



Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.

**CORROSION ELECTROQUIMICA DEL CONCRETO REFORZADO CON  
ADICIONES DE MICROSILICE**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

---

**DOCTOR EN CIENCIA DE MATERIALES.**

---

**PRESENTA:**

**M.I. MAURO UBER LOYA TELLO.**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN.**

**EGRESADO DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIA DE  
MATERIALES CON EL ACUERDO DE RECONOCIMIENTO OFICIAL DE  
ESTUDIOS 965032**

---

---

# ÍNDICE

Agradecimientos	
Listado de Figuras	i
Lista de Gráficas	iii
Lista de Tablas	v

## Introducción

Antecedentes

Hipótesis

Objetivos

## Capítulo I. Fundamentos de Corrosión en Concreto

1.1. Corrosión en Estructuras de Concreto

1.2. Corrosión del Acero de Refuerzo

1.3 Principios de Corrosión

1.3.1 Termodinámica de la Corrosión

1.3.2 Potencial del Electrodo.

1.3.3 Diagramas de Pourbaix (Potencial – pH)

1.4 Métodos de Medición

1.4.1. Potenciales de Corrosión

1.4.2 Velocidad de Corrosión

---

1.4.3 Ruido Electroquímico

1.4.3.1 Métodos de Análisis

1.4.3.1.1 Series de Tiempo

1.4.3.1.2 Métodos Estadísticos

## **Capítulo II. Metodología Experimental**

2.1 Materiales

2.2 Definición De Variables.

2.3 Métodos

2.3.1 Pruebas Mecánicas.

2.3.2 Nomenclatura De Las Probetas De Estudio.

2.3.3 Pruebas Electroquímicas.

2.3.4 Potenciales de Media Celda

2.3.5 Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

2.3.6 Ruido Electroquímico

2.3.6.1 Análisis De Ruido Electroquímico

2.4 Pruebas Químicas.

2.4.1 Cloruros

## **Capítulo III. Resultados y discusión**

3.1 Potenciales de Media Celda

3.2 Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)

3.3 Ruido Electroquímico

---

3.4 Comparativa de los resultados de laboratorio Vs Especímenes de prueba.

## **Capítulo IV. Conclusiones y Recomendaciones**

4.1. Conclusiones

4.2. Recomendaciones

## **Capitulo V. Referencias**

5.1. Referencias

---

## **Dedicatoria.**

**A mi esposa e hijos Cristy, Alexa y Uber.**

---

---

## Agradecimientos

- A Dios por todas las bendiciones que me ha otorgado.
- A mi esposa por su amor, comprensión y apoyo.
- A mis padres Ruth y Mauro, por su amor, apoyo y buen ejemplo, a mis hermanos por su cariño y buenos recuerdos y a los amigos que han compartido diferentes etapas de mi vida dándome apoyo, consejo y gratos recuerdos.
- Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados CIMAV S.C. por haberme acogido durante la elaboración de este trabajo y donde conocí a gente muy valiosa y buenos amigos.
- A la Dra. Citalli Gaona Tiburcio quien dirigió la mayor parte del tiempo esta investigación por su valioso tiempo y orientación
- Al Dr. Facundo Almeraya Calderón, investigador del Centro de Investigación en Materiales Avanzados, quien dirigió y asesoro la investigación, por su orientación y valiosos consejos para la elaboración este trabajo.
- A los maestros y técnicos de CIMAV, por transmitirme sus conocimientos y valiosa experiencia, principalmente al M.I Adán Borunda Terrazas.
- A mis sinodales Dr. Alberto Martínez Villafañe, Dr. Miguel Ángel Neri Flores, Dr. José Guadalupe Chacón Nava, Dr. Raúl Sandoval Javalera y al Dr. José Castañeda Ávila, por su tiempo y sugerencias en la revisión de la tesis de doctorado.
- Al personal de CIMAV por su siempre amable trato y facilidades para lograr la elaboración de este trabajo.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo económica sin el cual no hubiera sido posible realizar esta investigación.
- A todos ustedes

MUCHAS GRACIAS!!!

---

---

## Listado de Figuras

**Figura 1.** Corrosión del acero de refuerzo

**Figura 2.** Tipos de corrosión.

**Figura 3.** Ventajas al diseñar una estructura por durabilidad.

**Figura 4.** Estructura de concreto reforzado, con problemas de corrosión.

**Figura 5.** Serie de Potenciales de Oxidación de Algunas Aleaciones en la Industria.

**Figura 6.** Diagramas de Equilibrio Potencial – pH para el sistema Fe-H<sub>2</sub>O, a 25°C .

**Figura 7.** Diseño de celda de corrosión para Ruido Electroquímico

**Figura 8.** Ruido Electroquímico del acero de refuerzo en Cloruro de Sodio (NaCl)

**Figura 9.** a) Imagen general de la microsílíce (sin densificar), b) Esferas de microsílíce.

**Figura 10.** Prueba de revenimiento

**Figura 11.** Buena trabajabilidad en la prueba del revenimiento.

**Figura 12.** Varilla de acero corrugado

**Figura 13.** Fabricación de especímenes de ensayo.

**Figura 14.** Especímenes cabeceados para ensayos de compresión.

**Figura 15.** Probeta de concreto sin microsílíce sometida a prueba de resistencia Mecánica.

**Figura 16.** Potenciostato Gill8 (ACM Instruments).

**Figura 17.** Pantalla de configuración de la prueba de ruido electroquímico.

**Figura 18.** Probeta de concreto después hacer las perforaciones y recolección de polvo del concreto para elaborar las pruebas para la determinación de cloruros.

---

**Figura 22.** Esquema General de Mediciones de Potenciales de Corrosión.

**Figura 24.** Elemento de acero de Refuerzo (CS).

**Figura 25.** Elemento de acero de Refuerzo (CC).

**Figura 26.** Elemento de acero de Refuerzo (SS).

**Figura 27.** Elemento de acero de Refuerzo (SC).



---

## Listado de Gráficas

**Gráfica 1.** Valores de resistencia a la compresión de los elementos de concreto simple y con microsílíce.

**Gráfica 2.** Potenciales de corrosión de media celda.

**Gráfica 3.** Velocidad de corrosión obtenida por RPL.

**Gráfica 4.** Valores de Resistencia de (LPR) para los especímenes en estudio.

**Gráfica 5.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen CS.

**Gráfica 6.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen CC.

**Gráfica 7.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen SS.

**Gráfica 8.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen SC.

---

---

## Listado de Tablas

**Tabla 1.** Factores relacionados con el proceso de corrosión.

**Tabla 2.** Zonas predominantes en un diagrama de Pourbaix.

**Tabla 3.** Clasificación del ruido electroquímico, Malo<sup>1</sup>

**Tabla 4.** Clasificación del ruido electroquímico en función de la morfología.

**Tabla 5.** Requerimientos químicos del microsílíce.

**Tabla 6.** Proporcionamiento de la mezcla de concreto sin microsilíce.

**Tabla 7.** Proporcionamiento de la mezcla de concreto con microsilíce

**Tabla 8.** Nomenclatura de los especímenes en estudio.

**Tabla 9.** Interpretación de resultados de los potenciales de corrosión.

**Tabla 10.** Resultados RPL, semana 15.

**Tabla 11.** Resultados RPL, semana 23.

**Tabla 12.** Resultados RPL, semana 28

**Tabla 13.** Resultados RPL, semana 30.

**Tabla 14.** Resultados RPL, semana 36.

**Tabla 15.** Resultados RPL, semana 43.

**Tabla 16** Resultados RPL, semana 51.

**Tabla 17** Resultados RPL, semana 56.

**Tabla 18.** Resultados RPL, semana 63.

**Tabla 19** Resultados RPL, semana 70.

**Tabla 20.** Resultados RPL, semana 78.

---

**Tabla 21.** Resultados RPL, semana 93.

**Tabla 22.** Resultados RPL, semana 112.

**Tabla 23.** Criterio de Evaluación del nivel de corrosión.

**Tabla 24.** Parámetros Electroquímicos de Ruido Electroquímico

**Tabla 25.** Parámetros Electroquímicos de RPL y Ruido Electroquímico.

**Tabla 26.** Interpretación del índice de localización.

**Tabla 27.** Resultados del Índice de Localización para las formulaciones de  
Concretos en estudio.

---

---

# INTRODUCCION

## ANTECEDENTES.

Como ingenieros debemos elaborar estructuras y/o productos durables que al final de cuentas estén diseñados con materiales que nos permitan que estos a pesar de estar sujetos a esfuerzos y expuestos a las condiciones de trabajo permanezcan con las cualidades para las cuales fueron creadas. En lo general tenemos cinco grandes ramas de los materiales: Metales, cerámicos y vidrios, polímeros, compuestos y semiconductores<sup>2</sup>. Es el caso de las estructuras de concreto reforzado que utiliza metal para el refuerzo del concreto que a su vez es un composite o compuesto de agregados<sup>3</sup>. Las primeras observaciones de corrosión del acero embebido en el concreto fueron hechas a principios de este siglo, principalmente en ambientes marinos y plantas químicas, sin embargo es hasta mediados de este siglo cuando se inicia el estudio sistemático de este problema, habiendo llegado a ocupar un lugar muy importante dentro de las investigaciones sobre corrosión a nivel mundial, por los problemas y tipos de estructuras involucrados.

La corrosión electroquímica del concreto reforzado (del latín *corrodere* = corroer, destruir), se conocen los daños y desperfectos causados en el concreto por la acción agresiva de fluidos, gases húmedos, medio ambiente, etc. La corrosión o deterioro del concreto en sí presenta características químicas, de química coloidal, y de físico – química, mientras que la corrosión del concreto reforzado es principalmente de carácter electroquímico<sup>4</sup>.

---

---

La ausencia de ciertos factores y agentes agresivos proporcionan al acero de refuerzo, embebido en el concreto, un ambiente ideal para prevenir la corrosión de dicho acero, la calidad del concreto, colocado, compactado, y curado adecuadamente, proporcionan una alcalinidad alta y baja permeabilidad, protegiendo al acero de refuerzo. Sin embargo la entrada de humedad, electrolitos y oxígeno por difusión o mediante fisuras en el concreto, pueden destruir el medio pasivo existente. Entre los electrolitos, el cloruro de sodio parece ser el agente que más ataca al acero.

Los concretos pueden presentar un grado de protección que es, con frecuencia, una función de la calidad, espesor del recubrimiento y la continuidad de buenas prácticas constructivas. Sin embargo a pesar de la protección contra la corrosión que usualmente proporciona el concreto, se ha reportado un número desconcertante de casos de corrosión de aceros inmersos en el concreto. Esto sucede cuando están presentes cloruros u otros iones agresivos que inician la corrosión. La presencia de estos agentes agresivos puede provenir en algunas ocasiones de los mismos componentes del concreto, como son algunos acelerantes de fraguado que contienen por lo general productos corrosivos (por lo que en concretos armados se deben extremar precauciones), el agua adicionada al concreto en su fabricación, puede contener gran cantidad de cloruros. Otra forma de atacar al acero es mediante el ambiente externo difundiéndose a través del concreto, atacando el metal y produciendo óxidos con volumen mayor que el metal original, produciendo con esto, grandes presiones internas suficientes para fracturar el concreto<sup>5,6</sup>, lo que agudiza el problema por permitir ya sea más o más rápido el acceso de agentes nocivos.

Los métodos de control y protección de corrosión se basan en eliminar alguno de los cuatro elementos que conforman el sistema que inicia el proceso de

---

corrosión (ánodo, cátodo, conductor iónico, conductor electrónico), conocido también como Celda de Corrosión<sup>7</sup>.

Diversos métodos se han utilizado para proteger al concreto armado de la corrosión, comenzando por la calidad de los constituyentes de la mezcla (controlando las propiedades físico-químicas). Indirectamente se puede minimizar la corrosión con pinturas, revestimientos del acero y recubrimientos sobre el concreto, con protección catódica, agregando inhibidores de corrosión, removiendo los iones cloruro<sup>8,9</sup>, y re alcalinizando el concreto<sup>10</sup>. Estos dos últimos métodos se encuentran en período de investigación

En estructuras nuevas, el uso de un buen concreto, libre de sustancias nocivas e impermeable sería la mejor solución, ya que no existe mejor protección del refuerzo de acero que la película pasivante formada por la hidratación del cemento. Sin embargo, con el paso del tiempo es inevitable el deterioro del concreto, formándose grietas por las que se infiltran contaminantes que provocan el deterioro del material, lo cual se manifiesta con la aparición de manchas de corrosión en la estructura.



**Figura 1.** Corrosión del acero de refuerzo®

---

---

Las principales causas de la corrosión son las siguientes:

a) *Disponibilidad de oxígeno*. Como se vio anteriormente, éste es uno de los factores que más influyen en la corrosión; sin embargo, no existe mucha información sobre sus efectos en el concreto.

En estudios realizados se indica que la difusión del oxígeno está muy influenciada por el grado de saturación del concreto. En concreto húmedo, el oxígeno disuelto se difundirá principalmente como una solución; mientras que en un concreto parcialmente seco el oxígeno gaseoso se difundirá más rápidamente. Para que los iones ferrosos y el oxígeno se combinen, este último debe encontrarse disuelto.

Pocas veces se ha observado corrosión del acero en estructuras de concreto continuamente sumergidas, incluso en agua marina, esto se debe a lo siguiente<sup>11</sup>:

1. Se mantiene una alta alcalinidad (pH elevado);
2. Se tiene un reducido suministro de oxígeno; y
3. Hay una menor velocidad de difusión del oxígeno a través del concreto saturado.

b) *Iones cloruro (Cl<sup>-</sup>)*. Este es el contaminante que causa mayores daños por corrosión. Su intrusión en el concreto reforzado puede provocar la oxidación si al mismo tiempo hay oxígeno y humedad presentes. Los cloruros pueden penetrar el concreto de diversas maneras: ya sea intencionalmente, para acelerar la hidratación del cemento Portland; o accidentalmente, como contaminantes en los agregados, o por penetración de sales descongelantes, desechos industriales, y niebla o brisa

---

---

marina. Además, pueden introducirse a través de grietas y otros defectos de la estructura.

c) *Agua marina*. Por lo dicho anteriormente sobre los efectos dañinos de los cloruros en disminuir la estabilidad de la película protectora presente en el acero, es evidente que el concreto reforzado expuesto al agua o al rocío marino presenta un problema especial. La seria naturaleza de este problema se evidencia por las muchas estructuras costeras dañadas por la corrosión del refuerzo.

d) *Alcalinidad (pH)*. A mayor pH, el grado de corrosión es menor ya que ningún concreto o acero es durable en un ambiente ácido. Como los concretos tienen un pH mayor de 12.50, usualmente le proporcionan al acero una excelente protección. Sólo cuando hay presencia de sales o carbonatación, el refuerzo se vuelve vulnerable por la disminución en la alcalinidad. Según Pourbaix, cuando el pH se encuentra entre 13.0 y 18.0, el metal se halla en estado “pasivo” lo cual impide el desarrollo de la corrosión. Sólo cuando el pH alrededor de la varilla está por debajo de 9.0, se puede iniciar la corrosión.

e) *Ambiente físico del concreto*. Otro factor para que se presente la corrosión consiste en que se creen diferencias en el potencial electroquímico del sistema, como las que se presentan en el metal. Estas diferencias de potencial o voltajes también pueden darse en el concreto, ya sea por diferencias de su calidad o por las condiciones ambientales o de esfuerzos a que pueden estar sometidas dos partes de la estructura, siendo relativamente anódicas aquellas partes de la estructura que estén o hayan estado sometidas a grandes esfuerzos<sup>12</sup>.

f) *Grietas debidas a los esfuerzos actuantes*. La aparición de grietas en la estructura facilita la corrosión al permitir la intrusión de sales y de humedad de una manera más rápida. Además, el refuerzo interceptado por una grieta empieza a corroerse debido



---

---

a una pérdida de pasividad causada por el debilitamiento en la unión entre concreto y acero. Por otro lado, pequeñas imperfecciones debidas a la corrosión pueden causar una seria pérdida de resistencia a la tensión en el acero de refuerzo.

El concreto reforzado con varilla de acero es uno de los materiales de construcción más ampliamente sin embargo las estructuras que lo emplean tienen el inconveniente de ser susceptibles a la corrosión debido a la pérdida de protección natural ofrecida a la armadura por el recubrimiento del concreto. La corrosión en puentes, particularmente en ambientes marinos, es un problema grave que ha venido afectando al mundo, ya que se pueden presentar manifestaciones patológicas de significativa intensidad, lo que lleva a elevados costos de reparación de la estructura, posible reducción de su capacidad resistente a las cargas de servicio, falta de estética y dependiendo del grado de daño, podría verse afectada la seguridad de las personas<sup>13</sup>.

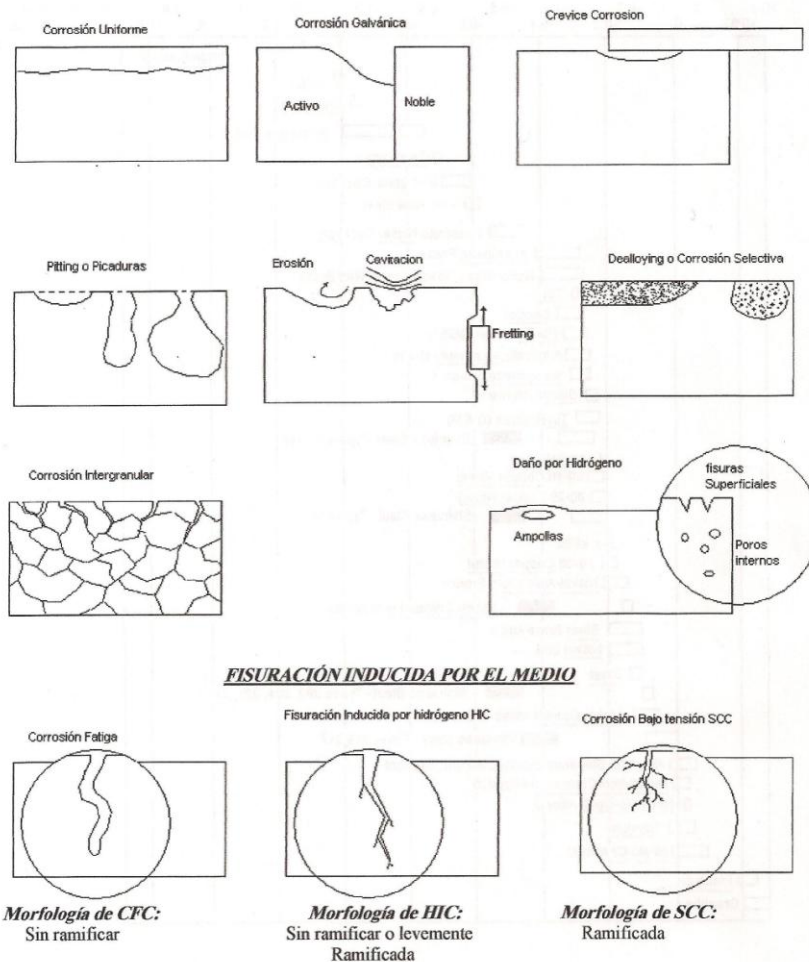
En los países industrializados, las pérdidas económicas causadas por la corrosión son elevadísimas, en Estados Unidos el costo directo por corrosión se estima en 276 mil millones de dólares por año, lo que representa el 3.1 por ciento del producto interno bruto (PIB) de dicho país<sup>14,15</sup>.

No obstante, a pesar de los grandes avances tecnológicos mundiales, el problema de la corrosión sigue sin ser entendido completamente, debido principalmente a la complejidad del proceso, esta representa el pago que el hombre asume al transformar minerales en metales útiles para su uso cotidiano.

La varilla de refuerzo, al ser fabricadas de acero, no escapa a este fenómeno debido a que es un material muy susceptible a oxidarse.

La degradación de las estructuras de concreto armado presenta un gran reto en cuanto al diseño y a la conservación de un número muy importante de estructuras que operan en el país, este problema se agudiza en zonas donde se

tienen ambientes agresivos, tal es el caso de las zonas marinas o lugares donde los contaminantes atmosféricos como el dióxido de carbono abundan.



**Figura 2.** Tipos de corrosión®

Ante tal problemática ha sido necesario el desarrollo de sistemas de protección contra la corrosión para alargar la vida útil de dichos materiales y las estructuras a las que pertenecen sobretodo en el caso particular del concreto con acero de refuerzo, y el analizar la vida útil de las estructuras bajo dichas condiciones, esto se realiza en ocasiones por métodos experimentales y otros combinación de experimentación y modelación<sup>16 17 18</sup>.

---

---

Las estructuras de concreto reforzado no escapan a este desarrollo, por lo que se han ideado técnicas y procedimientos que permiten incrementar la vida útil, ya sea mediante el diseño adecuado de una estructura o mediante la reparación de la misma, en lo referente a este último tema se está aun en la búsqueda de mejores materiales de reparación y no tener que volver a arreglar sitios ya reparados con anterioridad<sup>19</sup>.

Actualmente la gran mayoría de las investigaciones del cemento han estado encaminadas hacia dos direcciones; en primer lugar a tratar de mejorar sus características desarrollando cementos de alto desempeño, es decir; en mejorar la resistencia a la compresión y que las estructuras no se degraden con el tiempo (durabilidad) por ninguno de los ataques a las que son sometidas cotidianamente (sulfatos, ácidos y cloruros). En segundo lugar hacia la protección del medio ambiente, dado que la producción de cemento contribuye en forma notable a las emisiones de gases nocivos al ambiente principalmente Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

En los últimos veinte años el término “durabilidad” se ha estado escuchando con más frecuencia en la rama de la ingeniería civil. Países industrializados como los Estados Unidos, Japón y algunos en Europa (España, Francia, Gran Bretaña, etc.), han tomado a la durabilidad como un tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en estudios de investigación específicos<sup>20</sup>.

El concepto de vida útil en las estructuras es un tema que ha venido ganando importancia dentro del diseño y del campo del proceso constructivo; la vida útil es el periodo de tiempo necesario para alcanzar un determinado nivel de deterioro en una construcción.

Existen dos tipo de vida útil: la del proyecto (lo que se espera de la construcción según lo diseñado) y la de construcción (lo que se logra con lo realmente construido). La primera se define como el tiempo o vida de diseño

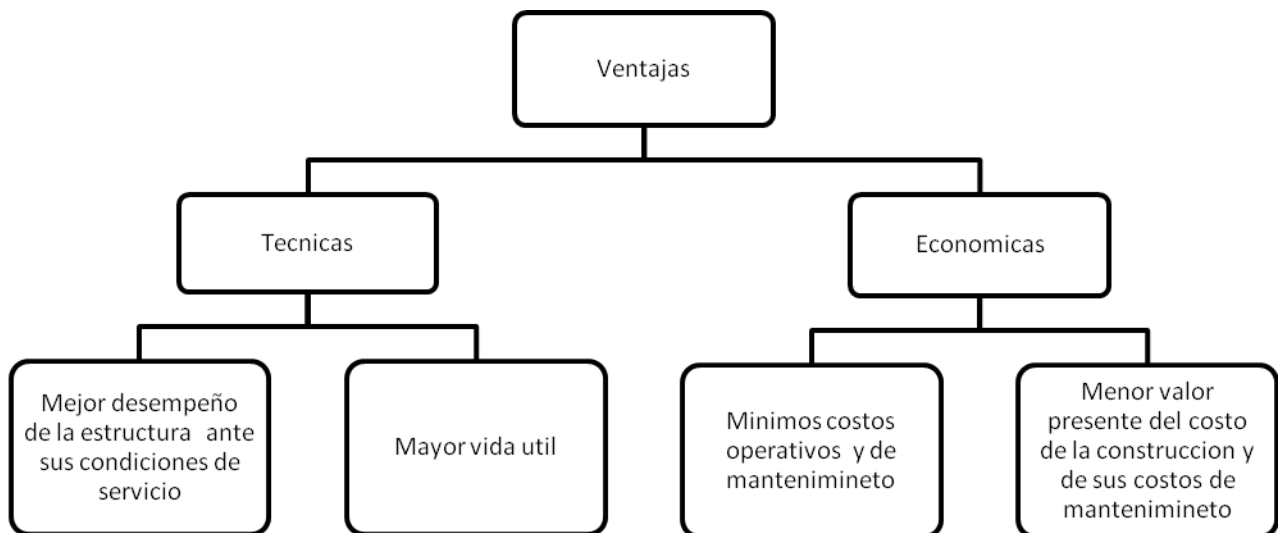
---

---

prevista por el diseñador, para el cual ni el tipo de agresión, ni la profundidad alcanzada por el agresor, ni la cuantía de este agresor en el concreto serán suficientes para dar inicio al deterioro de concreto reforzado. La vida útil del proyecto coincide con la fase de iniciación del ataque del medio agresor contra la estructura; durante esta fase alguna barrera protectora es vencida por el agresor, no obstante, no se ha debilitado aun la estructura ni los materiales que la componen.

La vida útil de servicio se define como el periodo que inicia desde la ejecución de la estructura hasta que se completa un nivel evidente de deterioro. En esta etapa se empiezan a evidenciar síntomas de deterioro tales como fisuras, desprendimiento del recubrimiento, herrumbre, entre otros<sup>21</sup>.

La experiencia ha demostrado que el costo por no considerar la durabilidad es mayor al que se invierte si se le considera. Es por ello importante diseñar obras durables, a continuación se muestran las figura 3 en las cuales se puede observar esquemáticamente las ventajas del diseño por durabilidad.



**Figura 3.** Ventajas al diseñar una estructura por durabilidad.®

---

---

En 1950 se comenzaron a estudiar las adiciones al cemento y sus ventajas en cuanto a resistencia, durabilidad, precios y protección del medio ambiente han sido demostradas indiscutiblemente<sup>22</sup>. Las adiciones mejoran el desempeño del cemento, porque densifican la matriz, disminuyendo la porosidad y aumentando la resistencia al ataque por penetración de agentes agresores (ácidos, sulfatos y cloruros, entre otros) con mejorías notables de la durabilidad, generando a su vez morteros y concretos de altas resistencias.

Las adiciones al cemento pueden ser o no puzolánicas, pues estas tienen la capacidad de fijar la cal libre en forma de hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$ ), conocido como portlandita y producir silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), densificando la matriz y aumentando las resistencias mecánicas y la durabilidad.

Las cuatro principales características que controlan la puzolanidad de un material son:

- Composición (que sea sílice o sílico aluminoso),
- Textura (en cuanto a la porosidad y el área superficial),
- Estructura (sea amorfa o cristalina) y
- Estabilidad química o reactividad.

Mientras más estable químicamente sea una partícula es menos reactiva. El área superficial depende del tamaño y la porosidad, a mayor porosidad mayor área superficial<sup>23 24</sup>.

Las puzolanas se pueden dividir en naturales o artificiales, como se describe a continuación:

1. Naturales: Cenizas volcánicas, tobas volcánicas, zeolitas, diatomitas (rocas sedimentarias de muy baja densidad) y radiolaritas (esqueletos de animales).

- 
- 
2. Artificiales: Cenizas volantes (fly ash), humo de sílice (silica fume – SF), cenizas de cascarilla de arroz, metacaolín, escorias de alto horno, y nano partículas.

En la actualidad las adiciones que han sido utilizadas con el propósito de inhibir la corrosión en estructuras de concreto son la ceniza volante, humo de sílice y escoria granulada de alto horno.

De lo anterior se desprende la hipótesis y objetivos del presente trabajo de investigación:

### **Hipótesis**

a) Una vez iniciada la incursión de iones cloruros en el concreto de los espécimes y estos lleguen al acero de refuerzo del concreto se activara el fenómeno de corrosión, lo que se espera es que al agregar microsilice y con ello obtener concretos mas densos esto retrase el desarrollo de corrosión.

b) Otro interes es saber si el hecho de introducir el acero de refuerzo con cierto grado de corrosión es dañino ya que se presume que la alcalinidad del concreto debe protegerlo, pero interesa conocer de que manera es afectado por las condiciones a las que se someteran los especimenes en este trabajo.

### **Objetivos**

- Caracterizar la corrosión del concreto con acero de refuerzo adicionando Microsilice. La determinación de la velocidad de corrosión se realizara por técnicas electroquímicas.

- 
- 
- Determinar la influencia de microsílises integrados al diseño de la mezcla del concreto
  - Evaluar la corrosión del acero de refuerzo en el desarrollo de corrosión y evaluar los tipos de corrosión que se presenten.

Para alcanzar estos objetivos se establece el desarrollo de tres capítulos, describiéndose a continuación.

En el capítulo 1 se plantean los principios de corrosión, el mecanismo de la corrosión en estructuras de concreto reforzado y las técnicas de medición.

En la metodología experimental, capítulo 2, se presentan los detalles de fabricación de especímenes, con los diferentes arreglos para este estudio, también se detallan los materiales utilizados, equipos de medición de corrosión necesarios, y parámetros experimentales para llevar a cabo esta investigación.

En el capítulo 3 se encuentran los resultados y el análisis de los mismos, presentando las gráficas de potencial de corrosión como función del tiempo de medición, así mismo se presentan los resultados de la técnica de resistencia a la polarización y las gráficas de ruido electroquímico (series de tiempo de ruido en corriente y potencial) que se obtuvieron del monitoreo.

---

Por último se presentan las conclusiones respecto al comportamiento de las vigas embebidas en los diferentes medios corrosivos, empleando la técnica de ruido electroquímico. Para finalizar este documento se tienen las referencias bibliográficas y los apéndices de resultados de esta investigación.



---

# CAPITULO 1.

## Fundamentos de Corrosion en Concreto

### 1.2. Corrosión en Estructuras de Concreto

El sistema acero – concreto, resulta ser una celda de corrosión que se constituye con el acero de refuerzo actuando como ánodo y cátodo, y el concreto más el medio ambiente actúan como electrolito.

Los procesos de corrosión de refuerzos metálicos embebidos en concreto son de naturaleza muy compleja, aún en los casos más simples. El proceso de corrosión está influenciado por numerosos factores que dependen de la composición química del concreto, la metalurgia del refuerzo, la mecánica del sistema, el ambiente, el uso de aditivos, etc. (ver Tabla 1)

---

<sup>a</sup> Costo de la corrosión en los Estados Unidos:

<http://www.corrosioncost.com/home.html>

<i>Factores dependientes del concreto</i>	<i>Factores dependientes del refuerzo metálico</i>	<i>Factores dependientes del medio de servicio</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permeabilidad</li> <li>• Porosidad</li> <li>• Recubrimientos</li> <li>• Tipos de cementos</li> <li>• Agregados</li> <li>• Aditivos</li> <li>• Puesta en obra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Naturaleza física y química del refuerzo</li> <li>• Condición superficial del refuerzo (óxido superficial, recubrimientos, etc.)</li> <li>• Solicitaciones mecánicas (tensión, compresión y torsión).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humedad relativa</li> <li>• Temperatura</li> <li>• Degradación biológica</li> <li>• Acción de diversas sustancias (Cl<sup>-</sup>, O<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>)</li> <li>• Corrientes parásitas</li> <li>• Protección catódica.</li> </ul>

**Tabla 1.** Factores relacionados con el proceso de corrosión<sup>25</sup>.

El concreto puede no ser capaz de proporcionar la protección requerida a los materiales embebidos en él, de acuerdo con las siguientes condiciones:

*Presencia de agrietamientos.* Comúnmente se cree necesario que existan agrietamientos para que la corrosión produzca daños extensos, lo cual es equívoco. El acero de refuerzo puede presentar corrosión aún en concreto no agrietado, si éste se encuentra bajo condiciones de exposición severa y si el material que cubre al acero de refuerzo es insuficiente.

El agrietamiento que se extiende hacia dentro desde la superficie del concreto contribuye a la corrosión, ya que puede proporcionar entrada a la humedad, al aire y a diversos contaminantes.

---

Las grietas estrechas perpendiculares a la dirección del material embebido, por lo general, no producen corrosión seria, excepto en condiciones de exposición severa, debido a que la corrosión es superficial y poco extensa. Las grietas más anchas, y en especial si son paralelas al material embebido en el concreto, pueden facilitar un mayor acceso a las sustancias corrosivas y así acelerar los ataques contribuyendo a otras formas de corrosión.

*Carbonatación.* El cemento Portland está sujeto a reacciones químicas producidas por el bióxido de carbono de la atmósfera. Dicha reacción, llamada carbonatación, aumenta la contracción del concreto al secarse, y, por consiguiente, la propensión del concreto a agrietarse. La carbonatación también reduce la alcalinidad del concreto, reduciendo su eficiencia como medio protector.

En el concreto de buena calidad, que haya sido adecuadamente compactado y curado, la carbonatación no penetra con profundidad, sólo en el concreto permeable o poroso, o cuando el refuerzo está relativamente cerca de la superficie; la corrosión originada por este motivo puede convertirse en un serio problema.

Una circunstancia a tener en cuenta es que la corrosión desencadenada por la carbonatación puede dar lugar a capas de herrumbre con características protectoras que atenúan la velocidad de corrosión subsiguiente, por lo que la carbonatación es un fenómeno mucho menos peligroso que la corrosión por cloruros<sup>26</sup>.

*Fugas de corriente eléctrica.* El paso de corriente eléctrica a través del concreto o del refuerzo utilizado en él, puede originar una rápida y seria corrosión.

---

---

Este tipo de corriente es producida frecuentemente por fugas de sistemas eléctricos, o por no haber dispuesto de un medio positivo y permanente para conectar los sistemas eléctricos a tierra. Se debe considerar que este tipo de corrosión siempre puede presentarse en las cercanías de cualquier equipo de corriente especialmente si en el concreto, o en contacto con él, se encuentra un electrolito tal como una solución de cloruro de sodio o de calcio.

## **1.2. Corrosión del Acero de Refuerzo**

La corrosión del acero de refuerzo juega un papel muy importante en la duración del tiempo de servicio de una estructura de concreto. Esta corrosión del acero de refuerzo en el concreto tiene dos principales consecuencias:

- 1) Por efecto de la corrosión se reduce la sección de las varillas de acero, disminuye su adherencia con el concreto y se degradan sus propiedades mecánicas, con lo cual disminuye su capacidad de trabajo estructural.
- 2) Como resultado de la corrosión, se originan productos (herrumbre) cuyo volumen es varias veces superior al de los elementos que les dan origen, y este aumento de volumen trae como consecuencia tensiones internas que agrietan progresivamente el recubrimiento del concreto, e incluso lo desprenden totalmente en situaciones de corrosión avanzada.

Las varillas de acero de refuerzo embebidas en el concreto, suelen recibir de éste una adecuada protección contra la corrosión electroquímica por dos conceptos, como a continuación se explica:

- 
- 
- 1) Para que se genere la corrosión es indispensable la presencia del electrólito, es decir, que en los poros del concreto exista humedad, y que además exista oxígeno para que se produzcan las reacciones químicas inherentes al proceso electrolítico. La sola falta de uno de estos dos participantes (agua y oxígeno) es suficiente para inhibir la corrosión, de este modo, el acero de refuerzo no se corroe sensiblemente si el concreto que lo circunda permanece seco, ni tampoco si el concreto se halla continuamente inmerso en agua, porque en este caso no hay suministro de oxígeno.

En condiciones en que hay riesgo de corrosión, la protección del concreto en este aspecto estriba en que el recubrimiento sobre las varillas impida la penetración del agua y el aire externos, lo cual a su vez depende del espesor del recubrimiento y de la permeabilidad del concreto<sup>27</sup>.

- 2) En general, el concreto protege bien de la corrosión al acero de refuerzo aunque estén sometidos frecuentemente a la acción de ambientes desfavorables. La acción protectora puede atribuirse, a la elevada alcalinidad y relativamente elevada resistencia eléctrica del concreto. La reacción del agua existente en los poros es alcalina, debida al hidróxido cálcico liberado en cantidades considerables. Su pH suele estar comprendido entre 10 y 13, eliminando así la posibilidad de corrosión del acero. Si el pH de esta agua desciende hasta valores inferiores a 9 (debido carbonatación, por ejemplo), puede producirse una corrosión del acero debida a la acción del aire que penetra en los poros, suponiendo que existan simultáneamente agua y O<sub>2</sub><sup>28</sup>.



**Figura 4.** Estructura de concreto reforzado, con problemas de corrosión.

### 1.3 Principios de Corrosión

El proceso de corrosión, desde el punto de vista electroquímico, siempre denota la existencia de una zona anódica (susceptible a la corrosión), zona catódica y de un medio conductor (electrolito), además de un buen conductor o contacto eléctrico entre ánodo y cátodo. Es imprescindible que existan estos tres elementos para que se dé el proceso de corrosión. Cuando los metales se encuentren en ambientes húmedos como: el suelo, la atmósfera, el agua de mar, las soluciones ácidas, sales fundidas, etc; y en presencia de gases a altas temperaturas, se dice que la naturaleza de la corrosión resulta ser un proceso electroquímico.

---

---

Desde el siglo XVII, se hicieron las primeras hipótesis acerca de la naturaleza electroquímica de la corrosión. En el año de 1771, el físico Luigi Galvani, de origen italiano, publica sus estudios sobre la acción electroquímica en el proceso de la corrosión, diciendo que la combinación de dos conductores eléctricos (electrodos) sumergidos en un medio conductor (electrolito), a lo que se le denomina actualmente Pila Galvánica, convierte la energía química en energía eléctrica. Cuando se cierra el circuito de una de estas pilas (uniendo ambos polos con un alambre de baja resistencia), fluye corriente positiva por la unión metálica desde el electrodo positivo al negativo.

Un año más tarde Frabroni, relaciona la corrosión con las pilas galvánicas, idea reforzada por los estudios de Thenard (1819) y De la Rive (1830) entre otros. Tuvieron que pasar unos 100 años hasta que Evans y Hoar lograsen demostrar, en 1932, la correlación cuantitativa existente entre las pilas de corrosión y la magnitud de ésta, dentro del marco de las leyes de Faraday.

### 1.3.1 Termodinámica de la Corrosión

Para conocer a detalle la velocidad de la termodinámica aplicada a sistemas corrosivos, es necesario conocer algunos antecedentes. La termodinámica puede tomar dos caminos: el ámbito químico y el electroquímico<sup>29</sup>.

Dentro de la química, la termodinámica requiere seleccionar variables independientes como es la temperatura absoluta (T), la presión aplicada por medio externo (P), y el número de moles (n). La función termodinámica que relaciona estas variables es G, designada como la *energía libre de Gibbs o entalpía libre*<sup>30</sup>.

---

Por el otro lado, en el ámbito electroquímico la termodinámica requiere de otra área de apoyo, debido a que la corrosión no sólo presenta velocidad de reacciones químicas, sino también reacciones electroquímicas, las cuales contienen aparte de las sustancias químicas, cargas eléctricas libres bajo la forma de velocidad (e-).

Dado lo anterior, hablar de la termodinámica de la corrosión es estar hablando de una reacción de corrosión que puede expresarse parcialmente por una ionización que sufre el metal (proceso por el cual un átomo metálico pierde electrones y queda cargado con el equivalente de cargas positivas); dicha entidad cargada constituye un ion positivo o catión.



Donde:

M = metal de valencia n

M<sup>+n</sup>= forma iónica de M

ne<sup>-</sup> = número de electrones cedidos

Para conocer la posibilidad de que ocurra una reacción bajo condiciones reales se tienen que analizar los cambios energéticos asociados a ella, o sea, la carga energética del metal antes de corroerse y la de los productos de corrosión. La termodinámica sólo podrá indicar la posibilidad antes mencionada, pero nunca la velocidad con que se llevará a cabo, ésta se determina por medio de la *cinética*.



---

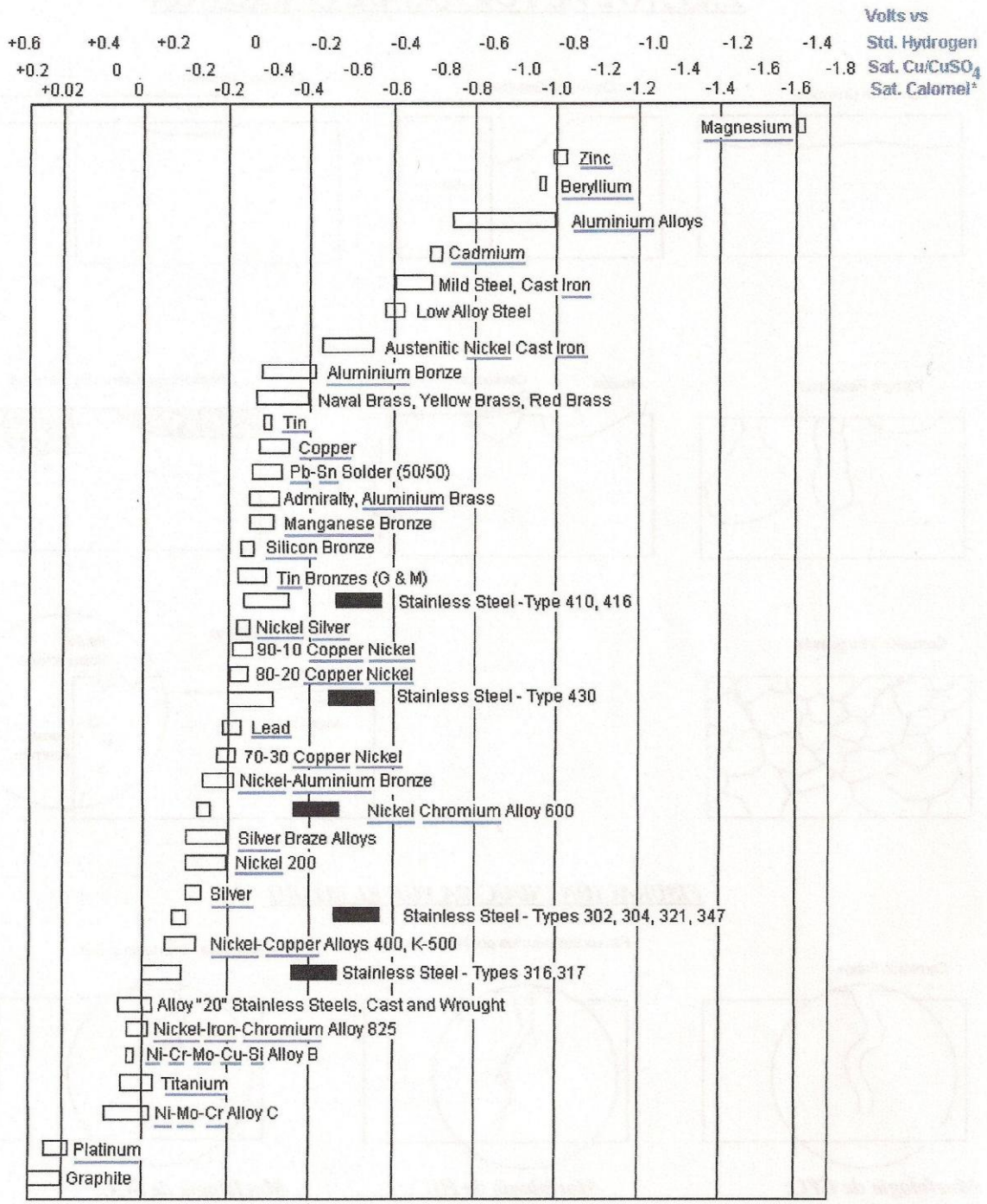
---

Analizar la tendencia que tienen los metales a corroerse en un medio dado es otra manera de comprender el estudio de la *termodinámica de la corrosión*. La corrosión representa el proceso por el cual un metal es producido a partir de un mineral, pero en sentido inverso (el cual se encuentra en su forma natural – óxidos, sulfuros, cloruros, etc.), lo que lleva a la conclusión que entre más rápido sea el proceso de degradación del metal de su forma natural, mayor será su tendencia a regresar a esa forma por medio de la corrosión, con mayor o menor velocidad, dependiendo del medio en que éste se encuentre<sup>14</sup>.

### **1.3.2 Potencial del Electrodo.**

La tendencia que presentan los metales a corroerse en un medio ambiente particular involucrado requiere de mediciones de potenciales eléctricos, donde se puede obtener un listado de metales en un electrolito dado, indicando cuales metales poseen la mayor tendencia a corroerse. A tal lista se le conoce como *Serie Galvánica*, en donde el arreglo de los metales dependerá del electrolito escogido<sup>31</sup>.

Se ha observado que aquellos metales con un potencial más positivo no sufren corrosión y son los llamados metales nobles, y aquellos con potenciales más negativos se corroen más rápidamente y se les conoce como metales base. También se dice que la información que se maneja en la serie galvánica aparenta ser poco precisa.



**Figura 5.** Serie de Potenciales de Oxidación de Aleaciones Industriales.

La serie galvánica es obtenida al efectuar mediciones de diferencias de potencial a circuito abierto, es decir, sin el paso de corriente eléctrica entre los

---

---

metales involucrados, y luego son enlistados en el orden apropiado. La implicación es que solamente las diferencias en potencial son las que se pueden medir y no sus valores absolutos de potencial. Esto debido al hecho de que no existe un método para determinar el valor absoluto del potencial de electrodo. Ante tal situación se pensó en que sería deseable escoger alguna reacción en equilibrio como un dato, o como una referencia de potencial cero contra la cual otros potenciales se pudieran medir o inferir.

El electrodo estándar de hidrógeno se eligió como el electrodo patrón (de referencia) que asume un valor de potencia igual a 0.000 volts. Básicamente consiste en una lámina de platino inmersa en una solución ácida de actividad hidrógeno 1 molar (pH = 0), y sobre la cual se burbujea hidrógeno gaseoso a una atmósfera de presión<sup>32</sup>.



E (Hidrógeno)= 0.00 por definición

La difícil manipulación del electrodo de hidrógeno, demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones prácticas, han dado lugar a la utilización de otros electrodos de referencia cuya manipulación y constitución resulta ser más sencilla; la condición fundamental es que el potencial de equilibrio de la reacción de óxido-reducción que tenga lugar en ellos permanezca constante respecto al electrodo de hidrógeno.

A partir de esta convención, es posible medir potenciales estándar de electrodo de cualquier metal relativo a la reacción de hidrógeno e inducir de esta manera  $E^0 \text{H}$ ; por lo que ahora se podrá tener una lista de metales en equilibrio en

---

sus propios iones junto con sus potenciales estándar, obtenidos de tales mediciones. A esta lista se conoce como Serie Electromotriz<sup>33</sup>.

### 1.3.3 Diagramas de Pourbaix (Potencial – pH)

El investigador belga Marcel Pourbaix tuvo la necesidad de obtener el equilibrio de todas las reacciones posibles entre un metal y el agua, para darse una mejor idea de la tendencia que poseería el metal ante un conjunto dado de condiciones de potencial y pH, es decir, con esto sabría si hay tendencia a formar óxidos o hidróxidos; si tendería a disolverse completamente, o si bajo esas condiciones, el metal permanecería inalterado<sup>34,35</sup>.

Afortunadamente no sólo obtuvo los equilibrios, sino que los representó gráficamente como función del potencial y del pH a través de los diagramas que hoy llevan su nombre<sup>36</sup>.

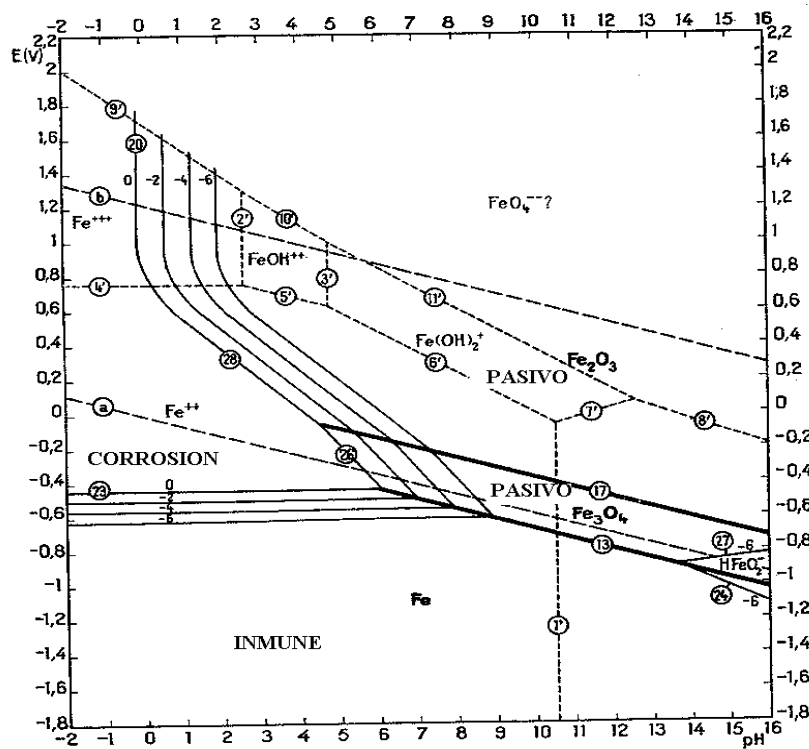
Esos diagramas se elaboran utilizando cálculos electroquímicos, datos de solubilidad y constantes de equilibrio. Un aspecto importante de esos diagramas es que muestran una división natural del cuerpo gráfico en tres regiones, las cuales son clasificadas de acuerdo a su comportamiento corrosivo en: pasividad, corrosión e inmunidad.

<b><i>Pasividad.</i></b>	Zona que representa al metal cuando posee películas oxidadas o de hidróxidos sobre su superficie, que inhiben la corrosión.
<b><i>Corrosión.</i></b>	Región donde el metal se disuelve activamente, siendo los productos de corrosión solubles.
<b><i>Inmunidad.</i></b>	En esta zona el metal se encuentra perfectamente preservado y estable bajo ciertas condiciones muy especiales de potencial y pH.

**Tabla 2.** Zonas predominantes en un diagrama de Pourbaix.

Es necesario recordar que el pH es simplemente el logaritmo de la concentración de iones hidrógeno, de tal manera que un pH de 7 indica que se tienen  $10^{-7}$  iones gramo de hidrógeno por litro de solución, y corresponde a una solución neutra, mientras que en pH=0 representa una solución muy ácida y un pH=14 es una solución muy alcalina<sup>35</sup>.

En el diagrama de Pourbaix para el sistema Fe-H<sub>2</sub>O, la región de inmunidad en la figura, indica que el hierro no se corroe bajo estas condiciones de potencial y pH, es decir, si el potencial de corrosión del hierro se hace suficientemente negativo, por ejemplo, a -1.4 volts el hierro no se corroerá en ningún sistema que varíe desde pH muy ácido hasta pH muy básico, ver figura 5.



**Figura 6.** Diagramas de Equilibrio Potencial – pH para el sistema Fe-H<sub>2</sub>O, a 25°C<sup>37</sup>.

---

---

Entre los principales usos de los diagramas de Pourbaix se encuentran los siguientes:

- Predecir si hay o no corrosión,
- Estimar la velocidad de desarrollo de los productos de la corrosión,
- Pronosticar cambios del medio ambiente que ayuden a prevenir o reducir el ataque corrosivo.

Es importante señalar que los diagramas de Pourbaix sólo ofrecen una termodinámica del sistema metal – solución, indicando el estado final al que tiende el sistema, pero no proporciona la velocidad con que se llega a tal estado.

#### **1.4 Métodos de Medición**

Desde hace mucho tiempo, el hombre comprendió que la corrosión era una fuerza natural que atacaba los materiales metálicos que él aprendió a arrancarle a la naturaleza desde su forma natural (óxidos, sulfuros, etc.) y llevados a su estado metálico. Así, desde que el hombre se dio cuenta de los daños económicos de esta “venganza de la naturaleza”, se dio a la tarea de inventar y mejorar métodos de protección contra la corrosión. Pero para eso fueron necesarios dos desarrollos científico-tecnológicos muy importantes<sup>38</sup>.

- Descubrir el mecanismo por el que ocurría la corrosión
- Idear métodos eficientes para evaluar la velocidad de corrosión y que fueran lo más prácticos posible.

Antes de descubrir el mecanismo por el que ocurre la corrosión, el hombre sólo pudo medir las consecuencias de este proceso, y surgieron métodos gravimétricos

---

---

y analíticos que evaluaron el grado de deterioro de los materiales metálicos, determinando la cantidad de material que se transformaba y perdía por corrosión, midiendo las pérdidas de peso, o determinando la cantidad de material que pasaba a forma iónica en una solución corrosiva.

En 1905 Tafel<sup>39</sup> descubrió una relación empírica entre  $\Delta\phi$  y la  $I_T$  con lo que se empezó a correr el telón del mecanismo de la corrosión, pero no fue sino hasta 1938 cuando Wagner y Traud<sup>39</sup> sentaron las bases de la teoría del potencial mixto, la cual postula que aun sin asumir la existencia de ánodos y cátodos locales, se pueden explicar las reacciones de corrosión si se asume que las reacciones parciales de oxidación y reducción ocurren en la interfase metal/electrolito y que estas reacciones están en constante cambio bajo una perspectiva estadística de posición tiempo.

Wagner y Traud<sup>40</sup> también mostraron que, en ciertas circunstancias, es posible calcular la velocidad de reacción usando métodos electroquímicos, y obtuvieron buenas correlaciones de velocidad de corrosión a través de curvas de polarización usando lo que ahora se llama “Extrapolación de Tafel”. Estos resultados experimentales fueron considerados una evidencia de los postulados generales de la teoría del potencial mixto, y finalmente se aceptó que el mecanismo por el que ocurre la corrosión es de naturaleza electroquímica.

Más tarde, algunos autores encontraron cierta relación entre la pendiente de la curva de polarización en el potencial mixto y la velocidad de corrosión. Pero no fue sino hasta 1957, cuando Stern y Geary<sup>41</sup>, basados en las teorías de la cinética electroquímica y en la teoría del potencial mixto, derivaron una ecuación que relaciona la pendiente de la curva de polarización en la vecindad del potencial de corrosión, dando origen así al método de resistencia de polarización, usado para el cálculo y monitoreo de la velocidad de corrosión en casi cualquier sistema metal/electrolito.

---

### 1.4.1. Potenciales de Corrosión

Las medidas de potencial pueden desarrollar un papel fundamental para controlar y prevenir el inicio de formas de corrosión localizadas, generalmente para la integridad de las instalaciones. El monitoreo de potencial resulta ser una técnica termodinámica en la cual se relaciona el estado de corrosión y el potencial de corrosión de un metal, como una medida de inicio o de la severidad de corrosión. En el estado pasivo se refleja un potencial de corrosión noble (velocidad de corrosión baja), y en el estado activo para el mismo material refleja un potencial de corrosión menos noble (velocidad de corrosión alta). Consecuentemente el potencial puede ser monitoreado para mostrar si el material se corroe lenta o rápidamente<sup>42</sup>.

El potencial de electrodo de un metal en presencia de un electrolito es el potencial de aquél con respecto a un electrodo de referencia, el cual resulta ser demasiado estable, no presenta variaciones con respecto a la temperatura, ni siquiera se polariza con el paso de corrientes débiles, y además sus propiedades no cambian con el tiempo. A pesar de su importancia las mediciones de potencial han encontrado hasta hoy aplicaciones limitadas principalmente por dos motivos:

- Pueden ser seguidas sólo en presencia de un electrólito
- Su interpretación requiere una experiencia particular y especialización.

Este método proporciona un valioso respaldo a técnicas como la resistencia de polarización, y resulta ser muy útil por si sólo, aun cuando no proporciona una medida directa de la velocidad de corrosión o de la corrosión total. La información



obtenida mediante este método puede ser difícil o imposible de obtener por otros métodos<sup>43</sup>.

### 1.4.2 Velocidad de Corrosión

Existen dos métodos para determinar la velocidad de corrosión por técnicas de corriente directa: *Extrapolación de Tafel y Resistencia a la Polarización*. Partiendo de la ecuación de Butler – Volmer<sup>44,45</sup> que describe la cinética de los fenómenos electroquímicos, para potenciales de corrosión suficientemente alejados de los potenciales reversibles de las reacciones acopladas anódica y catódica, se obtiene la relación entre el potencial y la corriente<sup>46,47</sup>:

$$i = i_{\text{corr}} \left[ \exp \left( \frac{2.303}{B_a} (E - E_{\text{corr}}) \right) - \exp \left( -\frac{2.303}{B_c} (E - E_{\text{corr}}) \right) \right]$$

donde:

$B_a$  y  $B_c$  = Pendientes anódica y catódica de Tafel

$i_{\text{corr}}$  = Densidad de corriente de corrosión

$E_{\text{corr}}$  = Potencial de corrosión

### 1.4.3 Ruido Electroquímico

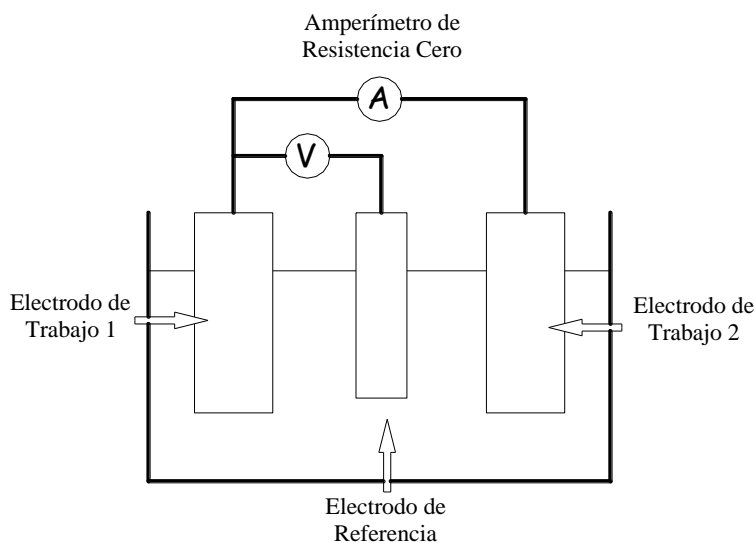
Ruido electroquímico se le denomina a las variaciones aleatorias del potencial o de la corriente de un material sujeto a corrosión. Con este método no se altera el estado del sistema en estudio, ya que no se aplica ninguna perturbación externa para realizar las mediciones. El concepto de ruido electroquímico es un comportamiento inversamente proporcional al intervalo de frecuencia, a menor frecuencia mayor intensidad.

---

Ruido es un término común que significa sonido no deseado, en términos científicos es aquello que no puede ser explicado con relación a la variabilidad de las mediciones obtenidas en un experimento. Sin embargo, esto no quiere decir que no contenga información.

El Ruido Electroquímico en potencial se define como las oscilaciones del potencial electroquímico de un electrodo respecto a un electrodo de referencia, mientras que el Ruido Electroquímico en corriente es la oscilación de una corriente electroquímica. La medición del Ruido Electroquímico es relativamente simple, aunque lo más importante es la obtención de la información relevante que puede ser en muchos casos más problemática<sup>48</sup>. El primero en monitorear simultáneamente señales de ruido electroquímico de potencial y de corriente fue Eden en 1984<sup>49,50</sup>.

El ruido electroquímico en corrosión<sup>51,52</sup> y en estudios electroquímicos<sup>53,54</sup> fue reportado en los finales de los 1960's e inicios de los 1970's pero fue esta la primeras publicaciones de finales 1970's y principios 1980's que ha habido un enorme interés en el tema<sup>55,56</sup>.



**Figura 7.** Diseño de celda de corrosión para Ruido Electroquímico

---

---

Uruchurtu Ch. En 1984<sup>57</sup> menciona que “el ruido electroquímico parece reflejar la suma individual de los eventos aleatorios, y el valor cuadrado medio (raíz cuadrática r.m.s.) de estos eventos o señales se ha visto que provee la *huella dactilar* de la cantidad de metal disuelto, dependiendo de la relación metal-medio ambiente”.

La señal de ruido es de baja frecuencia y se requiere de equipo digital muy sensible para registrar la señal obtenida. El intervalo de muestreo debe seleccionarse con mucho cuidado, ya que pueden presentarse dos fenómenos: muestreo rápido, que origina resultados erróneos a bajas frecuencias; y muestreo lento, que origina que las componentes de alta frecuencia no se resuelvan en el dominio de la frecuencia.

La *frecuencia de Nyquist* es el límite de alta frecuencia que se obtiene en el espectro, cuya relación está dada por:

$$f_{\text{máx}} = 1 / 2Dt$$

La resolución en baja frecuencia está dada por:

$$f_{\text{mín}} = 1 / N Dt$$

donde:

N = número de muestras

Dt = intervalo de muestreo

También se hace un análisis del ruido electroquímico que provee una evaluación cualitativa acerca del proceso de corrosión, y con ello se determina un número posible de factores que describen el comportamiento del sistema. Para

analizar el espectro se utilizan dos métodos: se gráfica el logaritmo del análisis contra el logaritmo de la frecuencia, utilizando *la transformada rápida de Fourier (FFT)*, y *el método de máxima entropía (MEM)* que maximiza la señal y no supone los registros de tiempo periódicos. Obteniéndose valores muy similares con ambos métodos<sup>58</sup>.

Las variaciones del potencial se explican en términos de un sistema en proceso de corrosión. En un material pasivo el potencial se mantiene constante, cualquier inicio de corrosión localizada ocasionará cambios intermitentes del potencial, caída seguida de una recuperación exponencial. Conforme el medio sea más agresivo y el sistema entre en un proceso de corrosión localizada, los *transitorios* serán más frecuentes.

Hladky y colaboradores<sup>59</sup> publicaron los resultados de las mejoras realizadas en la técnica de medición e interpretación de datos. Clasificando al ruido electroquímico en base a distintas respuestas durante el análisis de los datos, ver tabla 3.

Ruido Blanco.	Ruido Shot.	Ruido de baja frecuencia.
Originado por cambios de baja frecuencia en el medio ambiente, se observan como variaciones lentas del potencial de corrosión. Es mayor de 1 Hz, no depende de la frecuencia y su precisión mejora con la raíz cuadrada del tiempo de muestreo.	Origina cambios de consecuencias, su forma de espectro y cantidad de ruido presente, en una banda dada de baja frecuencia, es constante sobre un intervalo de frecuencias.	1/f ó rosa, relacionado con procesos del electrodo, caracterizado por su gran heterogeneidad. Grandes cambios de frecuencia menores o iguales a 1 Hz. La análisis de espectro varía con la frecuencia y su desviación es mayor que la originada por los efectos de carga que la ocasionan.

**Tabla 3.** Clasificación del ruido electroquímico, Malo<sup>60</sup>

Haciendo una clasificación en cuanto a la morfología del fenómeno de corrosión, de acuerdo a las observaciones realizadas por algunos investigadores, se tiene que existen los tipos de corrosión indicados en la tabla 4:

Corrosión ligera o pasivación	Caracterizado por bajas frecuencias y altas amplitudes. Procesos controlados por análisis, caracterizado por desviación estándar media ( $1e^{-3}$ , $1e^{-4}$ volts).
Corrosión localizada o picado	Caracterizado por altas frecuencias y altas amplitudes. Procesos transitorios de rompimiento-repasivación, caracterizado por un aumento en la desviación estándar o valores altos ( $1e^{-3}$ , $1e^{-2}$ ).
Corrosión generalizada	Altas frecuencias y bajas amplitudes. Procesos de transferencia de carga, caracterizada por una desviación estándar pequeña ( $1e^{-5}$ o menores).

**Tabla 4.** Clasificación del ruido electroquímico en función de la morfología.

Las señales del potencial de corrosión, obtenidas en la prueba potencioestática (EPN, Electrochemical Potential Noise), evidencian el inicio de una picadura; la amperimetría de resistencia cero y las series del ruido en corriente, obtenidas en la prueba galvanostática (ECN, Electrochemical Current Noise), predominan durante la propagación de las picaduras. Las variaciones son *procesos estocásticos*, que a su vez son una función de la cinética del electrodo, y en el caso de un sistema de corrosión, están relacionados con la velocidad de corrosión. Las variaciones del potencial de corrosión son debidas a las influencias externas casuales unidas con la naturaleza de la superficie metálica en dimensiones de submicras; estas no pueden predecirse, pero puede pronosticarse la posibilidad de que ocurran<sup>61</sup>.

---

---

La técnica de ruido electroquímico es sensible a las fluctuaciones de potencial causadas por fenómenos de repasivación-depasivación, y es ideal para una evaluación rápida de la tendencia de un material a la corrosión por picaduras, antes de que aparezca el primer indicio de que se esté formando alguna<sup>62</sup>.

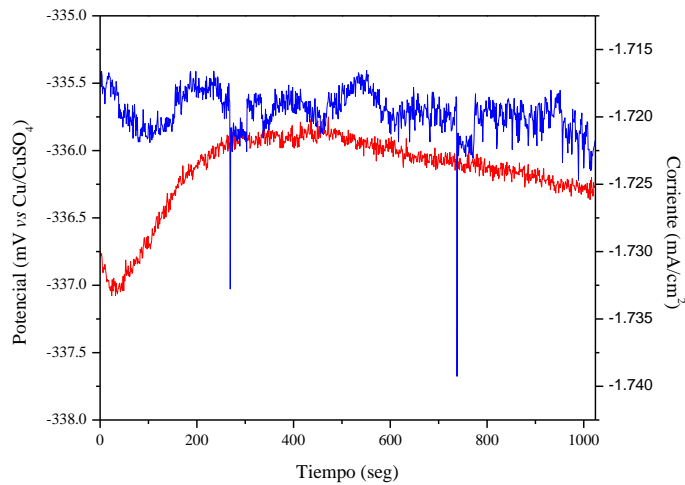
La reciente edición de la Norma ASTM G199<sup>63</sup> describe los lineamientos generales de procedimiento para conducir la prueba de ruido, con la instrumentación recomendada y sugerida para el análisis de resultados.

Los métodos electroquímicos no perturbadores incluyen el uso de amperímetros de resistencia cero o el análisis de respuesta de pares galvánicos, o sea, el monitoreo de potenciales de corrosión y las mediciones de ruido electroquímico.

### **1.4.3.1 Métodos de Análisis**

#### **1.4.3.1.1 Series de tiempo**

El método más directo, es el examinar las series de tiempo para la identificación de detalles que son característicos de los tipos de corrosión particulares. Por ejemplo, la detección visual de transitorios de rompimiento y repasivación o de oscilaciones asociadas a hendiduras de corrosión por picadura.



**Figura 8.** Ruido Electroquímico del acero de refuerzo en Cloruro de Sodio (NaCl).

El Ruido Electroquímico producido por algunos sistemas puede mostrar una estructura más definida en la serie de tiempo. Por ejemplo, la figura 8 representa el Ruido Electroquímico producido por el acero de refuerzo sometido a una solución de Cloruro de Sodio (NaCl). En este caso el acero tiende a formar una capa pasivada debido a la alcalinidad de la solución, pero los cloruros causan rompimiento localizado de la película pasivante, observándose corrosión por picadura.

#### 1.4.3.1.2 Métodos Estadísticos

Los métodos estadísticos tratan a la serie de tiempo como una colección de potenciales o corrientes individuales, ignorando la relación entre un valor y el siguiente (muestra de la población). La serie de tiempo está definida completamente por la distribución de sus valores. Las fluctuaciones de la media en largos períodos de tiempo están directamente relacionados a cambios en los procesos de corrosión.

---

---

El ruido en corriente teóricamente presentaría un valor de cero entre dos electrodos idénticos<sup>64,65</sup>, sin embargo en la práctica las variaciones estadísticas de los rangos de corrosión muestran que si existen flujo de corriente y se observa Ruido Electroquímico<sup>66,67</sup>.

La  $R_n^b$  es obtenida al dividir la desviación estándar del potencial y la desviación estándar de la corriente, por analogía de la ley de Ohm. Muchos trabajos han analizado la relación entre la  $R_n$  y la  $R_p$  y muchos afirman que las dos son equivalentes<sup>68</sup>. La resistencia en ruido ( $R_n$ ) incorpora fluctuaciones de la resistencia de la solución, a pesar de que no se aplica una corriente a la celda. Por lo tanto, se puede obtener en soluciones de alta resistividad.

---

<sup>b</sup>  $R_n$ : Noise Resistance, Resistencia de Ruido.



---

---

## CAPITULO 2.

### Metodología Experimental

#### 2.1 Materiales

Microsilice; es uno de los materiales utilizados en este trabajo que es de mucha relevancia, el cual según las normas ASTM C-1240<sup>69</sup>, y ACI 234<sup>70</sup> es un material puzolánico muy fino, compuesto principalmente por sílice amorfo, producido por los hornos de arco eléctrico, como subproducto de la producción de las aleaciones de ferrosilicio.

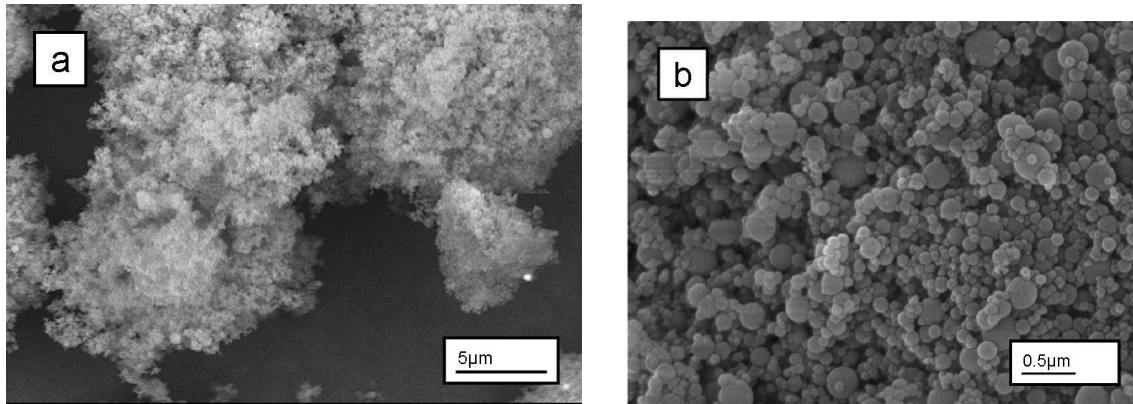
Requerimientos químicos para la microsilice ASTM C-1240	
<b>SiO<sub>2</sub>, min, %</b>	<b>85.0</b>
<b>Mezcla de otros materiales, máx., %</b>	<b>3.0</b>
<b>Pérdida por ignición, máx., %</b>	<b>6.0</b>

**Tabla 5.** Requerimientos químicos del microsilice

Al caracterizar los residuos provenientes de la industria del ferrosilicio, que eran una fuente de contaminación del aire de manera importante, se determina que estos poseen un elevado porcentaje de dióxido de sílice SiO<sub>2</sub> (más de 90%)

---

en forma no cristalina y con un diámetros aproximados de 0.1 micra (ver figura 9), es decir, 100 veces más fino que el cemento el cual posee una importante propiedad puzolánica, es decir, reacciona con la cal libre que se forma durante el proceso de hidratación del cemento portland.



**Figura 9.** a) Imagen general de la microsílíce (sin densificar)<sup>71</sup> b) Esferas de microsílíce<sup>72</sup>.

La microsílíce es un material que combina la propiedad puzolánica con una alta finura y no reacciona con el agua por lo cual resulta un material sumamente benéfico para la elaboración de concretos densos, algunos datos técnicos de este material se describen a continuación:

- Área superficial de aproximadamente 20,000 m<sup>2</sup>/kg
- El peso específico de la microsílíce por lo general se ubica dentro del rango de 2.10 a 2.25 pero puede llegar a 2.55.
- El peso volumétrico sin compactar del humo de sílice es de aproximadamente 250 a 300 kg/m<sup>3</sup>

La obtención de este material tan fino fue solucionado instalando plantas densificadoras a la salida de los filtros, es decir el material es compactado

---

---

densificándolo y haciéndolo más manejable para su transporte y posterior dosificación.

Numerosas pruebas fueron realizadas para comprobar su desempeño como adición en el concreto y estas fueron sobrepasadas<sup>73</sup>.

La microsílíce reacciona con la cal libre y da origen a un incremento de la red cristalina, silicatos, además de que las partículas de microsílíce que no reaccionan sellan los poros existentes debido a su pequeño tamaño.

La consecuencia de todo este proceso es la consecución de un concreto mas impermeable, bajo contenido de poros por sello y por mayor red cristalina.

Es de hacer notar que por ser la microsílíce un fino se requiere del uso de súper plastificante para lograr un asentamiento adecuado así como una reducción de agua notable (de un 25 a un 35%).

La adición de microsílíce al concreto permite obtener un concreto poco poroso, de alta resistencia mecánica y de fácil colocación, disminuyendo de esa forma el impacto de la colocación y la compactación en el proceso de ejecución del elemento<sup>74</sup>, es decir, un concreto durable, ya que debido a su poca porosidad es muy baja la capacidad de permear líquidos y gases a su interior, o sea un concreto casi impermeable, aunque para esto sea necesario mezclar la microsílíce como adición al cemento Portland en partes iguales<sup>75</sup>.

---

---

Se elaboraron especímenes de concreto con una altura  $h=30$  cms y un diámetro  $d=15$ cms según las normas ASTM C470-87<sup>76</sup> y C192-81<sup>77</sup>, con un  $f'c=250$  kg /cm<sup>2</sup> y dos elementos de acero al carbono R42, las cuales son varillas corrugadas de 3/8" (0.95 cm) de diámetro. Estos elementos metálicos sirven como electrodos.

Las variables utilizadas son un concreto con una relación  $a/c=0.55$  simple y otro adicionado con microsílíce, el cual se espera alargue la vida útil de los elementos donde se utiliza. La cantidad de micro sílice a agregarse en el diseño de la mezcla de concreto es el 10% en peso en relación al contenido de cemento por ser una la media de la recomendación del fabricante del producto. Para la elaboración del concreto de los especímenes los agregados petreos cumplieron con las normas de limpieza, tamizado, dureza y todos lo necesario para la elaboración de un concreto de calidad.

Materiales	Peso (Kgs)
<b>Agua</b>	205
<b>Cemento</b>	311
<b>Grava</b>	962
<b>Arena</b>	851.3

**Tabla 6.** Proporcionamiento de la mezcla de concreto sin microsílíce.

---

---

MATERIALES	PESO (KGS)
Agua	195
Cemento	298.9
Microsilice	29.9
Grava	942.6
Arena	840.3

**Tabla 7.** Proporcionamiento de la mezcla de concreto con microsilice

Además se realizaron pruebas de control de calidad al concreto fresco concretamente de revenimiento, en las figuras siguientes se muestran fotografías de la elaboración de las muestras y de la prueba de revenimiento para la cual se utiliza el cono de Abrahams, placa metálica, cuchara de acero, varilla redonda punta de bala.



**Figura 10.** Prueba de revenimiento.®

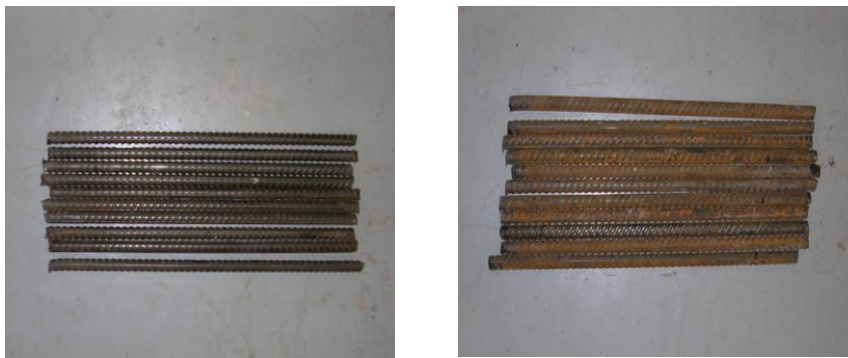
---

El procedimiento de la prueba es colocar la placa en el piso y sobre ella ubicar el cono de Abrahams, lo siguiente es llenar con el concreto una tercera parte del cono y introducir la varilla hasta el fondo de cada capa 25 veces tratando de cubrir toda el área expuesta, esto se realiza tres veces hasta llenar el cono. Después de llenar el cono se enraza, es decir, se corta con la varilla todo el concreto que supere la parte superior del cono dejando la misma lo mas uniformemente, a continuación se levanta el cono y se mide la diferencia entre el cono metálico y la formación de concreto fresco resultante, esta medida dada en centímetros es el Revenimiento y nos da una buena idea de la trabajabilidad del concreto.



**Figura 11.** Buena trabajabilidad en la prueba del revenimiento.®

Como se menciona anteriormente se utilizó acero de refuerzo sin corrosión y otros elementos con cierto grado de corrosión.



**Figura 12.** Varilla de acero corrugado en condición inicial.®

---

Para la elaboración de los especímenes de prueba se utilizaron moldes metálicos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, los que fueron llenados en tres capas de aproximadamente un tercio de la altura del molde y siendo compactados cada capa con 25 golpes utilizando la varilla redonda punta de bala como se muestran a continuación:



**Figura 13.** Fabricación de especímenes de ensayo.®

Terminando de colocar el concreto en los molde se procedió a colocar los elementos metálicos que sirven de electrodos, tanto los libres de corrosión como los que tenían cierto grado de corrosión.

---

---

Dichos elementos se sometieron a un proceso de curado teniendo para ello una cámara en la cual se controla humedad y temperatura, teniendo unos valores promedio de humedad del 97.5% y de temperatura de 21 grados Celsius.

## **2.2 Definición de Variables.**

Las variables dentro de este trabajo son el uso de microsílice en la elaboración del concreto de algunos de los elementos de estudio para obtener concreto más denso y con ello evitar la entrada de iones cloruros y la difusión de estos sea más lenta, por lo que la vida útil esperada del acero es mayor ya que no es atacado por los cloruros tan rápido como en un concreto normal, es decir sin micro sílice.

Otra variable es el uso de acero de refuerzo ligeramente oxidado en la mitad de los elementos para ver el efecto del micro sílice en el comportamiento del concreto y observar si protege al acero oxidado de ser despasivado de alguna manera.

Por lo tanto se tiene lo siguiente:

*Elementos de concreto con  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  sin micro sílice (8 cilindros).*

- 2 cilindros con acero nuevo (para pruebas electroquímicas).
- 2 cilindros con acero con corrosión (para pruebas electroquímicas).
- 3 cilindros de concreto sin acero de refuerzo (para pruebas mecánicas).  
7,14 y 28 días.
- Cilindro de concreto para mediciones de cloruros.



---

---

Elementos de concreto con  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  con micro sílice (8 cilindros).-

- 2 cilindros con acero nuevo (para pruebas electroquímicas).
- 2 cilindros con acero con corrosión (para pruebas electroquímicas).
- 3 cilindros de concreto sin acero de refuerzo (para pruebas mecánicas).  
7,14 y 28 días
- Cilindro de concreto para mediciones de cloruros.

## **2.3 Métodos**

Las probetas o cilindros descritos anteriormente fueron sometidos a diferentes pruebas que se describen a detalle a continuación:

### **2.3.1 Pruebas Mecánicas.**

Algunos de los elementos fueron sometidos a pruebas de compresión según la norma ASTM C39-03<sup>78</sup> para determinar la resistencia a la compresión, es decir el  $f'c$  de la mezcla de los especímenes y ver de qué manera afecta o incluso si afecta el hecho de agregar micro sílice al concreto.

En esta prueba la probeta se coloca en una prensa hidráulica y se le aplica una carga axial, con la magnitud de la carga a la cual falla el espécimen se procede a dividirla entre el área del mismo; esto es para cada uno de los especímenes con las dos variables: con o sin micro sílice en el diseño de la mezcla del concreto

---

Este tipo de pruebas se realizan a 7, 14 y 28 días para determinar la resistencia del concreto a estas edades y poder tener aun una mejor comparativa de las dos variables.

Para realizar las pruebas de compresión los elementos de concreto deben ser “cabeceados”, es decir, re nivelar los dos extremos superior e inferior para que la carga actúe de manera uniforme en dichas áreas, esto se logra fundiendo azufre y colocándolo sobre unos moldes metálicos donde a su vez se coloca el cilindro de concreto y el azufre al enfriarse se une y forma parte del cilindro como se observa en las fotografías siguientes:



**Figura 14.** Especímenes cabeceados para ensayos de compresión.

Elementos de concretos ya “cabeceados” según la norma NMX-C-109-ONNCCE<sup>79</sup>, primero parcialmente y después en ambos extremos listos para someterlos a pruebas de resistencia a la compresión.



**Figura 15.** Probeta de concreto sin micro sílice siendo sometida a prueba de compresión en la prensa universal.

### 2.3.2 Nomenclatura de las Probetas de Estudio.

Nomenclatura	Concreto Con Sílice (10% en Peso)	Concreto sin Sílice	Acero de Refuerzo con Corrosión Inicial	Acero de Refuerzo Sin Corrosión Inicial
CC	x		x	
CS	x			x
SC		x	x	
SS		x		x

**Tabla 8.** Nomenclatura der los especímenes en estudio

---

### 2.3.3 Pruebas Electroquímicas.

Las pruebas realizadas son medición de potenciales de media celda ASTM C876-91<sup>80</sup> y Resistencia a la Polarización Lineal (LPR) ASTM 59-91<sup>81</sup>, el barrido será de +/- 20mV y una velocidad de 10mV-min. En la figura 18 se muestra el aparato a utilizar es el potenciostato - galvanostato Gill 8 (ACM Instruments).



**Figura16.** Potenciostato/Galvanostato/ZRA Gill 8.

Con la medición de potenciales de media celda se establece la posibilidad de que el fenómeno de corrosión ocurra y con la prueba de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR por sus siglas en ingles) se mide la cinética de corrosión, es decir la velocidad con la que se da el proceso) a través de la ecuación de Stern-Geary<sup>82</sup>.

Las pruebas se realizaron por un periodo de 835 días, periodo durante el cual las probetas se sumergirán en una solución acuosa de Cloruro de Sodio NaCl al 3.5% ya que se ha encontrado que es la solución más agresiva<sup>83</sup> para diferentes aceros. Para dichas pruebas se utilizaron un electrodo de referencia de (Cu/CuSO<sub>4</sub>) saturado.

---

---

### **2.3.4 Potenciales de Media Celda**

Las mediciones de media celda ayudan a determinar si se está dando el fenómeno de corrosión o no, esto dependiendo también de variables como el pH.

Para las mediciones de Media Celda se utiliza el potenciostato Gill 8 y las pruebas se iniciaron con una frecuencia de una vez por semana pero al ver que los resultados no variaban notablemente se estuvieron realizando cada dos semanas y en ocasiones cada 3.

### **2.3.5 Resistencia a la Polarización Lineal (RPL)**

Las mediciones de resistencia a la polarización lineal (LPR por sus siglas en ingles) se realizaron cada 15 días, y después cada mes utilizando el potenciostato Gill 8 de la marca ACM.

Una de las ventajas de esta técnica electroquímica es que nos permite medir no solo la posibilidad de que se esté dando el fenómeno de corrosión sino también la cinética de corrosión, es decir la velocidad con que se está dando este fenómeno. Esto sirve para determinar la vida útil del material que se corroe bajo estas condiciones, además claro de corregir el problema.

### **2.3.6 Ruido Electroquímico**

Entender el origen del ruido electroquímico es el principio para entender la aplicabilidad de esta técnica. En este sentido, la interfase metal (capa de productos de corrosión) / electrolito es el punto donde se producen en forma

---

---

continúa las señales de ruido electroquímico en forma de pequeñas variaciones (transitorios) en potencial y corriente, las cuales están relacionadas con los procesos de transferencia de carga que allí ocurren. Por lo tanto, el fenómeno del ruido electroquímico no es, bajo ninguna circunstancia, la respuesta a algún tipo de excitación externa del sistema, sino en realidad una consecuencia inherente a los procesos electroquímicos involucrados en la corrosión, que ocurre aún cuando no se esté midiendo<sup>84</sup>.

La aplicación de la técnica de ruido electroquímico en el ámbito de la corrosión se puede clasificar en tres campos diferentes: investigación básica de fenómenos corrosivos, pruebas y evaluación de la corrosión, y monitoreo a nivel industrial de la misma.

Fenómenos de corrosión localizada, como el picado y la corrosión en rendijas entre otros, por tratarse de procesos electroquímicos estocásticos relacionados con la activación y repasivación local en la interface metal (capa pasiva)/ electrolito representan también una importante fuente de ruido electroquímico<sup>85</sup>.

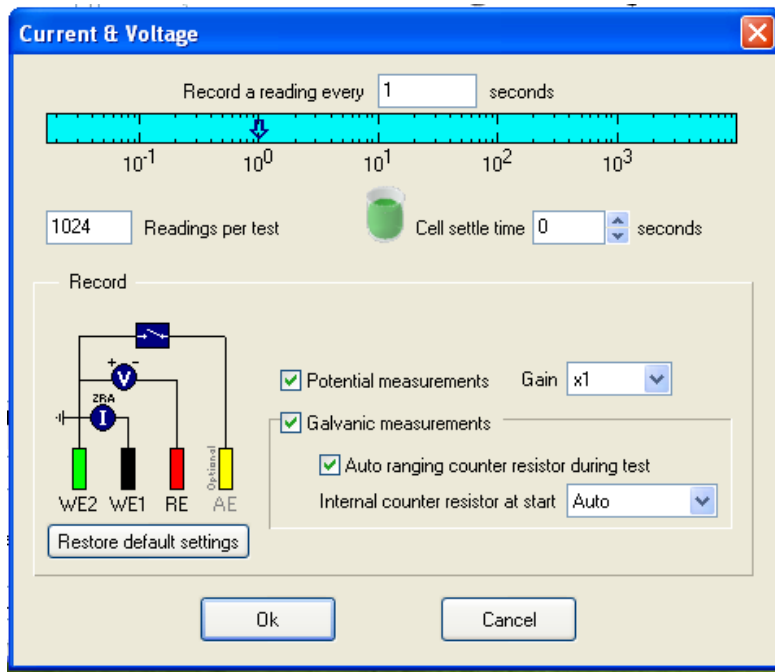
Esta técnica electroquímica permite evaluar si está ocurriendo la corrosión, determinar la cinética de corrosión y qué tipo de corrosión se está dando. Se ha encontrado que existen muchas y muy variadas fuentes de ruido electroquímico entre ellas:

- 1) Evolución de hidrogeno involucrando nucleación, crecimiento y separación de burbujas<sup>86,87,88,89</sup>; cambios en la resistencia de la solución y difusión hacia las micro grietas que se propagan<sup>90</sup>, y la descarga de metal en la micro grietas<sup>91</sup>.
- 2) Propagación de las grietas de corrosión bajo tensión involucrando disolución de material o descargas de agua<sup>90,92,93</sup>.

- 
- 3) Inicio de corrosión por picadura, picaduras metaestables, y crecimiento de estable picaduras<sup>94,81,95,96</sup>.
  - 4) Corrosión en grietas o hendiduras<sup>97,98,99</sup>.
  - 5) Compresión mecánica o abrasión<sup>100</sup>.
  - 6) UNDERFILM corrosión<sup>99,101</sup>.
  - 7) Sistemas Pasivos<sup>102,103,104</sup>.
  - 8) Procesos de alta temperatura<sup>105,106</sup>.
  - 9) Corrosión Microbiológica<sup>107,108</sup>.
  - 10) Corrosión uniforme<sup>109,110</sup>.

Para poder realizar la prueba, primeramente se alimenta el software del equipo con los parámetros a utilizar (figura 17), los cuales se mencionan a continuación.

1. Velocidad de lectura: 1 punto por segundo
2. Tamaño de muestreo: 1024 puntos
3. Mediciones: Corriente y Voltaje.



**Figura 17.** Pantalla de configuración de la prueba de ruido electroquímico.

### 2.3.6.1 Análisis de Ruido Electroquímico

El análisis visual de los espectros de ruido electroquímico en función del tiempo suele ser la forma más sencilla y rápida de obtener información del sistema y, a través de este, se puede lograr una valoración cualitativa del estado electroquímico del mismo, lo cual, en la mayoría de los casos, requiere de un suficiente conocimiento del sistema investigado. Por lo general, se emplean algunos métodos numéricos que permiten el análisis cuantitativo de dicha información y, con ello, diferencias en el comportamiento de sistemas específicos o de un sistema en cuestión bajo diferentes condiciones.

Dentro de dichos métodos, los más sencillos corresponden a la determinación de parámetros estadísticos, como la desviación estándar. El cálculo de la desviación estándar permite determinar diferencias en la intensidad de las señales de ruido electroquímico sobre extensas cantidades de datos y está



---

---

directamente relacionado con cada aplicación específica a través de los intervalos de tiempo empleados para su determinación.

Otra importante forma de extraer información contenida en las señales de ruido electroquímico consiste en realizar un análisis en el dominio de la frecuencia. La señal de ruido electroquímico está compuesta por diferentes frecuencias dependiendo del tipo y cantidad de fuentes de ruido que la producen y, naturalmente, de los filtros empleados en el acondicionamiento de la misma. Para efectuar dicho análisis, es necesario realizar una transformación de los espectros del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, obteniéndose así la posibilidad de determinar cuáles frecuencias juegan un papel decisivo en la señal y cuales carecen de importancia. A través de estos espectros, también se pueden reconocer señales externas que distorsionan la señal, como, por ejemplo, la proveniente de fuentes de corriente alterna.

La Transformación Rápida de Fourier (FFT) suele ser el método más sencillo para obtener los espectros en función de la frecuencia. Sin embargo, en realidad este es el método menos adecuado ya que el carácter estocástico (discontinuo, no periódico) de las señales de ruido electroquímico conlleva a que los eventos no puedan ser visualizados en el espectro. Ante esta limitante, surge como alternativa el uso de la transformación conocida como Short Time Fourier Transformation (STFT), la cual permite la localización de frecuencias en señales variantes en el tiempo, pero ofrece una muy limitada resolución en frecuencia dependiendo del intervalo de tiempo seleccionado y viceversa (Principio de indeterminación de Heisenberg)<sup>111</sup>.

En los últimos años, el uso de la técnica de Wavelet ha ganado un considerable interés por sus importantes ventajas para el análisis de las señales de ruido electroquímico<sup>112,113</sup>.

---

A pesar de todo la anterior la técnica de Ruido Electroquímico esta lejos de la perfección y se requiere que se siga investigando al respecto, lo cual no quiere decir que no es una importante técnica electroquímica la cual ha ayudado a entender más el fenómeno de corrosión

## 2.4 Pruebas Químicas.

### 2.4.1 Cloruros

Se realizaron también mediciones del contenido de iones de cloruro en el concreto, para esto se hicieron perforaciones a diferentes profundidades para detectar la cantidad de iones cloruro en el concreto, la profundidad a las que estos han llegado dentro de las probetas, si han llegado ya al acero de refuerzo y su efecto en él basándose en la norma ASTM G109 - 07<sup>14</sup>.



**Figura 18.** Probeta de concreto después hacer las perforaciones y recolección de polvo del concreto para elaborar las pruebas para la determinación de cloruros.®

Habiéndose producido dos elementos para realizar pruebas de cloruros, uno con micro sílice y el otro de concreto simple se realizaron perforaciones a diferentes

---

---

profundidades en cada uno para obtener el polvo de concreto obtenido y poder determinar el contenido de cloruros.

Para esto se utilizan bracas de diferentes diámetros siendo el de la primera el diámetro mayor que las subsecuentes. Después de taladrar aproximadamente 1/3" se recolecto el polvo y se guardo en bolsas plásticas sellables, esto se repite dos veces para cada elemento teniendo material para analizar de tres diferentes profundidades.

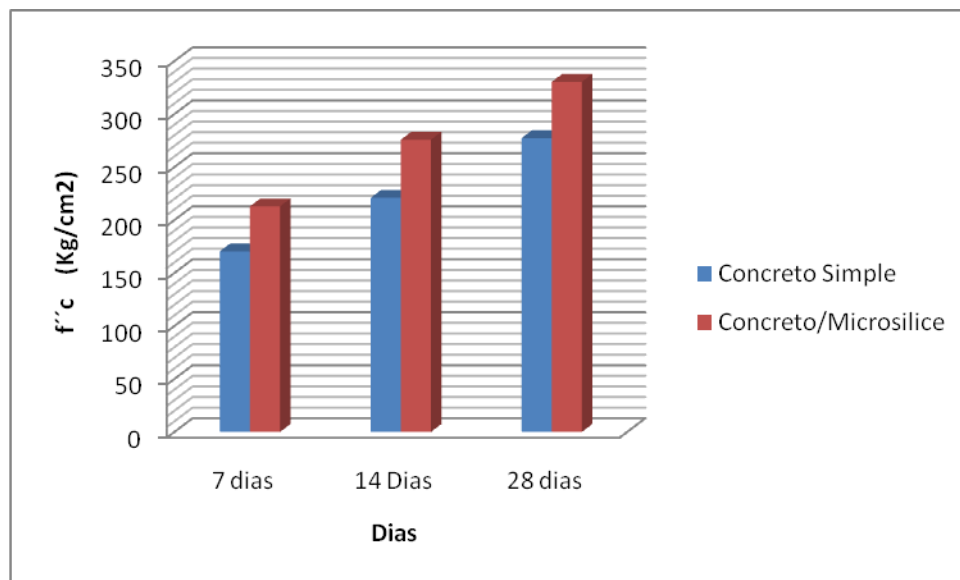
---

## CAPITULO 3.

### Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos de la caracterización por corrosión del concreto reforzado con adiciones de microsilice por las técnicas electroquímicas las cuales se pudieron obtener la tendía activo-pasiva, el mecanismo de corrosión, la resistencia electroquímica ( $R_n$ ), el índice de picaduras (IL), entre otros parámetros, y de esta manera realizar la evaluación del comportamiento ante la corrosión de los materiales con microsilice y compararlos con un concreto fabricado con el 100% de cemento Portland.

#### 3.1 Resistencia Mecánica



**Gráfica 1.** Valores de resistencia a la compresión de los elementos de concreto simple y con microsilice.

En la grafica 1 se observa que los elementos con microsilice tienen una mayor resistencia a la compresión que los de concreto simple por lo cual se observa que las adiciones de microsilice, no están afectando el parámetro mecánico de este

---

---

material. Esto se podría explicar por el producto de las reacciones químicas y por efectos físicos de las puzolanas.

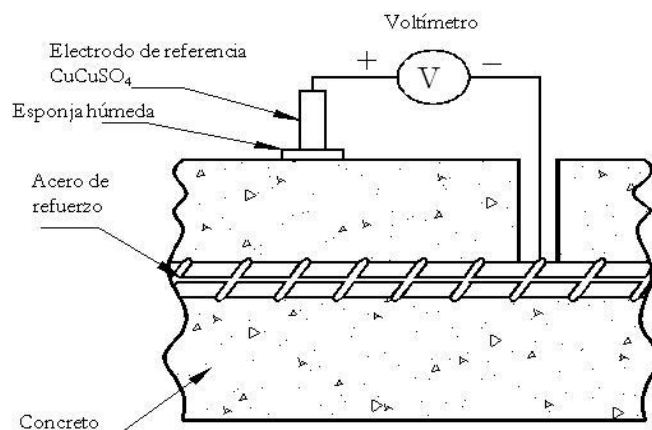
El sílice amorfo y el hidróxido de calcio (CH) producido por la hidratación del cemento para formar CSH hacen el efecto químico debido a las reacciones puzolánicas. El efecto que tienen las partículas de microsílíce, de envolver o recubrir los materiales sólidos, llenando los espacios entre los granos de cemento, de la misma manera que el cemento llena los espacios entre los agregados finos, y los agregados finos llenan los espacios de los agregados gruesos del concreto.

### **3.2 Pruebas Electroquímicas**

El análisis e interpretación de resultados fue de forma continua durante la experimentación, esto para retroalimentar el sistema en caso de desviaciones significativas durante los ensayos. Se utilizó el potencióstato/galvanostato Gill 8 equipo de electroquímica con el que se pudieron realizar todas las pruebas de corrosión como: potencial de media celda, Resistencia a la Polarización Lineal y Ruido electroquímico.

#### **3.2.1 Potencial de Media Celda**

Consiste en medir el potencial de corrosión (ASTM C876-09) del acero en el concreto mediante uso de electrodos de referencia. Se determinará el potencial electroquímico, que es un potencial eléctrico de metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto. En la figura 22, se observa el esquema general para poder realizar la medición del potencial de corrosión del acero embebido en el concreto.



**Figura 22.** Esquema general para realizar la medición de potenciales de corrosión.®

La interpretación de los potenciales de corrosión se realiza con base a la norma ASTM C-876 (ver tabla 1) u organismos internacionales como el DURAR<sup>115</sup>.

Potencial $E_{corr}$ (mV)	Riesgo de Daño
> -200	10 % de probabilidad de corrosión
-200 a -350	Cierta incertidumbre
< -350	90 % de probabilidad de corrosión

ASTM C-876 (ASTM C876-91 (reapproved 1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete)<sup>116</sup>.

**Tabla 9.** Interpretación de resultados de los potenciales de corrosión

El análisis de las gráficas de potencial de corrosión o potenciales de media celda obtenidas durante el monitoreo por corrosión de esta investigación se realizó

---

---

de acuerdo a los criterios de evaluación establecidos por la norma ASTM C-876 y a criterios establecidos por organismos internacionales como el (DURAR), ver Tabla 9.

Los valores de potencial proporcionan la probabilidad acerca de la corrosión del acero que se esté presentando en la estructura de concreto, pero es muy importante que estos sean interpretados adecuadamente considerando la información que pueda recopilarse acerca de las condiciones climatológicas y ambientales circundantes a la estructura, así como de la calidad de los materiales (concreto) empleados y su correcto uso.

El potencial electroquímico de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) del acero en concreto es un parámetro que indica el estado de avance de la corrosión del acero (pasivo o activo).

En la Gráfica 2 Se presentan los resultados del comportamiento del potencial de corrosión para los especímenes con las diferentes combinaciones de concreto y acero de refuerzo.

Los concretos con adiciones de microsilíce y acero limpio presentaron valores en la zona de 10% de probabilidad de corrosión con potenciales entre -133 y -177.6 mV de la semana 1 a la 23, de la semana 25 a la 63 tuvieron valores en el rango de incertidumbre con potenciales entre -216 a -343.2; finalmente entraron a la zona de 90% de corrosión de la semana 63 en adelante con valores de potencial entre -358.8 hasta 584.9 en la semana 112 de acuerdo a la norma ASTM C876.

---

---

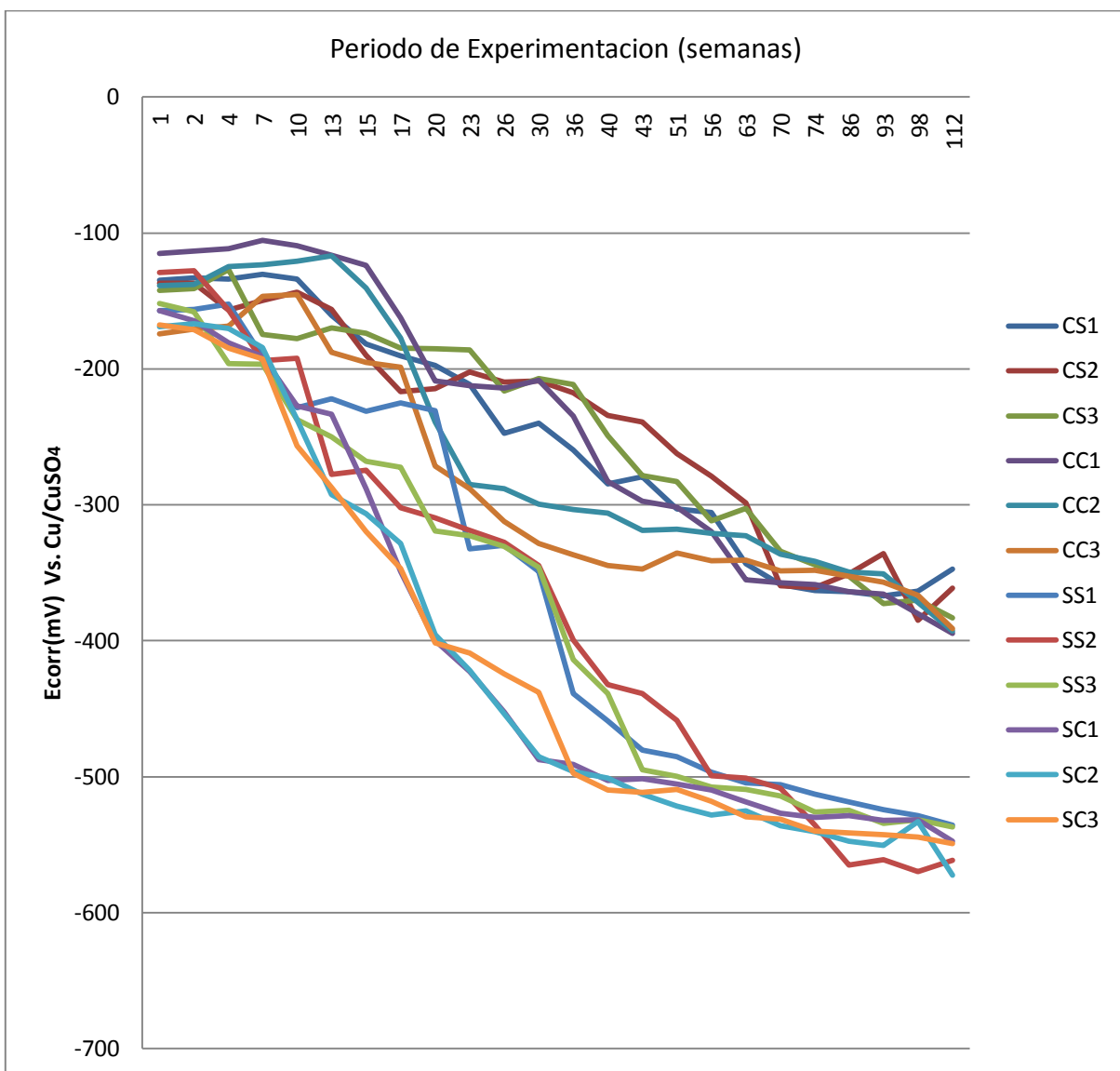
Para los especímenes con microsilíce y acero de refuerzo con corrosión inicial los valores de potencial de la semana 1 a la 20 estuvieron en la zona de menos del 10% probabilidad e corrosión con potenciales entre -115.1 y -198.6mV, desde la semana 20 a la 63 estuvieron en incertidumbre con valores de potencial de corrosión entre -208.2 y -341.3, en la zona de 90% de probabilidad de corrosión enstuvieron de la semana 63 a la 112 que fue la última medición con resultados de potenciales entre -355.2 y 594.6mV.

Los potenciales de corrosión en los elementos de concreto simple tienen los resultados siguientes: Con valores entre -128.9 y -196.7mV de la semana 1 a la 7 en 10% de probabilidad de corrosión, en zona de incertidumbre con potenciales entre -228.7 y -330.5mV de la semana 10 a la 30 y de la semana 36 a la ultima medición en la semana 112 con potenciales de corrosión entre -384.4 y 569.6mV con mas de 90% de probabilidad de corrosión, de acuerdo con ASTM C876.

Finalmente para la combinación de especímenes de concreto sin microsilíce y acero de refuerzo con corrosión inicial, de la semana 1 a la 7 tuvieron valores entre -157.1 y -192.8, es decir, con 10% probabilidad de corrosión, en zona de incertidumbre con valores entre -227.1 y 348.9 mV, en el periodo entre las semanas 10 y 17 y de la semana 20 a la 112 siendo esta la última medición se obtuvieron valores de potenciales de corrosión entre -395.4 y 572.6 mV considerándose por el rango de valores que están con por lo menos 90% de probabilidad de corrosión en ese periodo.

Todo lo anterior según lo establecido por la norma ASTM C876.





**Gráfica 2.** Potenciales de corrosión de media celda.

### 3.2.2 Resistencia a la Polarización Lineal

A continuación se muestran algunos de los resultados de las mediciones de resistencia a la polarización (ver tablas 10-22) donde aparecen los parámetros electroquímicos como: resistencia a la polarización,  $I_{corr}$  y Velocidad de Corrosión

---

---

para los especímenes en estudio. La primera tabla muestra valores iniciales y las siguientes la evolución de los mismos.

Se muestran tablas de las semanas donde las variaciones de los valores fueron más representativas:

<i>Especimen</i>	<i>LPR (<math>\Omega</math>)</i>	<i>I<sub>corr</sub> (<math>\mu</math>A/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>Vel.corr(mm/año)</i>
<b>CS1</b>	664.8	0.42	4.9
<b>CS2</b>	585.6	0.43	5.0
<b>CS3</b>	557.9	0.38	4.4
<b>CC1</b>	556.1	0.44	5.1
<b>CC2</b>	473.5	0.43	5.0
<b>CC3</b>	389.8	0.40	4.6
<b>SS1</b>	883.2	0.65	7.5
<b>SS2</b>	514.4	0.67	7.7
<b>SS3</b>	627	0.63	7.3
<b>SC1</b>	456.7	0.76	8.8
<b>SC2</b>	547.5	0.77	8.9
<b>SC3</b>	402.1	0.73	8.4

**Tabla 10.** Resultados RPL, semana 15.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	740.5	0.45	5.2
<b>CS2</b>	685.3	0.42	4.9
<b>CS3</b>	594.4	0.40	4.6
<b>CC1</b>	627.3	0.41	4.7
<b>CC2</b>	546	0.44	5.1
<b>CC3</b>	507.3	0.43	5.0
<b>SS1</b>	935.3	0.70	8.1
<b>SS2</b>	556.6	0.69	8.0
<b>SS3</b>	731.9	0.74	8.6
<b>SC1</b>	494.3	0.88	10.2
<b>SC2</b>	597.7	0.85	9.8
<b>SC3</b>	364.1	0.84	9.7

**Tabla 11.** Resultados RPL, semana 23.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	723.8	0.47	5.4
<b>CS2</b>	710.1	0.44	5.1
<b>CS3</b>	395.4	0.45	5.2
<b>CC1</b>	562.6	0.50	5.8
<b>CC2</b>	378.8	0.43	5.0
<b>CC3</b>	490.5	0.46	5.3
<b>SS1</b>	836.2	0.79	9.1
<b>SS2</b>	511.5	0.74	8.6
<b>SS3</b>	620.9	0.78	9.0
<b>SC1</b>	335.8	0.83	9.6
<b>SC2</b>	433.5	0.91	10.5
<b>SC3</b>	308.3	0.90	10.4

**Tabla 12.** Resultados RPL, semana 28

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	428.9	0.47	5.4
<b>CS2</b>	569.8	0.43	5.0
<b>CS3</b>	422.1	0.49	5.7
<b>CC1</b>	560.5	0.40	4.6
<b>CC2</b>	545	0.47	5.4
<b>CC3</b>	449	0.44	5.1
<b>SS1</b>	862	0.49	5.7
<b>SS2</b>	532.3	0.83	9.6
<b>SS3</b>	666.2	0.80	9.2
<b>SC1</b>	339.12	0.99	11.4
<b>SC2</b>	371.65	1.07	12.4
<b>SC3</b>	381.9	1.04	12.0

**Tabla 13.** Resultados RPL, semana 30.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	849.4	0.49	5.7
<b>CS2</b>	865.4	0.53	6.1
<b>CS3</b>	493.6	0.50	5.8
<b>CC1</b>	654.3	0.65	7.5
<b>CC2</b>	590.5	0.61	7.1
<b>CC3</b>	495	0.62	7.2
<b>SS1</b>	788.5	0.73	8.4
<b>SS2</b>	600.9	0.68	7.9
<b>SS3</b>	648.7	0.75	8.7
<b>SC1</b>	306.2	1.38	16.0
<b>SC2</b>	303.7	1.40	16.2
<b>SC3</b>	430.9	1.34	15.5

**Tabla 14.** Resultados RPL, semana 36.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	891.8	0.66	7.6
<b>CS2</b>	660.2	0.62	7.2
<b>CS3</b>	499.4	0.65	7.5
<b>CC1</b>	675.6	0.63	7.3
<b>CC2</b>	605.9	0.70	8.1
<b>CC3</b>	537.8	0.61	7.1
<b>SS1</b>	552.9	1.10	12.7
<b>SS2</b>	414.2	1.06	12.3
<b>SS3</b>	646.6	1.07	12.4
<b>SC1</b>	253	1.42	16.4
<b>SC2</b>	307.2	1.53	17.7
<b>SC3</b>	299.3	1.48	17.1

**Tabla 15.** Resultados RPL, semana 43.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	$I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	598.7	0.69	8.0
<b>CS2</b>	632.6	0.62	7.2
<b>CS3</b>	639.9	0.65	7.5
<b>CC1</b>	766.8	0.55	6.4
<b>CC2</b>	683.6	0.72	8.3
<b>CC3</b>	641.8	0.66	7.6
<b>SS1</b>	560.6	1.01	11.7
<b>SS2</b>	426.6	1.08	12.5
<b>SS3</b>	741	1.07	12.4
<b>SC1</b>	266.9	1.58	18.3
<b>SC2</b>	278.3	1.52	17.6
<b>SC3</b>	320.3	1.62	18.7

**Tabla 16** Resultados RPL, semana 51.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	955.8	0.66	7.6
<b>CS2</b>	887.9	0.60	6.9
<b>CS3</b>	554.9	0.68	7.9
<b>CC1</b>	682.7	0.62	7.2
<b>CC2</b>	746	0.67	7.7
<b>CC3</b>	708.7	0.60	6.9
<b>SS1</b>	492.2	1.12	12.9
<b>SS2</b>	421	1.00	11.6
<b>SS3</b>	725.8	1.03	11.9
<b>SC1</b>	262.5	1.61	18.6
<b>SC2</b>	268.1	1.58	18.3
<b>SC3</b>	297.8	1.62	18.7

**Tabla 17** Resultados RPL, semana 56.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	784.9	0.72	8.3
<b>CS2</b>	618.7	0.68	7.9
<b>CS3</b>	622.1	0.66	7.6
<b>CC1</b>	628.5	0.68	7.9
<b>CC2</b>	701.5	0.69	8.0
<b>CC3</b>	675.1	0.59	6.8
<b>SS1</b>	305.7	1.10	12.7
<b>SS2</b>	357.2	0.99	11.5
<b>SS3</b>	498.2	1.07	12.4
<b>SC1</b>	226.9	1.68	19.4
<b>SC2</b>	234.7	1.94	22.4
<b>SC3</b>	263.4	1.86	21.5

**Tabla 18.** Resultados RPL, semana 63.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	925.33	0.77	8.9
<b>CS2</b>	685.02	0.72	8.3
<b>CS3</b>	518.18	0.74	8.6
<b>CC1</b>	701.00	0.72	8.3
<b>CC2</b>	628.68	0.78	9.0
<b>CC3</b>	558.02	0.77	8.9
<b>SS1</b>	573.69	1.15	13.3
<b>SS2</b>	429.77	1.07	12.4
<b>SS3</b>	670.91	0.96	11.1
<b>SC1</b>	262.51	1.93	22.3
<b>SC2</b>	318.75	1.98	22.9
<b>SC3</b>	310.55	1.89	21.8

**Tabla 19** Resultados RPL, semana 70.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	930.67	0.79	9.1
<b>CS2</b>	864.56	0.82	9.5
<b>CS3</b>	540.31	0.70	8.1
<b>CC1</b>	664.75	0.84	9.7
<b>CC2</b>	726.39	0.80	9.2
<b>CC3</b>	690.07	0.82	9.5
<b>SS1</b>	479.26	1.19	13.8
<b>SS2</b>	409.93	1.03	11.9
<b>SS3</b>	706.72	1.09	12.6
<b>SC1</b>	255.60	1.98	22.9
<b>SC2</b>	261.05	1.97	22.8
<b>SC3</b>	289.97	1.79	20.7

**Tabla 20.** Resultados RPL, semana 78.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	847.07	0.76	8.8
<b>CS2</b>	786.89	0.75	8.7
<b>CS3</b>	491.77	0.69	8.0
<b>CC1</b>	605.03	0.70	8.1
<b>CC2</b>	661.13	0.89	10.3
<b>CC3</b>	628.08	0.86	9.9
<b>SS1</b>	436.21	1.24	14.3
<b>SS2</b>	373.11	1.16	13.4
<b>SS3</b>	643.23	1.09	12.6
<b>SC1</b>	232.64	1.96	22.7
<b>SC2</b>	237.60	1.90	22.0
<b>SC3</b>	263.92	1.99	23.0

**Tabla 21.** Resultados RPL, semana 93.

<i>Espécimen</i>	LPR ( $\Omega$ )	Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Vel.corr(mm/año)
<b>CS1</b>	799.66	0.79	9.1
<b>CS2</b>	742.85	0.75	8.7
<b>CS3</b>	464.25	0.78	9.0
<b>CC1</b>	571.17	0.96	11.1
<b>CC2</b>	624.13	0.98	11.3
<b>CC3</b>	592.92	0.90	10.4
<b>SS1</b>	411.79	1.26	14.6
<b>SS2</b>	352.22	1.32	15.3
<b>SS3</b>	607.23	1.27	14.7
<b>SC1</b>	219.62	1.98	22.9
<b>SC2</b>	224.30	2.01	23.2
<b>SC3</b>	249.15	1.95	22.5

**Tabla 22.** Resultados RPL, semana 112.



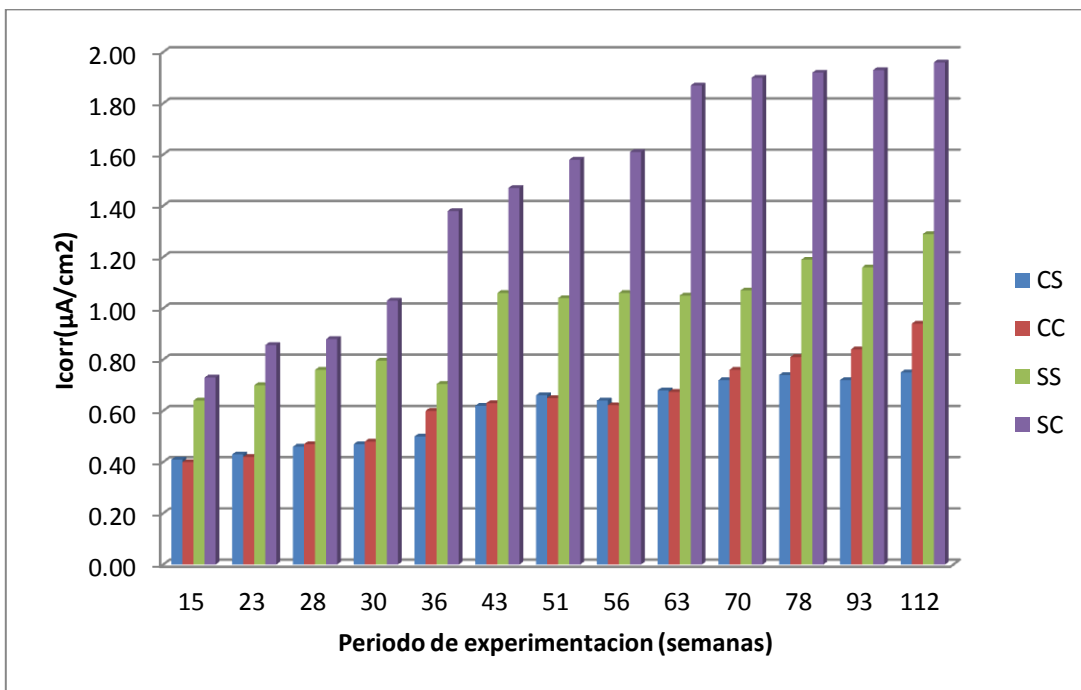
En las gráficas de Potencial Vs Corriente ( $E$  vs  $i$ ), (gráfica 3) se puede observar el comportamiento de la velocidad de corrosión de cada espécimen en estudio, después de alrededor de 112 semanas de monitoreo. El cálculo de la velocidad de corrosión se realiza por medio de la Stern y Geary, para obtener las densidades de corriente ( $i_{corr}$ ), en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , y de esta manera poder evaluar el nivel de corrosión.

La Red Durar emplea un criterio para determinar el nivel de corrosión donde presenta cuatro niveles de corrosión; que van de despreciables hasta niveles muy elevados de corrosión como se muestra en la Tabla 23. Todos estos valores se basan en considerar corrosión generalizada. Cuando la corrosión es localizada se calcula la penetración local máxima del ataque, multiplicandolo por 10 el valor medido. Así, para un valor de  $i_{corr}$  de  $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ( $3 \mu\text{A}/\text{año}$  de penetración homogénea) se puede calcular que en caso de ataque localizado, la máxima profundidad de picaduras será de  $30 \mu\text{A}/\text{año}$ <sup>114</sup>.

Los valores de velocidad de corrosión se pueden utilizar también para estimar la pérdida de capacidad portante estructural<sup>114</sup>.

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nivel de Corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 – 0,5	Moderado
0,5 – 1	Elevado
> 1	Muy elevado

**Tabla 23.** Criterio de Evaluación del nivel de corrosión.



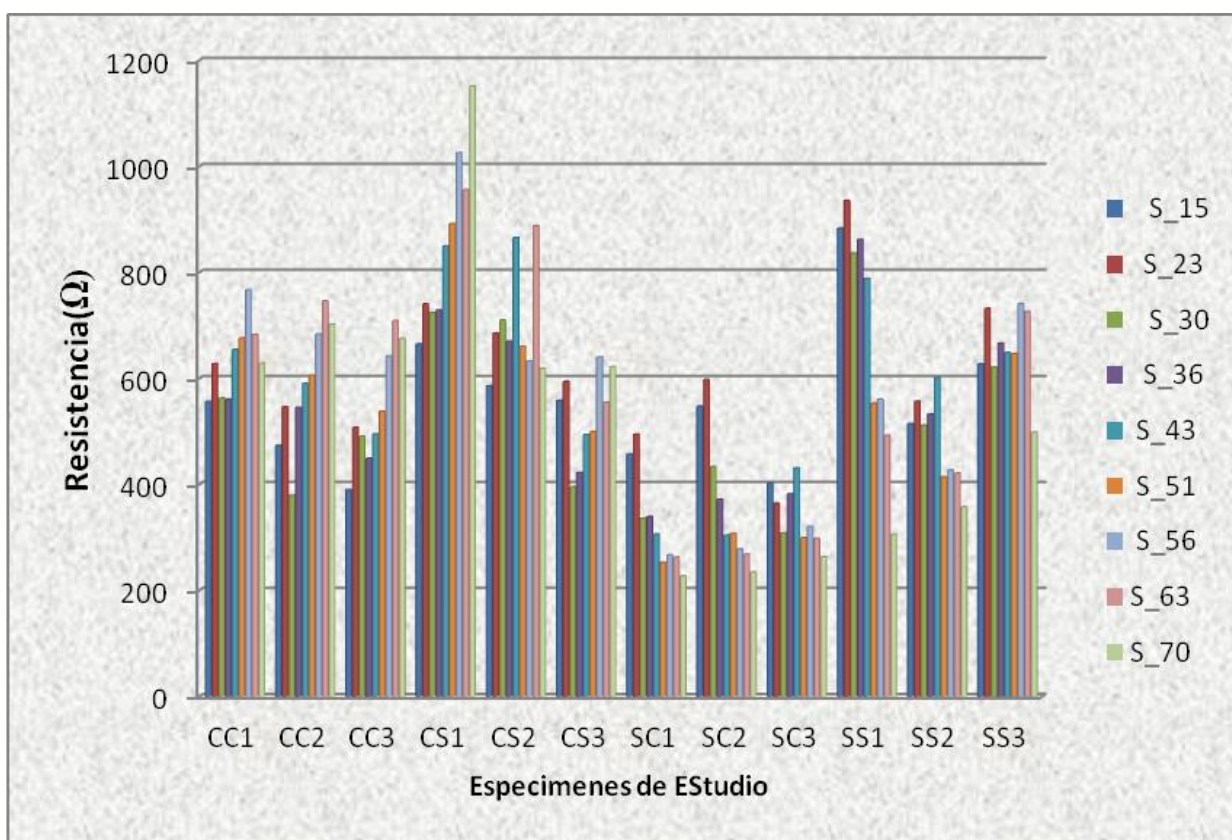
**Gráfica 3.** Velocidad de corrosión obtenida por RPL

En esta gráfica se observan las velocidades de corrosión determinadas por El método de Resistencia a la Polarización Lineal

Los elementos con mayores velocidades de corrosión son los fabricados con concreto simple y acero de refuerzo con corrosión inicial (SC), ya que el concreto no contiene micro sílices por lo que es un concreto menos denso que uno con micro sílice y además el acero de refuerzo tenía corrosión inicial; con estas características lo esperado es justamente que sean los que tienen la mayor velocidad de corrosión. Dichos Elementos mostraron velocidades de corrosión de moderados, es decir, mayores a  $0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  desde edades tempranas y más de  $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$  después de la semana 36, rango de valores de acuerdo a la Tabla 23.

Los elementos que les siguen en velocidad de corrosión aún alta son los que tienen nomenclatura SS, que son los que tienen un concreto sin micro sílices y el acero de refuerzo no tenía corrosión inicial que tiene valores de  $I_{corr}$  mayores a  $1.0 \mu A/cm^2$  que se consideran muy elevados desde la semana 43.

Los elementos con microsilíce, ya sea con acero de refuerzo limpio o con corrosión inicial tienen velocidades de corrosión muy similares, velocidades pequeñas o moderadas con valores hasta  $0.5 \mu A/cm^2$  hasta la semana 51, no llegando a tener valores mayores a  $1.0 \mu A/cm^2$  en ningún momento de este trabajo de investigación.



**Gráfica 4.** Valores de Resistencia de (LPR) para los especímenes en estudio.

---

### **3.3 Ruido Electroquímico.**

Esta técnica consiste, en conectar dos electrodos de trabajo (WE, Working Electrode) nominalmente idénticos y registrar las variaciones de la corriente que fluye entre ellos ( $\Delta I$ ) en función del tiempo y simultáneamente se registran las variaciones del potencial de ambos electrodos ( $\Delta V$ ) frente a un electrodo de referencia (RE, Reference Electrode). El electrodo de referencia utilizado durante al monitoreo de los especímenes estudiados fue el de  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ .

La técnica de ruido electroquímico es muy sensible y útil, además de poder estimar la velocidad de corrosión del sistema, se emplea particularmente en situaciones en donde los procesos incluyen corrosión generalizada o la interpretación del rompimiento de la película pasiva y el ingreso de las especies provocando corrosión localizada, esta técnica caracteriza la forma y el tipo de corrosión mediante dos tipos de análisis: visual y estadístico.

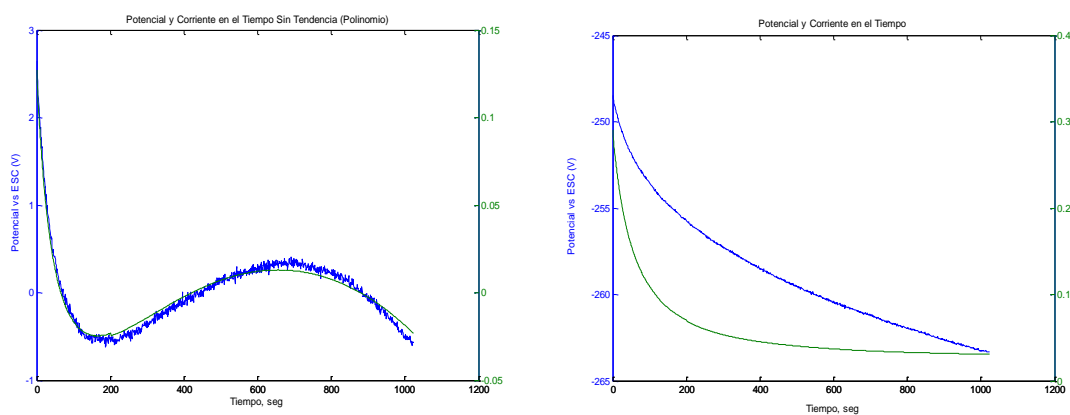
#### **3.3.1 Análisis visual de las series de tiempo.**

El análisis visual de las series de tiempo, permite identificar las características de los tipos de corrosión, asociado los transitorios a corrosión generalizada o al rompimiento o repasivación, así como las oscilaciones asociadas a hendiduras o picaduras.

Las series de tiempo de ruido electroquímico en potencial y corriente para la los concretos de esta investigación se analizan en las graficas siguientes.

---

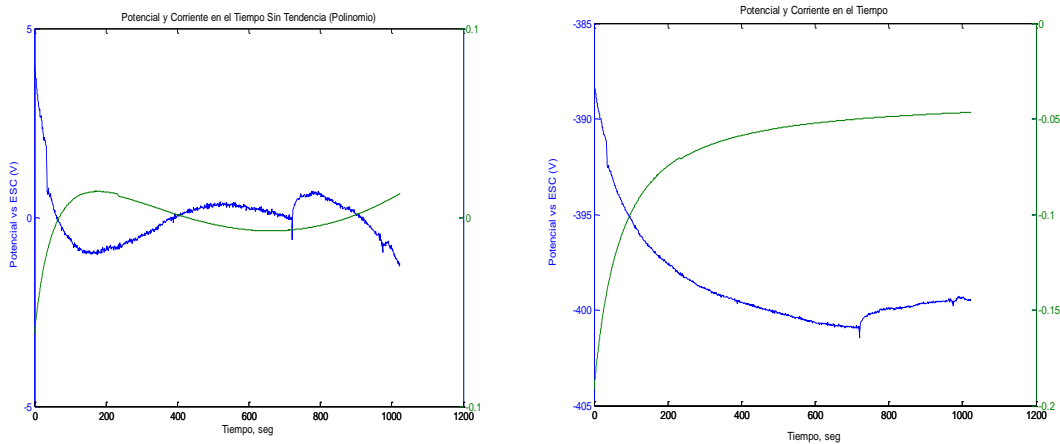
Las series de tiempo de ruido electroquímico en corriente y potencial (con tendencia y sin tendencia) para el espécimen CS se observan en la grafica 5 se observan para el especímenes que contienen microsilíce y sin corrosión, por lo que su comportamiento en la señal de ruido electroquímico indicaría que no tiene corrosión, El ruido en potencial esta en valores de -245 a -260 mV con respecto al electrodo de referencia. Las fluctuaciones de la señal de las series de ruido en corriente y potencial son prácticamente similares la tendencia y su comportamiento es igual. A medida que el potencial se vuelve más negativo la corriente tiende a bajar, la frecuencia de los transitorios son muy bajos.



**Gráfica 5.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen CS.

---

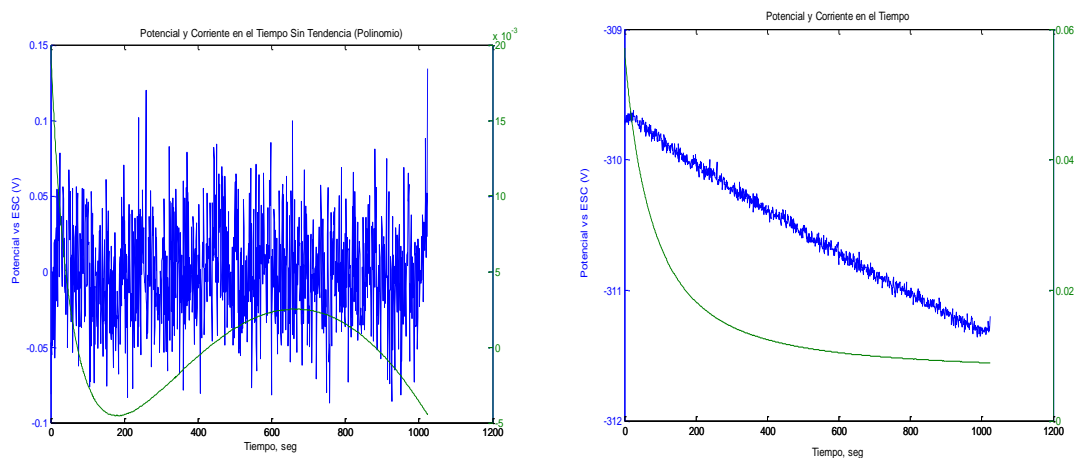
En la grafica 6 se observan las series de tiempo de ruido electroquímico en corriente y potencial (con tendencia y sin tendencia) para el espécimenes que contienen microsíllice y sin corrosión, por lo que su comportamiento en la señal de ruido electroquímico indicaría que no tiene corrosión, El ruido en potencial esta en valores de -385 a -400 mV con respecto al electrodo de referencia. En las series de ruido en corriente y potencial se puede ver que a medida que el potencial se vuelve más negativo la corriente tiende a incrementarse, pero después los transitorios de la señal son muy bajos.



**Gráfica 6.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen CC.

---

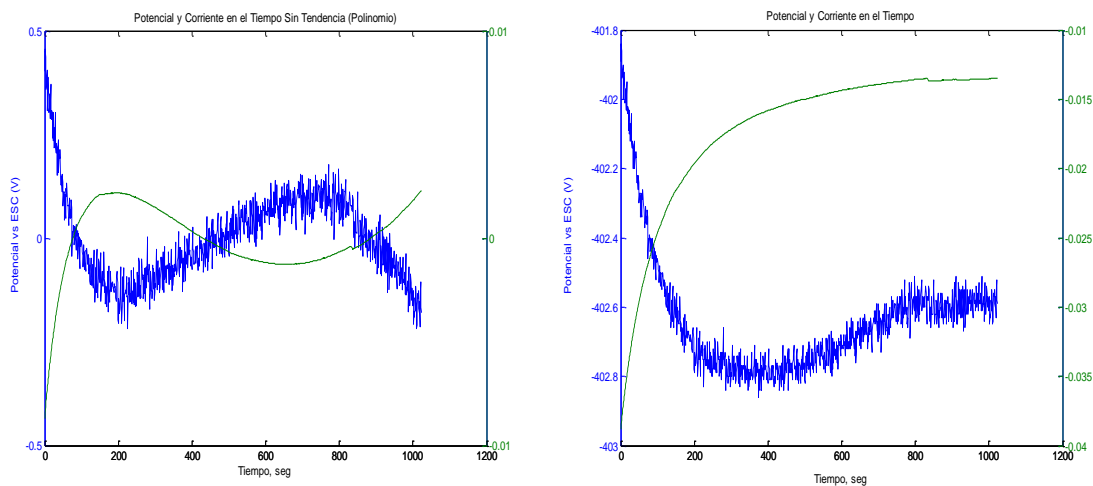
En la gráfica 7 se pueden observar las series de tiempo de ruido electroquímico en corriente y potencial donde la señal de los transitorios de ruido en potencial son más intensos que los de corriente, indicando una probabilidad de una mayor corriente, pero al observar los valores de corriente de  $10^{-8} \mu\text{A}/\text{cm}^2$  resultaría una corrosión menos intensa.



**Gráfica 7.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen SS.

---

El espécimen SC (grafica 8) sus series de tiempo de ruido electroquímico en corriente y potencial tiende a presentar una corrosión más intensa que los especímenes anteriormente analizados donde la señal de las series de tiempo (con tendencia y sin tendencia) indicaría que hay una mayor corrosión, El ruido en potencial esta en valores de -400 mV con respecto al electrodo de referencia. Las fluctuaciones de la señal de las series de ruido en potencial son más intensas que la de la corriente y esto indica mayor activación del material en estudio. Los transitorios de la señal en corriente son mucho mayor.



**Gráfica 8.** Series de tiempo de ruido electroquímico para espécimen SC.



	CC1	CC2	CC3	CS1	CS2	CS3	SC1	SC2	SC3	SS1	SS2	SS3
Rn_POL	115.99	9.55	18.97	4.07E+03	78.86	63.85	22.49	4.27	65.76	18.36	266.34	70.04
lcorr_POL	2.00E-04	2.70E-03	0.0014	6.39E-06	3.30E-04	4.07E-04	0.0012	0.0061	3.00E-04	0.0014	9.70E-05	3.70E-04
desvstdpot	2.22	0.03	0.23	0.05	1.37	0.11	0.44	0.04	0.97	0.22	0.29	0.72
desvstdi	0.019	0.004	0.012	0.000	0.017	0.002	0.012	0.009	0.015	0.012	0.001	0.010
Rms	0.19	0.02	0.06	0.00	0.18	0.02	0.07	0.04	0.07	0.06	0.01	0.07
IK=IL	0.32	0.52	0.57	0.31	0.31	0.29	0.61	0.58	0.61	0.44	0.62	0.38
PSDpot	-1.97	-0.25	-1.25	-2.05	-1.82	-0.90	-1.38	-1.22	-1.43	-1.34	-2.48	-4.14
PSDi	-3.64	-4.37	-7.03	-3.30	-3.78	-5.50	-6.97	-6.31	-7.38	-6.71	-5.49	-6.93

**Tabla 24.** Parámetros Electroquímicos de Ruido Electroquímico

Espécimen	Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)			Ruido Electroquímico (EN)		
	Rp (Ω)	Icorr (μA/cm <sup>2</sup> )	Crate (mm/Año)	Rn (Ω)	Icorr (μA/cm <sup>2</sup> )	I.L
<b>SC</b>	226.9	1.60	1.86	65.82	3.95	0.61
<b>SS</b>	305.7	1.20	1.39	70.08	3.71	0.48
<b>CC</b>	628.5	0.60	0.70	115.56	1.25	0.34
<b>CS</b>	651.5	0.38	0.44	412.70	0.63	0.31

**Tabla 25.** Parámetros Electroquímicos de RPL y Ruido Electroquímico

Esta tabla indica los valores de los elementos más representativos de cada Grupo de especímenes reflejando El comportamiento de cada grupo a lo largo Del período de experimentación.

### 3.3.2 Análisis de la morfología de corrosión por el método estadístico.

Para analizar la morfología de corrosión que presentaban los metales después de estar expuestos en medios agresivos, se realiza por el método estadístico (Kelly y Hudson, 1996).

El valor estadístico empleado, se realiza mediante un análisis del ruido en electroquímico en corriente, y es la razón de la desviación estándar con la raíz media cuadrática, llamado “índice de localización o de picado” (I.L)

El resultado indica el tipo de corrosión presente en el sistema en estudio como corrosión localizada, generalizada, mixta o inicio de picaduras, estas morfologías se indican en la Tabla 26.

Los resultados del índice de localización para las diferentes formulaciones de concretos aligerados con mezclas ternarias y con diferente condición en el acero, presentan tipos de corrosión localizada.

Por medio de esta técnica se obtuvo el tipo de corrosión que presento el acero de refuerzo embebido en los especímenes de concreto, con la finalidad de conocer si esta adición microsílíce en los porcentajes, relación agua-cemento y para el tipo de cemento utilizado brindaba a este (acero) protección contra el ataque de cloruros. El índice de localización fue el parámetro utilizado para conocer el tipo de corrosión, este se calculo mediante el cociente de la desviación estándar de la corriente ( $\sigma_I$ ) y la raíz cuadrática media de la corriente ( $I_{rms}$ ) según lo estipulado en la norma G 199-09<sup>117</sup>. Para interpretar los valores obtenidos del índice de localización se utilizaron los valores de la tabla 26 por medio de los cuales se conoció el tipo de corrosión que se estaba presentando en el acero de refuerzo embebido en concretos en estudio.

I.L	Tipo de corrosión
0.001 - 0.01	Generalizada
0.01 - 0.1	Mixta
0.1 – 1	Localizada
> 1.0	Iniciación de Picado

**Tabla 26.** Interpretación del índice de localización.

---

---

Espécimen	I.L	Tipo de Corrosión
SC	0.61	Localizada
SS	0.48	Localizada
CC	0.34	Localizada
CS	0.31	Localizada

**Tabla 27.** Resultados del Índice de Localización para las formulaciones de  
Concretos en estudio.

---

### 3.4 Comparativa de los resultados de laboratorio vs. Especímenes de prueba.

Se extrajo el refuerzo de acero de los elementos más representativos de las diferentes variables, es decir, de probetas de concreto con microsilíce y de concreto simple y de cada una de ellas de los elementos con corrosión inicial y con elementos sin corrosión al inicio del ensayo para verificar los resultados de laboratorio con las condiciones reales de los elementos de estudio obteniendo los siguientes resultados:

En las figuras siguientes se presentan las muestras antes descritas:



**Figura 23.** Muestra de concreto con microsilíce con Acero de refuerzo sin corrosión inicial (CS).

En la figura 23 se observa que el elemento de acero tiene poca corrosión localizada esto debido a la protección dada por un concreto compacto, poco permeable y mas denso por la adición de microsilíce y a que el acero no tenia corrosión inicial..

---

En la figura 24 El elemento de acero de refuerzo también presenta corrosión localizada leve o moderada a pesar de tener corrosión al inicio del experimento, todo esto por la protección mencionada anteriormente gracias a la adición del microsílíce al concreto.



**Figura 24.** Elemento de refuerzo proveniente de una probeta de concreto con adición de microsílíce. (CC).



**Figura 25.** Elemento de acero de refuerzo sin corrosión inicial proveniente de una probeta de concreto simple (SS).





**Figura 26.** Elemento de acero de refuerzo con corrosión inicial proveniente de una probeta de concreto simple (SC).

Como puede verse en la figura 26 la corrosión en el elemento metálico es mucho más notable, de tipo localizado e inclusive se observan muestras de productos de corrosión en el concreto que cubría al acero de refuerzo.

En la figura 26 el elemento presenta corrosión localizada notoria teniendo el concreto que lo recubría productos de corrosión en cantidad considerable. Este espécimen de concreto en particular mostraba un par de manchas de corrosión en el exterior muestra de la cantidad de productos de corrosión producidos.

En esto dos últimos casos el concreto era simple y no brinda protección suficiente a ninguno de los elementos ya fuera con o sin corrosión inicial, siendo grande la velocidad de corrosión en el elemento con corrosión inicial y propiedades del concreto adecuadas para que en esas condiciones proporcione

---

una vida de servicio y/ útil satisfactoria de pertenecer a alguna estructura sujeta a las condiciones del estudio.



# Conclusiones y Recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

#### **Resistencia Mecánica.**

La adición de microsílíce al concreto sin duda modifico sus propiedades mecánicas, de resistencia eléctrica y permeabilidad por lo que los niveles de corrosión en los elementos de prueba embebidos en concreto con microsílíce tienen valores de velocidad de corrosión más bajos y por lo tanto una mayor vida de servicio.

Los valores de resistencia mecánica aumentaron entre un 19 y un 24% en los elementos con adición de microsílíce respecto a los de concreto simple, esto debido a su mayor densidad y menor porosidad, ya que el microsílíce llena esos pequeños espacios que el agregado fino del concreto fino ya no logra llenar.

Esto influye también en su menor permeabilidad ya que los cloruros y humedad tienen una mayor resistencia para avanzar hacia el acero de refuerzo sobre todo si se siguen las recomendaciones de recubrimiento mínimos requerido para diferentes ambientes.

---

---

## Potenciales de Media Celda

En el caso de los valores de Potenciales de Media Celda aumentaron para los elementos sin micro sílice con nomenclatura SS y SC, los cuales entran a la zona de incertidumbre a edades cercanas a las 7 semanas y desarrollaron potenciales de corrosión que los colocaban con 90% de probabilidad de corrosión a edades de 17 (SC) y 30 semanas (SS) respectivamente, esto basando en los valores de la norma ASTM 876 91<sup>79</sup>.

Por otro lado se puede ver los valores de potencial de media celda para los especímenes con microsílíce están en zona de 10% de posibilidad de corrosión hasta entrada las semana 20 (CC) y 23 (CS) respectivamente; se mantuvieron en zona de incertidumbre por varias semanas hasta entrar a zona de 90% de posibilidad de corrosión hasta las semanas 63 para ambos caso. Estos especímenes con microsílíce se mantienen con potenciales de corrosión de bajos a moderados durante gran parte de la experimentación gracias a la protección brindada por el microsílíce, indicando que el proceso de corrosión esta pasivado o desarrollándose muy lentamente lo que permite pronosticar una buena vida útil a estos refuerzos del concreto bajo estas condiciones.

## Resistencia a la Polarización Lineal (LPR).

Los valores más altos de velocidad de corrosión obtenidos por la técnica de resistencia a la polarización lo tienen elementos Sin micro sílice y con Corrosión (SC) con valores entre , le siguen los elementos Sin micro sílice y Sin Corrosión inicial (SS) y después están los elementos Con micro sílice (CS) y (CC) los cuales tienen velocidades de corrosión de moderadas a bajas gracias a las propiedades proporcionadas al concreto por el microsílíce.

---

---

## Ruido Electroquímico

De las pruebas de Ruido Electroquímico donde la tendencia es la misma mostrando que la variable de corrosión inicial es importante sólo si el concreto no tiene micro sílice pero no en los casos donde la mezcla de concreto tiene micro sílice, el cual vuelve al concreto más denso y permite que las estructuras de concreto reforzado tengan una vida útil más larga con un menor costo de mantenimiento.

Los valores obtenidos del Índice de Localizaron debido a que los valores están dentro de  $0.01 < I.L < 1.0$  se considera que existe una corrosión localizada.

### 4.2 Recomendaciones

- Complementar los estudios con un análisis petrográfico de la matriz del concreto, para conocer el aspecto descriptivo, composición mineralógica y su estructura.
- Realizar una evaluación electroquímica de la corrosión del acero de refuerzo en  $\text{NaSO}_4$ . Ya que el ataque de sulfatos no solo produce degradación por expansión y fisuración provocando elevadas velocidades de corrosión; sino también, una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de cohesión en la pasta de cemento, con pérdida de adherencia entre la pasta y las partículas del agregado

---

---

## Capítulo 5.

### Referencias

- 
- [1] <sup>1</sup> Malo Tamayo, J. M. y Uruchurtu Chavarín, J., “*La técnica de ruido electroquímico para el estudio de la corrosión*”, I jornada de técnicas electroquímicas, XVI congreso S.M.E. Querétaro, Querétaro 2001.
- <sup>2</sup> J. F. Shackelford “Materials Science For Engineers” pag 19. 2004.
- <sup>3</sup> NACE “CP-1 Cathodic Protection Tester Course Manual” Pag. 2:25 NACE International. 2006
- <sup>4</sup> Torres Acosta, Andrés y Martínez Madrid, Miguel, “*Diseño de estructuras de concreto con criterios de durabilidad*”, Sanfandila Querétaro, Méx. Publicación técnica No. 181, Instituto Mexicano del Transporte.
- <sup>5</sup> Trocónis del Rincón Oladis y Miembros de la Red Iberoamericana Durar., “*Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*”, 1997.
- <sup>6</sup> Castro, P., M. San Juan, and J. Genescá, Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. Building and Environment, 2000.
- <sup>7</sup> Ávila M., J Genescá. J., “Mas Allá de Herrumbre III”, Fondo de Cultura Económica, 1986.

- 
- 
- <sup>8</sup> B. Elsener, U. Angst “Mechanism of electrochemical chloride removal”.  
Corrosion Science 49. 4504-4522. 2007
- <sup>9</sup> J.M. Miranda, A. Cobo, E. Otero, J.A. Gonzales “Limitations and advantages of electrochemical chloride removal in corroded reinforced concrete structures”.  
Cement and Concrete Research 37. 596-603.2007
- <sup>10</sup> P.F.G. Banfill “Re-alkalization of carbonated concrete-effect on concrete properties” Construction and Building Materials Vol II. 255-258. 1997.
- <sup>11</sup> C. Andrade, S. Feliu “Manual Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras” Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. Madrid España (1998)
- <sup>12</sup> J. F. Shackelford “Materials Science for Engineers” .2004.
- <sup>13</sup> Gómez Cortes, José Gabriel, “*Durabilidad del concreto*”, Ecuador. Memorias de la conferencia durabilidad del concreto. Universidad Nacional de Colombia. 2010.
- <sup>14</sup> Helene, Roberto P., “*Estructuras de concreto. Proyectar para durabilidad*”, seccional colombiana del ACI.
- <sup>15</sup> Más allá de la Herrumbre II. Fondo de Cultura económica.
- <sup>16</sup> M.T Liang,K.L. Wang, C.H. Liang “Service prediction of reinforced concrete structures”. Cement and Concrete Research 29. 1411-1418. 1999.

---

---

<sup>17</sup> Shamsad Ahmad “Reinforcement Corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review”. Cement & Concrete Composites 25. 2003

<sup>18</sup> A.M. Vaysburd, P.H. Emmons, “How to make repairs durable for tomorrow-corrosion protection in concrete repair”. Construction and Building Materials 14. 2000.

<sup>19</sup> J.F. Shackelford “Environmental degradation”. 2004.

<sup>20</sup> Secretaría de Comunicaciones y Transportes, “Manual para Inspección y Conservación de Puentes”, Dirección General de Servicios Técnicos, México, D.F. 1993.

<sup>21</sup> Barrientos Juárez, L, “Manual de Inspección Rutinaria de Puentes, Parte I”, Universidad Autónoma de Chihuahua, Noviembre del 2002.

<sup>22</sup> J.G. Gómez Cortes, “*Durabilidad del concreto*”, Conferencia durabilidad del concreto. Universidad Nacional de Colombia. 2010.

<sup>23</sup> Maldonado B. E.D. Tesis Doctorado CIMAV 2008.

<sup>24</sup> Bentur, A., S. Diamond, and N. Berke, Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice. 1997

---

---

<sup>25</sup> Flores Sánchez, J, “Conservación de puentes carreteros“, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F. 1998.

<sup>26</sup> Biczok, I, “La Corrosión del Hormigón y su Protección”, Ediciones Urmo, Bilbao España. 1972.

<sup>27</sup> Genescá, J, Ávila M, J, “Mas Allá de Herrumbre I”, Fondo de Cultura Económica, México, D.F. 1986.

<sup>28</sup> Comisión Federal de Electricidad. “Manual de mantenimiento para concreto”, Subdirección de producción. Gerencia de generación. México, D.F. 1991.

<sup>29</sup> Gaona T.C.”Corrosión en Estructuras de Concreto Armado”, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, México. 1997.

<sup>30</sup> “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.”, 2<sup>a</sup>. Edición. 1998. ISBN 980-296-541-3.

<sup>31</sup> Ibidem

<sup>32</sup> Avila M.J. y Genescá Ll. J.: “Termodinámica y Cinética de los procesos de Corrosión”, México, IMICORR. 1990.

<sup>33</sup> T.Hagyard,J.R. Williams “Transactions of the Faraday Society” Vol. 57. 1961.

---

---

<sup>34</sup> Pourbaix M.: "Thermodynamics of Dilute Aqueous Solutions", Edward Arnold & Co. 1949.

<sup>35</sup> Trethewey K.R. and Chamberlain J. "Corrosion for Students of Science and Engineering" Longman Scientific & Technical, U.K. 1988.

<sup>36</sup> Gaona C.T. y Almeraya C.F.: "Corrosión", Instituto Tecnológico de Chihuahua. Enero del 2000.

<sup>37</sup> Corrosion Basics An Introduction, National Association of Corrosion Engineers (NACE), U.S.A. 1984.

<sup>38</sup> Meas V.Y., López G.W, Rodríguez L.P., Avila M.J. y Genescá Ll. J.: "Tres métodos para evaluar una velocidad de corrosión ", Ingeniería Hidráulica en México. Enero-Abril de 1991.

<sup>39</sup> Tafel

<sup>40</sup> Wagner C., Traud W. "Concerning the Evaluation of Corrosion Reactions by Superposition of Electrochemical Partial reactions and Concerning the Potential Formation on Mixed Electrodes" Z. Elektrochem 44.1938.

<sup>41</sup> Stern T., A.L. Geary. "Electrochemical Polarization I. A. Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves" Journal Electrochemical Society 104 No. 1 1957.



---

---

<sup>42</sup> W. F Smith “Principles of Material Science and Engineering”. Cap 12. Page. 687. 1990

<sup>43</sup> Bastida J.M. “Técnicas Electroquímicas de Estudio de la Corrosión”, en U.E.I. de Corrosión y Protección del C.S.I.C., Retrospectivas de los Estudios de Corrosión en España en el periodo de 1960-1990, España. 1991.

<sup>44</sup> Malo Tamayo, J. M., Uruchurtu Chavarín, J; “Técnica de Ruido Electroquímico para el estudio de la corrosión”, Congreso Sociedad Mexicana de Electroquímica. 2001.

<sup>44</sup> Esteban García, José María Malo, Jorge Uruchurtu, Isaac Guzmán. “Técnicas electroquímicas aplicadas al control y seguimiento de la corrosión”. 1990.

<sup>46</sup> Allen J. Bard, Larry R. Faulkner, Electrochemical Methods Fundamentals and Applications. 1980. John Wiley & Sons.

<sup>47</sup> S. Feliu and J. A. González, M. C. Andrade, V. Feliu “Determining Polarization Resistance in Reinforced Concrete Slabs” Corrosion Science 29 No. 1.1989.

<sup>48</sup> Cottis, R.A; “Interpretation of Electrochemical Noise Data”, NACE International, Corrosion Vol.57, No.3, Marzo 2001

---

---

<sup>49</sup> D.A. Eden, K. Hadly, D.G. John and J.L. Dawson. "CORROSION/86" Paper 274. National Association of Corrosion Engineers. Houston. 1986.

<sup>50</sup> J.L. Dawson, W. M. Cox, D.A. Eden, K. Hlandky and D.G. John. "Giornalle delle Prove non Destructive (Italy) Vol.2. 1986.

<sup>51</sup> T.Hagyard,J.R. Williams "Transactions of the Faraday Society" Vol. 57. 1961.

<sup>52</sup> W.P. Iverson "Electrochemical Society" Vol 115. 1968

<sup>53</sup> V.A. Tyagai "Elektrokhimiya" Vol 3. 1967.

<sup>54</sup> M. Fleishmann and J.W. Oldfield. "Journal of Electrochemical Chemistry" .Vol.27. 1970.

<sup>55</sup> G. Blanc, C. Gabrielli and M Keddam. "Electrochimica Acta" Vol. 20. 1975

<sup>56</sup> K. Hladky and J.L. Dawson. "Corrosion Science" Vol. 22. 1982.

<sup>57</sup> Uruchurtu Ch. J. Ph. D. Thesis UMIST. Manchester England, 1984.

<sup>58</sup> J.W. Cooly and J.W. Tukey. "Mathematics of Computation" Vol. 19.1965.

<sup>59</sup> Hladky K., Dawson J. L. "The measurement of corrosion using electrochemical 1/f noise" Corrosion Science 22 No. 3.1982.

---

---

<sup>60</sup> Malo Tamayo, J. M. y Uruchurtu Chavarín, J., “*La técnica de ruido electroquímico para el estudio de la corrosión*”, I jornada de técnicas electroquímicas, XVI congreso S.M.E. Querétaro, Querétaro 2001.

<sup>61</sup> D.A. Eden “Electrochemical Noise- The First Two Octaves” Corrosion, NACE International 386.1998.

<sup>62</sup> G. Blanc, C. Gabrielli, M. Ksouri and R. Wiart “Experimental study of the relationships between the electrochemical noise and the structure of the electrodeposits of metals” *Electrochimica Acta* 23 No. 4. 1978.

<sup>63</sup> ASTM G 199 - 09 “*Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement*”. American society for testing materials, 2009.

<sup>64</sup> K. Hladky, J. L. Dawson “The measurement of localized corrosion using electrochemical noise” *Corrosion Science* 21 No. 4.1981.

<sup>65</sup> D.D. Macdonald, M. Urquidi-Macdonald, R.C. Rocha-filho and Y. El-Tantawy “Determination of the Polarization Resistance of Rebar in Reinforced Concrete” *Corrosion* 47 No. 5 (1991) p. 330

<sup>66</sup> D.A. Eden, J.L. Dawson and D.G John. “UK Patent APP861158,1986, U.S. Patent 5139627.

<sup>67</sup> D.A. Eden, K. Hadly, D.G. John and J.L. Dawson. “CORROSION/86”. Paper 274. National Association of Corrosion Engineers. Houston. 1986.

<sup>68</sup> Cottis P.A., Turgoose S. “Electrochemical Impedance and Noise” *Corrosion Testing Made Easy*. Series NACE, Houston TX, USA (1999)

---

---

<sup>69</sup> ASTM C 1240-05 “Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures” American Society for Testing Materials, Annual Book of ASTM Standards volume information West Conshohocken USA (2005)

<sup>70</sup> ACI 234 “Silica Fume in Concrete” American Concrete Institute.

<sup>71</sup> J. Andrew, A.J. Mass, H.I. Jason, C.G. Maria, “Alkali Silica Reactivity of Agglomerated Silica Fume” Cement and Concrete Research 37 No. 2. 2007.

<sup>72</sup> A. Chaipanich “Dielectric and Piezoelectric Properties of PZT–Silica Fume Cement Composites” Current Applied Physics 7 No. 5 . 2007.

<sup>73</sup> V.M. Malhotra, V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, P.C. Aitcin “Condensed Silica Fume in Concrete” CRC Press, Boca Raton, FL, (1987)

<sup>74</sup> M. Sarıdemir “Prediction of compressive Strength of Concretes Containing Metakaolin and Silica Fume by Artificial Neural Networks” Advances in Engineering Software. 2008.

<sup>75</sup> Mielenz, R.C. *Mineral Admixtures -History and Background*. Concrete International:Design & Construction. Vol. 5. No. 8. 1983.

<sup>76</sup> ASTM C470-87“Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02. USA. 1998.

---

---

<sup>77</sup> ASTM C192-81 “Standard Practice for Making and Curing Concrete test Specimens in the Laboratory” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02 West Conshohocken USA. 1998.

<sup>78</sup> ASTM C39-03 “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 04.02. USA. 1999.

<sup>79</sup> NMX-C-414-04-ONNCCE, (2004). *Industria de la construcción cementos hidráulicos*. Especificaciones y métodos de prueba.

<sup>80</sup> ASTM C876-91 “Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA. 1991.

<sup>81</sup> ASTM G59-91 “Standard Test for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA. 1997.

<sup>82</sup> Stern T., A.L. Geary “Electrochemical Polarization. I. A. Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves” Journal electrochemical Society 104. No. 1.1957.

<sup>83</sup> Cortez Méndez Adrian, Guerrero Mata Patricia, Martínez Delgado Dora Irma “Evaluación de la resistencia a la corrosión de aleaciones para oleoductos”. FIME-UANL Ingenierías 2005

---

---

<sup>84</sup> Goellner. "Elektrochemisches Rauschen bei der Korrosion", Werkstoffe und Korrosion, Vol. 55. 2004.

<sup>85</sup> A. Burkert, A. Heyn, J. Goellner. "Rauschdiagnostik bei Korrosionsprozessen Teil2: Problemanalyse", Werkstoffe und Korrosion, Vol. 49, pp. 642-650, 1998.

<sup>86</sup> G.C. Barker. "Journal of Electroanalytical Chemistry", Vol. 2.1967.

<sup>87</sup> U. Bertocci. "Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress Metallic Corrosion. Associacao Brasileira de Corrosao, Rio de Janeiro.1979

<sup>88</sup> R.W. Shideler and U. Bertocci "Journal of Research of the National Bureau of Standards". Vol 85. 1980.

<sup>89</sup> U. Beertocci and J. Krugger. "Surface Science". Vol 101. 1980

<sup>90</sup> S.P.Mattin and G.T. Burstein. "Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion". Vol 10. Proceedings of the 10<sup>th</sup> European Corrosion Congress, Institute of Materials. London. 1993

<sup>91</sup> K. Hladky and J.L. Dawson. "Corrosion Science" Vol 22. 1982.

<sup>92</sup> H.S. Issac."Initiation of Stress Corrosion Cracking on Sensitized Type 304 Stainless Steel". Final Report, EPRI Research Project RP. 1985.

<sup>93</sup> E.E. Heaver, K. Lawson and D.A. Eden "UK CORROSION/93" Institute of Corrosion.London.1993.

---

---

<sup>94</sup> G.T. Burnstein, P.C. Pistorious and S.P. Mattin. "Corrosion Science" Vol 35. 1993.

<sup>95</sup> U. Beertucci, J.L. Mullen and Y.X. Ye. "Proceedings of th 5th International Symposium on Passivity and Metallic Semiconductors". Elsevier N.Y. 1983

<sup>96</sup> C.C. Shih "Flow Affected Corrosion-Laboratory Studies and Models" PhD thesis, University of Manchester. 1992

<sup>97</sup> K. Hlanky and J.L. Dawson. "Corrosion Science" Vol 21. 1981.

<sup>98</sup> A.M. Simoes and M.G.S. Ferreira. "British Corrosión Journal" Vol.27.1987.

<sup>99</sup> A.M. Simoes and M.G.S. Ferreira."Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress of Metal corrosion" Vol.IV Key engineering Material, Vols. 20-28. 1988.

<sup>100</sup> D.A. Eden, M. Hoffman and B.S. Skerry. "Polymeric Materials for Corrosion Control" ACS Symposium Series 322. American Chemical Society.1986.

<sup>101</sup> C.T. Chen and B.S. Skerry. "Corrosion". Vol. 47. 1991.

<sup>102</sup> K. Tachibana and G. Okamoto. "Reviews on coatings and Corrosion". Vol. 3 1981.

<sup>103</sup> J.L. Dawson, D.M. Farrel, P.J. Aylot and K. Hlanky. CORROSION/89. Paper 31. National Association of Corrosion Engineers. Houston. 1989

<sup>104</sup> J.L. Dawson and M.G.S. Ferrerira. "Corrosion Science". Vol. 26. 1986.

---

---

<sup>105</sup> P.D.W. Bottomley, J.S. Gill and J.L. Dawson. "Material Science Forum".  
Vol.8 1986.

<sup>106</sup> G.A. Whitlow, W.Y. Mok, P. Gallager, W.M. Cox, P Elliot and S.Y. Lee.  
COROSION/91.National Association of Corrosion Engineers. Houston. 1991.

<sup>107</sup> W.P. Iverson and L.F. Finley. "Corrosion Monitoring in Industrial Plants  
Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods. ASTM STP 908.  
American Society of Testing and Materials.1986

<sup>108</sup> S.C. Dexter, D.J. Duquette, O.W. Siebert and H.A. Videla. "Corrosion".  
Vol. 47. 1991.

<sup>109</sup> S. Webster, L. Nathanson, A.G. Green and B.V. Johnson. "Proceedings of  
the 12th International Corrosion Congress". National Association of Corrosion  
Engineers. Houston. 1993.

<sup>110</sup> I. Al-Zanki, J.S. Gill and J.L. Dawson. "Materials Science Forum" Vol.8. 1986

<sup>111</sup> B. Joseph, X. Dai, R. Motard, D. Silverman. "Improved Discrimination of  
Electrochemical Noise Signals using Wavelet Analysis", Corrosion, Vol. 57,  
2001.

<sup>112</sup> X. Liu, H. Wang, S. Huang, H. Gu. "Analysis of EN with Wavelet Transform".  
Corrosion, Vol. 57. 2001.



---

---

<sup>113</sup> Kelly R. M.E. Inman, J.L. Hudson. Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications, ASTM STP-1277. ASTM Philadelphia. 1996.

<sup>114</sup> ASTM G109 - 07 Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments

<sup>115</sup> Red DURAR “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado” CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Río de Janeiro.1997.

<sup>116</sup> ASTM C876-91 “Standard Test for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete” American Society for Testing Materials Annual, Book of ASTM Standards, Vol. 03.02 West Conshohocken USA.1991.

<sup>117</sup> Uruchurtu. J., Malo., J. M; “La técnica de Ruido Electroquímico para el Estudio de la Corrosión”, XVI Congreso S.M.E. Querétaro, Qro. 2001.

## Apéndice 1. Potenciales de Corrosión

	<i>CS1</i>	<i>CS2</i>	<i>CS3</i>	<i>CC1</i>	<i>CC2</i>	<i>CC3</i>
<b>1</b>	-134.8	-136.9	-142.3	-115.1	-138.9	-174.3
<b>2</b>	-133	-137.1	-140.7	-113.4	-138	-170.7
<b>4</b>	-133.8	-156.6	-126.9	-111.5	-124.9	-168.5
<b>7</b>	-130.3	-149.7	-174.8	-105.4	-123.3	-146.6
<b>10</b>	-133.7	-143.7	-177.6	-109.5	-120.8	-145.2
<b>13</b>	-160.7	-156.2	-169.7	-116.4	-116.9	-187.8
<b>15</b>	-181.5	-189.8	-173.9	-123.8	-140.3	-195.4
<b>17</b>	-190.6	-216.9	-184.7	-162.3	-177.1	-198.6
<b>20</b>	-197.4	-214.3	-185	-208.7	-239.2	-271.3
<b>23</b>	-211.3	-202.1	-186.1	-212.5	-284.9	-288.1
<b>26</b>	-247.3	-209.7	-216.3	-214.2	-288	-312.4
<b>30</b>	-239.9	-208.9	-207.1	-208.2	-299.4	-328.4
<b>36</b>	-259.8	-217.6	-211.3	-234.5	-303.4	-336.7
<b>40</b>	-284.6	-234.4	-249.2	-282.8	-306.2	-344.6
<b>43</b>	-279.3	-239.2	-278.6	-297.2	-318.7	-347.4
<b>51</b>	-302.8	-262.4	-282.7	-301.8	-317.7	-335.2
<b>56</b>	-305.7	-278.7	-311.9	-319.6	-321.1	-341.3
<b>63</b>	-343.2	-298.4	-302.6	-355.2	-322.8	-340.5
<b>70</b>	-358.8	-359.3	-334.3	-357.5	-336.3	-348.4
<b>74</b>	-363	-360.8	-344.1	-358.6	-341.5	-348.1
<b>86</b>	-363.8	-350.6	-352.3	-363.8	-349.6	-352.4
<b>93</b>	-367.1	-335.8	-372.8	-365.8	-350.6	-356.7
<b>98</b>	-363.3	-384.9	-370.2	-380.2	-371.7	-366.3

<b>112</b>	-347.3	-361.2	-383.2	-394.6	-392.6	-391
------------	--------	--------	--------	--------	--------	------

Potenciales de Corrosión de los elementos con concreto con microsílíce.

	<i>SSI</i>	<i>SS2</i>	<i>SS3</i>	<i>SCI</i>	<i>SC2</i>	<i>SC3</i>
<b>1</b>	-157.2	-128.9	-151.7	-157.1	-169.1	-167.8
<b>2</b>	-156.1	-127.8	-158.2	-164.6	-166.7	-171
<b>4</b>	-152.3	-156.5	-196.3	-180.7	-170.4	-184.6
<b>7</b>	-190.8	-193.9	-196.7	-190.8	-184.2	-192.8
<b>10</b>	-228.7	-192.2	-237.3	-227.1	-237.4	-256.7
<b>13</b>	-221.9	-277.8	-250.1	-233.2	-292.6	-287.2
<b>15</b>	-231.1	-274.4	-267.9	-288.3	-306.3	-319.5
<b>17</b>	-225.2	-302.1	-272.5	-348.9	-328.3	-346.6
<b>20</b>	-230.7	-309.7	-319.2	-399.7	-395.4	-401.4
<b>23</b>	-332.2	-318.9	-322.7	-422.7	-421.8	-409.1
<b>26</b>	-329.7	-327.6	-330.5	-452.3	-453.8	-424.3
<b>30</b>	-348.8	-344.4	-345.8	-487.2	-485.4	-437.9
<b>36</b>	-438.8	-399.2	-413.8	-490.7	-496.3	-497.6
<b>40</b>	-459.1	-432.4	-438.8	-502.9	-501.2	-509.6
<b>43</b>	-480.5	-438.7	-494.8	-501.4	-512.7	-511.4
<b>51</b>	-485.1	-458.4	-499.6	-505.5	-521.4	-509.5
<b>56</b>	-496.4	-499.3	-507.7	-509.7	-528.3	-518.1
<b>63</b>	-504.5	-500.8	-509.3	-518.5	-524.9	-529.4
<b>70</b>	-505.6	-508.6	-514.2	-526.8	-536.1	-531.3
<b>74</b>	-512.6	-535.8	-526	-529.9	-540.5	-539.8
<b>86</b>	-518.5	-564.9	-524.8	-528.7	-547.2	-541.4
<b>93</b>	-524.3	-561.2	-534.3	-532.2	-550.52	-542.7

---

---

<b>98</b>	-528.6	-569.6	-531.8	-531.8	-532.8	-544.3
<b>112</b>	-535.6	-561.4	-537	-547.3	-572.6	-549.1

Potenciales de Corrosión de los elementos con concreto simple.