

INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES DEL TIPO DE RELLENO (SUELO) EN
LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CINTAS
ANÓDICAS

AUTOR

ING. VACA RODRIGUEZ JUAN SEBASTIAN

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y LA CORROSIÓN

BOGOTA

2021

INFLUENCIA DE LOS COMPONENTES DEL TIPO DE RELLENO (SUELO) EN
LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA POR CINTAS
ANÓDICAS

AUTOR

ING. VACA RODRIGUEZ JUAN SEBASTIAN

Monografía para obtener el título de especialista en gestión de la integridad y
corrosión

DIRECTOR

ING. PhD. JOSÉ ANÍBAL SERNA GIL

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE LA INTEGRIDAD Y LA CORROSIÓN

BOGOTA

2021

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del del jurado

Firma del del jurado

Bogota 17 de mayo de 2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| DEDICATORIA | 7 |
| AGRADECIMIENTOS | 8 |
| INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 10 |
| 1.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA | 10 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 10 |
| 2. JUSTIFICACIÓN | 11 |
| 3. OBJETIVOS | 12 |
| 3.1. OBJETIVO GENERAL..... | 12 |
| 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 12 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 13 |
| 4.1. CORROSIÓN | 13 |
| 4.1.1. Electroquímica. | 14 |
| 4.2. EL SUELO | 14 |
| 4.2.1. Corrosión en suelos. | 14 |
| 4.2.2. Elementos del suelo..... | 16 |
| 4.3. TIPOS DE CORROSIÓN EN LOS SUELOS | 18 |
| 4.3.1. Pila geológica por diferencias de composición | 18 |
| 4.3.2. Bio-corrosión..... | 18 |
| 4.3.3. Corrosión aerobia..... | 19 |
| 4.3.4. Corrosión galvánica. | 20 |
| 4.3.5. Corrosión por corrientes vagabundas. | 20 |
| 4.3.6. Corrosión localizada..... | 22 |
| 4.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA | 22 |
| 4.4.1. Selección del material..... | 22 |
| 4.4.2. Contenido de humedad en el suelo..... | 23 |
| 4.4.3. Textura del suelo..... | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4.4. Potencial de hidrógeno (pH) | 24 |
| 4.4.5. Temperatura. | 24 |
| 4.4.6. Contenido de oxígeno. | 24 |
| 4.4.7. Movimiento de estructura y electrolito. | 25 |
| 4.4.8. Actividad microbiológica. | 25 |
| 4.5. MEDIDAS PREVENTIVAS PARA MITIGAR LA CORROSIÓN EN SUELOS | 25 |
| 4.5.1. Modificar el ambiente del terreno. | 25 |
| 4.5.2. Cambios en el diseño estructural. | 26 |
| 4.5.3. Uso de recubrimientos. | 27 |
| 4.5.4. Protección catódica. | 27 |
| 4.5.4.1. Normas internacionales para sistemas catódicos externos | 27 |
| 4.5.4.2. Protección catódica con ánodos de sacrificio | 28 |
| 4.5.4.3. Protección catódica por corriente impresa | 29 |
| 4.5.4.4. Limitaciones de la protección catódica externa | 31 |
| 4.6. METODOLOGÍA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO | 31 |
| 4.6.1. Medición de la resistividad del suelo. | 31 |
| 4.6.1.1. Consideraciones. | 32 |
| 4.6.2. Medición del ph del suelo. | 33 |
| 4.6.2.1. Consideraciones. | 33 |
| 4.6.3. Medición de presencia de cloruros en el suelo. | 33 |
| 4.6.3.1. Procedimiento | 34 |
| | |
| 5. CONCLUSIONES | 36 |
| | |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 37 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1. Categoría de corrosividad | 15 |
| TABLA 2. Asignación de puntos según AWWA C -105 | 16 |
| TABLA 3. Relación entre las propiedades del suelo, resistividad y corrosión | 17 |
| TABLA 4. Clasificación de la resistividad del suelo | 17 |
| TABLA 5. Características de los ánodos para sistemas de protección por corriente impresa | 30 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. Celda de corrosión electroquímica | 13 |
| FIGURA 2. Corrosión galvánica..... | 20 |
| FIGURA 3. Corrosión por corriente parásita del fondo de un tanque sin protección | 21 |
| FIGURA 4. Esquema del dispositivo de Wenner para medir resistividad en suelos | 32 |

DEDICATORIA

Dedico la realización de este trabajo a mi hijo como mi motivo para salir adelante adquiriendo conocimiento; también a mis padres como agradecimiento a su apoyo incondicional que me han brindado al paso de los años, a mis abuelos como agradecimiento a sus grandes consejos brindados a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis sentimientos de agradecimiento a Dios por permitirme esta oportunidad de estudio, a todos los docentes de la especialización de gestión de la integridad y corrosión por haber compartido su sabiduría y experiencia en el ámbito laboral conmigo.

Agradezco a mi familia en especial a mis padres que siempre han confiado en mi y me han brindado su apoyo incondicional a lo largo de mi etapa educativa.

Agradezco también a mis compañeros de estudio y trabajo que me han animado a tener siempre la necesidad de superación por medio del estudio.

Agradezco a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, a su cuerpo de docentes especialistas de las diferentes áreas de la carrera cursada que me han brindado las herramientas y conocimiento para crecer como profesional cada día más.

Gracias.

INTRODUCCIÓN

Actualmente para la industria la necesidad de diseñar y construir redes de tubería enterradas y tanques de almacenamiento para fluidos se ha hecho necesario para garantizar el buen servicio, transporte y contención de este; por este caso dichas estructuras metálicas usualmente tienen que estar en contacto con el suelo o totalmente enterradas; este ambiente subterráneo en la mayoría de las ocasiones expone un ambiente agresivo que ayuda al fenómeno de la corrosión.

En la necesidad de mejora en el ámbito industrial y de construcción se ha visto la necesidad de analizar y estudiar más a fondo cual es el comportamiento de los agentes externos respecto a los activos de la empresa, entre ellos está el medio ambiente, la interacción con otros elementos cercanos y en este caso el suelo que es un ambiente muy complejo que puede impactar la vida útil de las estructuras metálicas, el costo que acarrea el sector industrial para mitigar el tema de la corrosión ya sea en elementos aéreos y subterráneos es muy elevado para mantener en funcionamiento dichos activos, esto se puede reducir si se enfoca los conocimientos a técnicas hoy en día disponibles que mitiguen dichos daños.

El suelo en el cual están dichas estructuras posee diferentes factores que pueden afectar la velocidad y los tipos de corrosión a generar ya que este es un ambiente heterogéneo que requeriría caracterizarlo en los diferentes segmentos en los que se encuentre las estructuras metálicas

Unas de las principales variables a analizar presentes en el suelo que propenden a la variación en la velocidad de corrosión son la acidez del mismo, la humedad que este presenta, la temperatura, la presencia de cloruros, la presencia de oxígeno microorganismos y las sustancias húmicas entre otros, el suelo puede realizar la función de electrolito y sumado a las variables nombradas anteriormente puede desempeñar de una mejor manera dicho papel afectando los activos que en este caso son las tuberías y tanques de almacenamiento.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Las pérdidas económicas para la mitigación de la corrosión han generado el desarrollo de nuevas investigaciones ha cerca de este fenómeno y su impacto económico en la economía de cada país.

Según la NACE en el documento *Corrosión Costs and Preventive Strategies In the United States* el tema de la corrosión en estructuras y equipos metálicos es de los principales problemas que debe afrontar la industria a una escala mundial y la cual para su mitigación se destina una gran cantidad de capital económico para la asignación de recursos, este valor para cada país oscila entre el 3% del PIB, lo cual es muy significativo. (PEREZ MOLINA. 2011)

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es la importancia de mitigar la corrosión generada en las estructuras metálicas en contacto con el suelo?

Actualmente prefabricar y construir estructuras metálicas que están en contacto con los componentes del suelo se ha vuelto una necesidad debido a la expansión de los sistemas de contención y transporte de líquidos ya sean de hidrocarburos o de algún liquido diferente.

En el aspecto económico como ya se ha nombrado la idea es propender a minimizar las pérdidas que este fenómeno conlleva; en la parte de seguridad este fenómeno puede aumentar los índices de riesgo en la planta para los activos y los operarios teniendo consecuencias catastróficas; para las industrias es importante el factor de la conservación de los activos (estructuras metálicas) debido a las condiciones del ambiente donde se encuentran, el objetivo es que las estructuras como los tanques de almacenamiento no sea inferior a los 20 años.

2. JUSTIFICACIÓN

Dadas las necesidades de la industria por mitigar el avance de la corrosión en las estructuras enterradas se hace necesario conocer las características y las propiedades de cada uno de los componentes presentes en el suelo o en los tipos de rellenos donde se encuentre el metal, además de entender que influencia tienen en el funcionamiento de los sistemas de protección catódica.

Una de las razones mas importantes por la cuales se debe enfocar los estudios a la mitigación de la corrosión es la posible perdida de fluidos peligrosos como los químicos y los combustibles que se trasportan o almacenan en las tuberías o tanques de acero al carbono; ya que esto es un factor que afecta tanto la parte económica como la parte ambiental en caso de algún posible derrame obteniendo consecuencias nocivas en el entorno y las personas.

El presente trabajo consiste en realizar una identificación de los principales componentes presentes en el suelo que propenden al aumento de la tasa de corrosión en estructuras metálicas que tienen contacto con este tipo de ambientes.

Como recurso principal se realizará un análisis bibliográfico de los principales artículos, normas y/o estatales realizados hasta el momento donde se identifiquen dichos componentes.

3. OBJETIVOS

A continuación, se presentan los objetivos de la monografía

3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis para determinar el tipo de relleno apto para el funcionamiento eficiente de la malla anódica y sistema de medición de los electrodos para un sistema de protección catódica por corriente impresa.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A continuación, se presentan los objetivos específicos los cuales ayudaran a cumplir el objetivo general

- Conocer los aspectos teóricos del funcionamiento de un sistema de protección catódica por corriente impresa y los tipos de corrosión en ambientes enterrados
- Analizar las variables requeridas en la fase de diseño de un sistema de protección catódica por corriente impresa por medio de la malla anódica y sistema de medición de los electrodos de referencia.
- Estudiar los componentes presentes en el tipo de relleno (suelo) que influyen sobre el comportamiento de la malla anódica y sistema de medición de los electrodos para un sistema de protección catódica por corriente impresa.
- Estudiar el fenómeno de corrosión en las estructuras metálicas en ambientes enterrados.

4. MARCO TEÓRICO

A continuación, se expone la parte teórica que se abordara para el desarrollo de esta monografía

4.1. CORROSIÓN

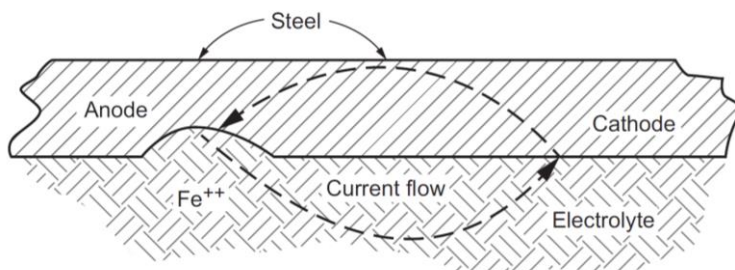
La corrosión de los metales es un fenómeno que se da de forma natural ya que si nos remitimos a la extracción de dichos materiales estos se encuentran en la tierra en forma de óxidos.

Los metales son obtenidos a partir de especies minerales que se encuentran estables en el momento de su hallazgo por tanto al ser extraídos tienden a estabilizarse química y energéticamente. La transición de estos materiales a su estado natural se llama corrosión, diferente al de los materiales no metálicos como polímeros y cerámicos que sufren un proceso de degradación.

Según el la practica recomendada API RP 651 la corrosión está definida como el deterioro de un metal como resultado de la reacción con el ambiente que lo rodea. La corrosión para la estructura metálica resulta de un proceso electroquímico y para que ocurra dicha reacción debe existir siempre los siguientes componentes

El ánodo es el metal base que se corroerá, liberando electrones y formando iones metálicos positivos y deben estar conectadas eléctricamente en contacto y un medio electrolito, El Cátodo absorbe los electrones liberados por el ánodo (en este no se produce la corrosión), el medio conductor metálico proporciona la vía por la cual se realizara el traspaso de electrones del ánodo al cátodo y el electrolito contiene aniones y cationes que serán atraídos por el ánodo y el cátodo respectivamente. Para este caso el terreno húmedo se convierte en el electrolito más común para los fondos de los tanques de almacenamiento según dicho estándar (AVILA; 2003).

Figura 1. Celda de corrosión electroquímica



Fuente API RP 651 4th edición.

4.1.1. Electroquímica. Esta es la ciencia que analiza los cambios químicos que produce una corriente y la generación eléctrica que produce algunas reacciones químicas (reacciones redox).

Hoy se conoce que todas las reacciones electroquímicas se generan por la transferencia de electrones, es decir; son reacciones oxidación-reducción (redox).

Los procesos electroquímicos requieren alguna forma para que un sistema externo introduzca corriente a un medio químico reaccionante o, en todo caso; un sistema externo que reciba los electrones producidos por la reacción. Es necesario que el medio reaccionante se encuentre en una celda. Esta celda se conectará con el exterior a través de dos electrodos separados y, por medio de ellos, se dará el ingreso de corriente o la salida de electrones. En función de si la energía eléctrica sale o ingresa del sistema, las celdas electroquímicas se clasifican en dos tipos: celdas electrolíticas y celdas galvánicas o voltaicas.

4.2. EL SUELO

El suelo es la colección de cuerpos naturales ocupando gran parte de la superficie del planeta que soporta la fauna y sus propiedades varían dependiendo de los efectos del clima y la materia viviente que actúa sobre ella y el tiempo en el que estos interactúan allí, es también conocido como un sistema físico, químico y biológico que está en constante cambio ya que aunque 2 zonas geológicas estén cerca no poseen propiedades similares; depende de factores ambientales como la lluvia, temperatura, corrientes de aire que desplazan elementos y la radiación solar efectuando alteraciones en el suelo y generando diferentes mecanismos de corrosión (LORA, F. E., 2010)

4.2.1. Corrosión en suelos. El suelo es una composición de varios elementos que están presente allí por ende es el electrolito más complejo de todos al momento de su estudio ya que dependiendo de la zona donde este se encuentre pueden variar las mediciones tomadas; entre estas variables esta la humedad presente, el contenido de sales y la materia orgánica que este presente

Para la construcción de grandes estructuras metálicas el suelo se convierte en el elemento obligatorio sobre el cual se deben apoyar o enterrar dichas estructuras de acero una de las principales razones es el factor económico ya que este es el método lógicamente mas viable para la prefabricación de líneas de tubería de grandes longitudes y tanques de almacenamiento de gran capacidad.

Todas estas estructuras metálicas sufren un proceso de corrosión y en algunos casos estos ambientes son mas agresivos que otros ya que el suelo es un elemento

heterogéneo donde se estudia por segmentos estos presentan diferentes tasas de corrección en los metales.

Tabla 1. Categoría de corrosividad

| Suma de puntos | Agresividad |
|--------------------|--------------------|
| $10 \leq S$ | Muy corrosivo |
| $8 \leq S \leq 10$ | Corrosivo |
| $5 \leq S \leq 8$ | Moderado |
| $2 \leq S \leq 5$ | Poco corrosivo |
| $0 \leq S \leq 2$ | Muy poco corrosivo |

Fuente AWWA C-105

Tabla 2. Asignación de puntos según AWWA C -105

| Parámetros del suelo | Asignación de puntos |
|--|----------------------|
| Resistividad (Ω cm) | |
| < 700 | 8 |
| 700 - 1000 | 5 |
| 1000 - 1200 | 2 |
| 1200 - 1500 | 1 |
| >2000 | 0 |
| PH | |
| 0 - 2 | 5 |
| 2 - 4 | 3 |
| 4 - 6.5 | 0 |
| 6.5 - 7.5 | 0 |
| 7.5 - 8.5 | 0 |
| > 8.5 | 3 |
| Potencial redox (mV) | |
| < 0 | 5 |
| 0 - 50 | 4 |
| 50 - 100 | 3.5 |
| >100 | 0 |

| | |
|---------------------|---|
| Humedad | |
| Siempre húmedo | 2 |
| Generalmente húmedo | 1 |
| Generalmente seco | 0 |

Fuente AWWA C -105

4.2.2. Elementos del suelo. Generalmente los suelos presentan los siguientes elementos Arena, arcilla, cal y humus, estos elementos están presentes en diferentes proporciones dependiendo de la zona que darán lugar a los diferentes niveles de ambientes corrosivos.

Por lo general, los suelos arenosos, margo-arenosos, margo-calcáreos y calcáreos no son muy agresivos; los suelos arcillosos en algunas condiciones son agresivos. Los que son agresivos de por sí son las turbas, los humus libres de cal y también los suelos cenagosos y de aluvión.

Los suelos artificiales, esto es los formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción y residuos humanos e industriales también son agresivos.

uno de los aspectos principales a tener en cuenta para calificar un tipo de suelo se da en función de la resistividad que presente y a su vez esta depende de características como la estructura de las partículas del relleno, la porosidad y la permeabilidad del elemento; esta última es una variable crítica ya que dependiendo de las estaciones climáticas que presente la zona pueda variar las características del terreno y de un momento a otro elevar el contenido de humedad favoreciendo las características para ser un electrolito ideal y elevar la velocidad de corrosión afectando la estructura metálica.

Así como en los fluidos la acidez que presentan los suelos o rellenos pueden motivar a una rápida corrosión si la estructura se encuentra descubierta y sin recubrimiento, aunque generalmente los suelos se encuentran con una acidez entre 5 y 8, cuando este es el caso ya podemos deducir que la corrosión puede estar inducida por otros factores diferentes a la acidez del terreno. (TORRES. 2016)

Tabla 3. Relación entre las propiedades del suelo, resistividad y corrosión

| Variable (Aumento de) | La resistividad: | La corrosión: |
|-----------------------|------------------|---------------|
| Porosidad | Aumenta | Baja |
| Salinidad | Baja | Aumenta |
| Humedad | Baja | Aumenta |
| Temperatura | Baja | Aumenta |

Fuente. *TORRES JIMÉNEZ; ZAPATA MASÍAS, protección catódica con corriente impresa de un acero ASTM A-36, enterrado en suelo franco arenoso húmedo. 2016*

En este caso donde el electrolito es el suelo siempre presenta diferencias en la concentración del aire disuelto (se presentarán algunas partes más concentradas que en otras) por lo tanto estas zonas donde se presenta esa mayor acumulación siempre existen un potencial mayor para la generación de corrosión.

Para el caso de la corrosión galvánica no siempre tiene que ser elementos de diferente calidad (grado de material) ya que siendo elementos nuevos cercanos a elementos estructurales metálicos viejos también pueden inducir dicho tipo de corrosión.

Para determinar en todos estos casos de posible corrosión se debe examinar principalmente una variable fundamental en el suelo que es su resistividad.

Tabla 4. Clasificación de la resistividad del suelo

| Rango de resistividad OHM-CM | Potencial de corrosividad del suelo |
|------------------------------|-------------------------------------|
| < 500 | Muy corrosivo |
| 500 - 1.000 | corrosivo |
| 1.000 - 2.000 | moderadamente corrosivo |
| 2.000 - 10.000 | levemente corrosivo |
| > 10.000 | poco corrosivo |

Fuente *API RP 651 4th edición*

La unidad de resistividad del suelo es el ohm/metro ($\Omega.m$). En la práctica de la ingeniería de la corrosión se requiere medir la resistividad de grandes extensiones y a menudo una cierta profundidad. Para ello según el API 651 utilizamos un método común descrito en el ASTM G57. Cabe señalar que la resistividad del suelo por sí sola no debe usarse para determinar la corrosividad del suelo.

Cuando los ánodos están en contacto con el suelo, se recubren con una capa muy resistente, esta capa ocasiona un aumento sensible de la resistencia de los ánodos con tendencia a pasivarlos, hasta el punto de hacerlos inoperables y para remediar la influencia de estos factores se coloca a su alrededor un medio químico artificial, llamado activador, mejor conocido en la terminología de la ingeniería como "backfill".

La medición del potencial de una estructura enterrada se mide con la ayuda de un electrodo de referencia de Cu/CuSO₄ saturado y un voltímetro de alta impedancia de entrada. El valor del potencial medido depende de la posición en que se sitúa el electrodo de referencia con respecto a la estructura. En la práctica de este tipo de determinaciones sólo es posible en estructuras no revestidas, en cuanto que la corriente en éstas es lo suficientemente elevada como para dar lugar a caídas óhmicas importantes en el terreno y debido a esto, medir diferencias de potencial apreciables cuando se traslada el electrodo de referencia de un punto a otro. (SUQUE; 2008).

4.3. TIPOS DE CORROSIÓN EN LOS SUELOS

4.3.1. Pila geológica por diferencias de composición Generalmente se da en tuberías enterradas cuando un segmento de esta pasa de un segmento a otro de distinta composición; el ataque de corrosión se da donde el tubo pasa de manera cercana a bolsas de alto contenido de sales y humedad lo cual genera las corrientes de corrosión.

4.3.2. Bio-corrosión. Esta se genera a partir de la corrosión bacteriana y los microorganismos presentes en el suelo y la corrosión biológica

Los microorganismos pueden generar productos metabólicos de posible actividad corrosiva, afectando el medio circundante a la interfase metal/solución, este efecto se magnifica por la acción sinérgica de la asociación de microorganismos presentes en el medio (consorcios microbianos). El metabolismo y velocidad de crecimiento de éstos pueden explicar por qué ciertas interfaces metal/solución pueden incrementar significativamente las velocidades de corrosión que experimentan.

Los procesos metabólicos de los microorganismos son sustentados por reacciones químicas para la generación de energía, a través de la asimilación de nutrientes que se encuentran en el medio circundante (MEDINA; 2009)

Destrucción de películas protectoras de las superficies metálicas.

Generación de ambientes ácidos localizados.

Creación de depósitos corrosivos.

Alteración de reacciones anódicas y catódicas.

Interferencia en mecanismos de protección contra la corrosión.

Microorganismos relacionados comúnmente a la corrosión microbiológica

4.3.3. Corrosión aerobia. Este tipo de corrosión consiste en la eliminación de hidrogeno de los sustratos orgánicos. Al igual que las bacterias que son anaerobias las bacterias aerobias pueden ser la causa de corrosiones muy agresivas.

Estas ocasionan formaciones de ácidos sulfúrico y precipitados sobre el material que quedan adheridos y forman procesos de aireación diferencial sobre la superficie y esto a su vez generando corrosión localizada, las bacterias presentes. Las bacterias que generan mayor presencia en este tipo de corrosión son Ferruginosas y los Thiobacilus.

Las bacterias ferruginosas se presentan en una gran proporción en la naturaleza, principalmente en aguas que contienen sales ferrosas disueltas, son aerobias y su metabolismo se asegura si existe la presencia de pequeñas cantidades de oxígeno, la energía que estas requieren la encuentran presente en las reacciones de oxidación del hierro; este consumo de oxígeno da lugar a ambientes anaerobios que luego da lugar a la proliferación de bacterias sulfato reductoras.

Las bacterias Thiobacilus también son anaerobias y autótrofas, los ambientes que estas mismas crean para su multiplicación se caracterizan por una reacción bastante acida, el PH óptimo para el crecimiento y desarrollo de esta ronda entre 3 y 4, pero también se proliferan en ambientes de 0.2 a 0.6.

Estas bacterias nombradas anteriormente son un gran agente en el suelo que puede ejercer la creación de PH muy bajos y la formación de H₂SO₄ ocasionando fuertes corrosiones a cualquier estructura metálica que se encuentre en contacto con el terreno (VALENZUELA; 2016).

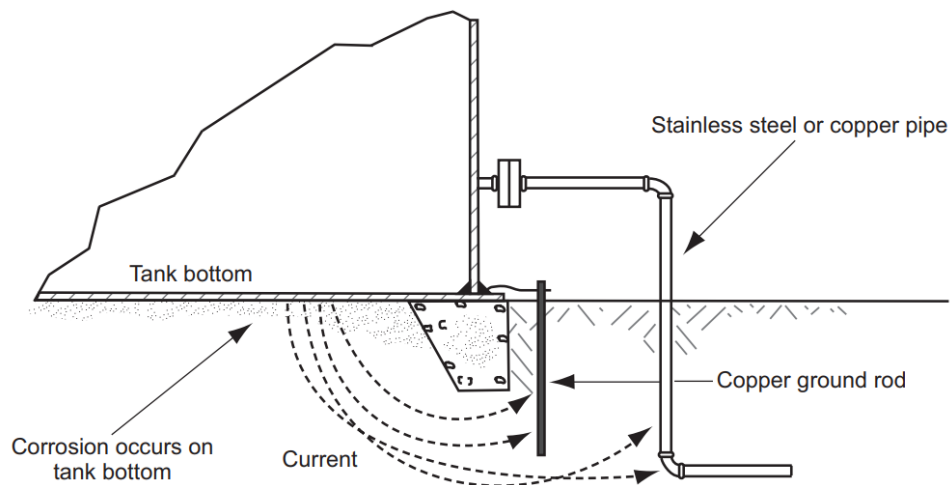
4.3.4. Corrosión galvánica. Este tipo de corrosión tiene lugar cuando dos metales de diferente naturaleza están en unión ya sea física o eléctricamente los cuales en presencia de un electrolito se forma una celda electroquímica donde el metal de menor potencial electroquímico es el que se va a corroer.

La corriente fluirá desde el metal más activo (ánodo) al metal menos activo (cátodo) con un ataque acelerado en el metal anódico. La extensión de tal problema depende de varios factores. Los factores más importantes son:

- a) las áreas de superficie relativas del cátodo y el ánodo;
- b) la diferencia de potencial relativa entre los dos materiales determinada por su posición en la serie galvánica; y
- c) temperatura.

La corrosión tiende a ser más severa cuando el área anódica es pequeña con respecto al área superficial del cátodo y los dos metales están muy separados en la serie galvánica.

Figura 2. Corrosión galvánica.

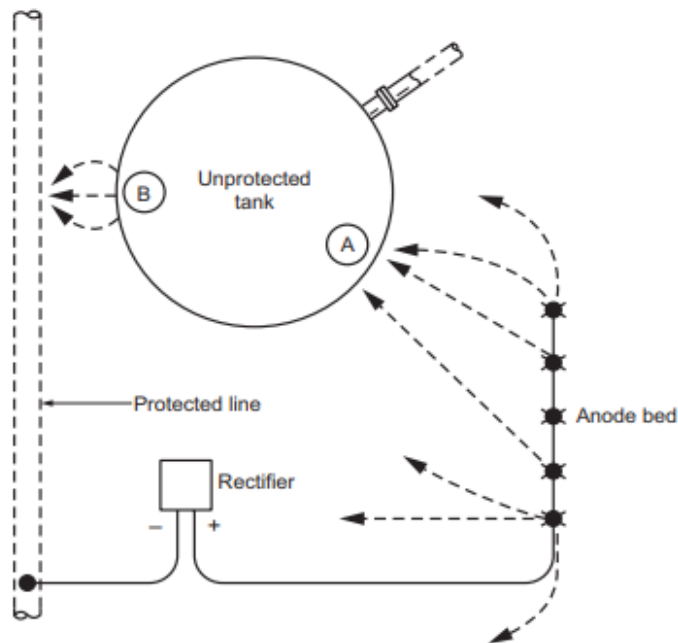


Fuente *API RP 651 4th edición.*

4.3.5. Corrosión por corrientes vagabundas. Las corrientes vagabundas se generan a partir de puestas a tierras de equipos de alta o baja tensión, grandes equipos, líneas eléctricas de ferrocarril próximas entre otras, el flujo de electrones es impulsado por la diferencia de potencial que circula en este caso por la estructura

metálica atravesándola debido a su alta conductividad, esto produce que la parte de la estructura por donde ingresa la corriente se comportara como una zona catódica y la parte por donde sale la corriente de la estructura será la zona anódica , si en el caso de tubería esta presenta algún tipo de recubrimiento y una zona donde este presente defectos en ese lugar se generara una corrosión localizada; para la corriente alterna debido a que esta tiene alrededor de 100 ciclos por segundo no presenta problemas significativos, pero para la corriente continua es la mas critica ya que el efecto corrosivo que puede llegar a generar esta entre 40 y 50% de agresividad.

Figura 3. Corrosión por corriente parásita del fondo de un tanque sin protección



Fuente *API RP 651 4th edición*.

La gravedad de la corrosión (pérdida de metal) resultante de las corrientes de interferencia depende de varios factores:

- a) separación y encaminamiento de las estructuras interferentes y afectadas y ubicación de la fuente de corriente interferente;
- b) magnitud y densidad de la corriente;
- c) calidad o ausencia de un recubrimiento en las estructuras afectadas;

- d) la presencia y ubicación de juntas mecánicas de alta resistencia eléctrica;
- e) temperatura.

4.3.6. Corrosión localizada. La corrosión localizada al contrario de la corrosión uniforme representa una mayor amenaza debido a que visualmente es difícil de detectar ya que como su nombre lo indica es en zonas puntuales sin afectar un área grande, pero si concentrando el efecto en una menor área con una mayor velocidad de corrosión, en estos lugares puede existir acumulación de elementos que puede ser oxidantes y un incremento de la acidez del medio, lo que propicia el deterioro de la capa pasivada, permitiendo que la corrosión se desarrolle en éstas zonas puntuales (SALAZAR; 2015).

4.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Antes de comenzar el diseño del sistema de protección catódica, deben considerarse todos los parámetros que influirán sobre el diseño.

4.4.1. Selección del material. Existen dos grandes grupos para clasificar la resistencia frente a la corrosión de los distintos materiales y aleaciones. Los que presentan una gran resistencia frente a la corrosión se les conoce como metales nobles, el oro y el platino son los elementos más representativos de este grupo. El segundo gran grupo, abarca a los materiales que presentan una baja resistencia frente a la corrosión, es decir; los metales activos. El sodio y el magnesio se pueden considerar como ejemplo de elementos de este grupo. Se debe tener en cuenta que la resistencia del metal tiene una fuerte relación con el ambiente al que éste es expuesto. La relación entre la velocidad de corrosión, corrosividad del ambiente y la resistencia a la corrosión del material permite esclarecer de mejor manera la idea anteriormente presentada. La relación es la siguiente:

$$Velocidad\ de\ ataque\ corrosivo = \frac{Corrosividad\ del\ medio}{Resistencia\ a\ la\ corrosión\ del\ material}$$

La relación explica que, si la corrosividad de un determinado ambiente es relativamente mayor que la resistencia a la corrosión que presenta un material; la razón del ataque corrosivo que este material sufrirá por parte del ambiente corrosivo será elevada. En cambio; si el material presenta una elevada resistencia a la

corrosión frente a la corrosividad del ambiente, la razón del ataque corrosivo será casi insignificante.

Considerar la resistencia a la corrosión junto a las propiedades mecánicas, es importante en la etapa de selección de un material para desarrollar un trabajo específico. Es común solucionar problemas de corrosión en ambientes altamente agresivos, únicamente con el remplazo del material que ha sido corroído; por un material que presenta una mayor resistencia a la corrosión. (LIZANO; 2017).

4.4.2. Contenido de humedad en el suelo En ausencia de humedad, no pueden producirse las reacciones usuales en corrosión y protección catódica. A medida que el contenido de humedad aumenta (alrededor del 15%), la resistividad del suelo disminuye, favoreciendo a la protección catódica.

La cantidad de humedad depende de la porosidad del terreno como del clima que lo rodea. En suelos muy húmedos se forma una fina película de agua y es sobre esta zona donde tendrá lugar la difusión del oxígeno procedente de la atmosfera.

En terrenos muy húmedos la reacción anódica se despolariza, pero la catódica se dificulta debido a que el oxígeno debe disolverse en agua para penetrar y llegar al metal, como en los suelos no existe convección forzada, el proceso está bajo control catódico

Cuando el suelo es muy seco y no hay presencia de película húmeda conductora, la corrosión tiende a ser nula o mínima debido al control anódico (alta resistencia).

Los terrenos agresivos son, por lo tanto, aquellos que presentan niveles intermedios de humedad

En términos generales los terrenos húmedos y conductores son los mas desfavorables para la integridad del tanque mientras que los terrenos secos presentan mayor resistividad.

La humedad del terreno esta relacionada con la disponibilidad de los iones ya que estos tienen la facilidad de difundir y disminuir la resistividad del suelo; para ello se puede clasificar las aguas en 3 tipos

Agua gravitacional: proveniente de las lluvias o nevadas

Agua capilar: es la retenida dentro de los capilares o porosidades del suelo

Agua subterránea: resultado de la acumulación del agua capilar en el tiempo

Para los temas de corrosión la humedad mayor al 20% ya se considera potencialmente agresiva generando una posible corrosión uniforme, para humedades menores al 20% propenden a generar corrosión por picaduras como resultado de la aireación diferencial generando gradientes de oxígeno y la formación de pilas en el suelo.

4.4.3. Textura del suelo. Determina la facilidad que líquidos y gases pueden penetrar en el suelo. El oxígeno puede penetrar estos suelos con facilidad, actuando como despolarizante y aumentando el requerimiento de corriente. Es por ello por lo que las zonas deficientes en oxígeno disuelto se vuelven ánodos con respecto a las zonas más aireadas.

La arena limpia es el material más común utilizado como almohadilla debajo de los fondos de los tanques de almacenamiento sobre el suelo. El uso de arena limpia por sí sola normalmente no elimina la necesidad de protección catódica ya que la corrosión puede ocurrir debido a la intrusión de agua de lluvia, nieve o una capa freática poco profunda.

4.4.4. Potencial de hidrógeno (pH) Generalmente, la corriente requerida para la protección catódica es mayor en medios ácidos, en comparación con la corriente requerida en medios básicos o neutros; en ambientes costeros las lluvias pueden arrastrar consigo cloruros; una vez estas gotas entran en contacto con la cimentación y el relleno del tanque este se contamina y genera que el terreno se vuelve más ácido y acelera la corrosión del fondo del tanque o la tubería según sea el caso (PANCORBO, 2010).

4.4.5. Temperatura. La velocidad de corrosión tiende a aumentar con la temperatura. Una mayor temperatura reduce la polarización, aumentando también el requerimiento de corriente.

4.4.6. Contenido de oxígeno. A medida que aumenta la concentración de oxígeno, la polarización tiende a disminuir. Por lo tanto, en medios más oxigenados, el requerimiento de corriente será mayor y el sistema de protección catódica reduce su eficacia; esta es una de las razones de usar rellenos finos para evitar la presencia de oxígeno.

Según el API 651 los tanques de almacenamiento de hidrocarburos es recomendable construirse sobre una berma elevada para permitir un drenaje

adecuado lejos del fondo del tanque. Para el relleno dentro del anillo de cimentación es recomendable el uso de partículas finas que proporcionará una almohadilla más densa para ayudar a reducir la entrada y salida de oxígeno del perímetro del tanque a medida que se vacía y se llena. Si se utilizan partículas de gran tamaño, puede producirse corrosión por aireación diferencial en los puntos donde las partículas grandes o los desechos entran en contacto con el fondo del tanque de acero. En este caso, la corriente de protección catódica estará apantallada y es posible que no sea eficaz para eliminar la corrosión.

4.4.7. Movimiento de estructura y electrolito. El movimiento relativo entre una estructura y el electrolito influye en el requerimiento de corriente. A medida que aumenta la velocidad relativa, también aumenta el requerimiento de corriente, debido a la menor polarización.

4.4.8. Actividad microbiológica. Las bacterias, en especial la bacteria reductora de sulfatos, las cuales se identifican como las responsables de los casos de corrosión más severos, este tipo de corrosión se da principalmente en ambientes anaerobios húmedos y terrenos denominados como tierras negras tienen un efecto despolarizante sobre las estructuras protegidas, estas bacterias convierten el sulfato presente en sulfuros y ácido sulfhídricos causando la precipitación de los sulfuros de hierro negro. Existen otros microorganismos o efectos biológicos que pueden atacar las estructuras como: Organismos productores de cieno que pueden depositar residuos y generar la formación de celdas por aireación diferencial.

Hongos que pueden atacar recubrimientos orgánicos; Raíces enterradas que crecen lo suficiente como para causar daños físicos a recubrimientos o estructuras. (ESPINOZA; 2014).

4.5. MEDIDAS PREVENTIVAS PARA MITIGAR LA CORROSIÓN EN SUELOS

Estas acciones están direccionadas a prevenir o mitigar el efecto de la corrosión en las estructuras metálicas que están contacto con el suelo

4.5.1. Modificar el ambiente del terreno. El entorno donde se encuentra situada la estructura ya sea un tanque o una tubería enterrada se puede controlar hasta cierto punto ya sea que en la fase de montaje se sustituye parte del terreno donde

se va a instalar la estructura por uno que presente mejores propiedades como una resistividad elevada para mitigar el avance de la corrosión.

Otro factor es la realización de obras civiles que mitiguen la presencia de humedad en el suelo como la implementación de geomembranas que separa el terreno que esta en contacto con la estructura dejando aislado el terreno que esta en contacto con el agua, también el uso de drenajes para canalizar las aguas y evitar los altos niveles de humedad.

A continuación, se describen algunas recomendaciones de este tipo de suelos a usar en fondos de tanques.

a) La arena debe estar limpia, tamizada y libre de escombros (es decir, sin madera, palos, vegetación, papel, rocas; arcilla, limo u otro suelo; varillas de soldar u otros objetos metálicos o no metálicos; etc.).

b) La limpieza debe realizarse en la fuente de suministro y se realiza mediante un lavado mecánico con agua que no altere la composición química o la resistencia eléctrica del material de arena.

4.5.2. Cambios en el diseño estructural. Aplicar principios correctos en el diseño, puede eliminar una gran cantidad de problemas relacionados a la corrosión y a la vez; reducir tiempos y costos asociados a la reparación y mantenimiento por corrosión. La corrosión generalmente ocurre en “puntos calientes” o en grietas, en donde el medio corrosivo presenta mayor agresividad. Por tal motivo, se debe evitar producir este tipo de condiciones en el material durante su proceso de manufactura, y también; no exponer al material a condiciones críticas en su operación. Por ejemplo, cuando existe la posibilidad de que se genere agrietamiento por corrosión bajo tensión, los mecanismos deben operar por debajo del umbral de esfuerzo que genera el agrietamiento, para así; evitar este tipo de problemas. También, para los ítems que son críticos en la operación de un sistema (como las bombas) es necesario instalar un equipo redundante que pueda ser utilizado cuando el equipo principal se encuentre en mantenimiento.

Cuando se encuentra en la fase de diseño es una buena opción el considerar el cambio de calidades en los materiales que presenten mejor resistencia a la corrosión siempre y cuando se realice un estudio previo donde se demuestre que es económicamente viable dicha sustitución y presente beneficios para la industria, también se debe tener en cuenta que si se cambia la calidad de material por sectores se debe aislar eléctricamente para evitar la presencia de corrosión galvánica.

4.5.3. Uso de recubrimientos. Es muy habitual el uso de sistemas de recubrimientos para proteger las estructuras para evitar el contacto con los componentes corrosivos del suelo; cuando los ambientes son de baja agresividad son suficientes las aplicaciones de pinturas bituminosas y en otros casos cuando los ambientes son más agresivos se recurre al uso de cintas protectoras o recubrimientos plásticos.

Los recubrimientos a la tubería son un método muy común para la protección de líneas enterradas siguiendo las especificaciones de la aplicación del producto para garantizar los tiempos de vida útil del recubrimiento y aumentar el de la tubería en su caso. Generalmente junto a este sistema siempre se acompañará de la implementación de un sistema de protección catódica para proteger de una manera mas integral el acero de la estructura contra la corrosión generada por el suelo del entorno.

4.5.4. Protección catódica. La protección catódica suprime la corriente de corrosión que causa daño en las celdas de corrosión que se originan en el material y fuerza, a esa misma corriente, a que fluya hacia el exterior del material a proteger. Así se previene la corrosión o disolución del material.

La protección catódica se puede llevar a cabo por dos métodos: por corriente impresa y por ánodos de sacrificio. El sistema de corriente impresa utiliza una fuente de potencia para forzar a la corriente que fluya desde la estructura a proteger hacia unos ánodos inertes. El sistema de ánodos de sacrificio usa metales activos (como el zinc y el magnesio) que se conectan al material a proteger, para así; generar una corriente de protección. (LIZANO; 2017).

4.5.4.1. Normas internacionales para sistemas catódicos externos. La corrosión en tanques metálicos de almacenamiento enterrados continúa siendo un problema crítico. Es por ello, que se ha regulado a nivel internacional métodos de protección basados en normas para la aplicación de los sistemas de protección catódica.

API (Instituto Americano de Petróleos)

- API RP 651 - Protección catódica de tanques de almacenamiento de petróleo sobre el suelo
- API RP1632 - protección catódica de tanques de almacenamiento enterrados de petróleo y sistema de tuberías.

NACE (Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión)

- NACE RP0285 Control de corrosión en sistemas de tanques de almacenamiento enterrados mediante protección catódica.
- NACE RP 0169-02 Control de corrosión externa en sistemas de tuberías metálicas enterradas o sumergidas.

4.5.4.2. Protección catódica con ánodos de sacrificio Esta clase de protección catódica se logra a partir de conectar el metal a proteger a uno menos noble que éste (más negativo en la serie electroquímica) lo que se hace es crear una pila galvánica donde el metal que se protege se comportara como cátodo (polo positivo) y el metal que se utiliza para proteger actúa como ánodo (polo negativo). El ánodo se disuelve como resultado de la oxidación que ocurre en el sistema de electroquímico, es por eso por lo que a este tipo de protección se le conoce como protección catódica con ánodos de sacrificio. (NACE RP 0169-02).

Los metales pueden ser considerados como ánodos de sacrificio cuando tengan las siguientes características:

- Ser menos noble que el material a proteger.
- Potencial de disolución entre -0.95 V y -1.7 V.
- Debe tener una tendencia elevada a la polarización, sin que forme una película pasivante que lo proteja a la disolución. Su sobrepotencial para la formación de hidrogeno debe ser elevado.
- Capacidad elevada de drenaje de corriente.
- Proceso de disolución uniforme.

Basándose en estas características los materiales ideales para utilizar como ánodos de sacrificio serían: magnesio, zinc, aluminio y, sus respectivas aleaciones. A continuación, se presentan las principales ventajas y limitaciones de los sistemas de protección catódica con ánodos de sacrificio:

Ventajas:

- Fácil instalación del sistema
- No requiere una fuente de corriente continua
- No genera problemas de interferencias
- Bajo costo de mantenimiento
- Permite mayor uniformidad de corriente
- Se puede modificar la cantidad de ánodos de sacrificio

Desventajas:

- No es un sistema eficiente en suelos con elevada resistividad.
- Inicialmente el costo es alto en instalación
- Deficiente cuando las estructuras están mal revestidas
- En ambientes con alto contenido de cloruros los ánodos a utilizar son elevados.

4.5.4.3. Protección catódica por corriente impresa Esta clase de protección necesita una fuente de corriente continua; El material para proteger se conecta al polo negativo de la fuente por lo que se le fuerza a ser el cátodo de la celda electrolítica, al polo positivo de la fuente se conecta otro metal que se convertirá en el ánodo.

Este metal designado como ánodo debe ser lo suficientemente resistente a la corrosión para que no se disuelva al corto plazo y así, la celda electrolítica (electrolito, fuente, ánodo y cátodo) tenga un tiempo de vida prolongado asegurando un tiempo considerable de vida útil de la estructura metálica. Esta clase de protección es la más utilizada en los sistemas de oleoductos, ya que permite cubrir mayores distancias de tubería que se protege (PEREZ; 2011).

Cabe resaltar que lo recomendable es siempre complementar estos sistemas de protección catódica junto con otro tipo de sistema para proteger una estructura de elevadas dimensiones como el recubrimiento a través de pinturas, recubrimiento electrolítico entre otros.

Los materiales que se seleccionen como ánodos auxiliares en sistemas de protección catódica por corriente impresa, deben poseer las siguientes características:

- Consumo bajo.
- Capacidad de drenar corriente elevada.
- Baja resistividad.
- Buena resistencia mecánica.
- Potencial de ruptura elevado.

También para esta clase de protección se resaltan las principales ventajas y limitaciones del sistema de protección catódica por corriente impresa:

Ventajas:

- Permite el diseño en un rango amplio de potencial y corriente
- Una zona anódica puede drenar una gran cantidad de corriente
- Permite proteger grandes áreas con un solo sistema
- Presenta buena funcionalidad en ambientes con una elevada resistividad
- Proteger estructuras metálicas de manera efectiva aun cuando están mal revestidas.

Desventajas:

- El sistema de corriente impresa puede generar problemas de interferencia con otras estructuras
- Está condicionado al suministro de la fuente de energía
- Se requiere de una inspección y mantenimiento frecuente
- Costo elevado de instalación

- Las sobreprotecciones pueden generar daños en los recubrimientos e integridad de la estructura metálica.

Los materiales más usados y que cumplen con estas características son los que se enuncian en la siguiente tabla:

Tabla 5. Características de los ánodos para sistemas de protección por corriente impresa

| Material | Peso específico g/cm ³ | Consumo Kg/A. Año | Densidad de corriente A/m ² | | Medio de utilización |
|---|--------------------------------------|----------------------|---|----------|---|
| | | | Máxima | Práctica | |
| Acero | 7.8 | ~9 | 5 | 1 | Todos |
| Grafito | 1.6 | 0.1-1 | 10-100 | 2.5-40 | Terreno, agua de mar, se excluye el fondo marino y el agua dulce |
| Ferro-silicio: 0.95%C, 16%Si, 0.75%Mn | ~7 | 0.25-1 | 30-40 | | Agua dulce, terreno |
| Ferro-silicio: 0.95%C, 14.5%Si, 0.75%Mn, 4.5%Cr | 7 | 0.25-1 | 270 | 10-100 | Terreno, agua de mar, fondo marino |
| Pb-Ag (2% Ag) | 11.3 | ~0.2 | 300 | 30-65 | Solo agua de mar, excluido del fondo marino |
| Pb-Ag-Sb (2% Ag, 6%Sb) | 11 | ~0.5 | 300 | 50-200 | |
| Titanio platinado | 4.5 | | 400 por cada micra de platino de espesor | 500-1000 | Terreno no salino con backfill, agua de mar, excluido del fondo marino y agua dulce |
| Niobio platinado | 8.4 | 8*10 ⁻⁶ | | 500-700 | |
| Tántalo platinado | 16.6 | | | 500-1100 | |
| Titanio-óxido de titanio y rutenio (MMO) | 4.5 | 5*10 ⁻⁷ | 1100 | 700-1100 | Todos |

Fuente: 14. LIZANO BORRERO, *Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa*. 2017.

4.5.4.4. Limitaciones de la protección catódica externa Según la practica recomendada API RP 651 La protección catódica es un medio eficaz de control de la corrosión solo si es posible pasar corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo (fondo del tanque). Muchos factores pueden reducir o eliminar el flujo de corriente eléctrica y, por lo tanto, pueden limitar la efectividad de la protección catódica en algunos casos o impedir su uso en otros. Tales factores incluyen:

- a) plataformas de tanques como hormigón;
- b) un revestimiento externo no conductor entre el fondo del tanque y los ánodos (a menos que los ánodos estén instalados entre el revestimiento y el fondo del tanque);
- c) suelo de alta resistividad o almohadillas de agregados de rocas gruesas / grandes;
- d) Los fondos viejos de los tanques de almacenamiento sobre el suelo se dejan en su lugar cuando se instala un fondo nuevo (API RP1632)

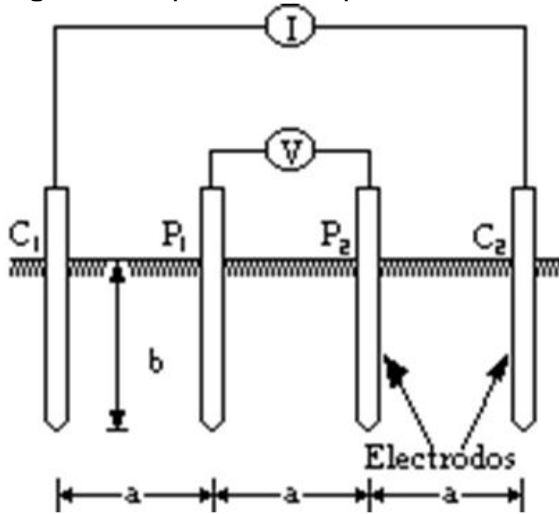
4.6. METODOLOGÍA PARA DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS DEL RELLENO

4.6.1. Medición de la resistividad del suelo. Según el estándar ASTM G57 para determinar el valor de la resistividad del suelo se realizará por el método de los 4 electrodos de Wenner en la caja Miller.

Para realizar dicha medición los electrodos se deben instalar en línea recta a una profundidad que no exceda el 5% de la separación mínima entre los mismos electrodos; la separación de los suelos deberá tenerse en cuenta previo un estudio de suelos realizado.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre los dos electrodos de los extremos C1 y C2, mientras que medimos el potencial que aparece entre los dos electrodos centrales P1 y P2. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

Figura 4. Esquema del dispositivo de Wenner para medir resistividad en suelos



Fuente 4. LORA, F. E. *Corrosión en 2010*.

Teniendo en cuenta que la medición se realiza en la caja se tomara la siguiente ecuación para determinar la resistividad

$$\rho, \Omega * cm = R \frac{A}{a}$$

Donde:

R: resistencia en ohmios a partir del instrumento.

A: área de la sección transversal de la caja perpendicular al flujo de la corriente y sus dimensiones dadas en cm²

a: espacio interior entre los electrodos y su dimensión dada en cm

4.6.1.1. Consideraciones.

se requiere el uso de un galvanómetro preferiblemente adecuado con 4 electrodos;

se requiere la fuente de corriente preferiblemente de 97 Hz en corriente alterna ya que la corriente directa generaría una polarización del sistema y arrojaría datos erróneos;

se requiere que los electrodos sean en acero inoxidable martensítico de 3/16 a ¼ in de diámetro y de 1 a 2 ft de largos

para el cableado preferiblemente alambre de cobre trenzado aislado de calibre 18 a 22 con terminales de buena calidad para asegurar buena conductividad

4.6.2. Medición del ph del suelo. Según el estándar ASTM G51 establece 2 métodos para la prueba de acidez para temas de corrosión Esta medida determina el grado de acidez o alcalinidad en los materiales del suelo suspendidos en agua y una solución de cloruro de calcio 0.01 M.

4.6.2.1. Consideraciones.

Una vez tomada la muestra de relleno o tierra se debe dejar secar por lo menos durante 48 horas para el siguiente paso.

Para el propósito de este método de prueba, el suelo de prueba debe ser tamizado a través de un tamiz No. 10 (aberturas de malla de tamiz de 2 mm). Las mediciones en suelos o fracciones de suelo con tamaños de partículas superiores a 2 mm por este método de prueba pueden no ser válidas (tomar una muestra de 20 gramos).

Toda el agua utilizada para este método de prueba debe ser ASTM Tipo III o mejor. El agua de Tipo III se define en la Especificación D 1193. Se prepara mediante destilación, intercambio iónico, ósmosis inversa o una combinación de estos (añadir a la muestra 50 ml del agua).

Se debe agitar la mezcla, mínimo durante 2 minutos y se deja reposar 15 min antes de proceder a realizar la prueba de acides

Se realizará por medio del método A según el estándar; para lo cual se requerirá un medidor de pH: potenciómetro equipado con un sistema de electrodo de vidrio-calomelanos. Siga las instrucciones del fabricante para el medidor de pH utilizado. También es aceptable un sistema de electrodos de plata / cloruro de plata o similar.

4.6.3. Medición de presencia de cloruros en el suelo. Según el estándar ASTM D512 Los métodos de prueba cubren la determinación de iones de cloruro en agua, aguas residuales (solo método de prueba C) y salmueras. Se incluyen los siguientes tres métodos de prueba:

Método de prueba A (valoración mercurimétrica)

Método de prueba B (valoración de nitrato de plata)

Método de prueba C (método de electrodo selectivo de iones)

4.6.3.1. Procedimiento

Vierta 50 ml, o menos, de la muestra, que contenga no más de 20 ni menos de 0.25 mg de ion cloruro, en un recipiente de porcelana blanca. Si hay iones de sulfito, agregue 0.5 ml de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) a la muestra, mezcle y deje reposar por 1 min.

Diluir hasta aproximadamente 50 ml con agua, si es necesario. Ajuste el pH al punto final de fenolftaleína (pH 8,3), usando H₂SO₄ (1 + 19) o solución de NaOH (10 g / L).

Agregue aproximadamente 1.0 ml de solución indicadora de K₂CrO₄ y mezcle. Agregue la solución estándar de AgNO₃ gota a gota desde una bureta de 25 ml hasta que el color rojo ladrillo (o rosa) persista en toda la muestra cuando se ilumina con una luz amarilla o se ve con gafas amarillas.

Repita el procedimiento descrito antes, utilizando exactamente la mitad de la muestra original, diluida a 50 ml con agua.

Si el volumen de titulante utilizado en este último paso es la mitad del utilizado en la titulación de la alícuota en el primer paso, proceda a la sección de cálculo. En caso contrario, existen interferencias importantes y se debe realizar una compensación; alternativamente, se debe utilizar otro método.

Calcule la concentración de iones de cloruro en la muestra original, en miligramos por litro, de la siguiente manera:

$$\text{Cloruro, } \frac{\text{mg}}{\text{l}} = \frac{[(V1 - V2) * N * 70906]}{S}$$

Donde:

V1= solución estándar AgNO₃ añadida en la titulación de la muestra original, S, preparada en 19.1, ml.

V2= solución estándar, AgNO₃ agregado titulado la mitad del volumen de la muestra original, preparada en 19.3, ml.

N = normalidad de la solución estándar de AgNO₃.

S = muestra original en la muestra de prueba de 50 ml preparada en 19.1, ml.

70906 = 35,453 g / mol de cloruro * 2 * 1000 mg / g, donde el factor 2 representa la mitad del volumen de la muestra (19,3).

Precisión: la precisión de este método de prueba puede ser expresado de la siguiente manera:

$$ST = 0.013X + 0.70$$

$$SO = 0.007X + 0.53$$

Donde:

ST = precisión general, mg / L,

SO = precisión de un solo operador, mg / L y

X = concentración de ion cloruro determinada.

5. CONCLUSIONES

La presencia de un alto porcentaje de contenido de cloruros en el suelo o relleno a utilizar en contacto con la estructura metálica demuestra una acción corrosiva promoviendo la corrosión localizada

En zonas donde se presentan varios estratos de suelos se pueden originar corrientes de corrosión afectando segmentos de la tubería este fenómeno llamado corrosión por pila geológica, lo ideal es realizar una cama con un tipo de relleno unificado que nos permita tener las mismas características a lo largo de toda la tubería y evitar este tipo de corrosión.

Los PH ácidos y con alto contenido de humedad propician un ambiente ideal para la presencia de microorganismos y bacterias que promueven de manera aerobia y anaerobia corrosiones localizadas en las estructuras en contacto con el suelo; aunque se realicen estudios con anterioridad para determinar su presencia estas pueden aparecer posterior a dichos análisis desde que el ambiente se propicie.

El titanio es un material que presenta una elevada resistencia a la corrosión cuando se utiliza como material para ánodos auxiliares en sistemas de protección catódica por corriente impresa. El titanio tiene un mejor comportamiento que otros materiales típicos utilizados para realizar este trabajo

Factores como la resistividad del terreno, la acides del suelo y el potencial de corrosión del acero al carbono para dicho medio se deben tener en cuenta a la hora de evaluar el nivel de protección catódica de la base de los tanques de acero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AVILA, Javier, et al. *Más allá de la herrumbre II*. FCE-Fondo de Cultura Económica, 2003.
2. API (American Petroleum Institute) • API RP1632 - Protección Catódica de tanques de almacenamiento enterrados de petróleo y sistema de tuberías.
3. API (American Petroleum Institute) • API RP 651 - Protección catódica de tanques de almacenamiento de petróleo sobre el suelo
4. ESPINOZA HUAMANÍ, Carlos Alberto. Protección catódica por corriente impresa para control de corrosión externa de tanques sumideros enterrados usados en la producción de petróleo Pavayacu-Loreto. 2014.
5. LIZANO BORRERO, Khevin Erickson Andre. Evaluación de titanio anodizado para su uso en sistemas de protección catódica por corriente impresa. 2017.
6. LORA, F. E. Corrosión en Suelos. *Grupo de corrosión y protección*, 2010.
7. MEDINA-CUSTODIO, O., et al. Corrosión microbiológica en aceros de bajo carbono. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 2009, vol. 10.
8. NACE RP0285 Control de Corrosión en Sistemas de Tanques de Almacenamiento Enterrados Mediante Protección Catódica.
9. NACE RP 0169-02 Control de Corrosión Externa en Sistemas de Tuberías Metálicas Enterradas o Sumergidas.
10. PANCORBO, Francisco J. *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*. Marcombo, 2010.
11. PEREZ MOLINA, L. (2011, octubre). Estudio avanzado de corrosión: Análisis del estado de corrosión de un edificio modernista de Barcelona y estudio de mecanismos de protección basados en recubrimientos orgánicos. Catalunya.
12. SALAZAR-JIMÉNEZ, José Alberto. Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, 2015, vol. 28.

13. SUQUE CERCADO, Willian Luis; PEÑA ESTRELLA, Julian. Diseño del sistema de protección catódica por ánodos profundos para un bosque de tanque de almacenamiento de combustible. 2008. Tesis de Licenciatura.
14. TORRES JIMÉNEZ, Jonathan Martín; ZAPATA MASÍAS, Christian Anderson. protección catódica con corriente impresa de un acero ASTM A-36, enterrado en suelo franco arenoso húmedo. 2016.
15. VALENZUELA GUERRERO, Silvia Paola. Influencia de ácidos húmicos en la corrosión de zinc puro para simular la corrosión de revestimientos HD-ZN en el suelo. 2016.