



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES
CFATA

**COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN EN EL ACERO API X52
PROTEGIDO CATÓDICAMENTE BAJO EL EFECTO DE UN
CAMPO MAGNÉTICO**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES**

PRESENTA:

ING. QUÍMICO CARLOS ENRIQUE MORENO OREGEL

TUTOR PRINCIPAL

DR. RAMIRO PÉREZ CAMPOS
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORIAL

DR. RODRIGO ALONSO ESPARZA MUÑOZ
CENTRO DE FÍSICA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA

DR. ANTONIO CONTRERAS CUEVAS
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

QUERÉTARO, JUNIO, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos. Por aguantar mis estados de ánimo durante el desarrollo de mis estudios. Su apoyo me dio el coraje de seguir adelante.

A mis amigos, por todas las horas de diversión, las pláticas y ayuda. Sobre todo al cierre de ésta tesis. Su ayuda fue esencial para cumplir mi meta.

A mis tutores, por su apoyo y consejo. Me guiaron y ayudaron tanto a mejorar mi trabajo como desarrollar y pulir mis habilidades académicas y personales.

A los catedráticos del CFATA que me ofrecieron su ayuda desinteresada, desde prestarme equipos hasta conseguir contactos para el desarrollo de mi trabajo. Sin su ayuda esto no hubiera sido posible. Gracias.

A los miembros del equipo técnico y secretaría académica del CFATA. Por su constante apoyo y confianza.

Para Ángela, por tu apoyo y paciencia en los momentos más difíciles. Tu cariño fue muy importante para no renunciar en los últimos momentos.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
FUNDAMENTO TEÓRICO	5
1. Corrosión en ductos de acero	5
1.1 Corrosión.....	5
1.2 Celda de corrosión.	5
1.3 Detección de la corrosión en un ducto.	10
1.4 Electrodo de referencia.....	12
2. Protección Catódica	16
2.1 Fundamentos de protección catódica.....	16
2.2 Tipos de protección catódica.	17
2.2.1 <i>Protección catódica mediante ánodos galvánicos</i>	17
2.2.2 <i>Protección catódica mediante corriente impresa</i>	18
2.3 Criterios utilizados para la protección catódica.....	19
3. Interferencia en la protección catódica	21
3.1 Interferencia por corriente alterna inducida por una línea de transmisión aérea. ...	21
3.1.1 <i>Acoplamiento conductor (resistivo)</i>	22
3.1.2 <i>Acoplamiento electrostático (capacitivo)</i>	23
3.1.3 <i>Acoplamiento electromagnético (inductivo)</i>	24
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	28
4.1 El suelo.....	28
4.2 Determinación del pH del suelo.....	28
4.2.1 <i>Ajuste del valor del pH</i>	29
4.3 Determinación de la textura del suelo por el método de Bouyoucos.....	30
4.4 Determinación de la resistividad.....	33
4.5 Diseño y construcción del sistema de protección catódica y colocación bajo tierra de cupones.....	34
4.5.1 <i>Sistema de Protección Catódica</i>	36
4.6 Aplicación del Campo Magnético Inducido.....	37
4.6.1 <i>Fuente de campo magnético</i>	38

4.7 Análisis de los productos de corrosión.	40
4.7.1 Microscopio electrónico de barrido (MEB).	40
4.7.2 Difracción de rayos X (DRX).	41
4.8 Determinación de la velocidad de corrosión por el método gravimétrico.	41
4.9 Mediciones de la magnitud de CA inducidas por el campo magnético.	45
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	48
5.1 Determinación del pH del suelo.	48
5.2 Resultados de la textura del suelo.	48
5.3 Resultados de la resistividad del suelo.	51
5.4 Resultados de la simulación de campo magnético por ANSYS.	53
5.5 Resultados de la microscopía electrónica de barrido.	55
5.6 Resultados de difracción de Rayos X	61
5.7 Resultados de la velocidad de corrosión por el método gravimétrico	63
5.8 Resultados de la corriente inducida por el campo magnético	66
6. Conclusiones	71
7. Trabajos Futuros	73
8. Bibliografía	74

INTRODUCCIÓN

La corrosión es uno de los fenómenos más comunes y se puede definir en términos generales como la degradación de los materiales a sus componentes originales, alterando sus propiedades mecánicas y químicas dependiendo de la naturaleza del material. En el caso del hierro se forman óxidos, entre los más comunes se encuentran la hematita, magnetita y óxido ferroso. La corrosión se da por medio de una reacción química con el ambiente al que se encuentra expuesto el metal. Al deteriorarse los materiales por corrosión presentan el riesgo de un fallo estructural si las condiciones son críticas^[1].

Los ductos que llegan a transportar materiales peligrosos, atraviesan largas distancias por una gran diversidad de territorios, por lo tanto, es importante mantenerlos en buen estado. Una falla en un ducto puede ocasionar daños en zonas urbanas, pérdidas económicas e incluso contingencias ambientales, por lo cual es importante tomar medidas para prevenir y minimizar los riesgos por corrosión.

Actualmente existen diferentes técnicas efectivas para la prevención de corrosión, siempre y cuando, se apliquen de manera adecuada. Para preservar la integridad externa de los ductos y minimizar el efecto de la corrosión se emplean principalmente dos técnicas, la primera y más común es el revestimiento externo, el cual es una protección física de alta resistividad eléctrica que funciona como un aislante entre el ducto y la tierra^[2]. La segunda es la protección catódica, de la cual existen dos tipos, la galvánica y la de corriente impresa. Sin embargo estas dos técnicas son preventivas, ya que actualmente la corrosión no puede ser eliminada del sistema^[3].

Las principales formas de daño por corrosión en los ductos son la externa y la interna. La corrosión externa en ductos es influenciada por diversas características principalmente la resistividad del suelo, la cual se encuentra

relacionada directamente con la humedad y el pH, aunque no son los únicos factores que intervienen^[4]. Actualmente existe un factor poco estudiado y relativamente nuevo que influye en la técnica de protección catódica bajando su efectividad e incluso anularla. Este nuevo factor de riesgo son los campos magnéticos variables. Los campos son generados por las líneas de alta tensión de corriente alterna y afectan a los ductos que se encuentran instalados en el mismo derecho de vía, por lo cual se encuentran interaccionando a lo largo de cientos de kilómetros.

Hosokawa^[5] ha mencionado el riesgo que corren los ductos de acero que transportan hidrocarburos instalados en las proximidades de las líneas de alta tensión o instalaciones de transporte público que utilizan corriente alterna en los rieles. Reporta que los ductos pueden llegar a presentar corrosión por la acción de una corriente alterna parásita, a pesar de que exista un sistema de protección catódica por corriente impresa, dando como resultado un nuevo criterio para la mitigación de las corrientes. Aunque no especifica la fuente de las corrientes parásitas, menciona que pueden ser inducidas en la tubería por acción de un campo magnético generado por una corriente alterna que circule en las proximidades^[5,6].

En el presente trabajo se evalúa como un campo magnético con una magnitud de 3 Gauss, cuya intensidad y naturaleza es similar al que se encuentra en la superficie de la tierra localizada en la vecindad de una línea de alta tensión, interfiere con el sistema de protección catódica por corriente impresa y afecta la velocidad de corrosión en cupones de acero X52. El suelo empleado es del tipo franco arenoso en condiciones de acidez a pH 5 y una humedad del 20%, estas condiciones favorecen la corrosión y es posible encontrarlas en zonas lacustres.

HIPÓTESIS

Los campos magnéticos generados por la corriente alterna (CA) que actúan sobre los materiales conductores, inducen corrientes eléctricas parásitas que provocan alteraciones en la velocidad de corrosión en el acero bajo protección catódica (PC).

OBJETIVO GENERAL

Estudiar los efectos de un campo magnético en el sistema de protección catódica aplicado en cupones de acero API X52 sin recubrimientos, colocados bajo tierra en un suelo franco arenoso en condiciones de pH = 5, humedad del suelo de 20% y una magnitud de campo magnético similar a la que puede encontrarse afectando una instalación de ductos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Observar el proceso de la corrosión bajo diferentes condiciones experimentales (PC, PC&CM, sPC), utilizando la caracterización por microscopía electrónica de barrido en los productos de la corrosión y su correlación con los resultados obtenidos por el método gravimétrico.
2. Mediante una simulación con el programa ANSYS, determinar la intensidad de un campo magnético en condiciones similares a las que encuentra una instalación de ductos en el campo.
3. Determinar el efecto del campo magnético en la velocidad de corrosión en un sistema bajo protección catódica, mediante el método gravimétrico.
4. Medir la intensidad de la corriente parasita inducida por el campo magnético y determinar si la corriente parasita afecta el sistema de

protección catódica. Así como su efecto en la velocidad de corrosión proporcionada por el método gravimétrico.

FUNDAMENTO TEÓRICO

1. Corrosión en ductos de acero.

1.1 Corrosión.

Una definición general de la corrosión es la degradación de un material mediante la interacción de éste con su medio, en general, esta transición ocurre en la mayoría de los materiales fabricados por el hombre, incluyendo plásticos, cerámicos y metales. El fenómeno de la corrosión en los metales se debe a que la mayoría de éstos se encuentran en estado reducido y son termodinámicamente inestables tendiendo a su forma natural (oxidados), es decir al mineral del que procede ya que buscan un estado de mínima energía^[2].

1.2 Celda de corrosión.

Las reacciones de corrosión en los metales más comunes como el hierro, ocurren a temperaturas cercanas a la ambiente y en medios húmedos. El proceso de corrosión involucra la remoción de electrones de un metal (oxidación) y el consumo de estos electrones por una reacción de reducción.

A la reacción de oxidación donde hay un consumo del metal consecuencia del desprendimiento de electrones, se le conoce comúnmente como reacción anódica. En otras palabras, oxidación es un término aplicado a la pérdida de uno o más electrones de un átomo o molécula, produciendo un ion con carga positiva denominado catión, la oxidación no está necesariamente asociada al oxígeno. Mientras que la reacción de reducción es donde se consumen los electrones desprendidos durante la oxidación y se le denomina reacción catódica donde se presenta una ganancia de electrones formando un ion con carga negativa denominado anión o elemento neutro^[2,3].

Un ejemplo de reacción anódica es la ecuación (1), mientras las ecuaciones (2) y (3) muestran una reacción catódica^[2].



Las reacciones anódicas y catódicas generadas durante la corrosión se presentan en las celdas electroquímicas, las cuales consisten en 4 partes fundamentales que se ilustran en la *figura 1.1*.

1. **Ánodo** → Lugar de donde provienen los electrones durante una reacción de oxidación.
2. **Cátodo** → Lugar donde los electrones producidos son consumidos por la reacción de reducción.
3. **Electrolito** → Solución ionizable conductora de electricidad, permitiendo el flujo de los cationes y aniones.
4. **Puente metálico** → Comunicación entre el ánodo y cátodo para que exista el flujo de electrones entre estos dos.

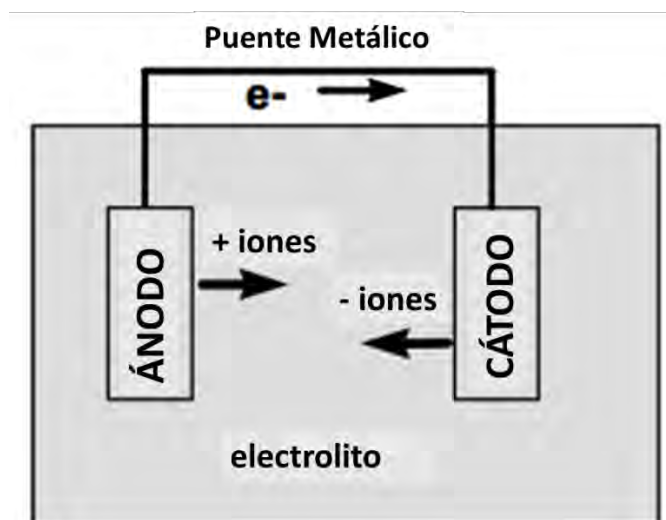


Figura 1.1 Celda electroquímica^[3].

Para que la celda electroquímica exista es importante que estén presente tanto la reacción de oxidación como la de reducción, de lo contrario, se formaría una gran carga negativa entre el ánodo y el electrolito, ocasionando que el proceso de corrosión se detenga.

Las reacciones pueden ocurrir en electrodos diferentes o en un mismo metal, este último es el caso de las tuberías de acero bajo tierra. Donde se forma una celda de corrosión diferencial mostrada en la *figura 1.2*. Aunque los componentes de esta celda son los mismos que en una celda electroquímica convencional, la diferencia radica en que un solo metal presenta una zona anódica y una zona catódica.

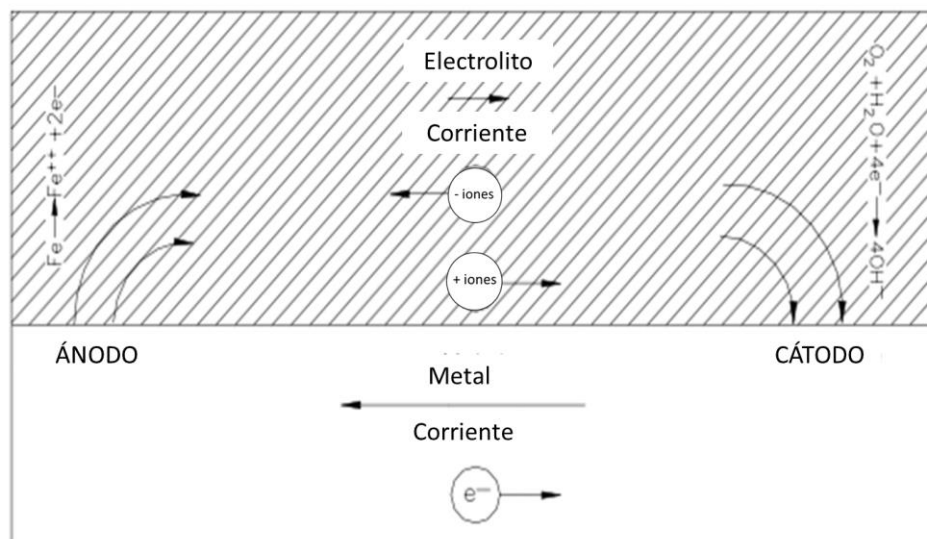


Figura 1.2 Celda electroquímica diferencial representando la corrosión en una estructura metálica^[2].

La corrosión de estructuras metálicas que se encuentran bajo suelo, es producida generalmente por la acción de una celda de corrosión diferencial, de la cual existen diferentes variedades. Las celdas electroquímicas diferenciales se presentan en un ducto de acero instalado bajo de la tierra por diferentes razones, a continuación se enlistan las más comunes.

Diferencias de temperatura.

En una celda por temperatura, el ánodo y cátodo son del mismo metal, uno es mantenido a una temperatura mayor respecto al otro por algún medio externo, en general el que se encuentra a mayor temperatura es el ánodo. Un ejemplo donde se puede presentar una celda por temperatura, es una línea de transmisión de gas que sale de una estación de compresión. El gas a la salida del compresor se encuentra a mayor temperatura y conforme se desplaza a lo largo de la tubería se va enfriando al transferir el calor al suelo que la rodea. Por lo cual la tubería a la salida del compresor se comporta como un ánodo, la tubería a menor temperatura como cátodo, el suelo como electrolito y el puente metálico es la misma tubería de acero, como se ilustra en la *figura 1.3*.

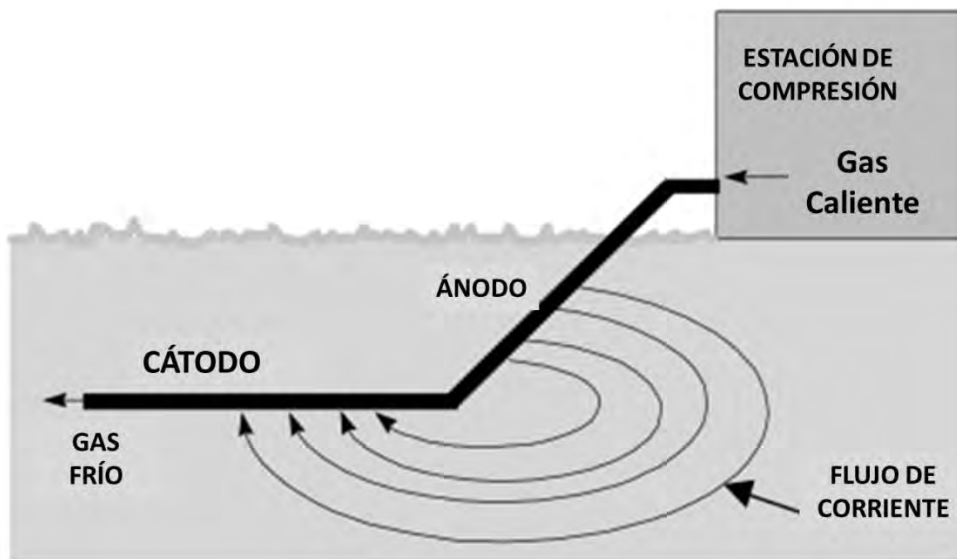


Figura 1.3 Representación de una celda electroquímica originada por diferentes temperaturas^[4].

Diferencias en la composición del electrolito.

Un electrolito con diferentes concentraciones de sales disueltas que entra en contacto con una misma estructura, como la tubería de transporte de gas que viaja debajo del suelo, donde este último funciona como el electrolito, puede

ocasionar zonas anódicas y catódicas sobre la superficie en contacto, como se ilustra en la *figura 1.4*.

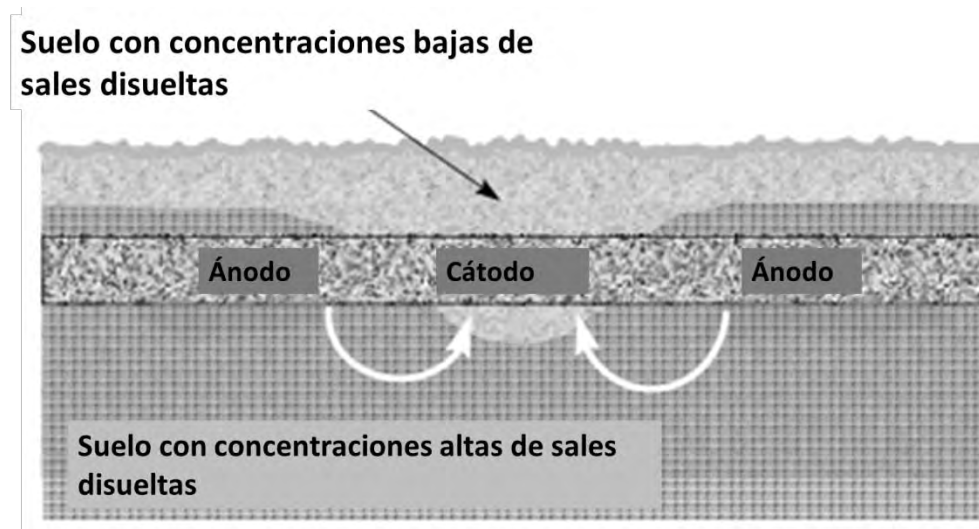


Figura 1.4 Celda electroquímica con diferentes concentraciones del electrolito^[4].

Celdas de aireación.

Es una celda ocasionada por la exposición de diferentes secciones del ducto a concentraciones diferentes de oxígeno permeado al suelo, como se representa en la *figura 1.5*.

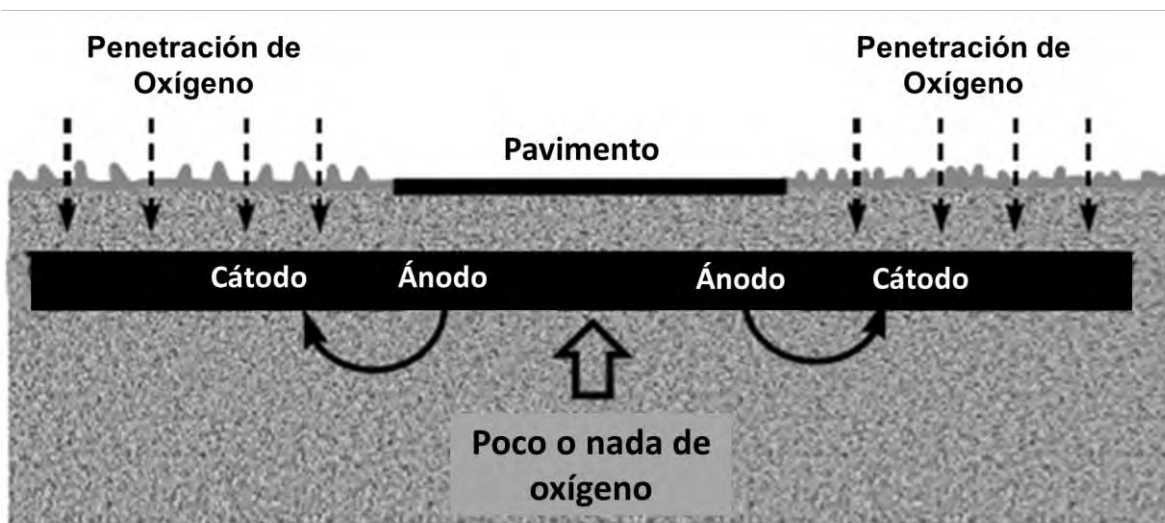


Figura 1.5 Celda de aireación tubería en diferentes concentraciones de oxígeno^[4].

Corrosión galvánica.

Esta celda es formada cuando dos metales diferentes están conectados eléctricamente y expuestos a un ambiente corrosivo, creando una diferencia de potencial. Cada material tiene un valor diferente de potencial de corrosión en un mismo ambiente. Cuando estos diferentes materiales se conectan el material con un potencial de corrosión menos negativo se convierte en un cátodo, ocasionando que el material más negativo se consuma al comportarse como ánodo. Un ejemplo es cuando el acero entra en contacto con el cobre^[2].

1.3 Detección de la corrosión en un ducto.

La electroquímica de la corrosión, nos otorga pistas para llevar a cabo su detección y monitoreo, en este caso específicamente se hablará de los ductos de acero que se encuentran bajo tierra. Estas técnicas se basan en el monitoreo de voltajes y corrientes que se generan durante el fenómeno de corrosión.

Cuando una pieza metálica, como un ducto, es puesta en contacto con un electrolito, en este caso suelo húmedo, se genera un voltaje a través de la interface metal–electrolito. Utilizando un multímetro y un electrodo de referencia (o media celda) se logrará obtener un voltaje denominado potencial de corrosión o también conocido como potencial a circuito abierto. Entre mayor sea la magnitud de este potencial mayor será la velocidad de corrosión. En la *Tabla 1.1*, se muestran los potenciales de corrosión respecto a un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre observado en suelo neutro y agua^[3].

Tabla 1.1 Potenciales típicos observados en suelo neutro y agua^[2].

Material	Potencial Voltios (CSE) ^A
Carbón, Grafito, Coque	+ 0.3
Platino	0 a - 0.1
Acero laminado	- 0.2
Hierro fundido	- 0.2
Cobre, Bronce, Latón	- 0.2
Acero en concreto	- 0.2
Plomo	- 0.5
Hierro fundido (Sin grafito)	- 0.5
Acero (Oxidado)	- 0.2 a - 0.5
Acero (Limpio y brillante)	- 0.5 a - 0.8
Aluminio puro comercial	- 0.8
Aleación de aluminio (5% Zinc)	- 1.05
Zinc	- 1.1
Aleación de magnesio (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	- 1.6
Magnesio puro comercial	- 1.75

^A Potencial típico observado en suelos neutros y agua, medidos respecto a un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre.

Los datos de potencial, nos permiten estimar la velocidad de corrosión de los diferentes metales. Los metales nobles tienen potenciales más positivos y por consecuencia son más resistentes a la corrosión, sin embargo los metales activos tienen potenciales más negativos y son los que generalmente se corroen. Cuando dos metales se conectan en una celda electroquímica, el metal más noble se comportará como el cátodo y el metal activo se comportará como el ánodo, siendo este último el destruido por el fenómeno electroquímico de la corrosión.

Las medidas de potencial son usadas comúnmente en las tuberías bajo tierra, para detectar la presencia de celdas diferenciales de corrosión. El proceso consiste en conectar eléctricamente el ducto a un voltímetro y a un electrodo de referencia, normalmente el electrodo de referencia es conectado a la terminal negativa del voltímetro para obtener una medida negativa, tal y como se muestra en la *figura 1.6*^[2].

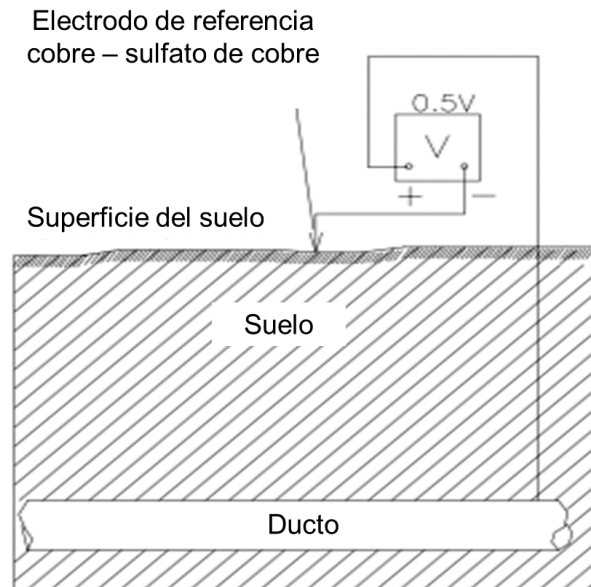


Figura 1.6 Medida de potencial de corrosión ducto-suelo^[2].

Las zonas de potencial más negativo del ducto, serán los ánodos de las celdas de corrosión diferencial y será ahí donde se presentará la corrosión^[2].

1.4 Electrodo de referencia.

Los electrodos de referencia o medias celdas, permiten medir el potencial de la superficie expuesta de un metal a un electrolito, como por ejemplo el sistema ducto-suelo, comúnmente referido como estructura-electrolito. El potencial obtenido de este sistema en realidad es el potencial obtenido entre la estructura y el electrodo de referencia, ya que el electrolito no aporta potencial, por lo cual es necesario el uso de un electrodo de referencia^[3].

Se puede definir un electrodo de referencia como “Electrodo reversible usado para la medida de potenciales de otros electrodos”, por lo tanto debe estar en equilibrio, es decir, no debe haber un cambio en el electrodo en función del tiempo. Las propiedades buscadas en un electrodo de referencia son^[2]:

1. Fácil uso y mantenimiento.
2. Potencial estable a través del tiempo.
3. El potencial varía poco cuando existe flujo de corriente, es decir, que no se polariza con facilidad.
4. Baja contaminación durante su vida útil.
5. No contamina el medio donde es utilizado.

El electrodo o media celda estándar de hidrógeno (SHE - *Standard Hydrogen Electrode*) es considerado el electrodo primario de referencia, ya que este es utilizado para medir el potencial de otros electrodos que son menos delicados para su uso en campo^[4]. Esto se debe a que la fuerza electromotriz (EMF por sus siglas en inglés), ha sido establecida arbitrariamente para la reducción del hidrógeno (4) con un valor de $E = 0.00 \text{ V}$. Una vez establecido este valor permitió calcular la EMF para otras reacciones de media celda.



Los electrodos de referencia más comunes son:

- Electrodo plata - cloruro de plata.

Principalmente utilizado para mediciones en agua salada.

- Electrodo de calomel o mercurio – cloruro de mercurio.

Principalmente utilizado en mediciones de laboratorio.

- Electrodo de cobre - sulfato de cobre.

Es el electrodo más utilizado para monitorear la corrosión de un sistema estructura-electrolito sólido, como el que se encuentra en un ducto bajo tierra, y es similar al mostrado en la *figura 1.7*. El electrodo consiste en una barra de cobre, bañada en una solución saturada de sulfato de cobre, es importante mantener esta concentración en la sal ya que es la que permite mantener un potencial constante a través del tiempo^[4].

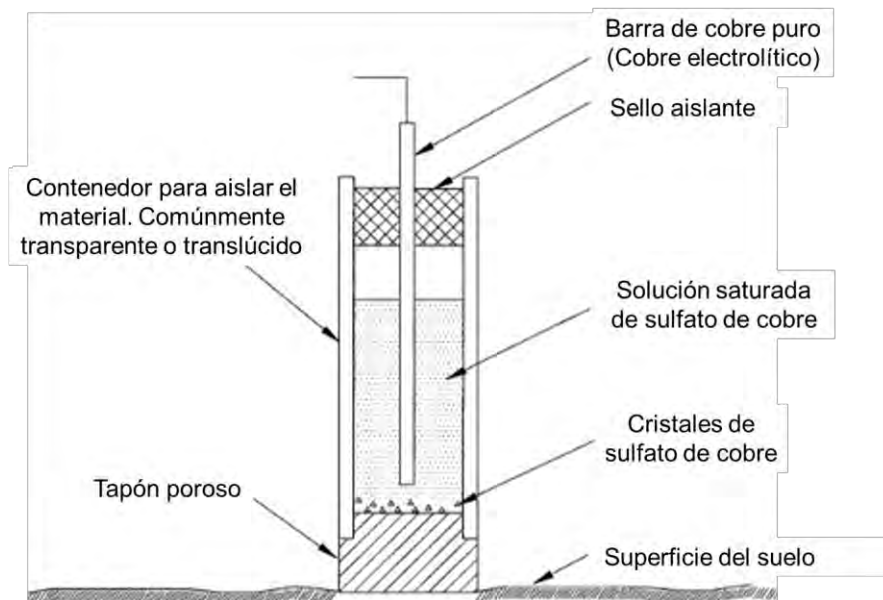


Figura 1.7 Esquema de un electrodo $Cu^{+2} / CuSO_4$ ^[2].

En la *tabla 1.2* se muestra el potencial de los electrodos de referencia medidos respecto al electrodo de hidrógeno.

Tabla 1.2 Potencial de los electrodos de referencia comunes respecto al electrodo de hidrógeno^[2].

Electrodos	
Electrodo	Potencial (V) @25 °C
Cu²⁺ / CuSO₄ (Saturado) [CSE]	+ 0.3
Calomel (Saturado KCl) [SCE]	+ 0.241
Ag⁺ / AgCl (Saturado KCl)	+ 0.196
Ag⁺ / AgCl (0.6 M Cl⁻) [Agua marina]	+0.250
Electrodo estándar de hidrógeno [SHE]	0.00
Zinc (agua marina)	-0.800

2. Protección Catódica.

2.1 Fundamentos de protección catódica.

La protección catódica es definida como la reducción de la velocidad de corrosión al modificar el potencial de la estructura a un potencial menos oxidante mediante la aplicación de una corriente externa. Esto puede ser apreciado en el diagrama de Evans de la *figura 2.1*, donde el potencial de un metal es modificado de un estado de corrosión libre E_{corr} a un estado de protección E_{PC} , al aplicársele una corriente i_{aplicada} . Cuando el potencial se vuelve más negativo, la velocidad de corrosión disminuye. Pero no se logra la protección total hasta que el metal es llevado al potencial de equilibrio, E_{equil} . A este potencial la velocidad de corrosión es cero, pero no es utilizado ya que la cantidad de corriente necesaria para mantenerlo es muy alta.

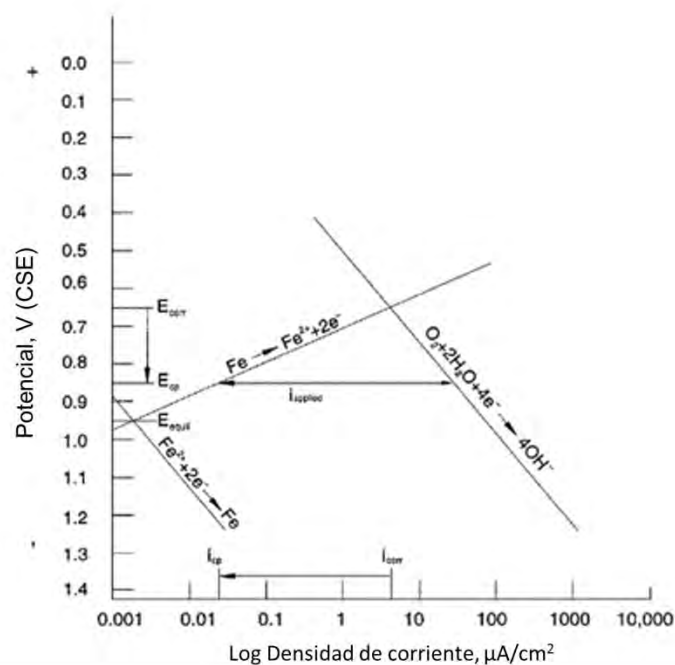


Figura 2.1 Diagrama de Evans representando el mecanismo de la técnica de PC^[2].

La intención de aplicar la técnica de protección catódica por corriente impresa, es convertir al ducto (estructura a proteger) en un cátodo mediante la ayuda de

una corriente directa (CD) y de esta manera eliminar las zonas anódicas de la superficie del ducto, para esto, es necesario otro electrodo conocido como ánodo de sacrificio^[7].

2.2 Tipos de protección catódica.

2.2.1 Protección catódica mediante ánodos galvánicos.

Se ha mencionado la formación de zonas anódicas y catódicas en las superficies metálicas y también las que se forman cuando dos metales diferentes entran en contacto, creando los roles de activo y pasivo. El activo o de carga negativa se corroe. En la PC galvánica se utiliza este fenómeno para proteger una estructura de metal conocido con un metal más activo, en la *tabla 1.1*, podemos observar los potenciales de distintos metales y concluir que si queremos proteger una estructura de acero podemos emplear ánodos de zinc. Para que esto suceda tenemos que crear una celda electroquímica entre el ánodo y cátodo, como se muestra en la *figura 2.2*, donde una tubería de acero es protegida con ánodos de zinc o magnesio y son por los que se da la descarga de corriente, protegiendo de esta manera a la tubería.

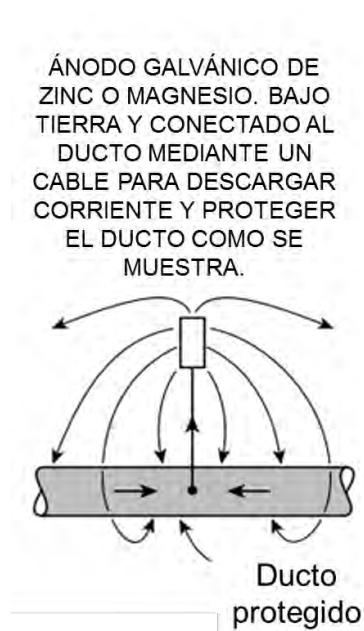


Figura 2.2 Sistema de protección catódica con ánodos galvánicos^[2].

Cabe recordar que esta técnica no elimina la corrosión, solo la desplaza de la estructura protegida a los ánodos galvánicos. La corriente disponible de los ánodos galvánicos es limitada, por esta razón, la PC galvánica es normalmente utilizada solo cuando la corriente requerida es pequeña^[2].

Otros requerimientos son suelo de baja resistividad, estructura a proteger pequeña, reforzar la protección en zonas clave.

2.2.2 Protección catódica mediante corriente impresa.

Anteriormente se mencionaron las limitaciones de la PC galvánica, pero la más importante es la limitación de corriente y voltaje, para evitar esto se utiliza la PC por corriente impresa, donde se utiliza una fuente de poder externa, denominada rectificador que convierte CA y CD de bajo voltaje. Los voltajes de CD que se manejan van desde menos de 10 V hasta 100 V, aunque en general operan entre los 10 V y 50 V y una corriente de salida desde poco menos de 10 A hasta cientos de Amperes^[2].

Este rectificador alimenta al sistema electroquímico como se muestra en la *figura 2.3*, con la diferencia de que ésta involucra lo denominado cama de ánodos que consiste en una serie de electrodos conectados en paralelo y distribuidos a lo largo de la estructura a proteger y es por donde se descarga la corriente y en consecuencia los electrodos son consumidos por el fenómeno de corrosión. No es necesario como en la PC galvánica utilizar materiales activos, pero sí es recomendable utilizar materiales con una baja velocidad de corrosión en comparación al de la estructura protegida^[2], esto para asegurar una vida útil larga.

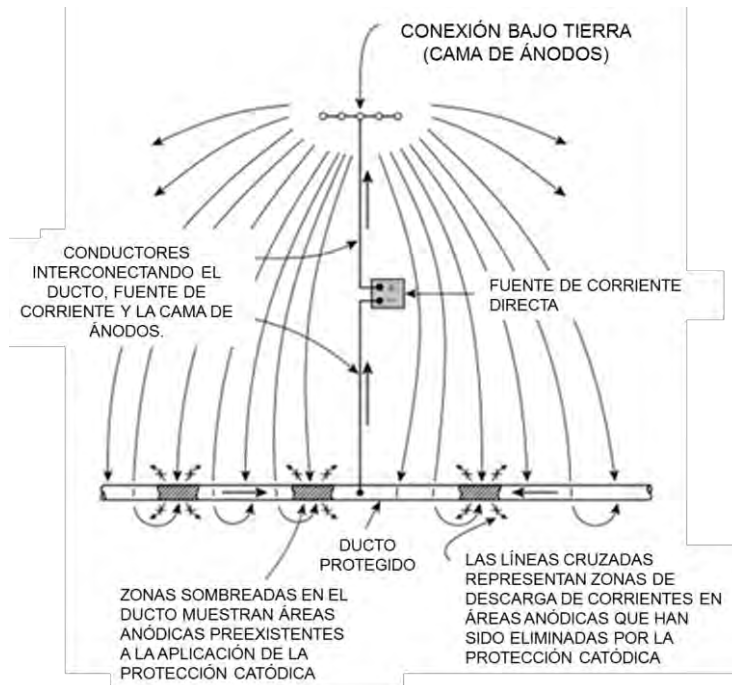


Figura 2.3 Sistema de PC por corriente impresa^[2].

2.3 Criterios utilizados para la protección catódica.

La teoría básica de PC es simple, aplicar corriente directa a una estructura para disminuir la velocidad de corrosión^[2], para lo cual diferentes criterios han sido desarrollados a través de los años para asegurar que las estructuras protegidas se encuentren bajo una protección adecuada. Para monitorear los niveles de PC en un sistema de ductos, se miden los potenciales existentes entre la tierra y la estructura. Estas medidas permiten determinar de manera rápida y confiable el grado de protección asociado al sistema.

Los tres criterios principales para PC en tuberías o recubrimientos de acero, bajo tierra o agua se encuentran en listados en la sección 6 de NACE Standard RP0169-2007^[8].

1) **Un potencial catódico negativo de al menos -850mV** con la PC activada (ON) y respecto a un electrodo saturado de cobre-sulfato de cobre. Tomando en cuenta las caídas de voltaje (caída IR) a lo largo de la estructura^[4].

$$E_{-850} = E_{on} - IR \quad (5)$$

2) **Un potencial de polarización negativo de al menos -850 mV** medido en comparación a un electrodo de cobre-sulfato de cobre durante un “Instant Off Potential”^[4].

3) **Un mínimo de 100 mV de polarización catódica** entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable, todo en contacto con un electrolito. La formación o caída de polarización podrá ser medida para satisfacer el criterio^[4].

$$\Delta E_{100} = E_{OFF} - E_{DEPOLARIZED} \quad (6)$$

$$\Delta E_{100} = E_{OFF} - E_{CORR} \quad (7)$$

Cabe recordar que los 3 criterios antes mencionados aplican únicamente para estructuras de acero enterradas o bajo agua, pero existen otros criterios para diferentes materiales como aluminio y cobre.

Por ejemplo el criterio para proteger aluminio de acuerdo a la NACE Standard RP 0169^[8] establece que debe existir un mínimo de 100 mV de polarización entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable, todo en contacto con un electrolito. El aluminio se denomina atmosférico, ya que se corroe bajo condiciones alcalinas y ácidas por lo cual el potencial de polarización tampoco debe ser más negativo de -1200 mV medidos con un electrodo de cobre - sulfato de cobre.

El criterio para el cobre bajo PC basado en “NACE Standard RP0169”^[8] establece un mínimo de 100 mV de polarización y en el caso de diferentes

metales en contacto, el potencial de protección debe ser el del metal más anódico.

3. Interferencia en la protección catódica.

3.1 Interferencia por corriente alterna inducida por una línea de transmisión aérea.

En la industria de los ductos, el término "interferencia" se entiende como una interferencia eléctrica y se define como cualquier disturbio eléctrico detectado sobre una estructura, causado por una corriente parásita; ésta a su vez se define como una corriente que atraviesa una ruta de manera no intencional^[9].

Aunque generalmente la corriente que genera la interferencia es una corriente directa (CD), existen corrientes provenientes de cualquier otro sistema eléctrico que utilice tierra como ruta de salida, ya sea intencionalmente o no, conocida como corriente alterna (CA). Los problemas de interferencia eléctrica entre sistemas preceden a la técnica de PC, ya que hubo reportes donde se mencionaba como los telégrafos interferían con los primeros sistemas de teléfono.

La energía eléctrica de una línea de transmisión aérea puede ser transferida a una tubería a través de tres mecanismos: acoplamiento electrostático (capacitivo), acoplamiento electromagnético (inductivo) y acoplamiento conductivo (resistivo). Aunque una tubería puede presentar problemas de interferencia por CA por encontrarse en la cercanía de una línea de transmisión, la mayoría de los problemas son ocasionados por los sistemas trifásicos (3Φ) de transmisión de corriente, debido a las corrientes intensas que manejan y a que es común encontrarlos en posición paralela a las tuberías a lo largo de grandes distancias, como se muestra en la *figura 3.1*^[9].



Figura 3.1 Sistema trifásico (3Φ) sobre un derecho de vía para ductos^[9].

3.1.1 Acoplamiento conductor (resistivo).

Un acoplamiento conductor ocurre cuando hay un corto circuito o una falla de línea a tierra sobre la línea de transmisión, como se representa en la *figura 3.2*. En condiciones de falla, la corriente fluye por cualquier ruta disponible que presente la menor resistividad, esto incluye cables blindados de la misma estructura, cables o estructuras a tierra y finalmente las estructuras metálicas en la tierra como las tuberías^[9].

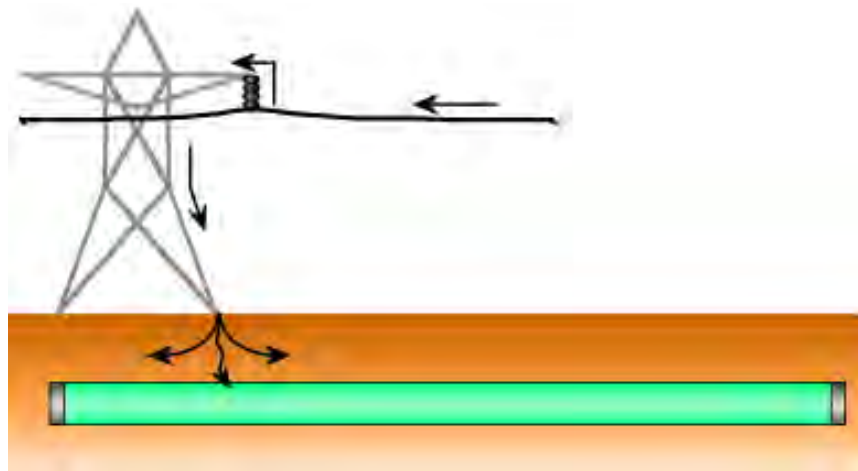


Figura 3.2 Acoplamiento conductor entre una línea y un ducto^[9].

La cantidad de corriente que se transmite a una tubería depende de las impedancias, es decir de la separación entre la estructura y el ducto. En las

líneas de transmisión las fallas comúnmente ocurren por tormentas eléctricas, vientos fuertes, fallas de las estructuras o de los aislantes, contactos accidentales entre las líneas y otras estructuras.

La corriente de falla se trasmite al ducto a través del recubrimiento, por lo tanto la cantidad de corriente transmitida muchas veces depende del estado y propiedades del recubrimiento^[9].

3.1.2 Acoplamiento electrostático (capacitivo).

En el acoplamiento electrostático la energía se transfiere a través de la capacitancia eléctrica que existe entre la línea de transmisión y el ducto. Ya que cualquier par de conductores separados por un material dieléctrico pueden ser considerados como un capacitor. La capacitancia es la capacidad de almacenar carga entre los dos conductores y es relativa al voltaje entre los mismos. La capacitancia es proporcional al área de los conductores pero inversamente proporcional a la separación de los mismos.

Cuando una fuente de voltaje de CA se aplica a un capacitor, la corriente comienza a fluir y las placas conductoras comienzan a acumular cargas. Conforme la polaridad de la fuente de corriente se invierte durante la segunda mitad del ciclo de CA y la corriente fluye en dirección opuesta, las placas del capacitor se descargarán y comenzarán a cargarse con polaridad opuesta. Este proceso de carga y descarga genera una corriente CA que fluye continuamente a través del capacitor.

Esto se representa en la *figura 3.3*, en donde tramos de una tubería han sido colocados a lo largo de la ruta sobre rieles de madera, aunque no parezca un capacitor, este sistema cumple con todos los requisitos para formar uno, los cuales son dos placas conductoras separadas por un material dieléctrico. En este caso la línea de transmisión es una placa y la tubería es la otra. Mientras

que el aire es el material dieléctrico y el segundo capacitor se forma de la tubería y la tierra, ya que la tierra se comporta como otra placa conductora. Por lo cual este sistema se puede representar como un circuito eléctrico que consiste en dos capacitores en serie con una fuente de CA^[9].

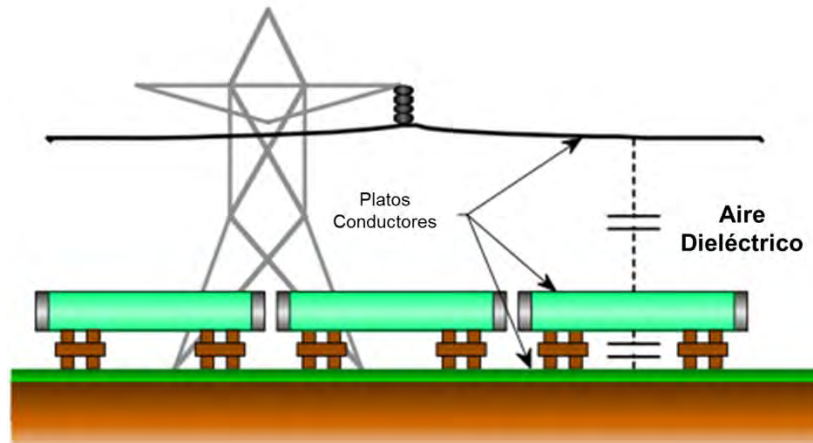


Figura 3.3 Representación de un acoplamiento electrostático^[9].

Por lo tanto, dependiendo de los valores relativos de capacitancia y el voltaje de la línea de transmisión, se puede generar electrostáticamente voltajes muy grandes en una sola unión de la tubería, aunque en general las corrientes asociadas son muy bajas ya que están limitadas por la reactancia capacitiva. El efecto del acoplamiento electrostático puede ser eliminado al conectar el ducto a tierra^[9].

3.1.3 Acoplamiento electromagnético (inductivo).

Los voltajes y corrientes inducidos electromagnéticamente a una tubería en términos generales funcionan de manera similar al devanado primario de un transformador que induce corriente para que fluya a través del devanado secundario.

En otras palabras, en un conductor el flujo de corriente crea un campo electromagnético (Φ) alrededor del conductor. La dirección de los vectores de

campo siguen la regla de la mano derecha, donde el dedo pulgar apuntaría la dirección de la corriente en el conductor y los dedos indicarían la dirección del flujo magnético como se representa en la *figura 3.4*.

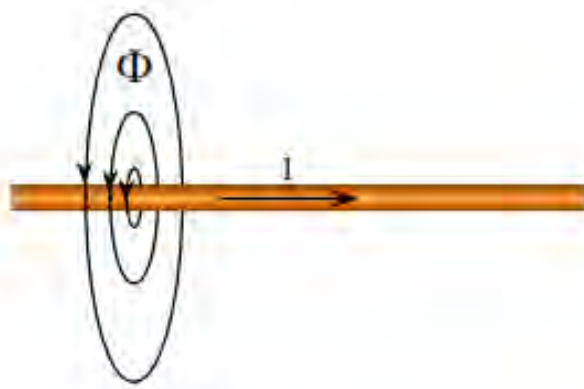


Figura 3.4 Campo electromagnético originado por el flujo de corriente en el cable^[9].

Por lo tanto una inducción electromagnética ocurre cuando hay un movimiento entre un conductor eléctrico y un campo magnético. Ya sea el movimiento físico de un conductor a través de un campo estacionario, o el movimiento de un campo a través de un conductor estacionario. Un ejemplo del primer caso es un generador eléctrico, en el cual una bobina rotativa de cable atraviesa un campo magnético estacionario para generar una corriente eléctrica. Para el segundo caso, donde tanto la fuente de campo como el conductor son estacionarios, el campo magnético debe estar en movimiento para poder inducir una corriente sobre el conductor. Esto se logra empleando la corriente alterna CA para crear un campo magnético con variación en el tiempo, el cual se expande y colapsa alrededor del conductor, para crear así un movimiento relativo. El ejemplo más tangible es un transformador eléctrico como el mostrado en la *figura 3.5*.

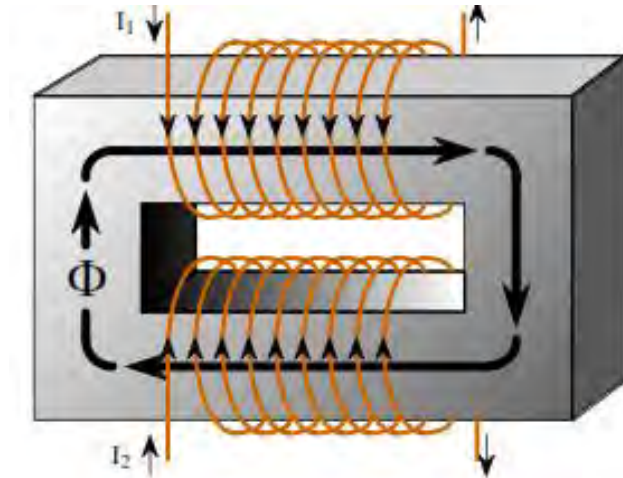


Figura 3.5 Inducción electromagnética en un transformador de núcleo de hierro^[9].

Esto quiere decir que cuando fluye una CA I_1 a través del devanado primario del transformador, crea un campo electromagnético (Φ), normalmente este campo se disiparía en el medio pero al encontrarse con material magnético, en este caso un núcleo de hierro, el campo magnético se concentra en el núcleo y es expandido y colapsado alrededor de los giros del devanado secundario y, por consecuencia se genera un flujo de corriente secundario I_2 .

Aunque el ejemplo previo es de un transformador ideado para maximizar la eficiencia, en la práctica la forma de inducir corriente a un ducto es similar. Ya que se puede formar un transformador, al colocar un conductor dentro del campo magnético variable generado en otro conductor, como se representa en la *figura 3.6*. Aunque este sería altamente ineficiente, y la corriente inducida no fluiría en la misma dirección debido a la ley de Lenz, que establece que la corriente generada fluiría en la dirección contraria a la corriente que genera el campo magnético^[9].

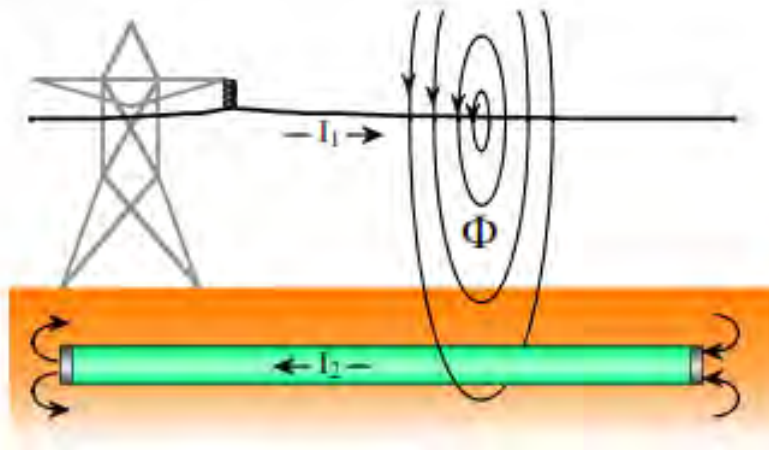


Figura 3.6 Ejemplo de inducción electromagnética en un ducto^[9].

El voltaje y corriente inducido electromagnéticamente por una línea de alta tensión es proporcional a la corriente que circula por la línea. Conforme la longitud de la tubería y la línea de transmisión se incrementan, el acoplamiento electromagnético entre ellos mejora, tal como el incrementar el número de giros en los devanados secundario y primario de un transformador mejora la eficiencia del mismo. ^[9].

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 El suelo.

El suelo utilizado durante el desarrollo experimental fue comprado en un distribuidor de materiales para jardinería, ya que el suelo no era el objeto de estudio. Se optó por emplear tierra negra y se caracterizó texturalmente por el método de Bouyoucos^[10], se acidificó y humectó hasta alcanzar las condiciones experimentales deseadas

4.2 Determinación del pH del suelo.

La información del pH del suelo es de gran importancia, ya que es conocido que éste está relacionado con la velocidad de corrosión de los aceros^[1]. En pocas palabras el pH se determina tomando pequeños volúmenes del suelo a lo largo de la superficie a trabajar, se mezcla con agua destilada y se mide el pH con un pH-metro.

El proceso que se empleó consistió en mezclar mecánicamente el suelo, posteriormente en un vaso de precipitado se colocaron 10 gr, que fueron pesados en una balanza Boeckel BBL4 con una precisión de 10^{-2} gr, se agregaron 20 ml de agua destilada, y se agitaron durante 30 minutos, se dejó reposar por 15 minutos y finalmente con pH-metro calibrado marca HANNA modelo HI 98107, mostrado en la *figura 4.1*, se tomó la lectura de pH^[11].



Figura 4.1 pH-metro en calibración, previo a la medición experimental.

4.2.1 Ajuste del valor del pH.

El valor del pH fue ajustado mediante la adición de ácido sulfúrico, ya que estudios previos muestran que los ácidos nítrico, acético, sulfúrico y fosfórico son efectivos para controlar el pH en suelos^[12]. Se agregó ácido sulfúrico directamente al suelo y se mezcló para garantizar uniformidad hasta que se logró un valor de pH de 5. Posteriormente se monitoreó este valor y se ajustó según la necesidad con la ayuda de un pH-metro de tierra marca KECHENG modelo KC-300B mostrado en la *figura 4.2*.



Figura 4.2 pH-metro para medir pH en suelos marca KECHENG empleado durante el experimento.

4.3 Determinación de la textura del suelo por el método de Bouyoucos.

El método empleado para determinar la textura del suelo, es el proceso denominado Bouyoucos. La textura es una expresión sintetizada de las características de cada fase presente y dependen de la proporción de los distintos tamaños de partículas.

La función de las clases texturales es hacer énfasis en el efecto que ciertas fracciones ejercen respecto a otras, a igualdad de porcentaje, esto nos sirve para determinar las propiedades del suelo. Para representar estas distintas clases se han construido los denominados triángulos de textura o diagramas triangulares, como el mostrado en la *figura 4.3*. La determinación de las fases mediante este método es relativamente rápida [13].

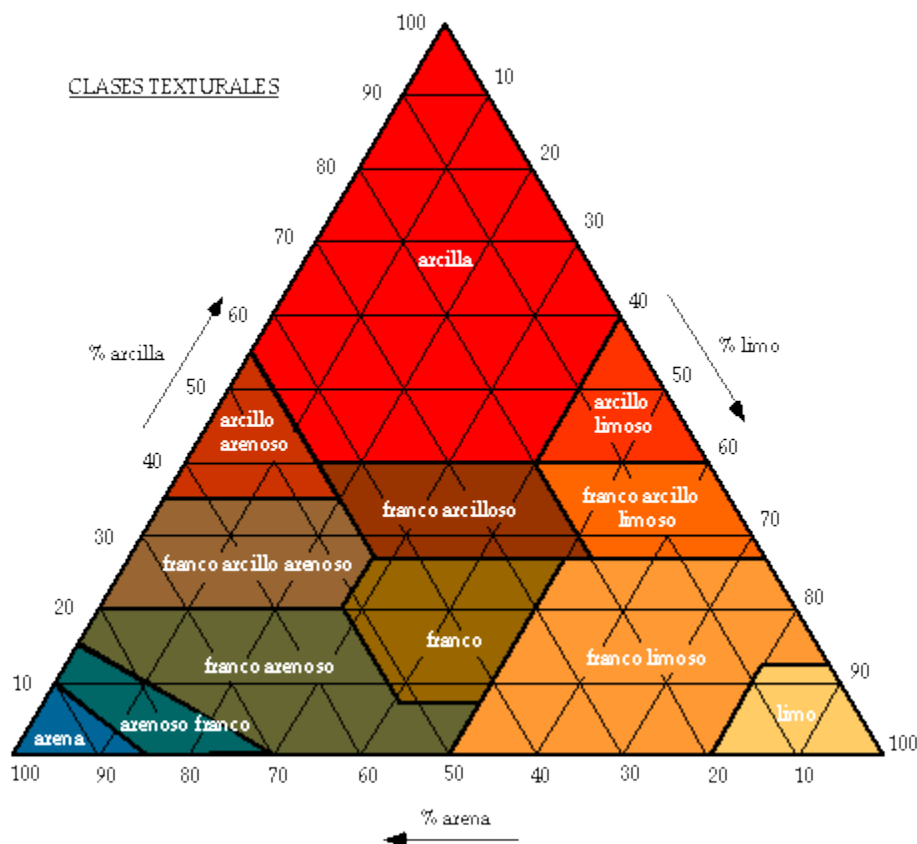


Figura 4.3 Triángulo de texturas de acuerdo al método de Bouyoucos^[14].

Para determinar la textura y fases presentes en el suelo se pesan 60 gr de la tierra negra en un vaso de precipitado de 500 ml y se agregan 40 ml de agua oxigenada al 30%. Se pone a calentar a baño maría para evaporar la solución y durante el proceso de evaporación se agrega agua oxigenada a discreción hasta que no se observa efervescencia, ya que esto indicará que la materia orgánica fue finalmente retirada de la muestra.

Después de haber eliminado la materia orgánica, se toman 50 gr de suelo y se colocan en un vaso de 250 ml, donde se agrega agua hasta formar una capa de 2 cm de agua respecto a la superficie de la muestra. Se agregan 5 ml de oxalato de sodio y 5 ml de metasilicato de sodio. Se deja finalmente reposar por 15 minutos. Posteriormente la muestra es colocada en el agitador mecánico durante 5 min. Al finalizar el tiempo de agitación, se pasa el contenido al cilindro de Bouyoucos o una probeta graduada de 1 lt *figura 4.4*.

Se toman las lecturas correspondientes con un hidrómetro a los 40 segundos, 1, 10, 60 y 120 minutos y, finalmente, a las 24 horas. En caso de que la temperatura supere los 19.5 °C se agregan 0.36 unidades por grado Celsius a lo registrado con el hidrómetro para corregir la lectura^[15]. Finalmente para determinar la textura se emplean las ecuaciones 8 a 11 y se utiliza el triángulo de texturas de la *figura 4.3*.



Figura 4.4 Probeta graduada con hidrómetro para medir la textura del suelo por el método de Bouyoucos.

Las ecuaciones (8) a (11) son utilizadas para determinar los porcentajes de arcilla, limo y arena.

$$\% \text{ de limo} + \% \text{ de arcilla} = \frac{\text{primera lectura} * 100}{\text{gr de Suelo}} \quad (8)$$

$$\% \text{ de arena} = 100 - (\% \text{ de limo} + \% \text{ de arcilla}) \quad (9)$$

$$\% \text{ de arcilla} = \frac{\text{Segunda lectura} * 100}{\text{gr de Suelo}} \quad (10)$$

$$\% \text{ de limo} = (\% \text{ de limo} - \% \text{ de arcilla}) - \% \text{ de arcilla} \quad (11)$$

4.4 Determinación de la resistividad.

Uno de los factores más relevantes relacionado con la velocidad de corrosión es la resistencia eléctrica o resistividad del electrolito. En nuestro caso, el suelo que se encuentra en contacto con el acero. La resistividad se afecta principalmente por tres factores: humedad, temperatura y sales.^[16].

1. Humedad: Un suelo que contiene más de 20% de humedad, puede presentar una resistividad hasta 5 veces menor en comparación a uno con un porcentaje de humedad de 2.5%^[16].
2. Temperatura: Un suelo que se encuentra a temperatura ambiente, alrededor de los 22 °C, presenta una resistividad hasta 4 veces menor que un suelo que se encuentra a 32 °C^[16].
3. Sales: un suelo que cambia su contenido de sales en 1% de su peso puede afectar su resistividad hasta en un factor de 20^[16].

Como se puede apreciar, la resistividad en la práctica está relacionada a factores que son muy cambiantes con el tiempo, la distancia y las condiciones climáticas. En el laboratorio estas condiciones pueden ser más estables. Es necesario conocer el valor de la resistividad para establecer las condiciones de corrosión a las que se encuentra expuesto el material. Para esto se empleó el método de Wenner en base a la norma ASTM G57^[17].

Los valores que relacionan la corrosividad del suelo con la resistividad y su clasificación se muestran en la *tabla 4.1*^[18].

Tabla 4.1 Corrosividad del suelo de acuerdo a la resistividad^[18].

Resistividad del suelo (Ω.cm)	Clasificación de la corrosión	Clase
> 10,000	Corrosivo muy levemente	I
5,001 - 10,000	Levemente corrosivo	II
2,001 - 5,000	Moderadamente corrosivo	III
1,001 - 2,000	Severamente corrosivo	IV
< 1,000	Corrosivo muy severamente	V

En la práctica se toma una muestra de suelo y se coloca en una caja de prueba o caja de suelo, donde es distribuido y compactado. En el experimento desarrollado en la presente tesis no fue necesario ya que las cubas experimentales funcionaron como cajas de prueba. El equipo utilizado consiste en 4 electrodos aislados, que fueron colocados a una distancia de 5 cm y una profundidad de 5 cm, ya que la distancia entre cada electrodo indica la resistividad a esa profundidad^[17].

4.5 Diseño y construcción del sistema de protección catódica y colocación bajo tierra de cupones.

El suelo utilizado durante el estudio fue colado en un recipiente de 70x50 cm manteniendo una distribución homogénea para poder aplicar la protección catódica posteriormente. Se colocaron 20 cupones, de los cuales a 10 se les aplicó protección catódica a -850 mV sin campo magnético y a otros 10 se les aplicó protección catódica a -850 mV y campo magnético a 3 Gauss. En forma paralela se colocó otro recipiente de 40x30 cm con cupones sin protección catódica y sin campo magnético los cuales fueron usados como referencia, como se ilustra en la *figura 4.5 y 4.6*. El suelo se mantuvo con un pH menor o igual a 5 y una humedad relativa mayor o igual al 20%.

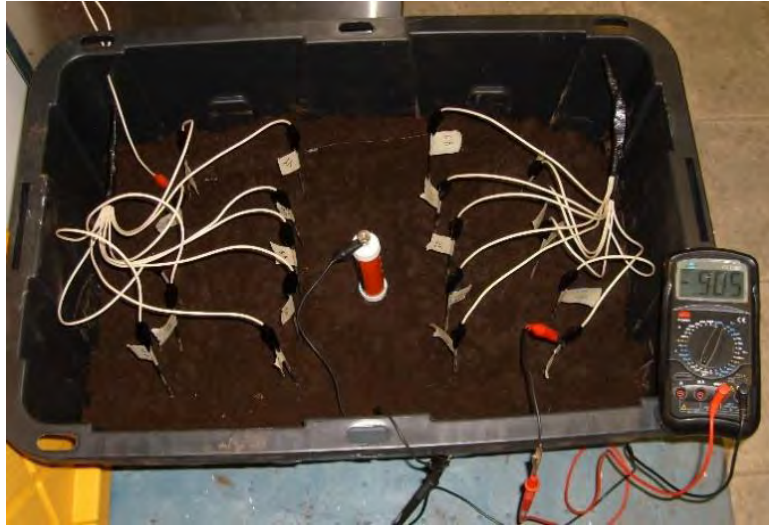


Figura 4.5 Fotografía de la distribución de los cupones bajo protección catódica.



Figura 4.6 Fotografía de la distribución de los cupones de referencia.

Cada uno de los juegos de 10 cupones se encontraba divididos en dos filas de 5 cupones a lo largo del ancho del recipiente como se muestra en la *figura 4.7*, y un arreglo similar para el recipiente de control como se ve en la *figura 4.8*. Los cupones enterrados son de acero API X52 de 4.5x4.5x0.32 cm conectados a la superficie por medio de una varilla de acero al bajo carbono aislada eléctricamente del suelo y atornillada al cupón.

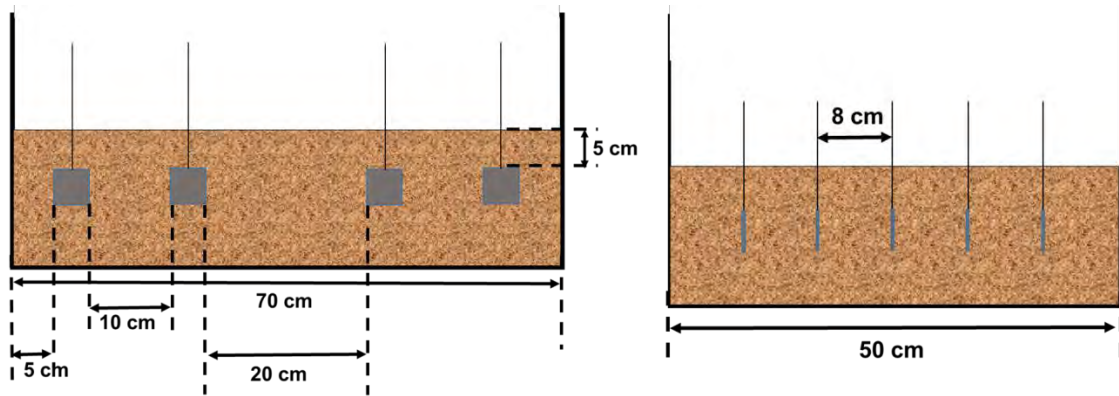


Figura 4.7 Vista frontal y lateral de los cupones bajo PC.

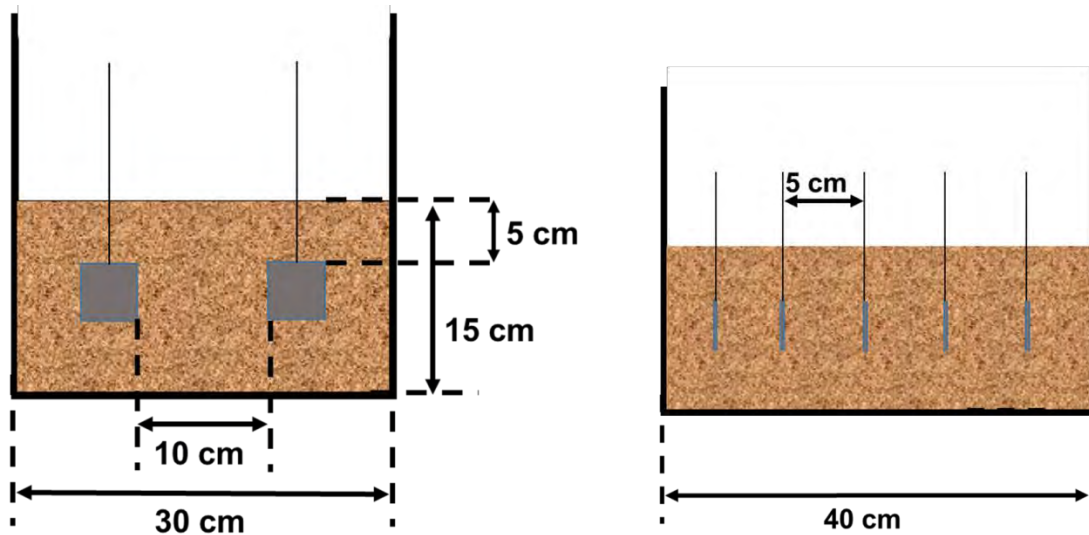


Figura 4.8 Vista lateral y frontal de los cupones de referencia.

4.5.1 Sistema de Protección Catódica.

La protección catódica que se aplicó a los cupones de acero API X52, se realizó mediante el uso de una fuente externa de corriente directa y un ánodo de sacrificio el cual es malla de acero galvánico que se encuentra en la parte más profunda del recipiente experimental distribuida a lo largo del fondo para garantizar un contacto homogéneo con el electrolito y éste a su vez con los cátodos a proteger.

La fuente de corriente directa trabaja de forma constante a lo largo del experimento, el polo negativo de la fuente o ánodo se conecta a la estructura a proteger en este caso la varilla conectada al cupón de acero. El polo positivo o cátodo se encuentra conectado al metal a corroer conocido también como ánodo de sacrificio, en nuestro caso utilizamos la malla galvanizada.

Anteriormente en sección 2.2.2 se describió el proceso de protección catódica por corriente impresa, en pocas palabras se basa en eliminar de la superficie de una estructura de acero las zonas anódicas y catódicas que generan la corrosión, ya que al aplicar corriente toda la estructura a proteger se convierte en un cátodo donde no se generan las reacciones electroquímicas características de la corrosión, se logra llevando a cero el potencial de corrosión de la estructura protegida.

4.6 Aplicación del Campo Magnético Inducido.

Algunos artículos mencionan que los valores típicos del campo magnético generado por líneas de alta tensión a una distancia de 20 metros de la fuente del campo van de 1 a 35 μT ^[19, 20]. Lo cual equivale a 0.01 a 0.35 Gauss, estos valores son muy bajos ya que los estudios han sido realizados en líneas de baja tensión. Otros trabajos donde se habla de líneas de alto voltaje en México reportan valores de hasta 200 Gauss en la zona de valor máximo para una línea de 500 kV. Y un valor de 35 Gauss en ambientes secos^[21]. Aunque en estos últimos no se especifica la distancia a la que fue realizada la medición del campo magnético.

Por lo tanto fue necesario realizar una simulación para determinar la magnitud del campo magnético que puede incidir en un ducto. La simulación se realiza en colaboración con el M. C. Fernando Muñoz Ceja^[22], en el programa llamado Ansys Maxwell, el cual es un software que emplea análisis de Elemento Finito (MEF) para darle solución a las ecuaciones de Maxwell y resolver problemas de

campos electromagnéticos^[23]. En este trabajo se utiliza “Maxwell software” para obtener el campo eléctrico y magnético producido por una línea de transmisión de 400 kV a 28 m de altura con dos conductores de aluminio con un radio de 2.54 cm por fase, ilustrado en la *Figura 4.9*.

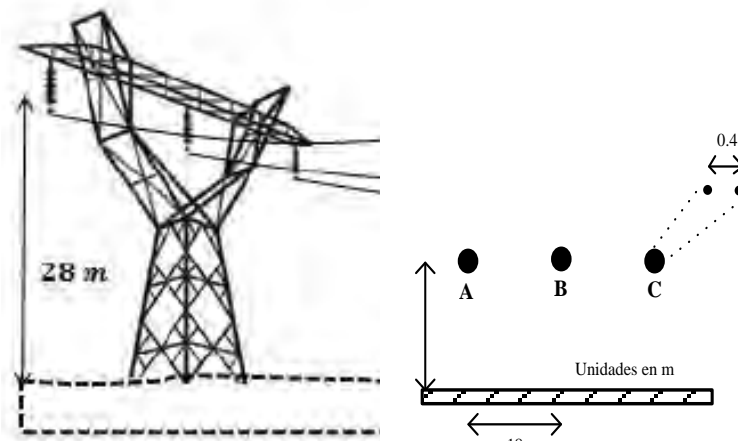


Figura 4.9. Representación esquemática de la torre y líneas de alta tensión que simuladas.

4.6.1 Fuente de campo magnético.

Una vez definida la magnitud de campo magnético mediante la simulación, se fabricó un sistema de bobinas tipo Helmholtz. Las cuales generan campos magnéticos uniformes de baja magnitud, frecuencia y que nos permiten la repetitividad experimental. Sin olvidar que este tipo de bobinas restringe el efecto del campo el volumen de trabajo para el que son diseñadas.

Primero se determinó el volumen en el cual se aplicaría un campo magnético, el volumen es de 30x49x25 cm (36750 cm³). Una vez establecido el volumen de trabajo se calcularon las vueltas de cable necesarias para formar cada bobina. Para una toma de corriente monofásica de 127V a 60 Hz fueron necesarias 4000 revoluciones con cable calibre 27. Para poder utilizar las bobinas posteriormente se realizó un embobinado de 4000 vueltas con un medio (derivación) y posteriormente otras 4200 vueltas^[24].

La construcción de los carretes a medida para cada bobina fue en acrílico por sus propiedades mecánicas y diamagnéticas. En la *figura 4.10* se muestra el proceso de torneado y terminado de las bobinas de Helmholtz, el embobinado se mandó a hacer a un taller especializado. Se diseñó una base que lograra sostener el peso de las bobinas y fuera libre de componentes paramagnéticos, con el fin de evitar interferencia con el campo generado.

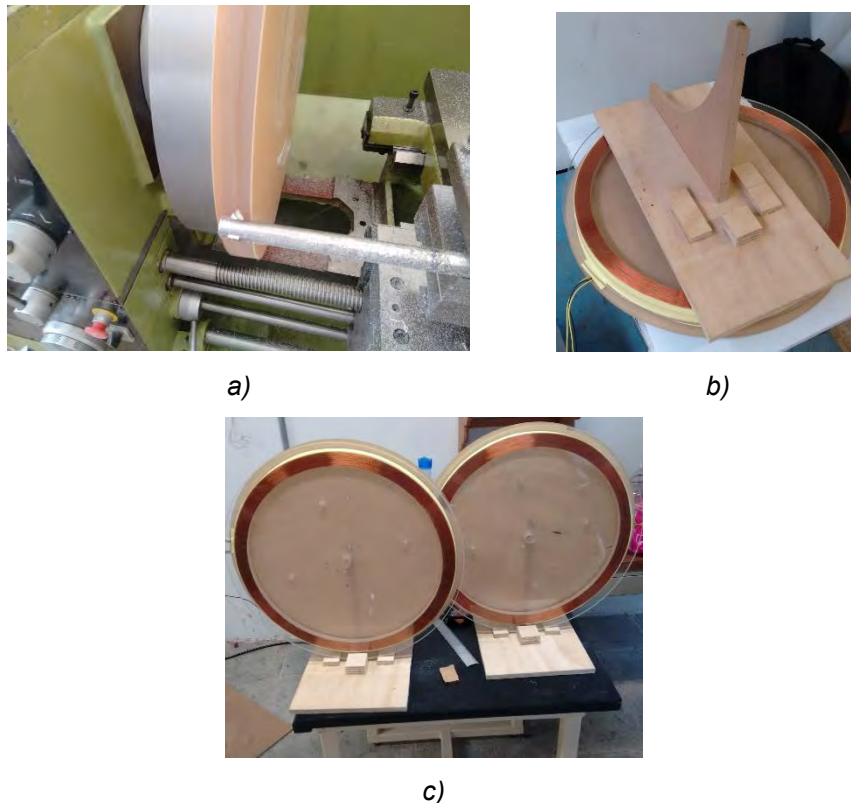


Figura 4.10. a) Maquinado del acrílico, b) base diamagnética, c) bobinas terminadas.

Una vez terminada la fabricación de la bobinas se realizaron pruebas de conexión y de campo magnético (*Figura 4.11*), con ayuda de dos multímetros, uno marca Fluke 289 TRUE RMS MULTIMETER y el otro STEREN MUL-040, y lo más importante un medidor de campo magnético variable marca TENMARS TM-191.

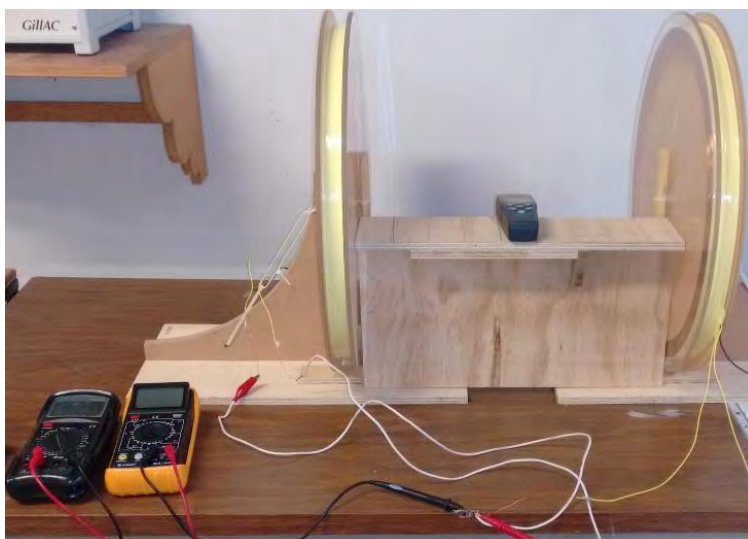


Figura 4.11 Prueba de funcionamiento de las bobinas previo a su instalación en la cuba experimental correspondiente.

4.7 Análisis de los productos de corrosión.

Para la caracterización, análisis y estudio de los productos de corrosión presentes en los cupones de acero se utilizaron dos técnicas, la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la difracción de rayos X (DRX).

Antes de realizar los análisis se limpió la superficie de los cupones con un cepillo de cerdas suaves para retirar el suelo y dejar únicamente la superficie corroída. Además no se aplicó ningún producto químico para no alterar la superficie y morfología de los óxidos^[25].

4.7.1 Microscopio electrónico de barrido (MEB).

El estudio superficial y morfológico de los productos de corrosión se realizó con un microscopio electrónico de barrido de cátodo frío a bajos voltajes, como el mostrado en la *figura 4.12*. El microscopio lleva incorporado un sistema de análisis que nos permite realizar espectroscopia de energía dispersa de rayos X

(EDX). Este conjunto nos permitió ver la morfología de la corrosión y realizar un análisis elemental de la superficie corroída. Las muestras fueron cubiertas con una fina capa de oro para evitar que se cargaran eléctricamente y afectaran la calidad de las micrografías.



Figura 4.12 Microscopio electrónico de barrido.

4.7.2 Difracción de rayos X (DRX).

Para obtener la identificación de los óxidos y otras posibles fases cristalinas presentes en la superficie de los cupones, los productos de corrosión se analizaron por difracción de rayos X en un rango de 10° a 80° grados y radiación proveniente de un bulbo de Cu a un longitud de 1.5406 Angstrom.

4.8 Determinación de la velocidad de corrosión por el método gravimétrico.

Los resultados obtenidos mediante el método gravimétrico, son vistos y preferidos por los ingenieros como los resultados reales, debido a que representan los resultados de la corrosión como deben estar sucediendo, por lo cual es considerado el parámetro más importante para obtener la velocidad de corrosión. La gran desventaja son los largos tiempos de espera para ver los resultados, ya que al menos pueden tomar un año, en comparación a las

técnicas electroquímicas que proporcionan resultados en cortos lapsos de tiempo^[26].

Los cupones se obtuvieron de una placa de acero grado API X52. Fueron cortados de la placa cuidando mantener una baja producción de calor y así evitar un cambio en la microestructura de la superficie. El área de contacto en cada cupón es de 46 cm². No contaban con recubrimiento y todas las caras estaban expuestas al electrolito.

Las muestras fueron desbastadas con lija de SiC número 600, se desengrasaron con etanol, se enjuagaron con agua destilada, se secaron con aire caliente y se pesaron antes de ser introducidas en el suelo de cada una de las cubas experimentales correspondientes. La figura 4.13a muestra una imagen del cupón antes de ser enterrado y la figura 4.13b el mismo cupón después de haber sido expuesto al suelo por 6 meses^[27].



Figura 4.13 a) Cupón de acero al inicio del experimento. b) Cupón al final del experimento después de 6 meses.

Se colocaron 10 cupones bajo protección catódica, 10 con protección catódica y dentro del campo magnético y finalmente 10 sin ningún tipo de protección funcionando como puntos de control. Todos bajo las mismas condiciones, cada cupón se encuentra a una profundidad de 10 cm y una separación de 5 cm.

Están conectados a la superficie por medio de una varilla la cual es atornillada al cupón y recubierta de pintura aislante y resistente a la corrosión. La *figura 4.14* muestra una imagen de la cuba con 20 cupones, de los cuales 10 fueron protegidos catódicamente y los otros 10 también pero bajo el campo magnético.



Figura 4.14. a) Imagen de la cuba con 20 cupones, de los cuales 10 fueron protegidos catódicamente y los otros 10 también pero bajo el campo magnético, b) 10 cupones de referencia (sin PC y sin CM).

Los cupones bajo protección catódica fueron colocados en la misma cuba experimental, para asegurar las mismas condiciones asociadas al electrolito, es decir la tierra y evitar diferencias de potencial entre cubas contenedoras y la fuente de corriente. Recordando que la presencia del campo magnético en la segunda parte de la cuba no afectaba a los cupones que se encontraban fuera del diámetro de las bobinas de Helmholtz, dada la naturaleza y principio de funcionamiento de las mismas. Esto fue reiterado por mediciones realizadas con un magnetómetro, como se ilustra en la *figura 4.15*.



Figura 4.15 Cuba experimental bajo protección catódica donde la sección superior no es afectada por el campo magnético.

Se analizó mensualmente un cupón de cada sección experimental (PC, PC+CM y control) mediante método gravimétrico para monitorear la velocidad de corrosión a lo largo del tiempo. El resto de los cupones fueron empleados para analizar los productos de corrosión y los sobrantes se guardaron como respaldo.

Para el método gravimétrico es necesario remover las capas de óxido del cupón, para lo cual se sumergió el cupón en una solución de HCl al 50% y 3.5gr de hexametilentetramina ($C_6H_{12}N_4$) por 15 min^[27], se enjuaga con agua destilada, se seca con una ráfaga de aire y finalmente se pesan en una balanza. Teniendo el peso inicial y final de los cupones se obtienen los gramos de acero consumidos por la corrosión y con la ecuación (12), la pérdida en masa se transforma a mm/año.

$$V_{CORR} = \frac{K*W}{A*T*D} \quad (12)$$

Donde:

V_{CORR} = Velocidad de corrosión.

K = Constante de oxidación. (8.76×10^4 mm/año)

W = Pérdida de masa en gramos.

A = Área de oxidación

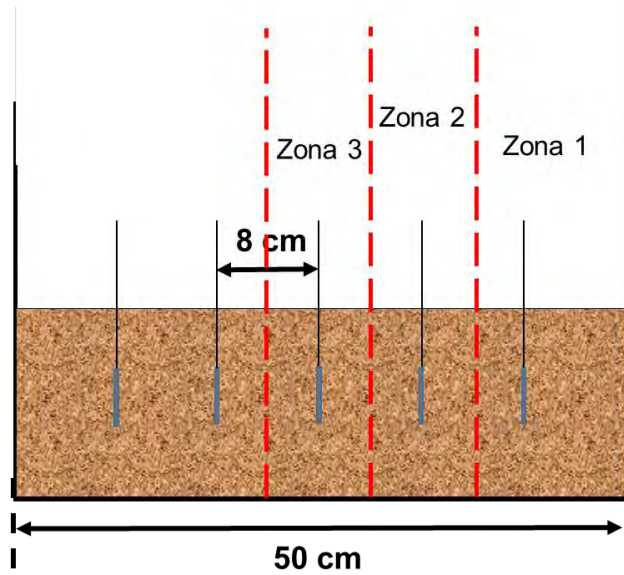
T = Tiempo de exposición de la muestra.

D = Densidad de la muestra g/cm^3

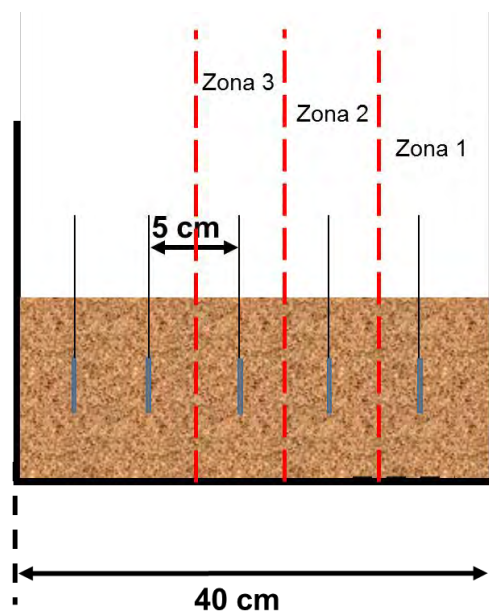
4.9 Mediciones de la magnitud de CA inducidas por el campo magnético.

El campo magnético de 3 Gauss producido por las bobinas de Helmholtz induce una corriente alterna en los cupones, para saber el valor de la corriente inducida. Se utilizó un multímetro “Fluke 289 TRUE RMS MULTIMETER”. Las mediciones se realizaron en los cupones localizados en la zona media de la cuba experimental hasta la zona más cercana a una de las bobinas. La intención es determinar el efecto directo del campo magnético sobre las corrientes que circulan en los cupones bajo protección catódica en distintos puntos.

El experimento consiste en realizar mediciones en los cupones bajo protección catódica, con y sin campo magnético. Se seleccionaron 3 zonas como se ilustra en la *figura 4.16*. Para cubrir un área desde la zona intermedia a las dos bobinas (zona 3) hasta la zona más cercana a una de ellas (zona 1). Se conectó el multímetro al cupón correspondiente a la medida experimental y se registró la corriente cada 5 min durante un lapso de 30 min. El multímetro fue conectado en cada ocasión en serie, entre el cable de protección y el cupón como se muestra en la *figura 4.17*.



a)



b)

Figura 4.16 a) Esquema de las zonas donde se midió la corriente alterna inducida en los cupones bajo protección catódica. b) Esquema de las zonas donde se midió la corriente alterna inducida en los cupones de control.

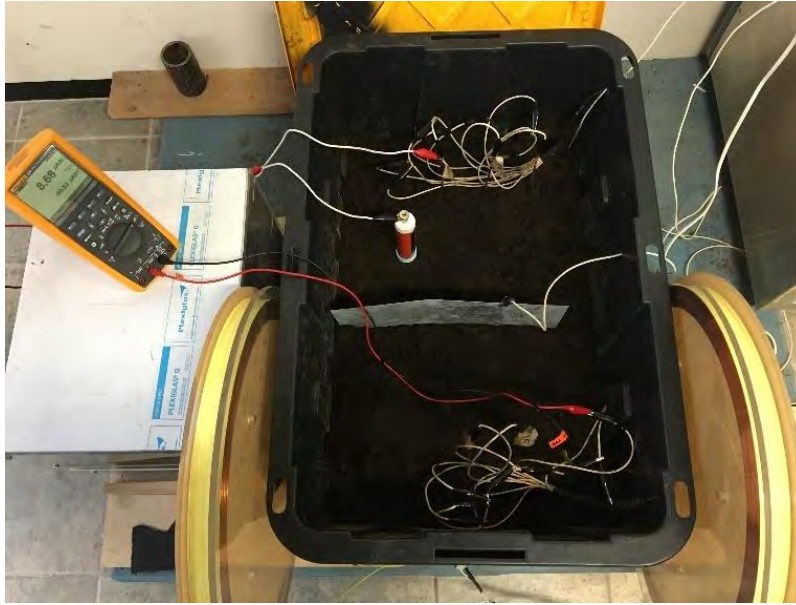


Figura 4.17 Medición de la corriente alterna inducida por el campo magnético.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1 Determinación del pH del suelo.

La *tabla 5.1* muestra los resultados de las mediciones del pH en el suelo empleado como electrolito. Representa las muestras tomadas en las diferentes secciones del experimento, la cuba de control y la de protección catódica dividida en dos secciones con y sin campo magnético. También se incluye el pH de la tierra antes de ser acidificada.

Tabla 5.1 pH del suelo.

Suelo	pH
<i>Suelo con pH controlado</i>	<i>3.4</i>
<i>Suelo afectado por la PC</i>	<i>4.4</i>
<i>Suelo afectado por la PC+CM</i>	<i>4.3</i>
<i>Suelo sin afectar</i>	<i>5.4</i>

El objetivo de la acidificación es mantener un valor de pH en el electrolito por debajo de 5, con el fin de favorecer la velocidad de corrosión. Es conocido que los suelos de alta alcalinidad o acidez propician un mayor deterioro por corrosión en el acero^[18]. La acidificación del suelo se logró agregando ácido sulfhídrico (H₂S) al 0.2 M y controlando el valor del pH a lo largo del experimento. Para monitorear la acidez a lo largo del tiempo se utilizó un pH-metro de tierra marca KECHENG KC-300B.

5.2 Resultados de la textura del suelo.

La textura del suelo nos proporciona una idea de las propiedades físicas y permite relacionarlas con la corrosividad del medio. Una forma rápida de determinar el tipo y textura de suelo es el método de Bouyoucos. En la tabla 5.2 se muestran las lecturas del hidrómetro obtenidas. Las lecturas se tomaron a los 40 s, 60 s, 10 min, 60 min, 120 min y 24 hrs. No se aplicaron correcciones

por temperatura ya que el cuarto donde se desarrolló la prueba se encuentra bajo condiciones controladas.

Se hicieron dos mediciones para corroborar la composición de la tierra.

Tabla 5.2 Lecturas del ensayo de Textura

	Muestra 1	Muestra 2
Tiempos	Lectura (gr/lt)	Lectura (gr/lt)
40 segundos	24	22.5
60 segundos	23	22
10 minutos	15	13.5
60 minutos	11	9
120 minutos	8	7
24 horas	3.5	3

Utilizando las ecuaciones 8 a 11 de la sección 4.3, se determinan los porcentajes de arcilla, limo y arena que se muestran en la *tabla 5.3*. Con los porcentajes de arena, arcilla y limo, nos desplazamos al triángulo de texturas de la figura 4.3 donde se identificó el suelo como tipo Franco Arenoso para la muestra 1 y 2 como se ilustra en la *figura 5.1*.

Tabla 5.3 Porcentajes de cada fase en el suelo de estudio.

Tierra Negra	Muestra 1	Muestra 2
% Limo + Arcilla	46.35	44.14
% Arcilla	9.46	8.16
% Limo	36.89	35.98
% Arena	53.65	55.86

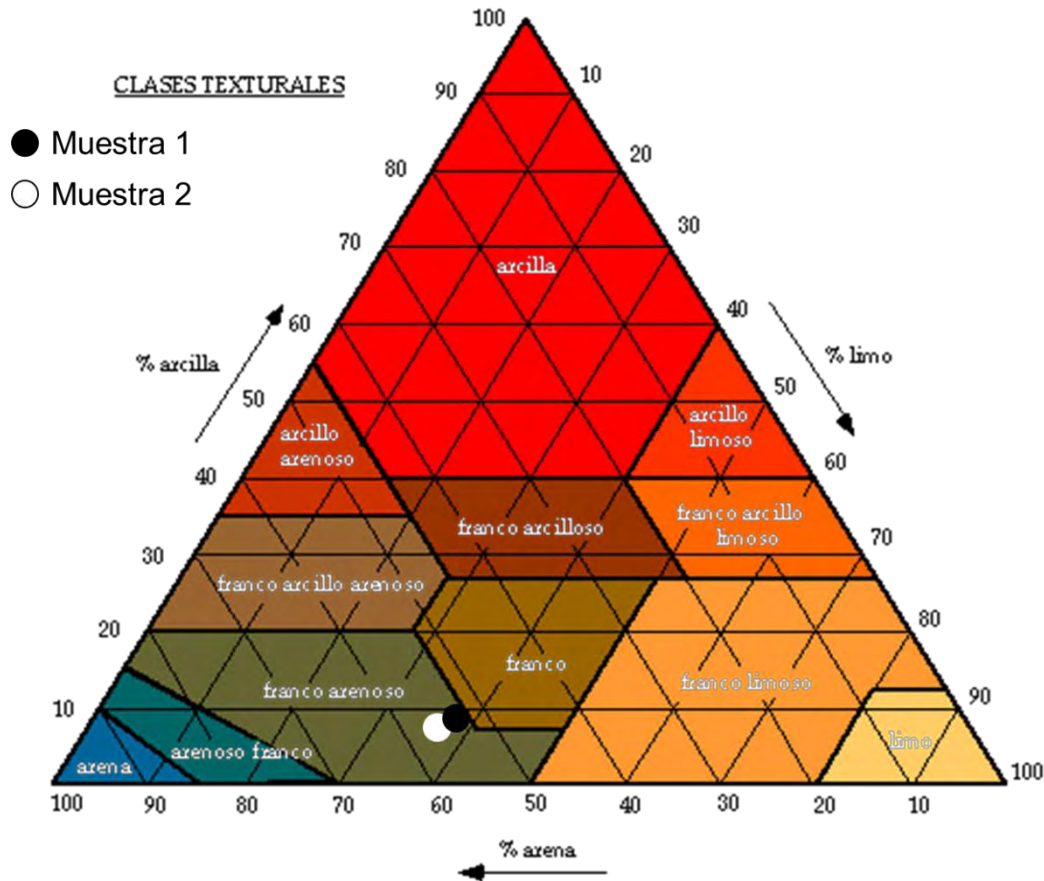


Figura 5.1 Localización de la muestra 1 y 2 en el triángulo de texturas de la figura 4.3

De acuerdo a los criterios de la USDA (*United States Department of Agriculture*), que establece que, a partir de un contenido de 20% en arcilla se puede denominar arcilloso, limoso con un 40% y arenoso si contiene un 44%. Nos señalan que la muestra franco arenosa empleada presenta una distribución de arena, limo y arcilla muy próxima a la ideal para la mayoría de los cultivos^[13]. Con base en estos resultados podemos relacionar el suelo empleado con las zonas lacustres, las cuales no es raro encontrarlas en las proximidades de los

ductos. El análisis de textura nos permitió relacionar el electrolito sólido seleccionado para el desarrollo experimental con los suelos que atraviesan los ductos comúnmente.

5.3 Resultados de la resistividad del suelo.

La resistencia eléctrica del electrolito desempeña un papel fundamental en la velocidad de corrosión de los aceros. La resistividad del suelo es la capacidad con la que una corriente es conducida. Cuando la resistividad es baja, la velocidad de corrosión aumenta^[18].

La resistividad del suelo fue medida en las condiciones de acidez obtenidas en la sección 5.1. El método utilizado para determinar la resistencia del suelo fue descrito en la sección 4.4 y es conocido con el nombre de método Wenner. Utilizando la fórmula (13) se obtienen los valores de resistividad representados por la letra griega *Rho* (ρ) la cual representa un ohm-centímetro u ohm-metro dependiendo de las unidades utilizadas para definir la variable *A*, e indica la resistencia eléctrica de un centímetro o metro cúbico de suelo según sea el caso.

$$\rho = 2\pi AR \quad (13)$$

ρ = ohm-cm u ohm-metro

π = Es la constante pi con valor aproximado de 3.1416

A = El espacio entre los electrodos en centímetros.

R = El valor de la resistencia obtenida durante la prueba en ohms.

La tabla 5.4 muestra los valores obtenidos mediante el resistómetro. Estos resultados junto con las condiciones de medición son introducidos en la fórmula (13). El valor de resistividad se tomó en la dirección del eje *x* como se ilustra en la *figura 5.2*, donde se representa la dirección espacial en la que se acomodaron los electrodos.

Tabla 5.4 Resultados de resistividad.

	R (Ohm)	A (cm)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)
PC y CM	67	5	2104.872
PC	69	5	2167.704
Control	220	5	6911.52

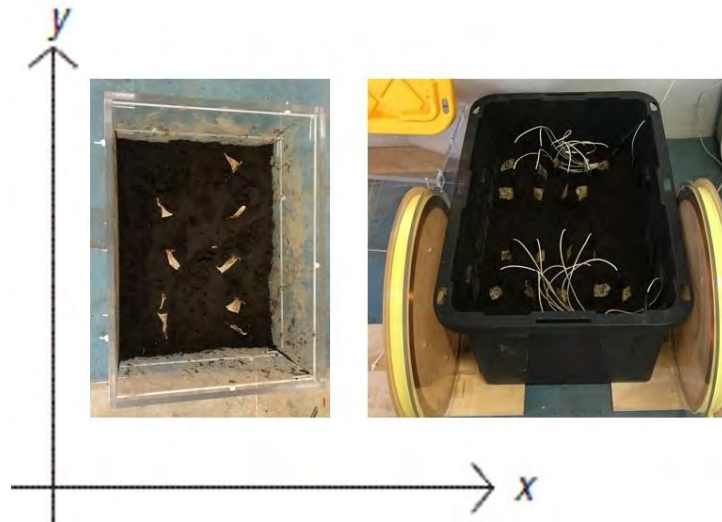


Figura 5.2 Ejes de dirección en los cuales se colocaron los electrodos para el método Wenner.

Al comparar los resultados de la tabla 5.4 con la información de la tabla 4.1 se pueden clasificar los suelos. Donde se encuentra la protección catódica se comporta como un suelo de clase 3 y es caracterizado por ser moderadamente corrosivo y agresivo con el acero al carbono. El suelo del contenedor de control es de clase 2, es decir, apenas corrosivo.

A pesar de que las condiciones del terreno no se encuentran en la clasificación máxima de corrosividad respecto a la *tabla 4.1*, las condiciones de experimentación se encuentran apegadas a las condiciones reales. Además es una clasificación de corrosividad únicamente con base en la conductividad eléctrica del suelo y existen otros factores que también promueven la corrosión. La resistencia del electrolito está sujeta a variables cambiantes como la

humedad, la temperatura ambiente, sales presentes e incluso la porosidad del terreno.

5.4 Resultados de la simulación de campo magnético por ANSYS

A partir de la simulación se obtuvieron datos del campo eléctrico y magnético donde se utiliza la solución electrostática del simulador, para la cual se necesitan fuentes de voltaje en cada una de las 3 fases. En este caso se utilizaron 400 kV, ya que es uno de los voltajes usados por CFE, posteriormente el *software* resuelve la ecuación (14) de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (14)$$

Obteniendo como resultado la intensidad (E) y densidad (D) del campo eléctrico representado en las *figura 5.3*.

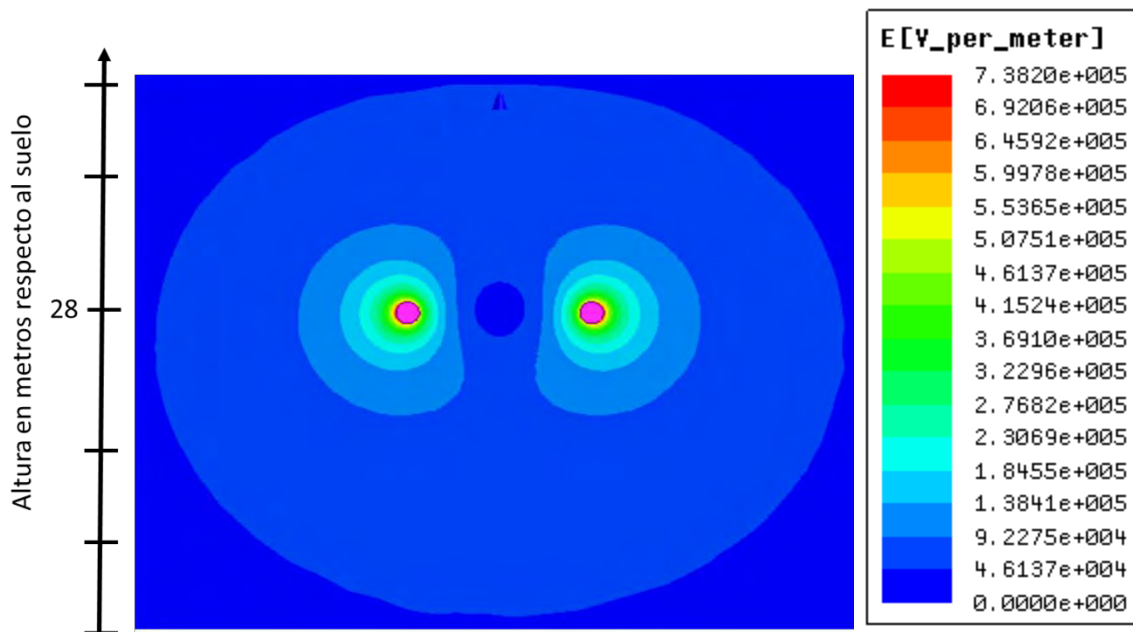


Figura 5.3 Campo eléctrico en fase B de una línea de transmisión trifásica.

La aproximación del campo magnético producido por la línea de transmisión se obtiene mediante la solución magnetostática del simulador, la cual da solución a la ecuación (15) de Poisson.

$$\nabla^2 A_z = -\mu J_z \quad (15)$$

Arrojando los resultados de intensidad (H) y densidad (B) del campo magnético. En este caso se necesitan fuentes de corriente las cuales se calculan en base a la ecuación (16) de corriente trifásica:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V_{LL} \cdot FP} \quad (16)$$

En donde P es la Potencia en MW , V_{LL} es el voltaje fase a fase de la línea de transmisión y FP es el factor de potencia.

Para este caso se seleccionó una potencia teórica de 350 MW, un voltaje de 400 kV y un factor de potencia de 0.8. Produciendo una corriente de 631 A. Una vez obtenidos estos datos se alimentan al simulador dando como resultado un campo magnético que se disipa conforme se aleja de su fuente, esto se representa en la *figura 5.4*.

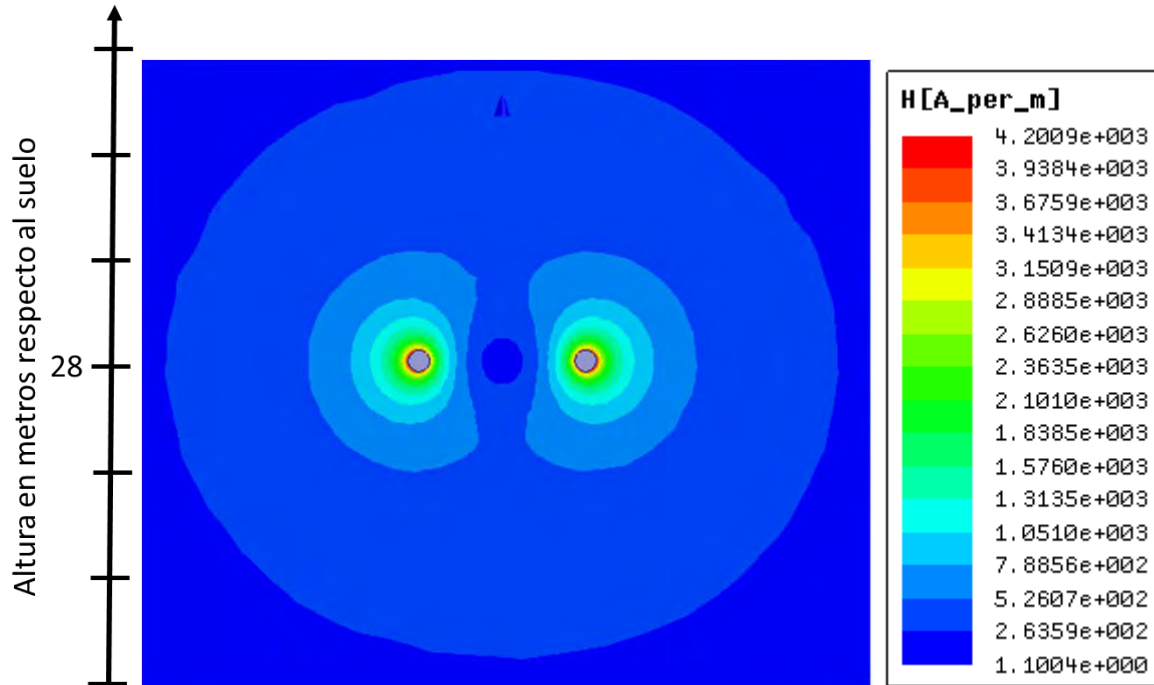


Figura 5.4 Campo magnético en fase B de línea de transmisión

De la *figura 5.4* se selecciona el penúltimo valor, debido a que el más lejano es cuando la distancia tiende al infinito. Por lo tanto tenemos un valor teórico de 2.6359×10^2 A/m. Que convertidos a Gauss equivalen a un valor teórico 3.3 Gauss. Este valor teórico nos proporciona una idea acertada del valor máximo que se esperaría encontrar sobre la superficie del suelo que se encuentre debajo de líneas de alta tensión. Basado en los resultados proporcionados por la simulación, se escogió el valor de 3 Gauss para observar sus efectos sobre el sistema de PC.

5.5 Resultados de la microscopía electrónica de barrido.

Desde periodos iniciales el metal sufrió un proceso de corrosión uniforme, mostrando productos de morfología homogénea. Conforme pasó el tiempo aumentó el espesor y en el caso de los cupones de acero en la cuba de control cambió de formaciones aciculares a tipo hojuela.

Las micrografías permiten apreciar claramente la superficie corroída del acero como se muestra en las *figuras 5.5 a 5.7* que corresponden al segundo mes experimental. Se aprecian formaciones de tipo hojuela (*figuras 5.5 y 5.6*) y aciculares (*figura 5.7*) características de los productos de oxidación del hierro.

Las micrografías correspondientes a las *figuras 5.5 y 5.6* se encuentran bajo protección catódica y además la muestra presentada en la *figura 5.6* se encontraba bajo el campo magnético. A los dos meses y a simple vista, la morfología parece ser ligeramente diferente, más adelante cuando el óxido en la superficie fue suficiente se corroboró con ayuda de un difractograma de rayos X la presencia de diferentes tipos de óxido, los cuales originan las diferentes morfologías mostradas.

En ambas superficies se presentan grietas a través de las capas formadas, estas grietas permiten que el óxido se desprenda conforme se acumula y este desprendimiento genera cambios en la velocidad de corrosión los cuales pueden ser apreciados por el método gravimétrico en las *figuras 5.14 y 5.15*.

En la *figura 5.7*, la estructura del óxido, muestra depósitos que tienen características aciculares y forman una capa adherente y compacta^[28], esta morfología ha sido descrita previamente por Borch y colaboradores^[29] en tuberías de acero corroídas. Donde se menciona la formación de cristales piramidales de Goethita o cristales octaédricos de magnetita

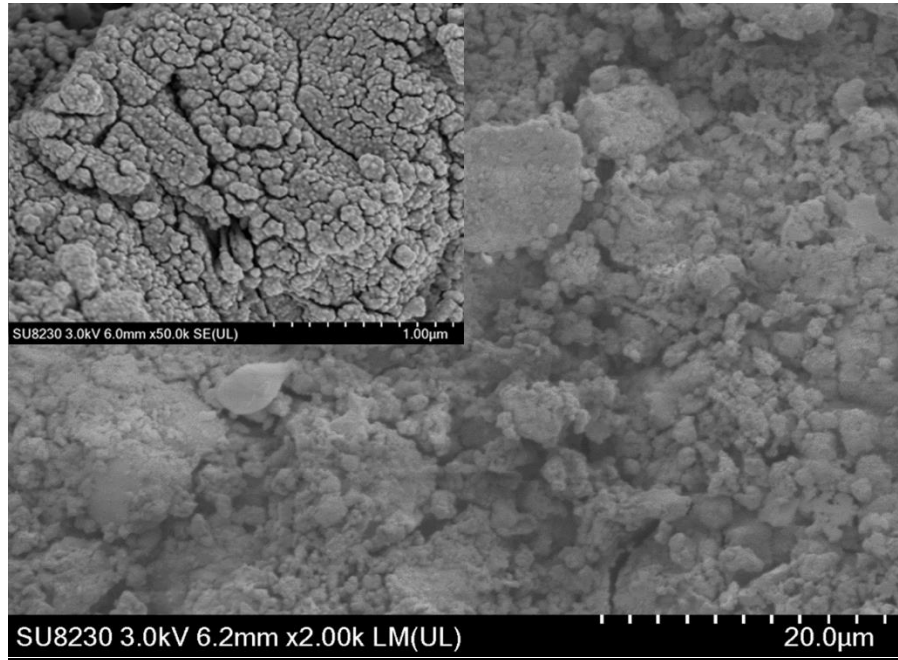


Figura 5.5 Imagen obtenida por MEB de la superficie corroída del cupón bajo PC después de 2 meses de exposición, donde se aprecian formaciones tipo hojuela.

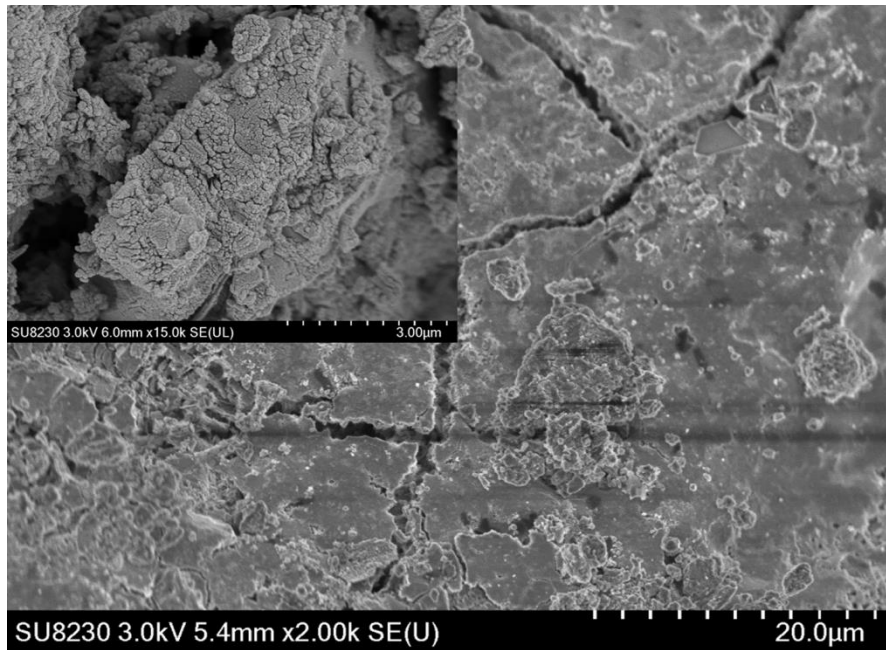


Figura 5.6 Imagen obtenida por MEB de la superficie corroída del cupón bajo PC y campo magnético después de 2 meses de exposición, donde se aprecian formaciones tipo hojuela.

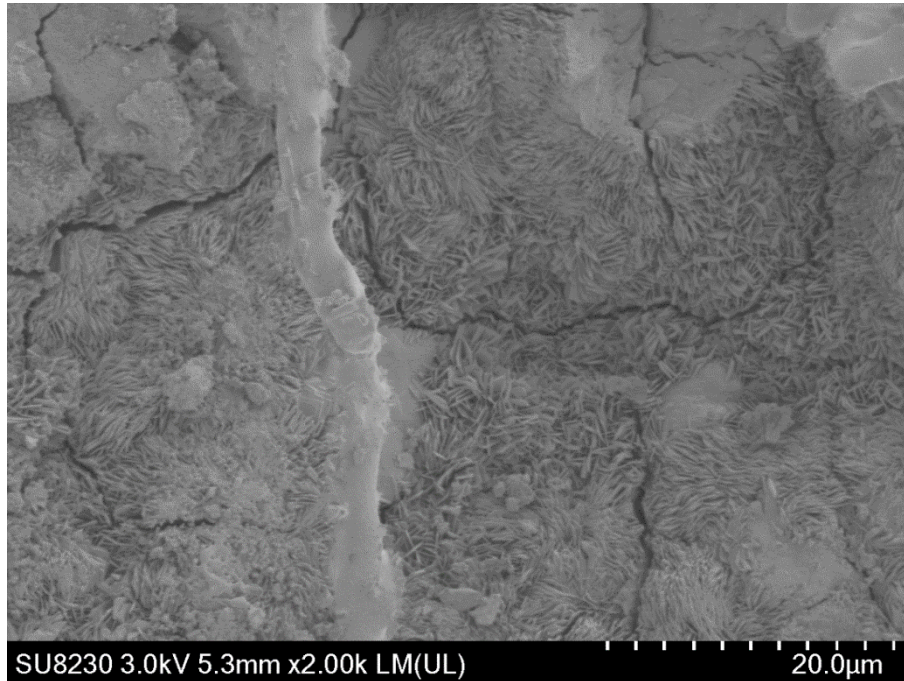


Figura 5.7 Imagen obtenida por MEB de la superficie corroída del cupón de control después de 2 meses de exposición, donde se aprecian formaciones aciculares.

En la muestra presentada en la figura 5.7, se evidencia la presencia de estructuras aciculares, las cuales indican la presencia del Fe_2O_3 (Fe^{2+}). Posteriormente en la figura 5.10, la desaparición de estas estructuras acicular se debe a la formación de Fe_3O_4 (Fe^{3+}).

Las micrografías de las *figuras 5.8 a 5.10*, presentan una morfología compacta característica del Fe_3O_4 (Fe^{3+}) y es evidente la ausencia de superficies aciculares. Sumado a esto, la presencia de grietas es indicativo de que el proceso de oxidación se encuentra en la etapa catódica donde posteriormente la capa de herrumbre se desprenderá de la superficie del cupón de acero.

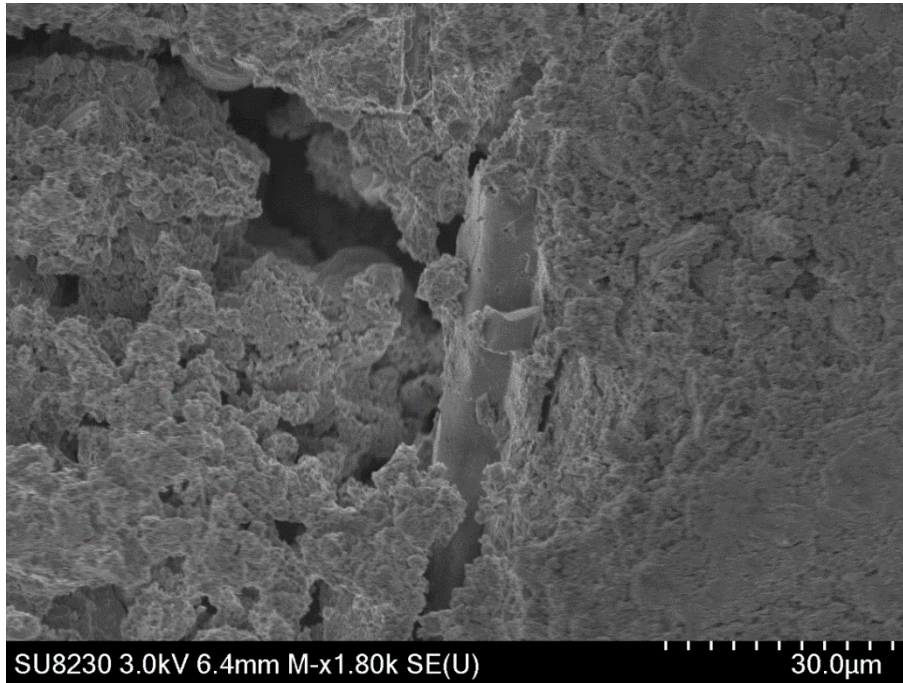


Figura 5.8 Superficie corroída del cupón bajo PC después de 6 meses de exposición.

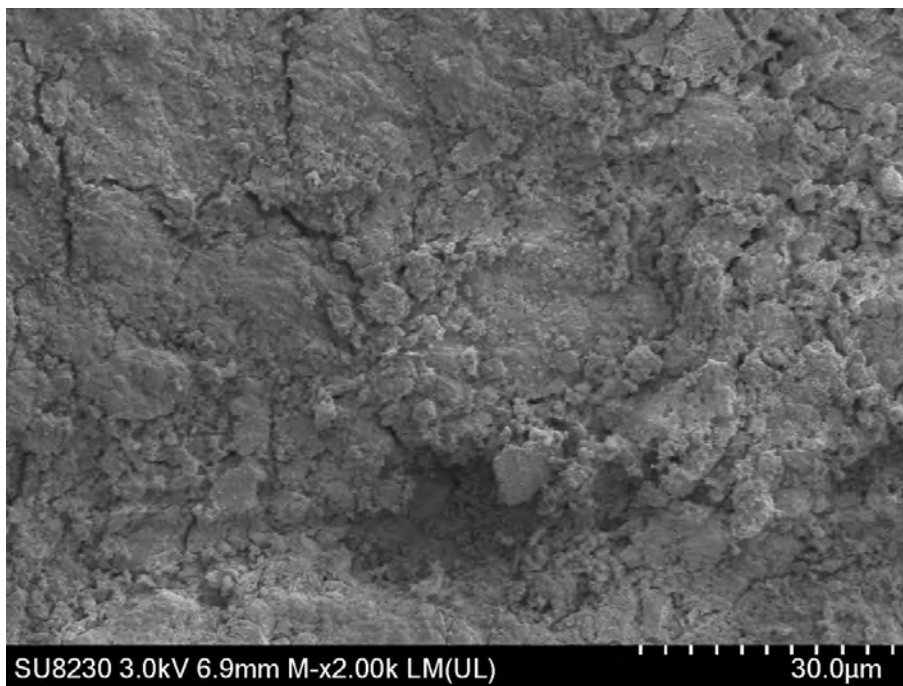


Figura 5.9 Superficie corroída del cupón bajo PC y campo magnético después de 6 meses de exposición.

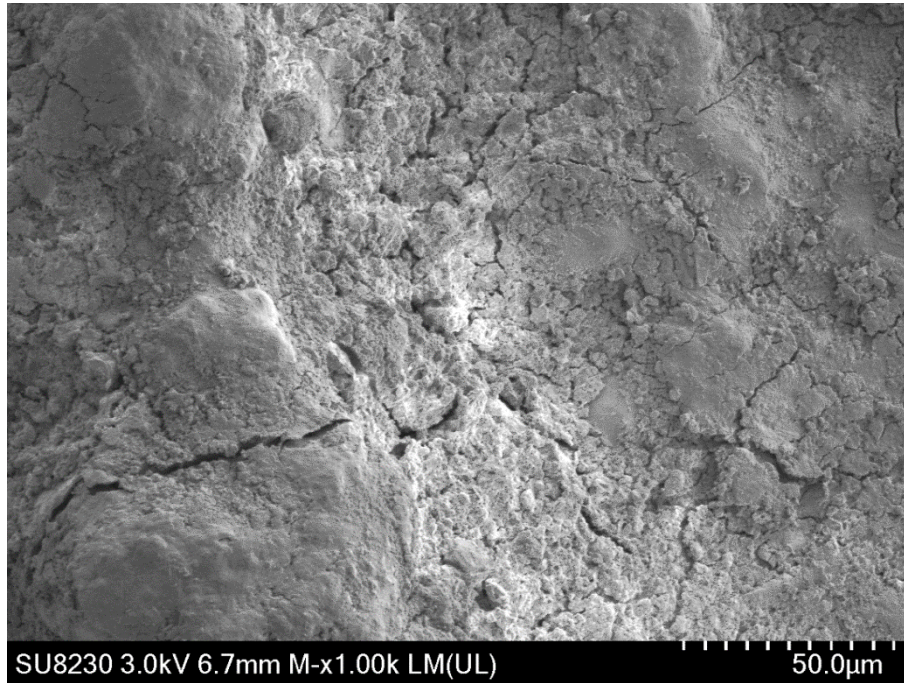


Figura 5.10 Superficie corroída del cupón de control después de 6 meses de exposición.

En el análisis elemental de un corte transversal realizado en el cupón bajo protección catódica y campo magnético mostrado en la *figura 5.11*, presenta una imagen de un corte transversal de la superficie corroída del cupón de acero API X52, donde se aprecia una capa de óxido de aproximadamente 100 micrómetros. El inicio y final de la capa de óxido está definido por la presencia de oxígeno y es formada principalmente por óxidos de hierro.

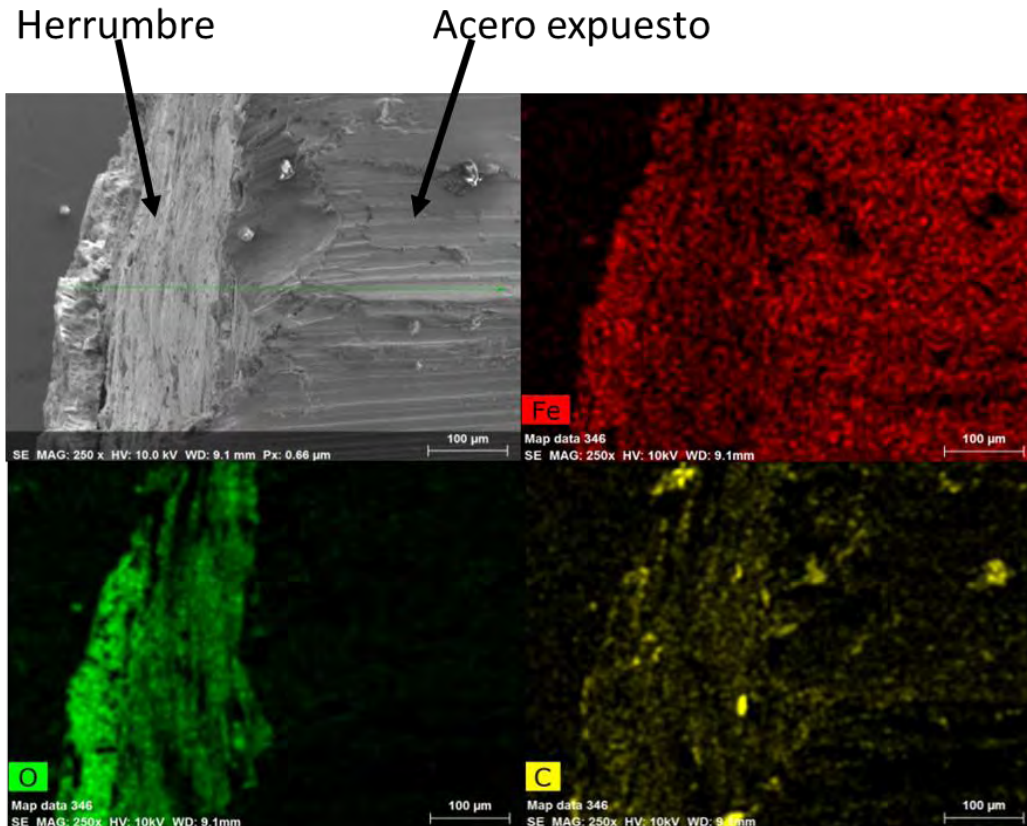


Figura 5.11 Análisis elemental sobre el corte transversal de la superficie corroída del cupón bajo PC+CM.

5.6 Resultados de difracción de Rayos X

La composición de los óxidos provenientes de la superficie de los cupones, es determinada mediante la técnica de difracción de rayos X. Los difractogramas se muestran en las figuras 5.12 y 5.13 e indican el tipo de óxido presente en la superficie respectiva. Debido a que los productos de corrosión del acero están asociados a los elementos presentes en el suelo no es fácil identificarlos.

En la *figura 5.12* se muestra el difractograma del polvo de óxido proveniente de la superficie del cupón de control. Muestra la presencia de Fe_2O_3 y $\text{Fe}_3\text{O}(\text{OH})$, el difractograma que corresponde a la *figura 5.7* de MEB, donde la superficie de control tiene formaciones aciculares. Este tipo de formaciones han sido reportadas como características de los productos de hierro principalmente de la

magnetita, la cual es muy inestable y se descompone rápidamente en óxidos más estables como el óxido de hierro III. Cornell y Schwertmann^[30,31] señalan que el principal precursor de magnetita es el hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) durante la corrosión anaerobia y además la magnetita reduce el oxígeno a mayor velocidad que el hierro puro, lo cual puede indicar una velocidad de corrosión mayor en esa superficie.

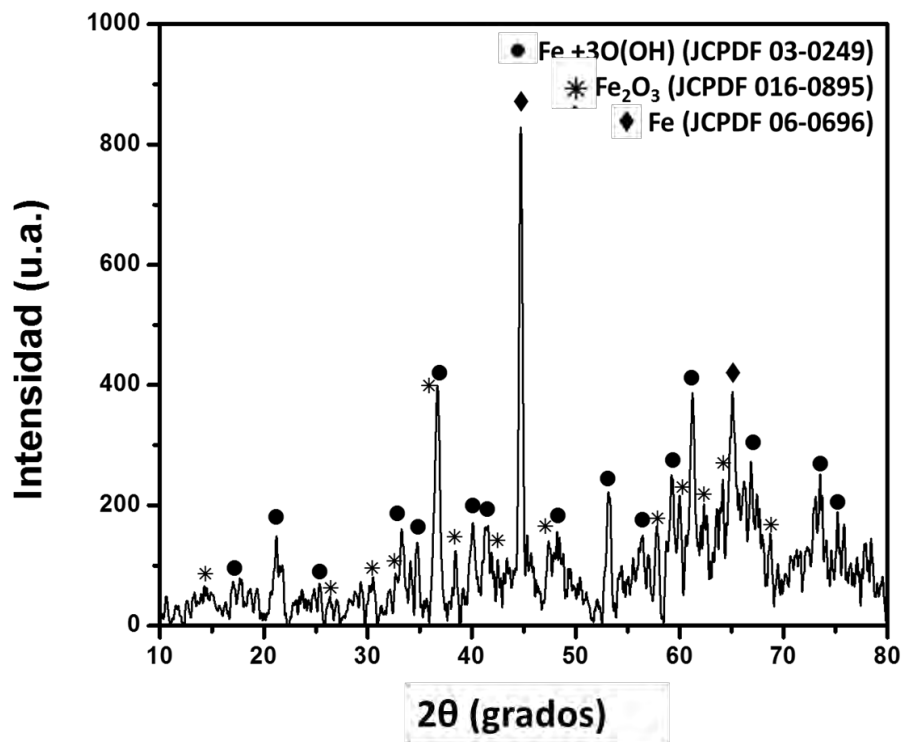


Figura 5.12 Difractograma de los polvos de óxido provenientes del cupón de control después de 3 meses.

En los cupones protegidos catódicamente representados con el difractograma de la figura 5.13, no se mostró evidencia de la presencia de un óxido en cantidades significativas. Únicamente el hierro apareció como estructura predominante, lo cual era de esperarse ya que es el componente principal del acero.

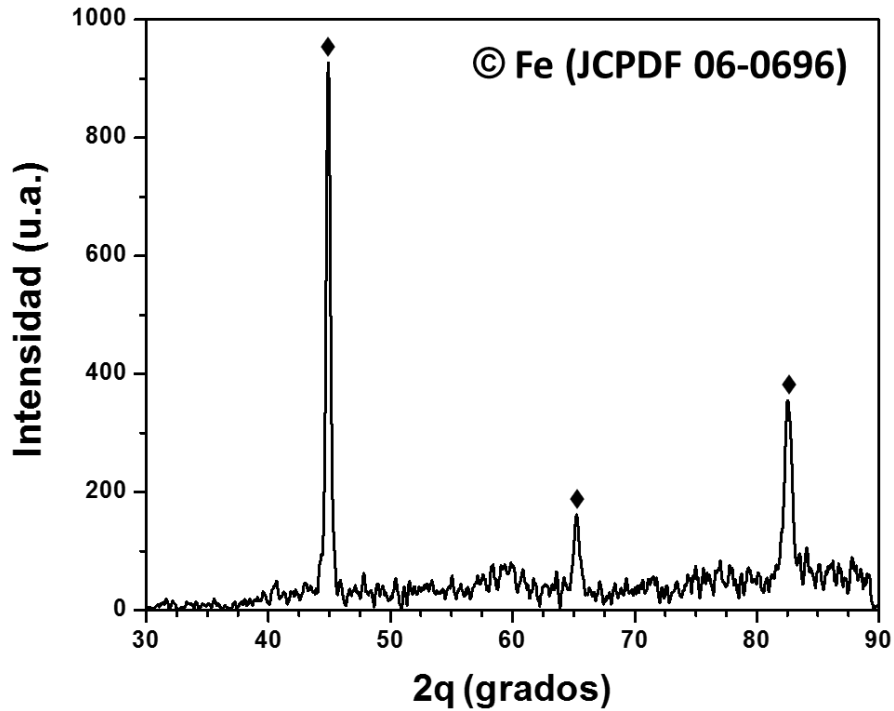


Figura 5.13 Difractograma de los polvos de óxido provenientes de la superficie de los cupones protegidos catódicamente después de 3 meses.

5.7 Resultados de la velocidad de corrosión por el método gravimétrico

La pérdida de peso o método gravimétrico es el parámetro más utilizado e importante para determinar la velocidad de corrosión de un acero que se encuentra en contacto con un electrolito sólido. Esta técnica proporciona una aproximación más real del desgaste sufrido por el acero durante el fenómeno de corrosión en comparación a otras técnicas electroquímicas. Su desventaja es el tiempo que toma obtener resultados^[26].

Ya ha sido reportado que las velocidades de corrosión tienden a disminuir conforme pasa el tiempo a medida que la superficie del acero es cubierta con los productos de la corrosión, alcanzando un estado cuasi estable entre las capas de óxidos y el suelo^[32].

En la *tabla 5.5*, se muestran los resultados de la velocidad de corrosión obtenidos por el método gravimétrico obtenidos para las distintas condiciones experimentales.

Tabla 5.5. Resultados de la velocidad de corrosión obtenidos por el método gravimétrico (mm/año).

Mes	Control	PC	PC & CM
1	0.07955	0.02083	0.0161
2	0.05715	0.01905	0.01759
3	0.05258	0.0245	0.02151
4	0.04288	0.02421	0.02573
5	0.04168	0.01829	0.02935
6	0.04659	0.02046	0.02727
mm/año (milímetros por año)			

Los cálculos fueron realizados según la norma ASTM G1 bajo las siguientes condiciones: densidad del acero 7.86 gr/cm³, área total expuesta del cupón 46 cm² y constante de 8.76x10⁴ mm/año. Estos datos se sustituyeron en la ecuación (8) y fue así como se obtuvieron los resultados mostrados en la *tabla 5.5*.

La *figura 5.14* presenta en las velocidades de corrosión un comportamiento cíclico, este comportamiento se manifiesta en el aumento y descenso de las velocidades de corrosión en las distintas condiciones experimentales. Esto se puede deber al comportamiento electroquímico de la corrosión ya que dicho proceso lleva un desprendimiento de herrumbre posterior a la etapa de pasivación. Este desprendimiento expone una superficie de acero nueva, la cual genera un pequeño reinicio en el ciclo de corrosión y provoca los ligeros aumentos en las velocidades de corrosión manifestadas en la *figura 5.14*.

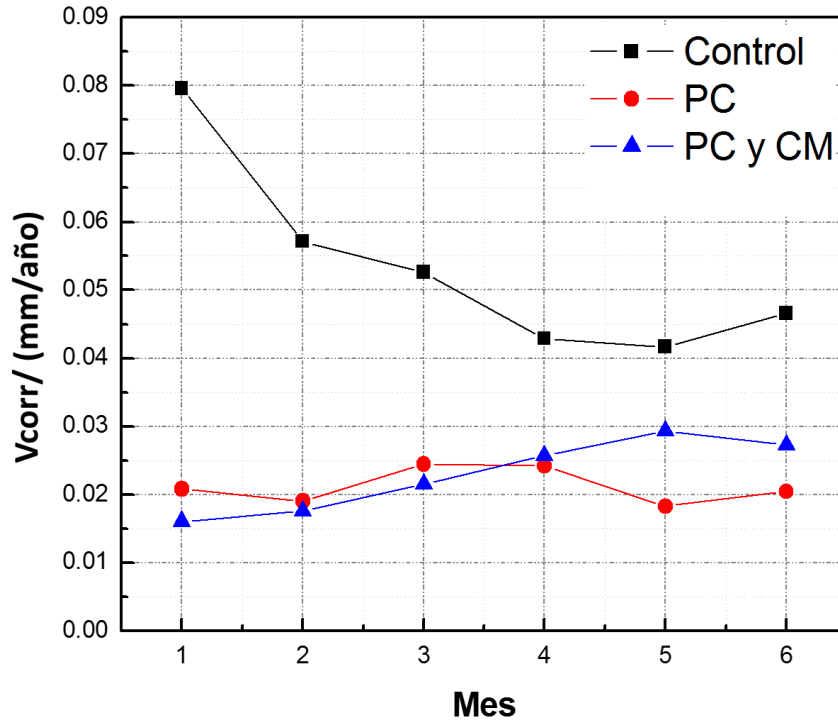


Figura 5.14 Velocidad de corrosión del acero

El ciclo que forma la corrosión a lo largo del tiempo es más evidente en el cupón bajo la PC. Sin embargo al final de los 6 meses el comportamiento de la velocidad de corrosión en el resto de las condiciones experimentales muestra una tendencia a formar un ciclo. Para confirmar lo anterior, sería necesario disponer de más tiempo para lograr determinar con mayor exactitud si el comportamiento se mantiene.

En la *figura 5.15*, la cual representa a las muestras bajo PC y PC & CM, se ve como las muestras bajo PC mantienen cierta estabilidad con el tiempo que duró el experimento en comparación a las muestras bajo PC & CM. Las muestras bajo la influencia del campo magnético de 3 Gauss presentan con el tiempo una velocidad de corrosión mayor en comparación a la ausencia del campo magnético, esto se debe a las corrientes alternas inducidas por el campo en los cupones de acero, aunque ninguna de las velocidades de corrosión representan un riesgo grave a los cupones de acero.

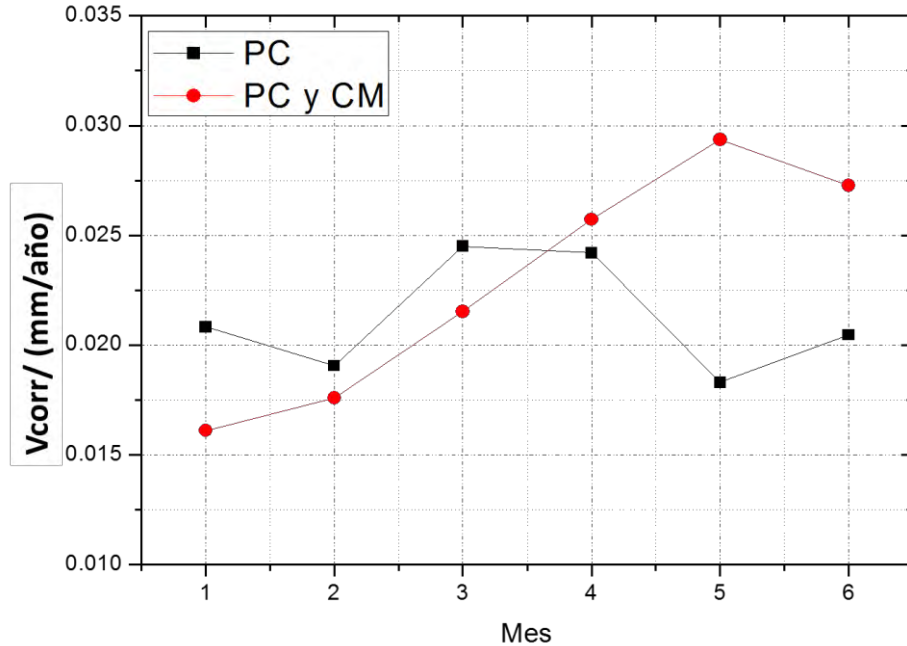


Figura 5.15 Velocidad de corrosión del acero bajo PC y PC+CM

El sistema de protección catódica mantiene un comportamiento cíclico durante los 6 meses experimentales en comparación al sistema de PC + CM. El comportamiento cíclico del sistema de PC corresponde a la formación y desprendimiento de capas de óxido, mientras que el sistema de PC + CM parece tener un ciclo más largo y es posible que se deba a la influencia del CM en la protección catódica. Ya que las corrientes alternas inducidas generan una mayor corrosión antes del desprendimiento de óxidos.

5.8 Resultados de la corriente inducida por el campo magnético

Las mediciones de corriente alterna en los diferentes cupones de acero bajo un voltaje constante de -850 mV, permiten evaluar el efecto inductivo del campo magnético. A continuación se presentan los resultados de los cupones protegidos catódicamente bajo el efecto del campo magnético en comparación a los que se encuentran lejos de la influencia del mismo.

En la *figura 5.16*, los cupones expuestos al campo magnético (CM) presentan valores de corriente alterna hasta tres veces mayores en comparación a sus contrapartes sin campo magnético (sCM). Con esta información se puede asegurar que el campo está influyendo en el comportamiento eléctrico de los cupones. Este efecto se evidencia mediante la presencia de una corriente alterna parásita cuyo origen es la inducción generada por el campo. Esto se corrobora al apagar las bobinas (CM OFF) al inicio y al final del experimento como se muestra en el gráfico, presentándose una caída de corriente cuando el campo magnético es desactivado y su efecto inductivo desaparece.

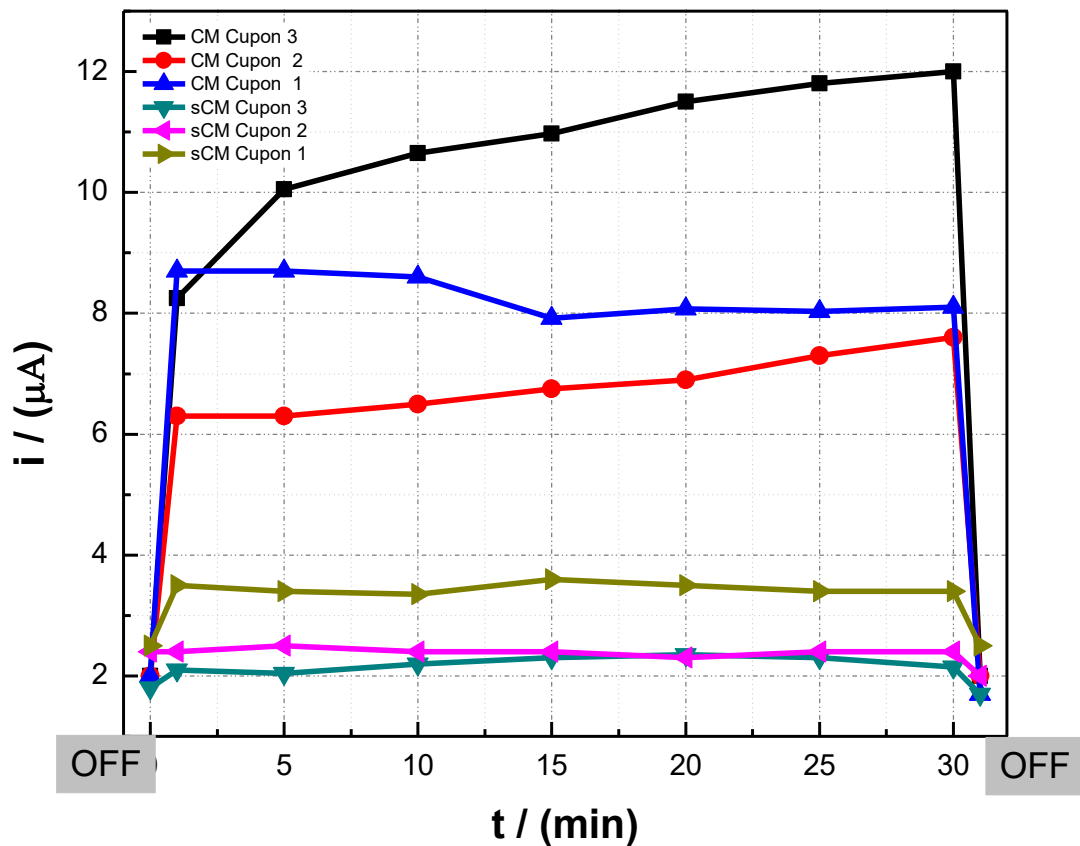


Figura 5.16 Corriente inducida en los cupones al aplicar un CM de 3 Gauss.

La variación de los valores de corriente en los cupones bajo el efecto del CM, puede deberse a diversos factores, como el cambio en la humedad o corrientes de aire presentes al momento de realizar la medición así como también pequeñas variaciones en la superficie de incidencia del campo sobre los

cupones las cuales pudieron ser generadas al momento de colocar el cupón en su posición.

Una vez comprobada la existencia de la corriente parásita se evalúa el riesgo que presenta a la protección catódica. Para esto se utilizaron las ecuaciones (17) y (18), propuestas por Hosokawa^[5] como un nuevo método para determinar si una corriente parásita de corriente alterna está afectando la protección catódica, estas ecuaciones se representan de forma gráfica en la *figura 5.17*

$$0.1 \text{ A/m}^2 \leq I_{CD} < 1.0 \text{ A/m}^2 \text{ y } I_{CA} < 25 * I_{CD} \quad (17)$$

$$1.0 \text{ A/m}^2 \leq I_{CD} < 40 \text{ A/m}^2 \text{ y } I_{CA} < 70 \text{ A/m}^2 \quad (18)$$

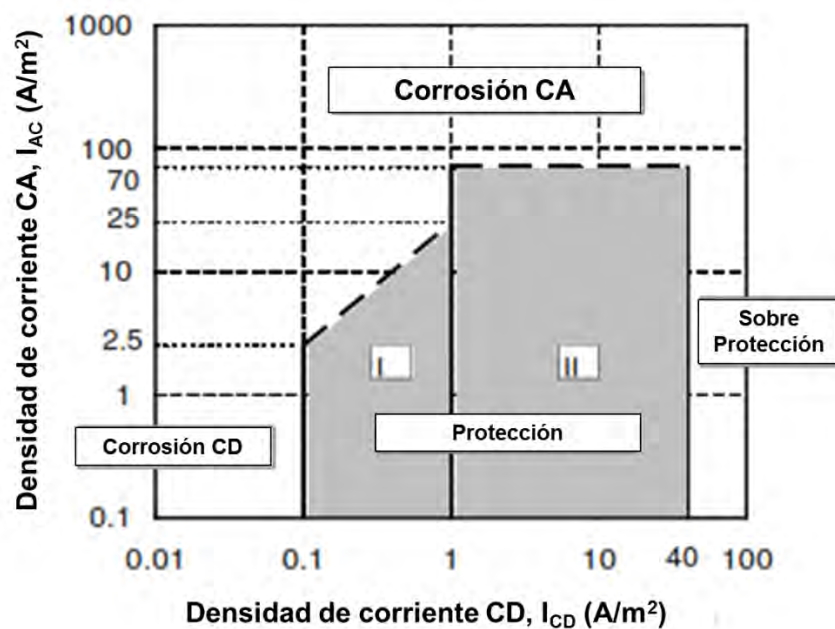


Figura 5.17 Nuevo criterio de PC basado en densidades de corrientes CA y CD^[5].

Con el fin de determinar si la corriente alterna inducida es un factor de riesgo en nuestro sistema de protección catódica, se calcularon las densidades de corriente en la *tabla 5.6* y *5.7* en base a las mediciones experimentales. Se compararon los valores de densidad de corriente con los criterios establecidos en las ecuaciones (17) y (18).

Tabla 5.6. Densidad de CA y CD en los cupones con PC sin CM.

Tiempo Minutos	Cupón 1sCM		Cupón 2sCM		Cupón 3sCM	
	CA A/ m ²	CD A/ m ²	CA A/ m ²	CD A/ m ²	CA A/ m ²	CD A/ m ²
OFF	1.26	40.74	1.21	15.27	0.91	23.40
0	1.77	40.73	1.21	14.75	1.06	23.50
5	1.72	44.45	1.26	16.83	1.03	24.99
10	1.69	44.97	1.21	17.25	1.11	26.61
15	1.82	45.74	1.21	17.71	1.16	27.95
20	1.77	46.16	1.16	18.27	1.19	29.00
25	1.72	46.69	1.21	18.78	1.16	30.04
30	1.72	47.19	1.21	19.09	1.09	30.68
OFF	1.26	47.19	1.01	19.10	0.86	30.74

Tabla 5.7. Densidad de CA y CD inducida en los cupones con PC y CM.

Tiempo Minutos	Cupón 1CM		Cupón 2CM		Cupón 3CM	
	CA A/ m ²	CD A/ m ²	CA A/ m ²	CD A/ m ²	CA A/ m ²	CD A/ m ²
OFF	1.01	33.34	1.01	34.68	1.01	54.59
0	4.40	33.33	3.18	34.68	4.17	113.37
5	4.40	35.69	3.18	34.68	5.08	104.10
10	4.34	36.76	3.28	35.83	5.38	94.12
15	4.00	38.42	3.41	34.48	5.54	88.41
20	4.08	39.87	3.49	31.37	5.81	82.25
25	4.06	41.16	3.69	27.79	5.96	77.70
30	4.09	42.51	3.84	25.99	6.06	73.28
OFF	0.86	42.49	1.01	25.87	1.01	54.59

Las densidades de corriente de las *tablas 5.6 y 5.7 bajo el criterio de Hosokawa*^[5] ilustrado en la *figura 5.18*. Muestra que los cupones se encuentran en una zona de protección, aunque los cupones que se encuentran bajo el CM tienen CA mayores en comparación a los que únicamente cuentan con PC. Esto nos indica que el efecto de la corriente parásita inducida por un campo magnético de 3 Gauss no es suficiente para poner en riesgo la protección catódica, sin embargo, sí genera un efecto en el sistema. Teniendo en cuenta que la corriente inducida aumenta conforme el tiempo pasa y en consecuencia

podría desplazar los cupones a una zona de mayor riesgo, sería necesario realizar un experimento con mayor tiempo para corroborar estas afirmaciones.

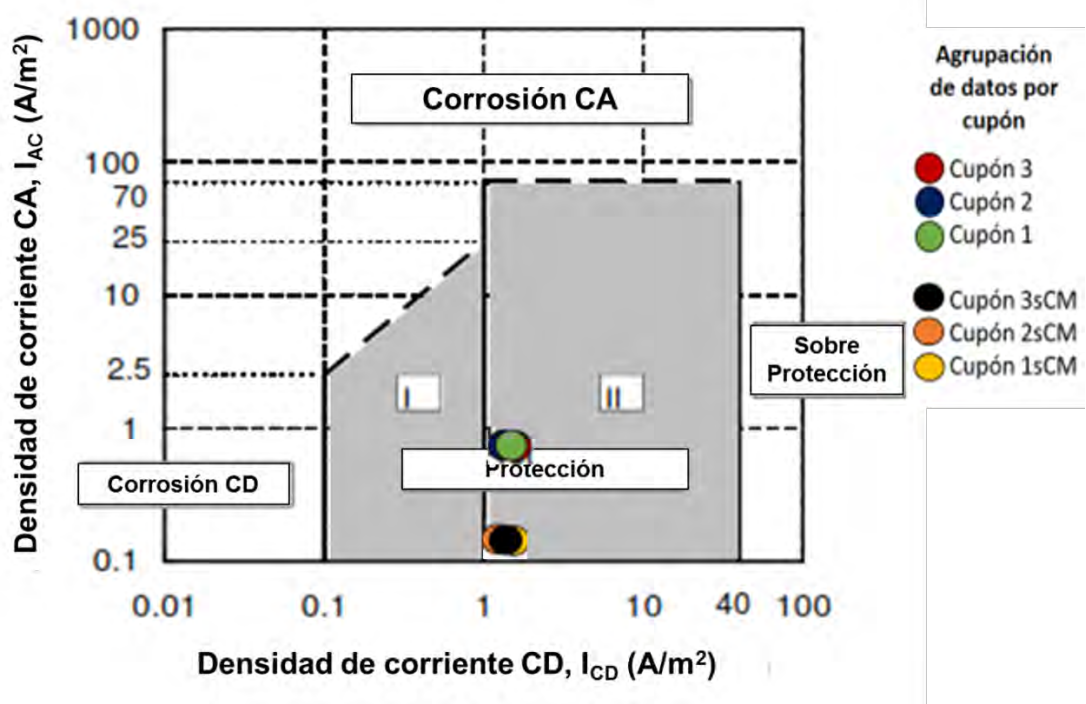


Figura 5.18 Resultados de la densidad de corriente en base al nuevo criterio de PC

6. Conclusiones

- (1) Mediante la microscopía electrónica se observó el proceso de corrosión presente en la superficie de los cupones y cómo evolucionó con el tiempo. Se formaron óxidos como el Fe_2O_3 propiciando el agrietamiento y desprendimiento de las capas superficiales de la herrumbre, estos desprendimientos afectaron la velocidad de corrosión manifestada en los ciclos anódicos del método gravimétrico, ya que al desprenderse la capa de herrumbre se expone la superficie limpia del acero y genera una caída de potencial, provocando que el ciclo de corrosión se reinicie. Esto también explica porque la velocidad de corrosión no es constante a través del tiempo y presenta un comportamiento cíclico.
- (2) Mediante la simulación con el programa ANSYS, para una línea trifásica a 28 metros de altura, 350 MW, 400 kV, una corriente de 631 A. Se logró determinar teóricamente la magnitud máxima de campo magnético que se puede encontrar en la práctica, la cual fue de 3.3 Gauss, permitiendo establecer la magnitud del parámetro más importante para éste trabajo. En la figura 5.4 se muestra el campo magnético de las líneas de transmisión y como se disipa conforme aumenta la distancia.
- (3) Los resultados del método gravimétrico en las figuras 5.14 y 5.15 indican que un campo magnético de 3 Gauss en condiciones idénticas al producido por las líneas de alta tensión. Puede aumentar la velocidad de corrosión de un ducto protegido y bajar la eficiencia de la protección catódica. Sin embargo, el efecto ocasionado por la inducción de la corriente en un lapso de 6 meses, sigue que en este tiempo el efecto del campo no es suficiente para afectar al sistema de PC, ni aumentar el riesgo de corrosión, como se muestra en la figura 5.18.

- (4) Con base a las mediciones experimentales de corriente alterna, directa y sus densidades de corriente asociadas (*tabla 5.6 y 5.7*), se puede asegurar que la corriente inducida por el campo magnético existe y afecta la protección catódica. De igual manera el método gravimétrico, durante los 6 meses que duró la evaluación, muestra una tendencia ascendente en la velocidad de corrosión. Cabe recordar que la vida útil de los ductos es de varias décadas y por lo tanto para trabajos futuros es recomendable extender el tiempo de experimentación por varios años o determinar la inductancia máxima de corriente en el ducto, para que con un campo de intensidad mayor se logre observar en unos meses lo que tomarías años.

7. Trabajos Futuros

1. Mediante unas bobinas de helmholtz que puedan regular la intensidad del campo magnético, determinar que magnitud de campo magnético que afecta la protección catódica, señalar que condiciones en la práctica generan esa inducción y corroborar si la técnica propuesta por Hosokawa^[5] mitiga la corriente parasita, de lo contrario proponer un nuevo método.
2. En cupones de diferente tamaño, inducir corriente mediante un campo magnético de 3 Gauss y estudiar si a mayor superficie de incidencia mayor es el acoplamiento magnético. Determinar si hay un punto máximo de inductancia para un sistema de campo magnético de 3 Gauss y un ducto.

8. Bibliografía

- [1] P. R. Roberge, *Corrosion Engineering Principles and Practice*, vol. 105. Mc Graw Hill, 1996.
- [2] a W. Peabody and R. L. Bianchetti, *Control of Pipeline Corrosion*, 2nd ed. NACE Press, 2001.
- [3] 200 NACE, International, Ed., *CP1-CATHODIC PROTECTION TESTER TRAINING MANUAL*. USA: NACE International, 2000, 2006.
- [4] B. Hutson, J. C. Bowles, R. Castillo, K. Garrity, T. H. Lewis, L. Rankin, and D. A. Schramm, *CP 2 – Cathodic Protection Technician Course Manual*, no. January. USA: NACE International, 2000, 2007.
- [5] Y. Hosokawa, “Overcoming the New Threat To Pipeline Integrity - Ac Corrosion Assessment and Its Mitigation -,” *23rd World Gas Conf.*, 2006.
- [6] Y. Hosokawa, K. Fumio, and Y. Nakamura, “An Innovative Instrument for Evaluating CP Levels Liaison with Enhanced CP Maintenance Database,” *CORROSION/02*, no. paper no. 02112, p. 11, 2002.
- [7] A. Bahadori, *Cathodic Corrosion Protection Systems*. USA: Gulf Professional Publishing, 2014.
- [8] F. S. Standards, *Standard Practice Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*, vol. 2007, no. 21173. 2013.
- [9] N. International, *Interferencia PC*, Julio 2007. NACE International, 2006, 2007.
- [10] H. M. González, J. García, and D. Núñez, “El método del hidrómetro : base teórica para su empleo en la determinación de la distribución del tamaño de partículas de suelo The hydrometer method : theoretical basis for its employment in determining the soil particle-size distribution,” vol. 16, no. 3, pp. 19–25, 2007.
- [11] “MÉTODO AS-02,” *NOM-021-SEMARNAT-2000*, 2002.
- [12] A. McCauley, C. Jones, and J. Jacobsen, “Soil pH and Organic Matter,” no. 8, 2009.

- [13] J. Porta Casanellas, M. López-Acevedo Reguerín, and C. Roquero de Laburu, *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente*, 3a. Edició. Madrid: Mundi-Prensa, 2003.
- [14] A. J. Muelas Pillimué and M. M. Alejandra, “DETERMINACIÓN DE LA TEXTURA POR EL MÉTODO DE BOUYOUCOS,” Cauca (Colombia), 2015.
- [15] “MÉTODO AS-09,” *NOM-021-SEMARNAT-2000*, 2002.
- [16] “Understanding Soil Resistivity,” 2014.
- [17] “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method,” *ASTM G57-06(2012)*, no. Reapproved, pp. 2–6, 2012.
- [18] M. Taghipour, G. R. Lashkaripour, M. Ghafoori, and N. Hafezimoghaddas, “Evaluating the soil corrosion of Bushehr, Iran, based on a new classification system for corrosive soils,” *Anti-Corrosion Methods Mater.*, vol. 63, no. 5, pp. 347–354, 2016.
- [19] G. Filippopoulos and D. Tsanakas, “Analytical Calculation of the Magnetic Field Produced by Electric Power Lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1474–1482, 2005.
- [20] J.-R. Riba Ruiz and A. Garcia Espinosa, “Magnetic Field Generated by Sagging Conductors of Overhead Power Lines,” *Comput. Appl. Eng. Educ.*, vol. 19, no. 4, pp. 787–794, 2011.
- [21] S. Vujevi and D. Lovri, “3D Computation of the Power Lines Magnetic Field,” vol. 41, pp. 1–9, 2015.
- [22] F. Muñoz Ceja, “Simulación de Transitorios Electromagnéticos mediante el Método de las Características en el Dominio de Fases para Localizar Segmentos Corroídos en Líneas de Transmisión y Cables,” CINESTAV Guadalajara, 2016.
- [23] ANSYS, *ANSYS Maxwell V16 Training Manual*. 2013.
- [24] A. F. Restrepo, E. Franco, and C. R. Pinedo, “Metodología de diseño e implementación de un sistema para generación de campos magnéticos uniformes con bobinas helmholtz cuadrada tri-axial,” *Inf. Tecnol.*, vol. 25,

no. 2, pp. 3–14, 2014.

- [25] Y. A.- Montero, G. C. C.- Vela, B. A. D.- Guedez, A. C. Corugedo, S. L. Guerra, C. De Investigación, V. Blanca, C. Ciudad, D. Habana, C. P. I. Tecnológico, P. Intevrep, U. S. Rosa, S. El, T. L. Teques, and B. De Miranda, “Productos de corrosión del acero API 5LX-52 en medio salino en presencia de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno,” *CENIC Ciencias Quim.*, vol. 46, pp. 119–125, 2015.
- [26] J. O. Bockris and A. K. N. Reddy, *Modern Electrochemistry 2B*, Second Edi. Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [27] Astm, “ASTM G1 Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluation Corrosion Test Specimens,” 2003.
- [28] L. J. C. López, E. Arce, J. Torres, J. Vázquez-Aremas, J. M. Hallen, and R. Cabrera-Sierra, “Corrosion Process of API X52 Carbon Steel Immersed in an Aqueous Solution Simulating a Clay Soil.,” *NACE Corros.*, vol. 67, no. 11, pp. 116001-1-116001–10, 2011.
- [29] T. Borch, A. K. Camper, R. Gerlach, T. Borch, A. K. Camper, J. A. Biederman, P. W. Butterfield, R. Gerlach, and J. E. Amonette, “Evaluation of Characterization Techniques for Iron Pipe Corrosion Products and Iron Oxide Thin Films,” *J. Environ. Eng.*, vol. 134, no. 10, pp. 835–844, 2008.
- [30] R. M. Cornell and U. Schertmann, *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences, And Uses*, 2nd ed. WILEY-VCH Verlag GmbH, 2003.
- [31] U. Schertmann and R. M. Cornell, *Iron Oxides in the Laboratory*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2000.
- [32] M. Barbalat, L. Lanarde, D. Caron, M. Meyer, J. Vittonato, F. Castillon, S. Fontaine, and P. Refait, “Electrochemical study of the corrosion rate of carbon steel in soil: Evolution with time and determination of residual corrosion rates under cathodic protection,” *Corros. Sci.*, vol. 55, pp. 246–253, Feb. 2012.