de corrosión hacia los -0.7V, (cerca de 0.1V de diferencia), lo cual es importante ya que indica que una mayor densidad de corriente pasa por el sistema, pero manteniendo como mecanismo controlante la difusión, que a pesar de todo aumenta la velocidad de corrosión.

Por otra parte, en la zona seca de las probetas, por la naturaleza del medio que la rodea, las reacciones que se llevan a cabo son distintas debido a que el concreto permite el ingreso de aire que contiene  $\text{CO}_2$ , siendo dañino a la estructura de refuerzo, debido a las reacciones de carbonatación:



En las zonas anódicas formadas en la superficie de la varilla la reacción de disolución será:



Los electrones viajarán de las zonas anódicas hacia las zonas catódicas a través de la misma varilla, donde serán consumidos en la reacción de reducción del agua en mayor proporción debido al pH:



Lo anterior se agrava con la existencia de los efectos combinados de secado y mojado que "empuja" las especies dañinas, activando las zonas con menor concentración de iones  $\text{OH}^-$  y pasivando las zonas con alta concentración de iones  $\text{H}^+$ . Por la zona de salpique en una probeta semi-sumergida, el fenómeno es una combinación de ambos mecanismos. Es por ello que el deterioro de esta zona es mayor y más acelerado.

Los cambios tan radicales de potencial definen una activación de las probetas horas después de haberlas sumergido. Esta activación se debe a la hidratación de la probeta y a la reducción del agua como principal contribuyente, que como ya se mencionó promueve la movilidad de los iones.

En todas las probetas al analizar solo las varillas centrales, es posible observar, una clara tendencia, siendo la parte superior de la probeta la que presenta potenciales más pasivos y la posición inferior de medición la que presenta potenciales más activos. Lo anterior se debe a que existe una mayor disponibilidad de oxígeno en la parte superior, mientras que en la parte inferior, la probeta está protegida por el concreto.

El mismo comportamiento se observa con mayor claridad en la figura 3.5, el cual muestra el comportamiento de la varilla central, que describe una diferencia de potencial cercana a 0.2V entre las posiciones superior e inferior. Al revisar y comparar este comportamiento de PT con el de las probetas PE y PO. Se observa que a causa del grado de humedad, los potenciales de corrosión en una misma varilla siguen la misma tendencia que PT pero en magnitudes distintas y con una diferencia de potencial menor. Así, la diferencia de potencial mayor entre las posiciones superior e inferior de una misma varilla, la presenta la probeta PT, seguida de PE y finalmente en PO se observa que los potenciales guardan una diferencia de potencial entre dichas posiciones cercana a cero. Es decir, el efecto del oleaje evita la formación de macropilas a lo largo de la barra de refuerzo pero de acuerdo con la magnitud del potencial, existe un mayor deterioro, lo cual puede explicarse ya que por la naturaleza del medio existirá una corrosión por picadura y tal vez demasiadas picaduras, que desde el punto de vista macroscópico simularía una corrosión homogénea.

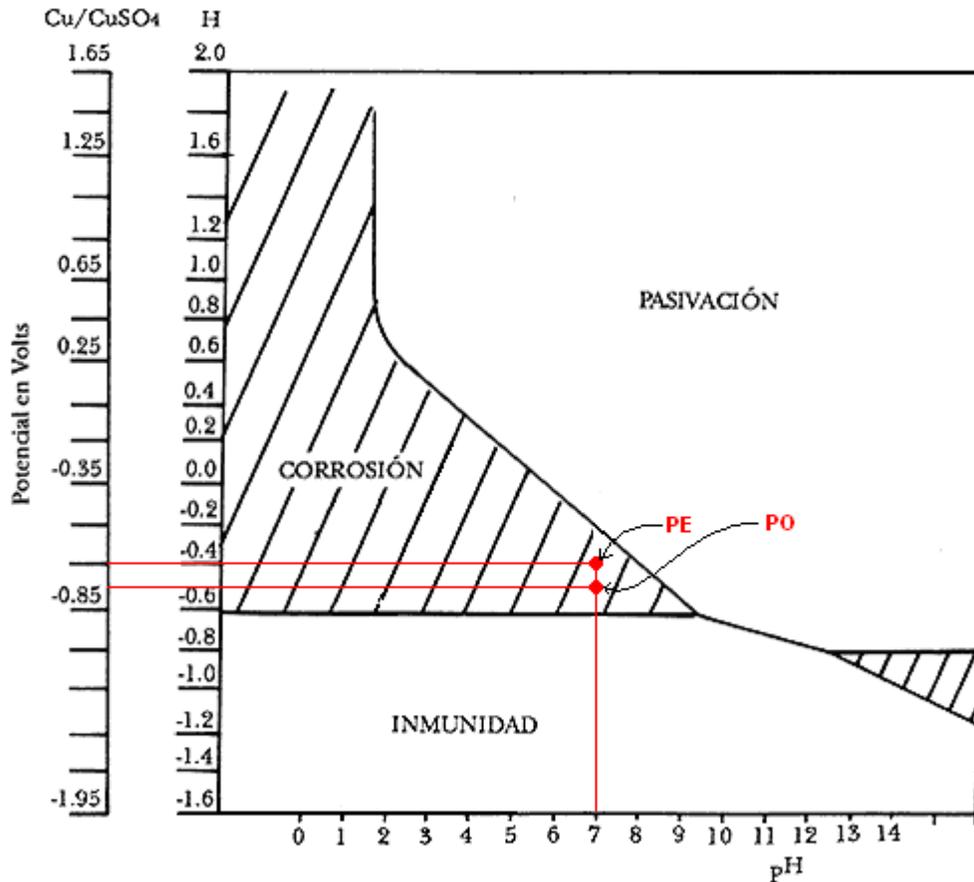


Figura 4.2. Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe) [2].

Comparando este comportamiento con el de las probetas PE con PO, se verifica que existe una estrecha dependencia con la cinética del medio. La concentración de oxígeno también sufre dicha dependencia, visible en la disponibilidad de oxígeno para llevar a cabo las reacciones de oxidación. En el medio agitado, el ingreso de oxígeno además de otras especies es mayor que en el medio estable.

Comparando los potenciales de las probetas con el diagrama de Pourbaix (Figura 4.2), solo con fines de comparación, y por supuesto sin considerar la cinética, es posible observar que a pH = 7, como con el que cuenta el electrolito en cuestión, la estructura en general se encuentra en una zona de corrosión.

La **resistividad** del medio es un factor de gran importancia, ya que el valor de este parámetro facilita o restringe el acceso de especies cargadas. De ahí que se haya decidido realizar dicho análisis a las probetas de concreto. Se obtuvieron las figuras 3.8, 3.9 y 3.10, los cuales muestran el comportamiento de las probetas respecto a la altura de medición.

Analizando las figuras anteriores se observa inicialmente que el grado de humedad de las probetas disminuye el valor de la resistividad. Así para PT se tienen los valores mas altos en magnitud de 1000 k $\Omega$ -cm, presentando los valores más altos en la parte superior de la probeta e indicando que existe un riesgo prácticamente nulo de corrosión, se observan valores de magnitud cercana a los 300 k $\Omega$ -cm en la parte media que indican aún, poco riesgo de corrosión y finalmente los valores más bajos en la parte inferior, cercanos a los 200 k $\Omega$ -cm, que indican un riesgo moderado de corrosión. De lo anterior se deduce que la parte inferior cuenta con cierto grado de hidratación, el cual no es comparable con las probetas semi-sumergidas pero que tiene cierto efecto sobre los valores de resistividad, que como criterio general implica un riesgo despreciable.

Respecto a la probeta PE, en la figura 3.9 los valores de resistividad se encuentran en un rango comprendido entre 1 y 3.5 k $\Omega$ -cm, cuyos valores se deben a una mayor hidratación de la matriz de concreto y a la facilidad de tránsito de la corriente por cierta concentración de cloruros en la probeta.

Al aplicar el criterio general, se observa un alto riesgo por corrosión, además de que en la parte media de la probeta, se encuentran los valores más bajos de resistividad (1.6 k $\Omega$ -cm) debido tal vez, a la combinación de mecanismos de corrosión (cloruros, reducción de agua y difusión de oxígeno) en esta pequeña zona. La parte baja de la probeta cuenta generalmente con los valores más altos debido probablemente a una mayor concentración de cloruros por la saturación total de la matriz de concreto que dificulta la difusión de cloruros.

Finalmente, la parte superior cuenta con cambios continuos de resistividad en función del tiempo. Este comportamiento es debido a la hidratación progresiva del concreto en dicha zona. Es de esperarse que al obtener una mayor hidratación en función del tiempo, el valor de la resistividad disminuya de una forma mas lenta que en la zona media, pero poniendo en riesgo la estructura con un alto riesgo de corrosión.

Al analizar el comportamiento resistivo de la probeta en condiciones de oleaje se observa que se obtienen valores altos de resistividad en la base de la probeta, seguidos en magnitud por los valores de la parte media y con los valores mínimos en la parte superior. Este comportamiento parece ser más ordenado pero inverso al esperado ya que al existir una mayor hidratación de la matriz de concreto en la parte inferior los valores de resistividad deberían ser más bajos que en la parte superior. Y aplicando el criterio general de la referencia [8], la probeta en general corre un alto riesgo por corrosión.

Dicho comportamiento se explica a través de la concentración de cloruros en esta zona que permiten una mayor conductividad cuando existe una hidratación de la probeta y los cloruros se encuentran a bajas concentraciones. Esta condición se hace más notable en PO debido a que el movimiento del electrolito promueve la hidratación de la probeta por capilaridad.

La ley de migración independiente de los iones de Kohlrausch y la teoría de las disoluciones diluidas apoya esta aseveración y se basa en que, al haber una menor concentración de iones en un electrolito, los choques entre las partículas cargadas son menores; permitiendo el libre tránsito de electrones. Lo anterior no sucede en PE ya que el grado de hidratación en la probeta es menor, además de ser más marcado (prácticamente una zona seca y una hidratada) y aunque la concentración de iones cloruro es baja no existe la misma movilidad iónica que en PO [28].

En el caso de las probetas semi-sumergidas el comportamiento resistivo del concreto, en general, decrece con el tiempo. Sin embargo, a diferencia de la probeta testigo, los valores de resistividad son más bajos, indicando que será más fácil propiciar el deterioro en las probetas por un efecto difusivo de iones y oxidación del acero. Los valores de resistividad para la probeta con electrolito estancado son más altos que para la probeta con electrolito agitado, en magnitud de 1 k $\Omega$ -cm, aproximadamente. Para PO, se observa que la resistividad decrece conforme se llega a la parte superior de la probeta por una hidratación más homogénea, mientras que en PE, es posible observar los valores mínimos en la parte media de la probeta, debido a que se tiene las zonas de hidratación de la probeta "delimitadas".

En general, se observa un decremento en el valor de la resistividad al variar la altura de las probetas, lo cual indica que es probable un tránsito más eficiente de la corriente por la presencia del ión cloruro, que ayuda a verificar el aumento de la difusión del ión en la matriz de la estructura.

Para el caso de la probeta testigo, en los primeros meses, se observa que la resistividad aumenta respecto a la primera evaluación. Esto explica y apoya que los valores en el potencial de corrosión relativamente bajos (alrededor de  $-0.1V$ ) y que la velocidad de corrosión también sea mínima, lo que se analizará mas tarde.

Ya que el deterioro de las probetas resulta acelerado respecto al de una estructura seca, pero lento para apreciar una reducción de espesor en la estructura de refuerzo, se propuso un **envejecimiento electroquímico**, dentro del mismo medio de evaluación (figura 3.14), para cada probeta. Dicho deterioro, se refiere a la determinación de la densidad de corriente que pasa por el sistema a lo largo de un año y la administración de dicha corriente en un tiempo menor (en este caso en periodos de 1.5h). El envejecimiento electroquímico logra la generación de los productos de corrosión que se formarían en un año de manera rápida, sin embargo las condiciones bajo las cuales sufre la corrosión el sistema son idénticas a lo largo del experimento, diferenciándose de la realidad, en la que ocurren cambios en las condiciones ambientales a las que se expone la estructura, y que influyen en el comportamiento del refuerzo, como son: variaciones en la temperatura de temporada en temporada e incluso durante el mismo día, cambios en la humedad relativa de la temporada, lluvias, sol, etc.

De esta manera, al realizar el envejecimiento, se pretende evaluar el deterioro de las estructuras en 3 años, con solo algunos meses de experimentación.

Al realizar el envejecimiento, la generación abrupta de productos de corrosión produce la difusión de los productos de corrosión desde la interfase acero-concreto hasta la superficie, llegando así hasta el seno del electrolito, el cual tiñe con el color característico de la herrumbre, lo que indica el rápido deterioro. Además durante la experimentación se observa la respuesta de la estructura en forma de una caída de potencial a valores por debajo de los  $-0.8V$ , que explica el porque de los productos de corrosión en el electrolito.

La respuesta del potencial de corrosión al finalizar el incremento de la densidad de corriente es un rápido ascenso en la escala de potencial hacia valores de  $-0.4$  y una caída hacia sus valores habituales en un lapso de 1.5h, aproximadamente.

Con la respuesta anterior del sistema se observa un envejecimiento electroquímico exitoso, a un año, el cual se ve reflejado en los datos experimentales de potencial de corrosión aproximadamente en las 3000 horas de evaluación, además de un aumento mínimo de la velocidad de corrosión, después de esto.

Por otra parte, analizando la respuesta de la resistencia a la polarización, se observa en la figura 3.17 que, PT tiene una gran diferencia en magnitud respecto a las probetas semi-sumergidas, y se observa una disminución en dicha magnitud en función del tiempo. Esto se debe a que al realizar las pruebas la probeta requería ser semi-sumergida para cerrar el circuito con el contra-electrodo.

De acuerdo con lo observado en la figura 3.17, los valores de  $R_p$  de las probetas semi-sumergidas presentan un incremento respecto al tiempo en un valor promedio aproximado a los  $20 \Omega$ , mientras que los valores de PT decaen en función del tiempo desde  $1000 \Omega$  hasta  $700 \Omega$ . Lo anterior explica que las resistividades sean bajas para las probetas PE y PO, en comparación con PT.

La **velocidad de corrosión** depende estrechamente de la  $R_p$ , y es un parámetro muy importante que se ha de tomar en cuenta para fines de diseño de estructuras de acero reforzado, es por ello que se ha puesto especial interés en este parámetro y por lo cual se ha calculado utilizando las dos aproximaciones disponibles.

Es necesario mencionar que con el uso de ambas ecuaciones se obtienen resultados similares en magnitud. Sin embargo, los resultados más conservadores para fines de diseño, se obtienen a través de la ecuación 16, la cual es utilizada para sistemas que están controlados por transferencia de carga y con la cual se obtienen valores más altos de velocidad de corrosión.

A través de la ecuación 17 se obtienen valores más bajos de velocidad de corrosión de forma general, pero es posible observar en la figura 3.18 que los valores presentan una oscilación menor que los obtenidos mediante la ecuación 16.

Es necesario destacar que los valores obtenidos utilizando ambas ecuaciones (16 y 17) son una aproximación del valor real de la velocidad de corrosión del sistema. Ya que al utilizar la ecuación 16, (para control por transferencia de carga) se pretende que las pendientes de Tafel son iguales y de la misma magnitud ( $120\text{mV/dec}$ ), lo cual, para cualquier sistema esto no es necesariamente cierto. Por otro lado, al utilizar la ecuación 17 (para control difusional) se está haciendo otro tipo de aproximación al utilizar el valor de la pendiente anódica, ya que la linealidad entre potencial y corriente no existe y que en el mejor de los casos dicha pendiente estará calculada a través de un modelo matemático que parte de datos pretafelianos o no lineales. De este modo, los datos obtenidos son una aproximación bastante correcta que no implica errores importantes.

Es posible observar que los valores más bajos en mm/año de forma general, se presentan en PT, mientras que para las probetas semi-sumergidas los valores son muy similares durante las primeras semanas de evaluación, obteniendo magnitudes de  $3.9E-2$  mm/año mediante la ecuación 16 y de  $1.3E-2$  mm/año, mediante la ecuación 17. Esta situación cambia conforme aumenta el tiempo de exposición, teniendo la velocidad de corrosión más alta en PO ligeramente por encima de PE durante la evaluación. Lo anterior indica que un medio agitado disminuye la resistencia a la polarización del sistema permitiendo una mayor densidad de corriente y por lo tanto una corrosión mas alta, que implica un deterioro mas acelerado de la estructura de refuerzo, dando una vida útil y una vida residual, menores.

De acuerdo con el manual DURAR [8], velocidades de corrosión superiores a  $11E-2$  mm/año, indican un nivel alto de corrosión asegurando una corrosión de tipo generalizada y en corrosión localizada como es el caso del sistema de estudio la penetración local máxima de ataque promedio en el tiempo de evaluación es de  $91\mu\text{m/año}$ , obtenida multiplicando por 10 el valor medio medido de  $i_{\text{corr}}$ .

De acuerdo con los datos experimentales la velocidad de corrosión en PT es menor que en PE y a su vez es menor en PO, lo cual coincide con las gráficas de concentración de cloruros en la interfase acero-concreto de ambas probetas, es decir existe un mayor deterioro en la probeta con oleaje debido a una mayor concentración de cloruros, además de una menor resistencia a la polarización por efecto de la humectación, y una mayor densidad de corriente.

De acuerdo con los valores que se representan la figura 3.18, y promediando la velocidad de corrosión a lo largo de toda la evaluación es posible tener un estimado de la vida útil de las probetas.

La vida útil es un valor indicativo de la duración en años que tendrá el acero de refuerzo, antes de una reducción del área transversal de la varilla en un 25%, para lo cual únicamente se han considerado los valores mas conservadores, es decir, los datos obtenidos mediante la ecuación 16, que son de una magnitud mayor y que para fines de diseño permiten tomar medidas preventivas para la protección y/o mantenimiento de la estructura, (véase Tabla 17).

Es posible apreciar en la tabla 17, que PO resulta ser la probeta menos durable, seguida por la probeta PE y finalmente la probeta más durable resulta ser la probeta testigo. Lo cual apoya la hipótesis de un mayor deterioro por efecto de oleaje en estructuras de concreto armado.

Tabla 17, valores para considerados calcular la vida útil en años a partir de la velocidad de corrosión y las características de la varilla de acero.

<b>Diámetro inicial</b>	9.525mm	<b>Radio varilla</b>	4.763mm
<b>Área transversal</b>	71.25mm <sup>2</sup>	<b>Radio a 25% reducción de área</b>	0.63mm
<b>25% área</b>	17.81mm <sup>2</sup>		<b>Vida útil en años</b>
<b>delta de área</b>	53.44mm <sup>2</sup>	<b>PT</b>	555
<b>diámetro final</b>	8.24mm	<b>PE</b>	16
<b>delta de diámetros</b>	1.27mm	<b>PO</b>	15

Además de utilizar las herramientas electroquímicas convencionales para determinar la velocidad de corrosión, se utilizan métodos adicionales como el uso de un nomograma que permite el mismo cálculo. La Figura 4.3, muestra un nomograma para determinar la vida útil de una estructura a partir de la concentración de cloruros [29]. Y de acuerdo con las características de las probetas evaluadas, con un espesor de 5cm y una relación a/c de 0.45 (C45 en el nomograma), se observa que se espera una vida útil aproximada a los 15 años, que coincide con la calculada.

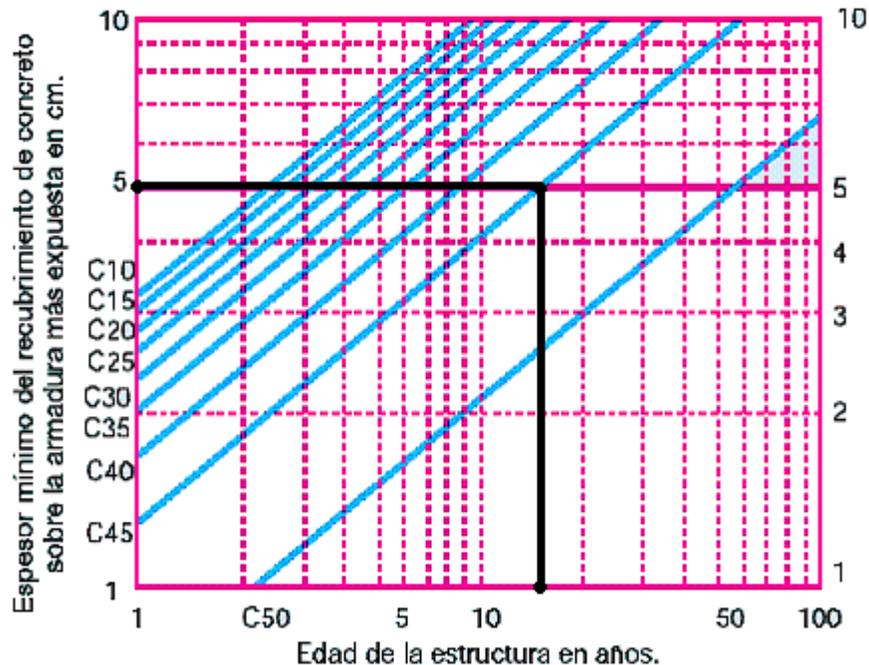


Figura 4.3. Nomograma para determinar la vida útil de estructuras expuestas en ambientes marinos [29].

Por último se realizó un **intercambio de probetas** del medio bajo al cual se encontraban expuestas las probetas PE y PO con el fin de observar que se trata del medio de exposición, la principal causa del deterioro de las probetas y no solo la

naturaleza de la matriz de concreto. Esto es, que debido a que la matriz en cada estructura de concreto no es homogénea pudiera presentar distintos niveles de protección al acero de refuerzo.

Así pues, se procedió al intercambio, y monitoreando durante las dos últimas semanas de evaluación, hallando resultados interesantes, que se muestran en la figura 3.19. Según esta figura los potenciales de la probeta decrecen hacia valores más activos de corrosión y muestran una diferencia de potencial menor, conforme avanza el tiempo, mientras que en la probeta PO, avanzan los valores de potencial hacia un estado de pasivación, pero favoreciendo la formación a nivel macroscópico de pila entre la parte inferior y la parte superior de la probeta, es decir, se marcan las dos zonas generadas en electrolito estable, una zona mojada y una zona seca.

Se observa que los potenciales de la probeta que se encontraba antes con electrolito en oleaje, avanzan hacia valores más positivos (del orden de  $-0.650$  V vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) durante las primeras 96 horas, sin embargo se observa una nueva activación de estos valores en función del tiempo, esta nueva activación no es comparable con los valores anteriores. De acuerdo con la referencia [30] la reducción de la actividad se atribuye a l hecho de que los sitios anódicos pueden cambiar a un comportamiento catódico. El cual se interpreta en términos de la actividad del par redox Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> y la cantidad de herrumbre acumulada en esos sitios. Así, existirá una pasivación y activación consecutiva de sitios, que en tiempos largos permanecerán anódicos si el concreto se mantiene húmedo.

De acuerdo con todo el análisis anterior es posible llegar a las conclusiones del presente trabajo, una vez que se han cubierto los objetivos del mismo.

---

## CAPÍTULO 5 Conclusiones.

- La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto se ve acelerada por el movimiento del electrolito que favorece la difusión de iones despasivantes, debido al distinto nivel de humectación de la probeta.
- El mapeo de potenciales ayuda a determinar el deterioro de las probetas en forma general, observándose que las probetas pasan a un estado activo por la humectación que provoca el medio con un riesgo de corrosión alto.
- De acuerdo con la geometría de las probetas, y apoyado por los potenciales, existe un mayor deterioro en las varillas de los extremos, debido a que hay una menor distancia entre la superficie del concreto y la interfase acero-concreto, que permite una mayor disponibilidad de oxígeno y de iones despasivantes.
- En las zonas con menor humedad de las estructuras, es apreciable que el deterioro es mayor que en la base las mismas, debido a una mayor disponibilidad de oxígeno, a la formación de pares galvánicos entre las diferentes zonas de concentración de cloruros a lo largo del refuerzo, una densidad de corriente mayor debido a una baja resistencia de la pasta de cemento hidratada, con lo cual se promueve la corrosión localizada del acero.
- La variación de la resistividad en función de la altura de las probetas se explica a través de la humectación de las mismas y la difusión de especies cargadas. Así, es posible decir que la baja concentración de la parte superior de PO acompañado de la gran humectación de la probeta, logran un mejor flujo de corriente.
- La resistencia del elemento a la corriente disminuye en función de la hidratación de la probeta, lo cual ayuda también a que la velocidad de corrosión sea mayor en una probeta mas hidratada, como la que produce el efecto del oleaje.
- La velocidad de corrosión promedio, en la probeta con electrolito en movimiento, es de 0.0425 mm/año, para la probeta con electrolito estable es de 0.0391 mm/año y para la probeta sin electrolito es de 0.0015 mm/año. Lo cual apoya y confirma la hipótesis de un mayor deterioro por efecto del oleaje.
- Tomando en cuenta un deterioro del 25% de adelgazamiento en la sección transversal, la probeta con electrolito en movimiento tiene una vida útil menor que la probeta con electrolito estable.

- El oleaje es responsable de un mayor deterioro de la estructura de concreto y se presenta en la zona intermedia o de salpique, aunque existe un mayor deterioro si además la estructura resulta quedar expuesta por efecto de los esfuerzos internos que producen los productos de corrosión y generan grietas.
- Mediante el perfil de concentración de cloruros obtenido por el modelo, se puede apreciar que una probeta de concreto bajo condiciones de oleaje alcanza la concentración de cloruros en el electrolito de forma más rápida que cuando el electrolito se encuentra en estado estable, además de que lo hace de forma heterogénea a lo largo de la barra de refuerzo.
- A través del modelo matemático es posible determinar una difusión de cloruros en la parte superior de una estructura sometida a oleaje más alta y más acelerada en comparación de una probeta semi-sumergida con electrolito estable.
- La vida útil obtenida a través del nomograma para las probetas evaluadas es aproximada a 15 años que se asemeja al valor calculado con datos obtenidos de forma experimental y el modelo matemático corrobora esta situación mediante el uso de los perfiles de concentración de cloruros calculados.

---

**CAPÍTULO 6 Referencias**

- [1] **Diccionario enciclopédico Quillet**  
Vol VI, Ed. Cumbre, México 1979.
- [2] Wietek, B. y Kunz, E.G.  
**Permanent monitoring for reinforced and prestressed concrete structures.**  
Ed. CMS Gmbh-A-6073 Innsbruck-Sistrans 290, Austria 1996.
- [3] Rodríguez P., Ramírez E., González J. A.  
**Methods for studying corrosion in reinforced concrete.**  
Magazine of Concrete Research 46, No. 167, 1194.
- [4] Glass G.K., Buenfeld N.R.  
**The representation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete.**  
Corrosion Science, Vol. 39, No. 5, 1001-1013, 1997.
- [5] Castro B. P., Castillo R.M., Campo J.J.  
**Corrosión en estructuras de concreto armado.**  
México: IMCYC.
- [6] Gerhard Neumann, Willard J. Pierson Jr.  
**Principles of physical oceanography,**  
Ed. Prentice-Hall. Inc. Englewood Cliffs, Estados Unidos, 1966.
- [7] Alfredo Cilento Sarli  
**Puentes y puentes colgantes.**  
Tecnología y Construcción Vol. 16-2, 9-24, 2000.
- [8] **DURAR** red temática XV.B  
**Durabilidad de la armadura, Manual de inspección evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado.**  
Programa iberoamericano de ciencia y tecnología para el desarrollo. Subprograma XV.
- [9] P. A. M. Basheer, P. R. V. Gilleece.  
**Monitoring electrical resistance of concretes containing alternative cementitious materials to asses their resistance to chloride penetration.**  
Cement And Concrete Composites 24, 437-449, 2002.
- [10] Hugo Barrera, Horacio Perez, Román Sandoval.  
**La carbonatación en edificios de Santiago.**  
Depto. Ing. OO.CC.U. de Santiago de Chile, 2003.

- [11] Neftalí Alvarado Rodriguez  
**Características del concreto.**  
http://www.construaprende.com/Trabajos/, México, 2001.
- [12] SICARTSA  
**Varillas corrugadas.**  
http://www.villacero.com/pdf\_esp/no\_planos/Varilla%20Corrugada/VarAIC.pdf
- [13] **Siderurgica Tultitlán**  
<http://www.sidertul.com.mx/nuestros.html>, México 2004.
- [14] **Código de la edificación.**  
<http://www.construir.com/Edifica/document/normas06.htm> 2ª Edición, 1949.
- [15] **Reglamento de la Construcción del Distrito Federal**  
Diario Oficial de la Federación, (02 de Agosto de 1993).
- [16] Javier Ávila Mendoza y Joan Genescá Llongueras  
**Más allá de la herrumbre II "La lucha contra la corrosión"**  
La ciencia para todos, Fondo de cultura económica, México, 1999.
- [17] Chang R.  
**Química general**  
Ed. McGraw-Hill, México 1999.
- [18] Marcela Vázquez y Raúl Fernández  
**La corrosión ataca desde adentro, ¿Que hacer cuando el enemigo está instalado?**  
Revista Ciencia Hoy en línea, Vol. 14, No. 82, Agosto-Septiembre 2004.
- [19] Capozucca R.  
**Damage of reinforced concrete due to reinforcement corrosion. Construction and building materials.**  
Vol. IX, No.5,195-303, 1995.
- [20] Maldonado L.  
**Corrosión del acero de refuerzo:** Revisión del estado del arte en México.  
Dpto. de Física Aplicada, Ed. Cinvestav-Mérida, México 1995.
- [21] Byung Hwan Oh, Bong Seok Jang  
**Chloride diffusion analysis of concrete structures considering effects of reinforcements.**  
ACI Materials Journal, V.100. No. 2, Marzo-Abril, 2003.
- [22] Szekely Julian,  
**Fenómenos de flujo de fluidos en procesamiento de metales.**  
Instituto Tecnológico de Massachusetts, Ed. LIMUSA, México 1988.

- [23] Ramón M<sup>a</sup> Gutiérrez Serret, José Lozano Pedroche y Raúl Atienza  
**Los modelos físicos a escala reducida y la simulación de maniobras de buques.**  
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. España 2000.
- [24] ASTM standards.  
**Especificación estándar para sustituto de agua de mar**  
Clasificación (ASTM D1141-86), 1986.
- [25] Daniel Cusson, Noel P. Mailvaganam  
**Monitoring and evaluation techniques for corrosion inhibiting systems in reconstructed bridge barrier walls**  
Institute for research in construction, Canadá 1999.
- [26] Y. Meas, F. J. Rodríguez, J. Genescá, J. Mendoza, R. Durán, J. Uruchurtu, J. M. Malo, E. A. Martínez, C. R. Arganiz, T. Pérez, A. Martínez, J. G. Chacón, C. Gaona, F. M. Almeraya, J. G. Gonzalez  
**Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión,**  
Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
- [27] Jesús A. Chávez M., Hildebrando B. Rios  
**Perfiles de penetración de cloruros en estado iónico en concretos del rango a/c, 045 a 0965.**  
2003.
- [28] John O´m. Bockris, Amulya K. N. Reddy  
**Electroquímica moderna**  
Vol. 2, Ed. Reverté, España 1980.
- [29] Paulo Roberto do Lago  
**Estructuras de concreto, Proyectar para la durabilidad**  
Sección colombiana del ACI, Colombia, 2000.
- [30] Alonso C., Andrade C., Izquierdo M., Novoa X. R., Pérez M.C.  
**Effect of protective oxide scales in the macrogalvanic behaviour of concrete reinforcement.**  
Corrosion science, Vol. 40, No. 8, 1379-1389, 1998.

## Apéndice 1

### Especificación estándar para sustituto de agua de mar.

Designación **ASTM D1141 86**

Las concentraciones de agua de mar varían dependiendo de la localización, sales con contenidos menores a los 0.005mg/L no se incluyen.

#### Referencia. (ASTM standards)

D1129 definición de términos relacionados al agua.

D1193 specification for reagent water

E 200 Practice for preparation, standarization and storage of standard solutions for chemical analysis.

Cloración – el peso del ión plata (g) requeridos para precipitar completamente los hálidos en 0.3285Kg de agua (g/Kg).

Pureza del agua (D1193 Type II) solución de hidróxidos de sodio (0.1N).

#### Solución 1

Disuelva las siguientes cantidades de sales para un volumen total de 7L.

MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	3889.0g	(555.6g/L)
CaCl <sub>2</sub> (anhydrous)	405.6g	(57.9g/L)
SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	14.8g	(2.1g/L)

#### Solución 2

Para preparar 7L de agua de mar sintética

KCl	486.2g	(69.5g/L)
NaHCO <sub>3</sub>	140.7g	(20.1g/L)
KBr	70.4g	(10.0g/L)
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	19.0g	(2.7g/L)
NaF	2.1g	(0.3g/L)

**Solución 3**

Para preparar 10L.

Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.994g
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.546g
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·3H <sub>2</sub> O	0.396g
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.151g
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.066g
AgNO <sub>3</sub>	0.0049g

Disolver AgNO<sub>3</sub> (0.049g de AgNO<sub>3</sub>) en 1L de agua adicionar 100mL de la solución 3 antes de diluir en los 10L.

Para 10L disolver 245.34 g de NaCl y 40.94g de NaSO<sub>4</sub> en 8L de agua, adicionar lentamente y agitando vigorosamente 200mL de la solución 1, y 100mL de la solución 2. Diluir en 10L, ajustar el pH en 8.2 con unos cuantos mililitros de NaOH (0.1N).

Para la preparación del agua de mar con metales pesados, se deberá agregar 10mL de solución 3 lentamente y agitar en 10L de agua preparada como en el paso anterior.

Composición	(g/L)
NaCl	24.53
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5.20
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.09
CaCl <sub>2</sub>	1.16
KCl	0.695
NaHCO <sub>3</sub>	0.201
KBr	0.101
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.027
SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.025
NaF	0.003
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9.94 E -5
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3.40 E -5
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3.08 E -5
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9.60 E -6
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6.60 E -6
AgNO <sub>3</sub>	4.90 E -7