

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“EFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LA RESISTENCIA DE
DISPERSIÓN DE ELECTRODOS ENTERRADOS EN EL SUELO”**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

ROGER MISAEL VALDERRAMA GUILLÉN

PROMOCIÓN

1989-2

LIMA-PERÚ

2005

**EFFECTOS DE LA CORROSIÓN EN LA
RESISTENCIA DE DISPERSIÓN DE ELECTRODOS
ENTERRADOS EN EL SUELO**

**DEDICO ESTE TRABAJO A LOS ALUMNOS DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y
ELECTRONICA DE NUESTRA QUERIDA UNIVERSIDAD**

SUMARIO

El presente trabajo desarrolla el tema del Efecto de la Corrosión en la Resistencia de Dispersión de Electrodo Metálicos Enterrados en el Suelo, en tal sentido se analiza las principales causas para que se presente la corrosión en el suelo, se describen los procesos de corrosión de los principales metales empleados: Cobre, Hierro, Aluminio.

En el Capítulo I, se trata de las prestaciones de los Electrodo de Puesta a Tierra, describiéndose en forma separada las prestaciones eléctricas y las prestaciones mecánicas, en el Capítulo II se describen las Características Generales de la Corrosión en el Suelo, poniendo énfasis en las condiciones para que se presente el proceso de corrosión en metales enterrados en el suelo, en Capítulo III se describen los mecanismos de la corrosión de un electrodo de puesta a tierra, explicando el origen de las diferentes tipos de celdas de corrosión, en el Capítulo IV se describen las características generales y el comportamiento termodinámico del Cobre, Hierro y Aluminio, que son los principales materiales empleados en la fabricación de puestas a tierra, en el Capítulo V explicamos el control de la corrosión en el suelo, para finalmente exponer las conclusiones de este trabajo.

El procedimiento seguido ha sido únicamente de recopilación de información especializada, puesto que el realizar muestras experimentales para comprobar el efecto de la corrosión en los electrodo de puesta a tierra y debido a la lenta velocidad de este fenómeno, el tiempo requerido excedería largamente lo disponible para la presentación de este trabajo.

Para concluir afirmaremos que no se ha podido determinar resultados cuantitativos del tema tratado, pero si resultados cualitativos y se exponen recomendaciones deducidas del análisis de los procesos involucrados.

INDICE

PROLOGO		1
CAPITULO I		
	PRESTACIONES DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA	2
1.1	Prestaciones Eléctricas	4
1.1.1	Alta Conductividad Eléctrica	4
1.1.2	Alta Conductividad Térmica	6
1.2	Prestaciones Mecánicas	6
1.2.1	Mínima Dilatación Lineal	6
1.2.2	Mínima Dilatación Permanente	6
1.2.3	Alta Resistencia a la Tracción	7
1.3	Prestaciones Frente al Entorno	7
1.3.1	Estabilidad Estructural	8
1.3.2	Resistencia al Ataque Externo	9
CAPITULO II		
	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CORROSIÓN EN EL SUELO	10
2.1	La Corrosividad de los Suelos	12
2.1.1	La Resistividad del Suelo	12
2.1.2	La Aireación del Suelo	14
2.1.3	El contenido de Humedad del Suelo	14
2.1.4	Los contenidos de ácidos salinos	15
2.2	Condiciones para que se presente el proceso de corrosión	17

2.2.1	Presencia de Zonas Anódicas	18
2.2.1.1	Curvas de Polarización Anódica	18
2.2.2	Presencia de Zonas Catódicas	20
2.2.2.1	Curvas de Polarización Catódica	22
2.2.3	Conexión entre Zona Anódica y la Zona Catódica	23
2.2.4	Presencia de un Electrolito	24
2.2.5	Los Potenciales de los Electrodo de los Metales	24
2.2.6	Corrientes que Producen Corrosión	25

CAPITULO III

	MECANISMOS DE LA CORROSIÓN EN UN ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA	28
3.1	Celdas de Macro y Micro Corrosión	28
3.2	Clasificación de la Corrosión según la morfología del Ataque	29
3.2.1	Corrosión Uniforme o Generalizada	30
3.2.2	Corrosión en Placas o Selectiva	30
3.2.3	Corrosión por Picaduras	30
3.2.4	Corrosión en Resquicio	30
3.2.5	Corrosión Íntergranular	31
3.2.6	Corrosión Bajo Tensión	31
3.3	Origen de las Celdas de Corrosión	31
3.3.1	Celdas por Diferencia de Concentración de Oxígeno	32
3.3.2	Celdas de Concentración de Sales Disueltas	32

3.3.3	Celdas Galvanicas	33
3.3.4	Celdas de Resistividad Diferencial	33
3.3.5	Celdas de Película de Oxido Superficial	34
3.3.6	Celdas de Bacterias Sulfato Reductoras	34
3.3.7	Celdas de Sollicitación Mecánica	35

CAPITULO IV

LA CORROSIÓN EN EL COBRE, HIERRO Y EL ALUMINIO EN LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

4.1	El Cobre	39
4.1.1	Propiedades y Características Generales del Cobre	39
4.1.2	Comportamiento Termodinámico del Cobre	40
4.2	El Hierro	42
4.2.1	Propiedades y Características Generales del Hierro	42
4.2.2	Comportamiento Termodinámico del Hierro	44
4.3	El Aluminio	45
4.3.1	Propiedades y Características Generales del Aluminio	46
4.3.2	Comportamiento Termodinámico del Aluminio	46

CAPITULO V

CONTROL DE LA CORROSIÓN DEL SUELO

5.1	Uso de Materiales Resistentes a la Corrosión	50
5.2	Utilización de Rellenos Adecuados	50
5.3	Protección Catódica	50

CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFIA	53

PROLOGO

Considerando que una puesta a tierra (PAT) de uso eléctrico, es la inmersión de un objeto metálico que posee en su superficie una débil capa de óxido, enterrado en contacto directo con el suelo natural o mediante una mezcla de tierra fina con sales conductoras disueltas en agua; que tiene la finalidad de conducir y dispersar con la menor resistencia posible: corrientes permanentes, corrientes erráticas ó corrientes de corta duración. Por ello se requiere que la puesta a tierra tenga una larga vida útil y que en su funcionamiento no sufra perturbaciones debidas al ataque químico que se manifiesta como corrosión destructiva.

De acuerdo a las características de la instalación y prestaciones que deben tener y conservar las puestas a tierra, resulta sumamente importante el estudio de los mecanismos de la corrosión de los electrodos; este fenómeno de corrosión que se presenta debido a diferentes causas puede ocasionar inicialmente el incremento la variación de la Resistencia de puesta a tierra, así como la pérdida de material del electrodo, que por sus características de instalación, hacen que sea difícil su detección y su mantenimiento, derivando luego en la interrupción del circuito por las discontinuidades del proceso destructivo.

CAPITULO I

PRESTACIONES DE LOS ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

Los electrodos de puesta a tierra, se diseñan y construyen para facilitar la evacuación eficiente de corrientes eléctricas desde las masas de los equipos e instalaciones eléctricas hacia el suelo, y para asegurar la presencia de un potencial referencial fijo (de valor relativo cero) en los puntos neutros de los circuitos eléctricos y en las masas de los aparatos que se conectan. El suelo que utilizamos para enterrar al electrodo de puesta a tierra es un conjunto de componentes tales como: arena, limo, arcilla, cascajo, hormigón entre otros, los cuales se les puede clasificar mediante el análisis de sus diferentes propiedades; entre ellas su comportamiento conductivo eléctrico en función de su Resistividad (ohm-m), que se resume en la Tabla N° 1.1; de la misma manera se pueden clasificar a las aguas naturales que permiten recargar la humedad de las puestas a tierra y por lo tanto conservar su resistividad, cuyo resumen se presenta en la Tabla N° 1. 2.

Tabla N° 1.1: Resistividades Referenciales según Tipo de Suelos Predominantes [10].

Tipo de Suelo Predominante	Resistividad ρ (Ohm – m)
Limos, arcillas, suelo de cultivo	5 - 10
Suelo vegetal, turbas, fangos	110- 300
Tierra fina y areniscas, suelo seco	300 - 800
Arenas firmes y eólicas, hormigones	600 - 3000
Lecho de río, gravas y cascajos	2000 - 5000
Rocas estratificadas y fracturadas	3000 - 8000
Rocas monolíticas secas	5000 - 20000
Suelos de feldespato, mica, cuarzo	5000 - 30000
Concreto húmedo enterrado	300 - 600
Concreto seco de superficie	3000 -10000

Tabla N° 1. 2: Resistividades Referenciales según Tipo de Aguas Naturales [10]

Tipo de Agua Natural	Resistividad ρ (Ohm – m)
Aguas salobres de tierra y mar	Aprox. 0.1
Aguas minerales y geotérmicas	0.03 – 0.5
Aguas estancadas orgánicas	30 - 150
Aguas de lluvia contaminada	30 - 400
Aguas de filtración rocosa	50 - 1000
Aguas de lluvia limpia	800 - 1200
Aguas de filtración del suelo	2000 - 3000

De los datos de las tablas anteriores se deduce que para obtener una buena puesta a tierra se necesita preparar un relleno adecuado con tierra fina y sales conductoras disueltas en agua para obtener una buena Conductividad eléctrica y una baja Resistividad de puesta a tierra.

En general la instalación de una puesta a tierra debe cumplir con los siguientes objetivos:

- Seguridad para las personas.
- Protección de las instalaciones.
- Establecimiento y continuidad de un potencial de referencia.
- Eliminación de ruidos eléctricos.

Asimismo un sistema de puesta a tierra debe cumplir con los siguientes requisitos mínimos:

- El valor de la resistencia debe ser el adecuado para cada tipo de instalación.
- La variación de la resistencia debida a cambios ambientales debe ser mínima.
- Su vida útil debe ser mayor de 20 años.
- Debe ser resistente a la **corrosión**.
- Debe permitir su mantenimiento periódico.
- Cumplir los requerimientos de las normas y especificaciones.

Las características de las puestas a tierra las podemos agrupar de acuerdo a sus requerimientos: Prestaciones eléctricas y prestaciones mecánicas

1.1. - Prestaciones Eléctricas

Un electrodo de puesta a tierra debe conducir y dispersar corrientes eléctricas pequeñas y grandes con la mínima resistencia de dispersión, por lo cual los materiales usados y las conexiones realizadas deben tener: Alta conductividad eléctrica y alta conductividad térmica, para obtener una adecuada circulación y evacuación de las corrientes eléctricas desde los puntos neutros o desde los conductores pasivos (masas) de las instalaciones, hacia el suelo.

1.1.1. - Alta Conductividad Eléctrica

Los electrodos de puesta a tierra deben tener la mínima Resistencia de dispersión para asegurar la protección de las personas, es decir se debe obtener las mínimas tensiones de toque y de paso durante las fallas. Estas tensiones están asociadas a los parámetros de: Resistencia admisible (R_K), corriente admisible (I_K) y tensión admisible (V_K), que circulan por el cuerpo humano, y que se deducen de manera indirecta de la siguiente forma: Para intervalos máximos de 3 segundos, las normas asignan un valor promedio de $R_K = 1000$ Ohm, valor promedio determinado a partir de las siguientes medidas directas, que se muestran en la tabla adjunta.

Tabla N° 1.3: Resistencia del Cuerpo Humano de Acuerdo al Recorrido de la corriente. [10]

R_K (Ohm)	RECORRIDO DE (I_K)
650	Pecho a Mano (Derecha)
750	Pecho a Mano (Izquierda)
1000	Mano (Izquierda) a Pies
1250	Mano (Derecha) a Pies
1400	Espalda a Mano (Derecha)
>1400	Otros Puntos de Contacto

La corriente admisible en el cuerpo humano de acuerdo a la sensación que produce, es determinada por norma como una corriente estacionaria máxima de valor $I_K = 0.05$ Amperios, aplicable durante un máximo de 3.0 segundos, valor obtenido a partir de los

experimentos con animales mamíferos de peso similar al de las personas, que se detalla en la tabla siguiente.

Tabla N° 1.4: Corriente Admisible en el Cuerpo Humano de Acuerdo a la Sensación Experimentada. [10]

I_K (60 Hz)	Sensación
Menor a 1.0 mA	Limite de Percepción
De 6.0 a 8.0 mA	Hormigueo, Fastidio
De 8.0 a 25.0 mA	Malestar, Calambres
De 25.0 a 50.0 mA	Descontrol, Asfixia
De 50.0 a 100.0 mA	Fibrilación Ventricular
De 100.0 mA a más	Shock, Paro Cardiaco

Las tensiones o diferencias de potencial admisibles, pueden deducirse a partir de la aplicación de la ley de ohm, puesto que se conocen los valores de la resistencia admisible (R_K) y corriente admisible (I_K), establecidas sin compromiso de la salud o la vida humana para aplicaciones temporales en seco inferiores a 3.0 segundos. Luego, con los valores de R_K é I_K , tenemos $V_K = 50V$.

Los valores antes definidos pueden ser mucho mayores cuando se trata de corrientes y tensiones instantáneas aplicadas durante muy breves intervalos de tiempo (intervalo de aclaración de la falla, o corte de las corrientes de falla), por ello se define:

La Corriente Instantánea Admisible en función del tiempo de aclaración de la falla, mediante un interruptor o un fusible.

$$I_K = 0.0116 / \sqrt{t} \quad (1.1)$$

La Tensión de Toque Instantánea Admisible (V_t), considerando el circuito Resistivo que involucra al cuerpo humano.

$$V_t = 638 / \sqrt{t} \quad (1.2)$$

La Tensión de Paso Instantánea Admisible (V_p), considerando el circuito Resistivo que involucra al cuerpo humano.

$$V_p = 812 / \sqrt{t} \quad (1.3)$$

1.1.2. - Alta Conductividad Térmica

El electrodo de puesta a tierra deberá disipar el calor originado por el paso de elevadas corrientes hacia el suelo, manteniendo las características de conductividad de los diferentes empalmes y conexiones de la puesta a tierra. El Coeficiente de Conductividad Térmica es un valor propio del material del electrodo de puesta a tierra, que permite determinar el calor conducido en una determinada sección en cierto tiempo, normalmente se define este valor para una determinada temperatura (20°C); el valor del coeficiente de conductividad térmica se muestra en la tabla N° 4.1

1.2. - Prestaciones Mecánicas

Son las que se presentan debido a elevadas corrientes o a sollicitaciones externas de otra naturaleza como: vibraciones, movimientos sísmicos, cargas de impacto en sus cercanías; requieren que las puestas a tierra tengan las siguientes prestaciones mecánicas: Mínima dilatación lineal, mínima dilatación permanente y alta resistencia a la tracción.

1.2.1. - Mínima Dilatación Lineal

La dilatación lineal debe ser la mínima posible, lo cual se asegura con electrodos de sección sólida, pues de esta manera se evitara la fractura de la capa de oxidación superficial (que tiene el electrodo antes de ser enterrado y que le sirve como una barrera protectora para el aumento de la corrosión); siendo su valor directamente proporcional a su coeficiente de dilatación lineal que es propio del material seleccionado para fabricar el electrodo de puesta a tierra; algunos valores del Coeficiente de Dilatación lineal se muestran en la tabla N° 4.1.

1.2.2. - Mínima Dilatación Permanente

Esta característica es necesaria para asegurar la durabilidad de los empalmes, uniones a presión y en menor medida de las uniones soldadas; la dilatación permanente se produce cuando se ha excedido el límite de deformación elástica y el material se encuentra en la zona de fluencia donde se produce la deformación permanente.

La fluencia es una propiedad de gran importancia de los materiales sometidos a altas temperaturas, definiéndose tres zonas de comportamiento: Fluencia primaria, fluencia secundaria en condiciones estables, fluencia terciaria; en cada zona el material tiene un comportamiento mecánico diferente ante el incremento de carga, produciéndose deslizamiento y endurecimiento debido al comportamiento de los granos más favorablemente orientados en el sentido de la carga; la deformación permanente final está asociada al tiempo de aplicación de la carga y al valor de esta; lo que se traducirá de persistir su aplicación en la fractura del material. La propiedad que determina el límite de la deformación permanente del material sometido a tracción, es el módulo de Elasticidad, cuyos valores para el cobre, hierro y aluminio tratado, se presentan en la tabla N° 4.1.

1.2.3. - Alta Resistencia a la Tracción

Considerando que el electrodo de puesta a tierra estará sometido principalmente a tracción, este deberá tener una alta resistencia a esta sollicitación mecánica pues una fractura en el electrodo de puesta a tierra sería de muy difícil ubicación al estar enterrado, y significaría la discontinuidad de la conducción eléctrica. Los valores de la resistencia a la tracción para el Cobre, Hierro y el Aluminio se muestran en la tabla N° 4.1.

1.3. - Prestaciones Frente al Entorno

El electrodo de puesta a tierra debe tener una buena resistencia a la agresión de los parámetros del entorno, tales como: humedad, salinidad, temperatura, etc. Por ello se requiere que el material del electrodo de puesta a tierra tenga las siguientes características:

1.3.1. - Estabilidad Estructural

Algunas de las propiedades físicas de los metales varían como resultado de la acumulación de energía interna debida al trabajo en frío o en caliente a que fueron sometidos para llegar a su forma final, esto se traduce como un incremento de la dureza, la resistencia a la tensión, la resistencia eléctrica y la disminución de la ductilidad producidos por: el aumento del numero de dislocaciones y debido a que ciertos planos de su estructura cristalina se distorsionan severamente llegando a la deformación plástica por deslizamiento y por maclaje. Una buena estabilidad estructural asegura que las características físicas del metal se mantengan a través del tiempo, lo cual es deseable para el electrodo de puesta a tierra, que en lo posible deberá conservar sus características físicas de diseño. En la figura adjunta se muestra la Energía almacenada de trabajo en frío, para el cobre de alta pureza

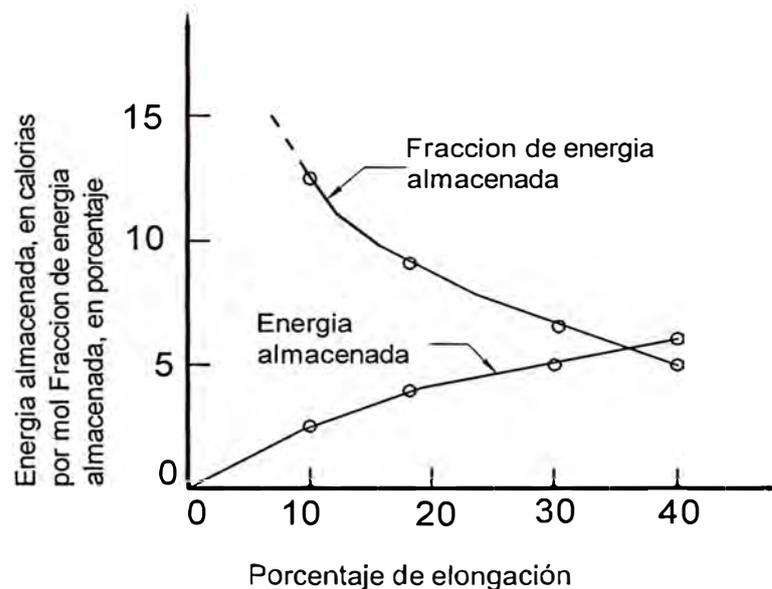


Fig. N° 1.1: Energía almacenada de trabajo en frío y fracción del trabajado total que permanece como energía almacenada para el Cobre de alta pureza, en función de la elongación tensil. [3]

1.3.2. - Resistencia al Ataque Externo

Esta característica del electrodo de puesta a tierra es importante conocerla pues permite evaluar entre otros aspectos, su pérdida de conductividad debido al ataque superficial electroquímico que ocasiona la corrosión, además de la pérdida de material del electrodo; cuya consecuencia es el incremento de la resistencia de puesta a tierra y su dificultad para evacuar las corrientes que van hacia ella.

Esta característica está íntimamente asociada al tipo de estructura atómica y en particular a su tipo de enlace atómico que puede ser: Enlace iónico, enlace covalente u homopolar, enlace metálico y las fuerzas de Van der Waals; estos enlaces permiten mantener juntos a los átomos o moléculas de un sólido; en el caso del Cobre es: Enlace metálico, con estructura cristalina f.c.c.(cúbica centrada en las caras) y consecuentemente tiene mayor resistencia al ataque externo.

En general la resistencia al ataque externo de los metales, está asociada a sus potenciales propios de reducción u oxidación, estos potenciales están relacionados con sus energías propias de remoción de electrones para alcanzar el equilibrio electroquímico, en el caso del Cobre que se utiliza como electrodo de Puesta a Tierra, se trata de un metal noble cuyo potencial de Reducción es + 0.3402 Voltios, según lo cual está menos expuesto al ataque galvanico.

CAPITULO II

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CORROSIÓN EN EL SUELO

Para el estudio de la corrosión se clasifica, este proceso, según el medio en el que se desarrolla, el cual puede ser: Corrosión Química y Corrosión Electroquímica; siendo este último proceso de corrosión el asociado a los electrodos de puesta a tierra.

Corrosión Química: Se denomina así a todos aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no iónico (por ejemplo: oxidación en aire a alta temperatura).

Corrosión Electroquímica: En general se podría decir que todos los procesos de corrosión son electroquímicos, sin embargo teniendo en cuenta la participación de los iones metálicos es usual designar corrosión electroquímica a la que implica un transporte simultáneo de electricidad y iones metálicos a través de un electrolito; a este grupo de procesos corrosivos pertenecen la corrosión en soluciones salinas y agua de mar, la corrosión atmosférica y la corrosión en suelos que es materia de este informe.

La corrosión electroquímica se presenta cuando los materiales metálicos se encuentran en contacto con un medio de conductividad electrolítica : Agua, solución salina, humedad de la atmósfera o del suelo y se manifiesta por la aparición en la superficie del metal de regiones anódicas (las que sufren la disolución de material) y regiones catódicas que no sufren el ataque electroquímico. Ver en la figura adjunta la representación esquemática del proceso de corrosión electroquímica.

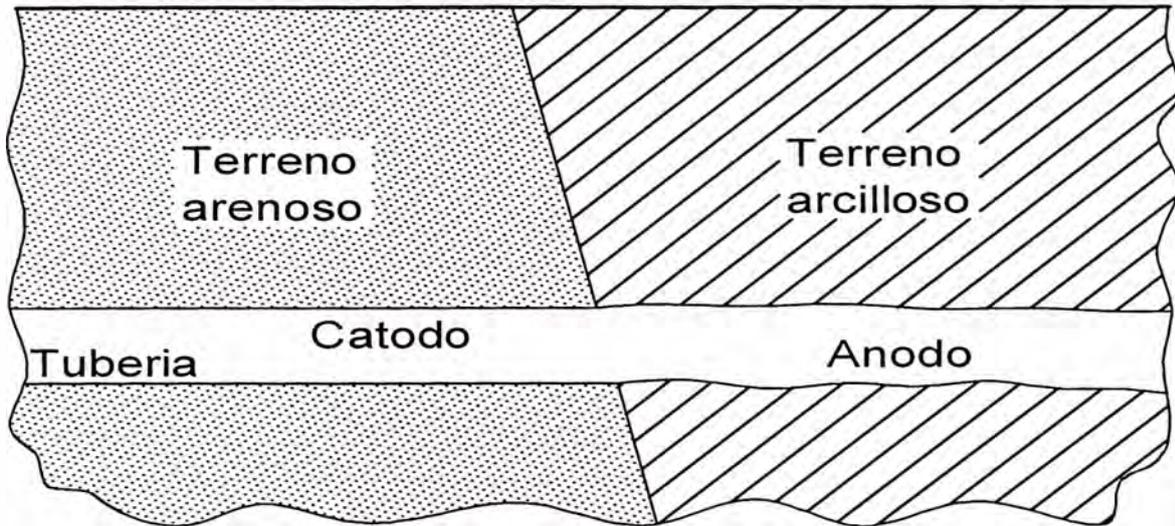


Fig. N° 2.2: Esquema de un metal enterrado en suelos de diferente composición, que se comporta como una celda de corrosión [11]

Asimismo el relleno aun que se trate de ser lo más homogéneo posiblemente en la practica es un conglomerado de estructuras moleculares con características físicas y químicas variables lo que determinan en la practica zonas de comportamiento anódico y catódico en la superficie del electrodo cuando ha sido enterrado en el suelo.

2.1. - La Corrosividad de los Suelos

La Corrosividad en el suelo depende del tipo de suelo y del entorno donde se entierra el electrodo de puesta a tierra; los principales factores que influyen en la corrosividad son: La resistividad del suelo, la aireación del suelo, el contenido de humedad del suelo y los contenidos de ácidos salinos.

2.1.1. - La Resistividad del Suelo

Es la característica eléctrica más representativa de las características Físico – Químicas del suelo, siendo su valor inversamente proporcional a la corriente de corrosión en el Electrodo de Puesta a Tierra (PAT); pues a menor Resistividad mayor será la

corrosión de los metales enterrados, sin embargo la corrosión puede cambiar con cualquier variación local o puntual de:

- La estratificación de la superficie del suelo.
- La existencia de Celdas de Concentración.
- Las diferencias de (pH) entre zonas adyacentes.
- La contaminación química de los agregados

La variabilidad de los anteriores factores determina que no se pueda definir valores exactos que relacionen la corrosividad de los suelos con la resistividad de los mismos; los cuales influyen en una adecuada prestación del electrodo de puesta a tierra; sin embargo en la siguiente tabla se indica de manera referencial el valor de la resistividad del suelo respecto al grado de corrosión de este y como era de esperarse se observa que, para una corrosión severa del suelo se tiene el valor menor de resistividad.

Tabla N° 2.1: Corrosividad Referencial de los Suelos en Función de su Resistividad de Estrato [9]

Corrosividad de los Suelos	Resistividad (Ohm – m)
Corrosión Severa	0 – 25
Corrosión moderada	26 – 50
Corrosión Media	51 – 200
Corrosión Baja	>200

En la práctica para evaluar la resistividad del suelo se debe considerar que existen dos interfases de conducción eléctrica y por lo tanto una contribución de ambas a la resistencia total de la Puesta a Tierra; estas interfases son: Electrodo – Relleno (donde se produce la disolución del metal), y Relleno - Suelo Natural, que también participa en la conducción de la corriente de dispersión y en la pérdida de humedad y que se aprecia en la figura siguiente.

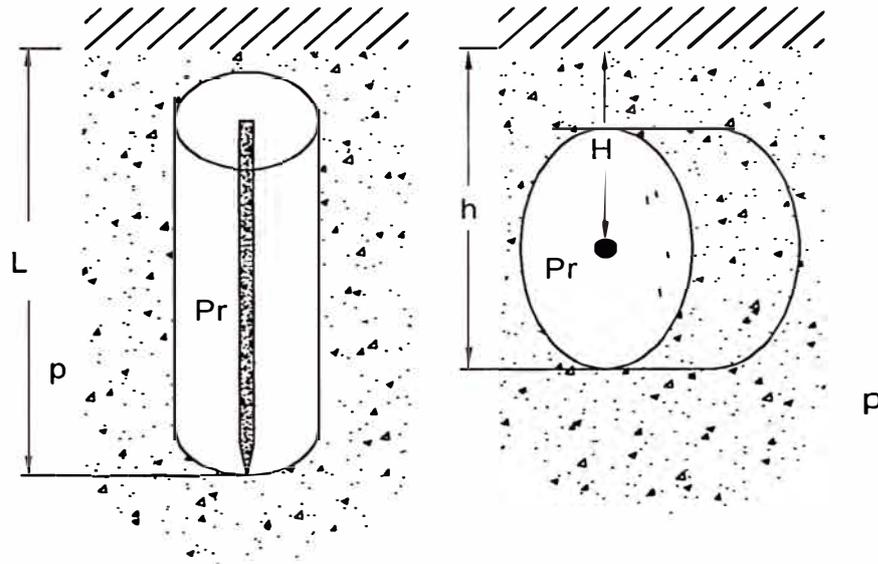


Fig. N° 2.3: Típica Instalación de un Electrodo de Puesta a Tierra, donde se aprecia: El electrodo, el Relleno y el Suelo.[10]

2.1.2. - La Aireación del Suelo

Depende de la permeabilidad del suelo a la penetración del aire, una pobre aireación ocasiona en el metal enterrado una severa corrosión local por celda de aireación diferencial; en la zona aireada el oxígeno eleva el Potencial Estático del Metal ennoblecándolo y creando una diferencia de potencial respecto a otro punto del metal, lo que hace funcionar las celdas de corrosión. La aireación se relaciona en forma inversa con la recarga de humedad del suelo, por lo que afecta su resistividad.

2.1.3. - El Contenido de Humedad del Suelo

La penetración de humedad en el suelo, limita la penetración del aire ocasionando al mismo tiempo disminución de la Resistividad del suelo, lo cual incrementa la corrosividad de este. El contenido de humedad del suelo varía con la cantidad de agua recargada por la lluvia, con la permeabilidad del suelo que permite la recarga de la humedad; así como con la variación de la temperatura del ambiente la cual varía incluso

de acuerdo a la hora del día como apreciaremos en la figura Siguiete, donde además se muestra la variación de la humedad relativa de acuerdo a las horas del día, factor que influye en el contenido de la humedad del suelo.

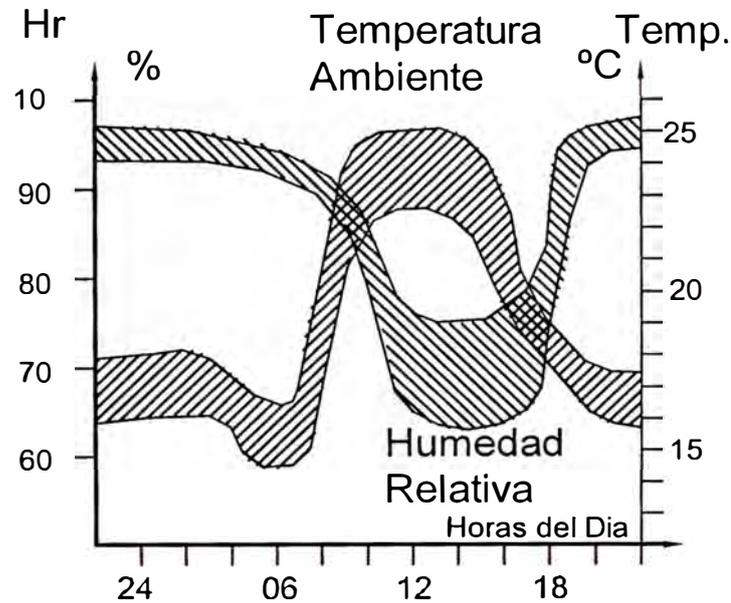


Fig. N° 2.4: Variación Típica de la Humedad Relativa (%) y la Temperatura Ambiente (°C) en la Costa del Perú [10].

2.1.4. - Los Contenidos de Ácidos Salinos

El tipo de sales que contienen los suelos determinan el aumento o disminución de la corrosión en los mismos, así las sales ácidas incrementan la corrosividad del suelo, mientras que las sales Alcalinas lo inhiben; en los suelos ácidos aumenta la despolarización en la zona Catódica incrementando por lo tanto la corrosión en la zona Anódica. Se ha determinado que existe una relación entre la acción de algunos parámetros del medio ambiente externo, los contenidos de elementos conductivos y de la condición alcalina o ácida del suelo; en las tablas siguientes se muestran el análisis químico de muestras de tierra superficial en 400Km. Del litoral costero del Océano Pacífico en el Perú.

Tabla N° 2.2: Intervalos Porcentuales de Composición Química de Muestras de Contaminación Atmosférica [10].

Sal	Compuestos Químicos Principales	Contaminación Depositada		
		Arenoso	Eriazo	Cultivo
Total	Sales Solubles	13.0 – 15.0	10.0 – 15.0	13.0 – 15.0
	Sales Insolubles	2.3 – 2.8	2.7 – 3.2	2.4 – 2.5
Solubles	Sodio (Na)	4.6 – 5.0	5.2 – 5.3	4.7 – 5.2
	Sulfato (SO ₄)	6.0 – 8.0	7.9 – 8.5	6.7 – 7.0
	Carbon (CO ₃)	1.4 – 1.5	---- 1.2	---- 1.3
	Cloruro (Cl)	0.7 – 0.9	0.6 – 1.0	0.7 – 0.9
Insolubles	Hierro (FeO)	0.4 – 1.0	1.0 – 1.1	0.4 – 0.5
	Calcio (Ca)	0.4 – 0.8	0.5 – 0.8	---- 0.6
	Carbon (CO ₃)	0.5 – 0.9	0.6 – 0.9	---- 0.8
	Sulfatos (SO ₄)	0.2 – 0.3	0.2- 0.3	---- 0.15
	(Al), (Mg)	0.3 – 0.4	0.2 – 0.3	0.1 – 0.3
	Materia Orgánica	---- -0.2	0.1 – 0.2	---- 0.15

Tabla N° 2.3: Intervalos Porcentuales de Composición Química de Muestras de Suelo Superficial [10].

Sal	Compuestos Químicos Principales	Tierra del Suelo Superficial		
		Arenoso	Eriazo	Cultivo
Total	Sales Solubles	0.9 – 1.5	0.8 – 2.5	4.5 – 5.5
	Sales Insolubles	8.0 – 12.0	---- 9.0	8.0 – 9.0
Solubles	Sodio (Na)	0.2 – 0.3	0.2 – 0.9	1.7 – 2.2
	Sulfato (SO ₄)	0.3 – 0.9	0.3 – 0.9	0.15 – 0.5
	Carbon (CO ₃)	---- 1.5	0.1 – 0.5	1.8 – 2.5
	Cloruro (Cl)	0.14 – 0.17	0.13 – 0.25	0.25 – 0.95
Insolubles	Hierro (FeO)	0.3 – 0.4	2.0 – 8.0	2.6 – 2.9
	Calcio (Ca)	2.0 – 2.5	1.5 – 5.0	0.1 – 3.5
	Carbon (CO ₃)	1.5 – 3.5	3.0 – 8.0	3.0 – 4.5
	Sulfatos (SO ₄)	---- 0.6	0.4 – 0.75	0.6 – 0.8
	(Al), (Mg)	0.5 – 0.7	0.5 – 1.0	0.7 – 1.5
	Materia Orgánica	---- 0.8	7.5 – 8.0	----- 8.0

2.2.- CONDICIONES PARA QUE SE PRESENTE EL PROCESO DE CORROSIÓN EN METALES ENTERRADOS EN EL SUELO

Los electrodos de puesta a tierra, se corroen por electrólisis; este fenómeno consiste en el movimiento de electrones desde las zonas anódicas (donde se realiza la oxidación), a las zonas catódicas (donde ocurre la reducción), a través de las partes del metal no involucradas en la reacción, cerrándose el circuito por el electrolito (suelo húmedo ó relleno) que es una solución caracterizada por su conductividad iónica. Por lo tanto para que se presente el proceso de corrosión en presencia de oxígeno y humedad deben darse las condiciones, que se muestran en las figuras siguientes.

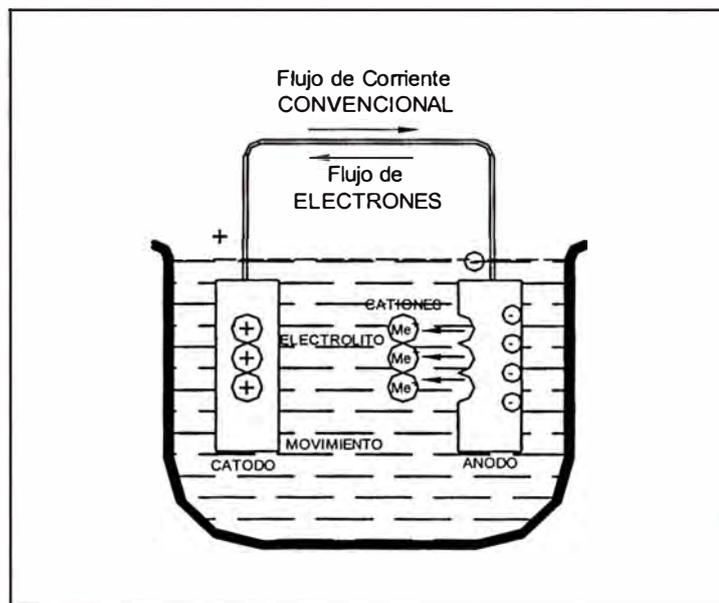


Fig. N° 2.5: Esquema del Principio de una Celda Básica de Corrosión Electrolítica Aireada [10].

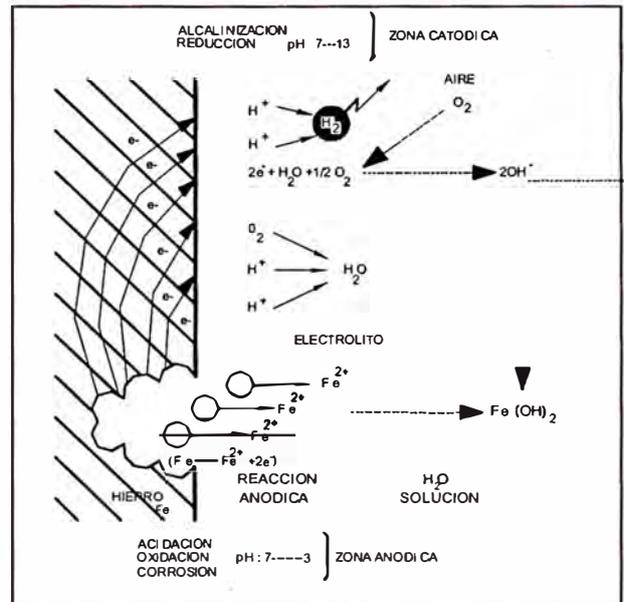


Fig. N° 2.6: Representación del Proceso de Corrosión del Hierro en una solución Aireada[10].

2.2.1. - Presencia de Zonas Anódicas

Son las partes afectadas del electrodo de puesta a tierra, donde ocurre la disolución del metal, a este proceso se conoce como reacción Anódica o de Oxidación, produciéndose la remoción de electrones y la acidificación del medio. Una reacción típica es la siguiente:



El paso directo de iones de la red metálica a la solución, tal como se muestra en la ecuación anterior, es relativamente raro. En general el proceso de disolución de un metal suele ocurrir por etapas más o menos complejas, y la ecuación anterior muestra sólo el estado inicial y final del proceso de corrosión.

2.2.1.1. - Curvas de Polarización Anódica

Si el metal se encuentra al potencial de equilibrio termodinámico, habrá un intercambio de iones entre el metal y la solución, pero no habrá paso neto en ninguna de las dos direcciones.; asimismo al circular una corriente neta, el potencial del metal varía y

se observa una sobretensión, este aumento de la tensión es la que determina el comportamiento del metal. Cuando la sobretensión es positiva circulara una corriente positiva por la interfase del metal – solución y el metal se corroerá. Midiendo la corriente que circula para cada sobretensión se obtiene la curva de polarización Anódica que tendrá algunas de las formas indicadas en siguiente figura.

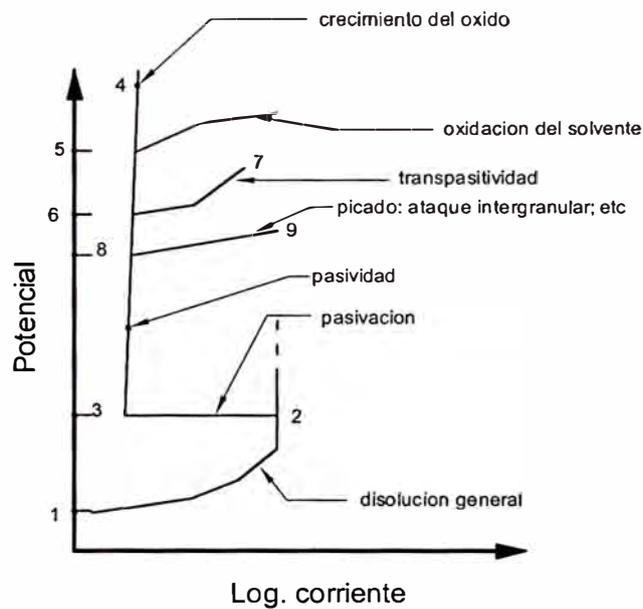


Fig. N° 2.7: Posibles formas que puede tener una curva de polarización Anódica [2].

Si la sobretensión es pequeña se tendrá una relación lineal entre la sobretensión y el logaritmo de la corriente, a sobretensiones mayores influyen otros factores como: acumulación de los productos de la corrosión, difusión de los productos o los reactantes, formación de óxidos; dejando de cumplirse la relación lineal.

En la figura anterior: En la zona 1 – 2, el metal se disuelve en forma activa, si se sigue elevando el potencial, se observa que en algunos casos la velocidad de corrosión permanece alta, mientras que en otros casos la corriente cambia en forma brusca: Zona 2-3, en esta zona la corriente puede disminuir entre cuatro a cinco veces su valor y aparece un estado que se denomina de pasividad; sobre el metal se forma una película muy delgada

de óxido que dificulta su disolución. Las propiedades de esta película determinarán el comportamiento posterior del metal a potenciales mayores.

Si la película pasivante formada es aisladora, al aumentar el potencial el óxido pasivamente irá aumentando de espesor, sin que se note un aumento importante de corriente, 3 - 4 (por ejemplo, Al, Zr, Ta, etc).

Si el óxido pasivante es un buen conductor de electrones, una vez alcanzado el potencial de desprendimiento de oxígeno, 5, la solución comenzará a descomponerse (por ejemplo: Fe, Ni, etc). Si en la solución se encuentran sustancias que se oxidan a un potencial inferior al de desprendimiento de oxígeno también se notará un aumento de corriente.

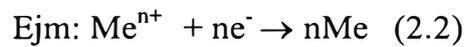
Cuando la película pasivante está formada por elementos que pueden oxidarse a una valencia mayor y dar productos solubles, se nota también un aumento de la corriente, 6 – 7, acompañado en este caso por disolución del metal. Este fenómeno se conoce como transpasividad y lo presentan elementos tales como el cromo o el manganeso.

En ciertas soluciones, por encima de cierto potencial, la película pasivante puede perder su estabilidad, esto ocurre en forma localizada y produce un aumento de la disolución del metal, 8 – 9. Es el fenómeno llamado picado y lo presentan metales como el hierro, cromo, aluminio, en presencia de iones tales como cloruros, nitratos, bromuros, etc. También puede observarse en estas condiciones ataque intergranular o la aparición de corrosión bajo tensión.

De la gráfica también se nota que cuando mediante el suministro de corriente externa, el potencial de un metal es controlado y mantenido a un valor entre los puntos 3 y 8, la corrosión será despreciable y se tendrá la llamada protección catódica.

2.2.2. - Presencia de Zonas Catódicas

Son las partes del electrodo metálico que no se deterioran produciéndose la alcalinización del medio y el consumo de electrones, para todos los casos de metales no anfóteros se tendrá:



Asimismo existen reacciones típicas que son:

Reacción que da lugar la evolución del Hidrogeno ó reacción catódica de reducción de protones (Ver esquema adjunto)

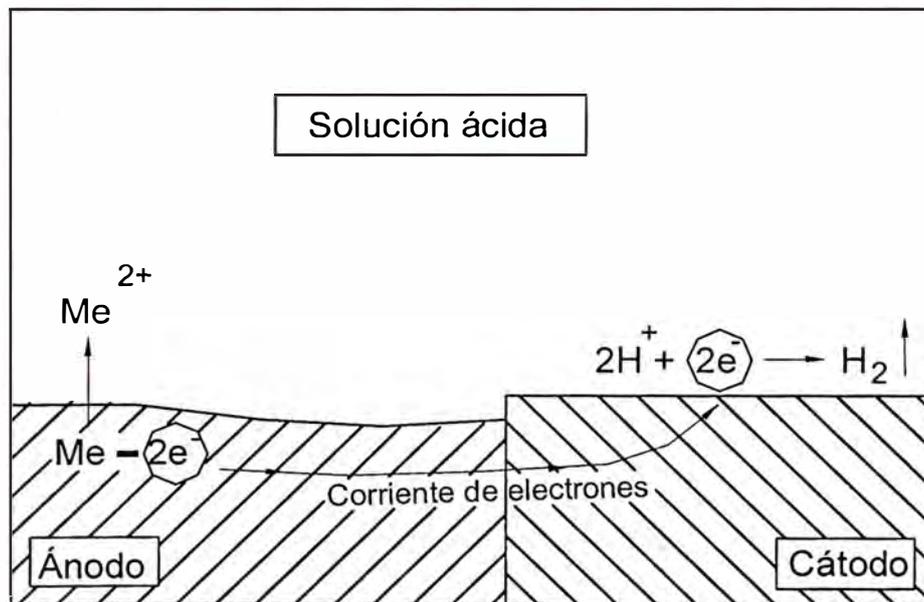
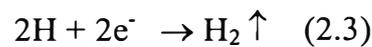
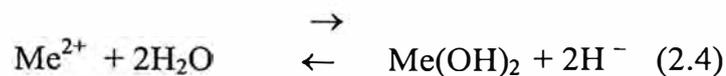


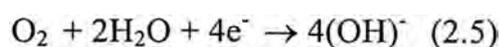
Fig. 2.8: Esquema de una Reacción Catódica de Reducción de Protones [11]

- Hidrolización de Metales no Estables, para alcanzar su equilibrio Termodinámico



Reducción del Oxigeno del Electrolito ocurre en función de la tendencia de la concentración (pH) de la solución.

- Para $\text{pH} > 7$ en la zona Neutro - Alcalina se producen iones $(\text{OH})^-$ (Ver figura adjunta)



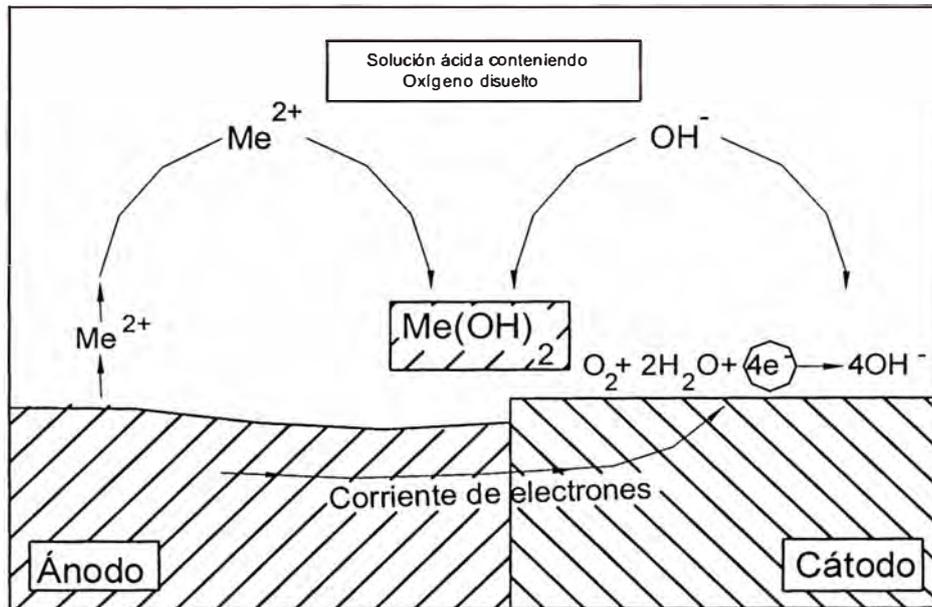
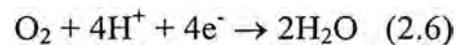


Fig. 2.9: Esquema de una Reacción Catódica de Reducción de Oxígeno [11]

Para $\text{pH} \approx 6$, empezando la zona ácida se tiene



2.2.2.1. - Curvas de Polarización Catódica

De la reacción catódica depende que un metal permanezca pasivo, se pique, se ataque en forma activa o no sufra corrosión alguna; normalmente sobre un metal en corrosión ocurren en forma simultánea e independiente dos o más reacciones electroquímicas.

En la siguiente figura si A, en la Fig. a, es la curva de polarización del metal y B la curva de una reacción que también tiene lugar sobre el metal en forma simultánea e independiente (por ejemplo la reducción del oxígeno), la curva de polarización del metal estará dada por la suma de las dos reacciones independientes, curva C. Al no circular corriente, el metal se encontrará a un potencial U_{mix} , llamado potencial de corrosión, al cual la reacción Anódica de A y la catódica de B son iguales y opuestas. En tales

condiciones i_c determinara la velocidad máxima de corrosión natural del metal en el medio considerado.

Se llama potencial mixto U_{mix} , o potencial de corrosión, al potencial al cual la sumatoria de las corrientes positivas, correspondientes a las reacciones electroquímicas que tienen lugar en el electrodo es igual a la sumatoria de las corrientes negativas. Si en lugar de usar la representación anterior, se representan las corrientes positivas y negativas sobre el mismo lado del eje cartesiano, se simplifica la ubicación de los potenciales de corrosión, pues estarán dados por los puntos de intersección de la curva Anódica de A con la catódica de B, obteniéndose así los diagramas de Evans, Fig. B.

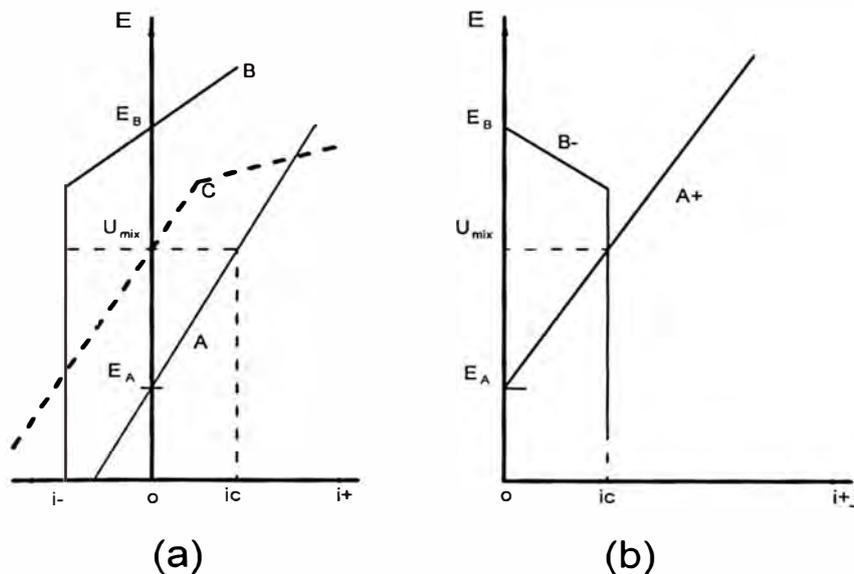


Fig. N° 2.10.- (a), Reacciones simultaneas sobre un mismo electrodo; A: reaccion parcial, predominantemente Anódica, con potencial de equilibrio = E_A ; B: reacción parcial predominantemente catódica, con potencial de equilibrio E_B . La suma de ambas curvas es la curva C. U_{mix} : potencial mixto; i_c : Corriente de corrosión. (b) Las mismas curvas, representadas según el Diagrama de Evans [2].

2.2.3. - Conexión Entre la Zona Anódica y la Zona Catódica

La conexión entre el ánodo y el cátodo asegura la circulación de la corriente, los electrones parten del cátodo para dirigirse al ánodo, a través del electrolito que permite

cerrar el circuito de la corriente de corrosión. En la figura adjunta se muestra el esquema básico de una celda de corrosión.

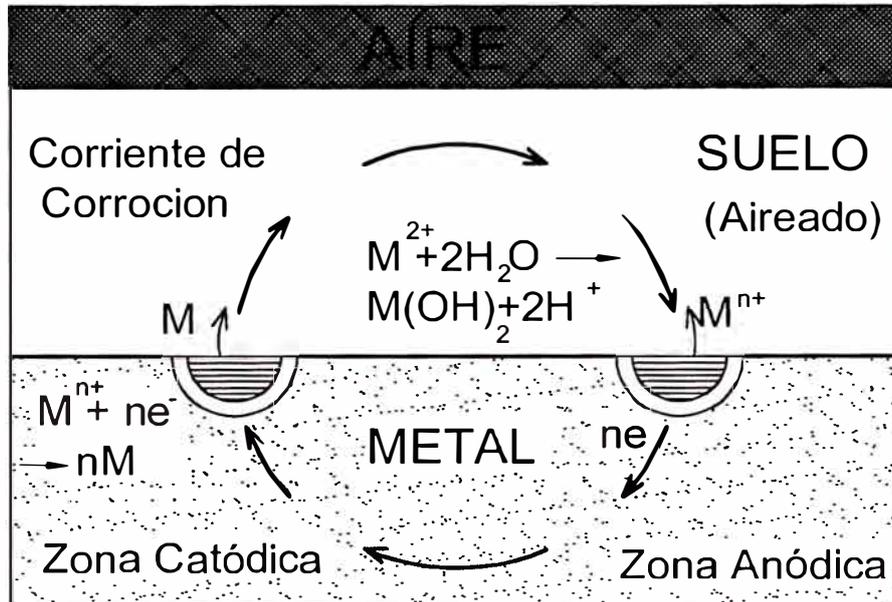


Fig. N° 2.11: Esquema básico de una celda de Corrosión Electroquímica en Suelo Aireado [10]

2.2.4. - Presencia de un Electrolito

Permite el desarrollo de los procesos anódicos y catódicos así como de la circulación de la corriente iónica entre el ánodo y el cátodo; si el electrolito contiene sales ácidas débiles, no se modificara el pH pues se consumirán protones, si el electrolito contiene sales ácidas fuertes por el contrario ocurrirá una acumulación de protones, que pueden disolver los óxidos pasivantes del metal, con lo cual aumenta el proceso de corrosión posterior

2.2.5. - Los Potenciales de los Electrodo de los Metales

Uno de los factores más importantes que influyen en la corrosión es la diferencia de potencial eléctrico de metales no similares cuando están acoplados conjuntamente y

sumergidos en un electrolito. Este potencial se debe a la naturaleza química de las regiones anódica y catódica, las cuales definen la energía de remoción de los electrones para alcanzar el equilibrio electroquímico; para compararlo con una referencia común, se usa el electrodo de hidrogeno ($2H^+ + 2e^- = H_2$), al que se le asigna el valor cero; por lo que los metales nobles ó catódicos son aquellos que producen menos electrones que el hidrogeno y por lo tanto presentan un potencial de electrodo más positivo que este, lo contrario ocurre con los metales anódicos, que tienen mayor capacidad de producción de electrones. La serie Electroquímica de los potenciales de electrodo de los metales más utilizados se puede apreciar en la Tabla siguiente.

Tabla N° 2.4: Serie Electroquímica de Potenciales de Electrodo Respecto del Electrodo Hidrógeno. [2]

ELECTRODO		POTENCIAL (V)	
Au+++	+ 3e- = Au	Metales	+1.042
Ag	+ 1e- = Ag	Catódicos	+0.7996
Fe+++	+ 1e- = Fe++	(Nobles)	+0.770
Cu++	+ 2e- = Cu		+0.3402
2H+	+ 2e- = H ₂	↑	0.000
Pb++	+ 2e- = Pb	—	-0.1263
Sn++	+ 2e- = Sn	↓	-0.1364
Ni++	+ 2e- = Ni		-0.230
Fe++	+ 2e- = Fe		-0.409
Cr+++	+ 3e- = Cr		-0.74
Zn++	+ 2e- = Zn		-0.7628
Al+++	+ 3e- = Al	Metales	-1.706
Mg++	+ 2e- = Mg	Anódicos	-2.375
Li+	+ 1e- = Li	(Activos)	-3.045

Serie Electroquímica de Potenciales de Electrodo
Respecto del Electrodo de Hidrogeno (H₂ / H⁺)

2.2.6. - Corrientes que Producen Corrosión

No solamente la corriente continua generada en el proceso electroquímico en las celdas de corrosión es la que ocasiona la destrucción del metal, también las corrientes denominadas erráticas, que circulan por el suelo siguiendo circuitos diferentes al de la celda de corrosión incrementan sustancialmente el proceso al abandonar el Electrodo hacia

el suelo; además existen otras corrientes muy corrosivas que se derivan del funcionamiento de aparatos con cargas no lineales, producidas por: Rectificadores, Cargadores de Baterías, UPSs. En la tabla adjunta se puede apreciar la pérdida de peso por corrosión en Kg/ Amp-Año de metales debido a las corrientes erráticas.

Tabla N° 2.5: Pérdida de Peso por corrosión en Kg/Amp-Año de Metales debido a Corrientes Erráticas [8].

Metal	Peso Atómico	Estado Oxidación	Pérdida Kg/Amp-Año
ALUMINIO (Al)	26.98	3	2.99
COBRE (Cu)	63.57	2	10.48
HIERRO (Fe)	55.85	2	9.25
PLOMO (Pb)	207.20	2	34.27
MAGNESIO (Mg)	24.32	2	4.00
ZINC (Zn)	65.38	2	10.85

En los procesos de corrosión Electroquímica y debido a la presencia del electrolito, circulan sobre el material expuesto a corrosión corrientes eléctricas que originan el proceso corrosivo (adicionales a las corrientes de dispersión que normalmente se evacuan a través de la puesta a tierra), las causas más frecuentes de estas corrientes son:

- Por que dos ó más metales distintos están en contacto (corrosión galvánica); tal como ocurre con el Aluminio en contacto con el cobre o con el grafito.
- Presencia de dos o mas fases diferentes en una misma aleación, lo que origina una corrosión entre estas fases del metal. Por ejemplo: aleaciones termotratables de aluminio, aceros inoxidable sensibilizados, etc.
- Presencia de capas de óxidos conductores de electrones. Por ejemplo: óxido de laminación en chapas de hierro, o capas de aceite carbonizado en el interior de tubos de cobre.

- Corrientes inducidas por circuitos eléctricos mal aislados, tal es el caso de las corrientes vagabundas en estructuras metálicas enterradas, ó otro tipo de corrientes, como corrientes provenientes de cargas no lineales, las cuales al circular a través del electrodo de puesta a tierra ocasionan la corrosión en el material.
- Presencia de oxidantes en el medio, que causan disolución Electroquímica de un metal aun cuando éste sea puro, sin segundas fases y aislado de otros metales, esto debido a la presencia del electrolito y de una diferencia de potencial entre dos regiones del material que se corroerá.

CAPITULO III

MECANISMOS DE LA CORROSIÓN DE UN ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA

La corrosión en un electrodo de puesta a tierra cumple con los mecanismos de la corrosión en el suelo, pues su principio es el funcionamiento de las celdas galvánicas debido a la diferencia de potencial que aparece en la superficie del metal. El proceso de la corrosión se presenta en el electrodo de puesta a tierra por la aparición de las siguientes celdas de corrosión.

3.1. - Celdas de Micro y Macro Corrosión

Por la forma y el tamaño de la corrosión se pueden clasificar las celdas de corrosión en Celdas de Micro Corrosión y Celdas de Macro Corrosión.

Las celdas de micro corrosión se forman por las irregularidades en la superficie del electrodo, y por la diferente composición que presenta el electrodo en su longitud, los puntos que sufren corrosión son pequeños y su distribución es uniforme a lo largo del electrodo.

Las celdas de macro corrosión se forman por las variaciones de las condiciones del suelo a lo largo de la superficie del metal, siendo las causas principales la aireación diferencial y la diferencia en la resistividad del suelo, en este caso la corrosión es localizada y las zonas de material deteriorado son de mayor tamaño, tal como puede apreciarse en la figura adjunta.

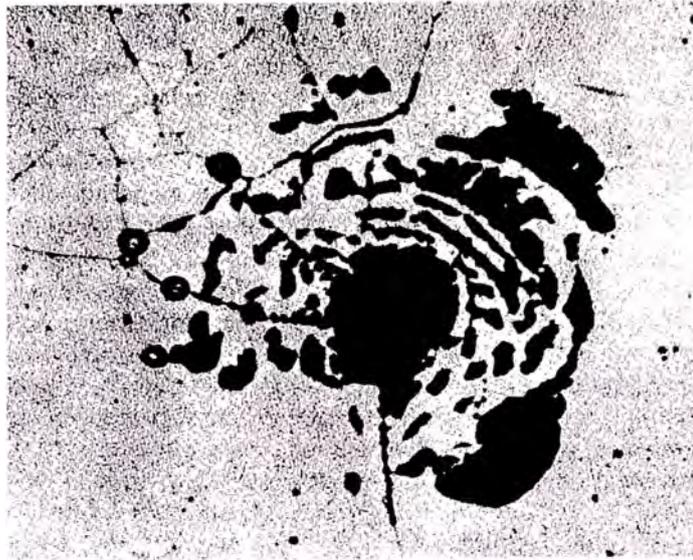


Fig. N° 3.1: Pequeño agujero superficial formado electrolíticamente, 350x [1].

3.2.- Clasificación de la Corrosión Según la Morfología del Ataque

Según la morfología del ataque la corrosión del electrodo de puesta a tierra puede ser: Uniforme, de placas, de picadura, de resquicio, intergranular o corrosión bajo tensión (Ver figura adjunta)

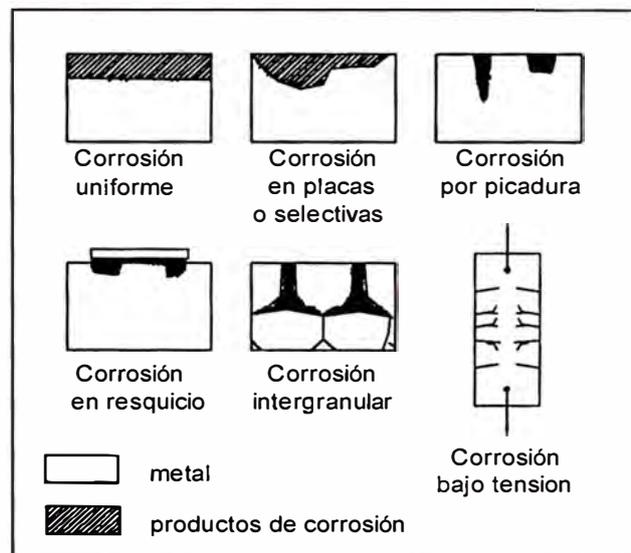


Fig. N° 3.2: Representación Esquemática de la Corrosión de Acuerdo a la Morfología de Ataque [11]

3.2.1.- Corrosión Uniforme o Generalizada

Cuando la corrosión se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica y por lo tanto la penetración media es aproximadamente la misma en todos los puntos, en este tipo de corrosión existe una relación directa entre la pérdida de material, la reducción del espesor del electrodo pudiéndose estimar la vida útil de este.

3.2.2.- Corrosión en Placas o Selectiva

La corrosión se localiza en determinadas zonas de la superficie del electrodo, los casos mas característicos de este tipo de corrosión se presenta en aleaciones que presentan distintas fases con diferentes contenidos en los diversos metales de que están constituidas. Este tipo de corrosión puede considerarse como un caso intermedio entre la corrosión uniforme la corrosión por picadura.

3.2.3.- Corrosión por Picaduras

La corrosión se localiza en zonas aisladas de la superficie cuya superficie es de 1 ó 2 mm² por cada picadura y se propaga hacia el interior del metal formando pequeños túneles que crecen con rapidez debido a la alta velocidad de corrosión.

Este tipo de corrosión aparece debido a las heterogeneidades superficiales y se presenta generalmente en metales pasivables, pues el ataque se inicia como consecuencia de la rotura de la película pasivable que suele formarse sobre el electrodo antes de enterrarse.

La pérdida de material es pequeña debido a lo reducido de la superficie afectada, pero sus consecuencias pueden ser graves como la disminución drástica de la conductividad eléctrica

3.2.4.- Corrosión en Resquicio

Se presenta en uniones, insterticios, zonas de solape, zonas roscadas, es decir en las regiones mal aireadas o en las que la renovación del medio corrosivo está condicionada por

mecanismos de difusión, presentándose este ataque por celdas de aireación diferencial (Ver figura adjunta).

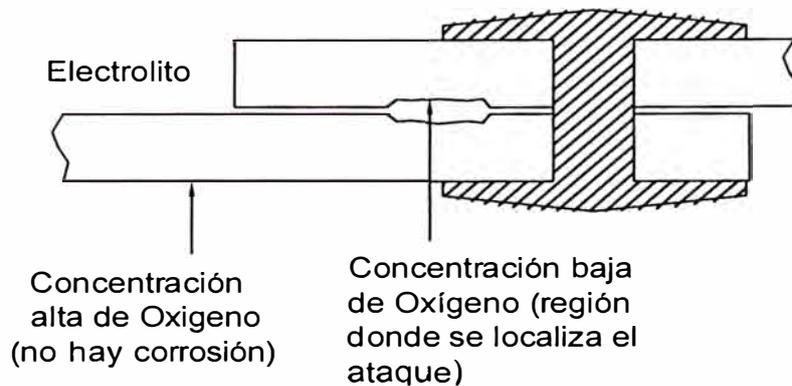


Fig. N° 3.3: Corrosión por Resquicio (Ataque en la zona de solape donde se da la baja concentración de oxígeno [11])

3.2.5.- Corrosión Intergranular

La corrosión se presenta en los límites del grano del metal, perdiendo por consiguiente las características mecánicas del material, se presenta por lo general en aleaciones donde se precipita uno de los componentes.

3.2.6.- Corrosión Bajo Tensión

Se presenta en materiales sometidos a tensiones mecánicas de tracción, bien sea aplicada o residual, se presenta generalmente en aleaciones que se encuentran en contacto con un medio agresivo. La corrosión se presenta como grietas o fisuras que se extienden en la dirección de aplicación de la carga a través del grano (transgranular) o a lo largo del límite del grano (intergranular).

3.3. - Origen de las Celdas de Corrosión

Las celdas de corrosión pueden tener varios orígenes, así como diferente grado de ataque a los electrodos de puesta a tierra.

3.3.1. - Celdas por Diferencia de Concentración de Oxígeno

Debido a la diferencia de concentraciones de oxígeno, se presenta una celda de corrosión donde el cátodo es la zona de mayor concentración de oxígeno y la zona Anódica es la que está desprovista de oxígeno; normalmente el oxígeno tiene acceso relativamente fácil al exterior de una unión y de difícil acceso a los puntos de interfase de ajuste. Se presenta normalmente en los extremos de las grapas de presión ó entre la superficie inferior y superior de los conductores horizontales en medio del relleno, o debido a la diferencia de granulometría pequeña y grande de los estratos del suelo en contacto con los electrodos verticales.

El efecto del oxígeno tiene doble influencia en la corrosión pues, actúa en la formación de óxidos eliminando los iones metálicos del metal y como despolarizador catódico, ayudando a eliminar la superficie de pasivación de corrosión del metal.

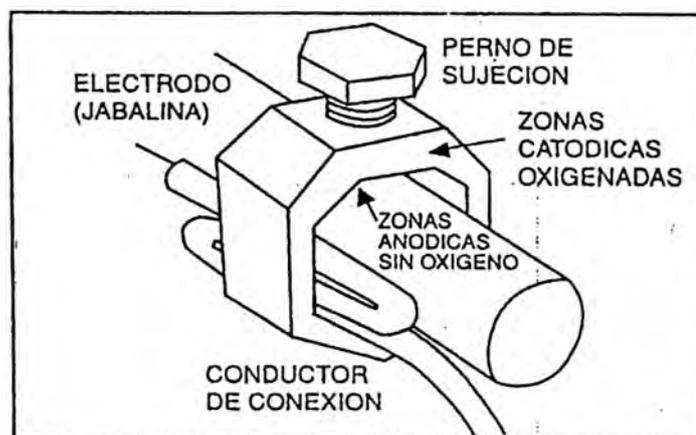


Fig. N° 3.4: Corrosión por Oxigenación Diferencial (Típica en los puntos de contacto a presión) [10]

3.3.2. - CELDAS DE CONCENTRACIÓN DE SALES DISUELTAS

Estas celdas se presentan debido a las diferentes concentraciones de sales disueltas en el relleno, la zona de mayor salinidad es Anódica, pues en esta se presenta remoción de

electrones de los átomos, ocasionando la acidificación del medio y la producción de electrones.

3.3.3. - CELDAS GALVANICAS

Estas celdas se presentan debido a la diferencia de potenciales de dos metales involucrados en el electrodo, el cátodo es el más noble y el ánodo es el más activo; este tipo de celda de corrosión está influenciada también por la relación de área entre el ánodo y el cátodo.

Con un cátodo grande el hidrógeno que lo alcanza se esparcirá y será más accesible a la eliminación mediante la reacción con el oxígeno. Por esta razón es práctica efectiva siempre que se pueda tener un área pequeña del cátodo y un área grande del ánodo.

Un caso típico de corrosión por celdas galvánicas en las que se puede apreciar la influencia de la relación entre de área entre cátodo y ánodo ocurre en coples de cobre con acero después de su inmersión en un electrolito con alto contenido salino. En un caso los remaches de cobre con área pequeña en placas de acero de área grande provocan solo un ligero incremento en la corrosión en el acero; pero en el caso de remaches de acero con área pequeña en placas de cobre de área grande provocan una severa corrosión en los remaches de acero.

3.3.4. - Celdas de Resistividad Diferencial

Estas celdas se presentan debido a la presencia de estratos de diferente resistividad a lo largo del electrodo, debido a rellenos no homogéneos en los que está instalado el Electrodo; el relleno de mayor resistividad será el cátodo y el ánodo corresponde al relleno de menor resistividad, ocurriendo en suelos estratificados para Electrodo Verticales, y en suelos nivelados para los electrodos horizontales, tal como se aprecia en la figura 3.5.

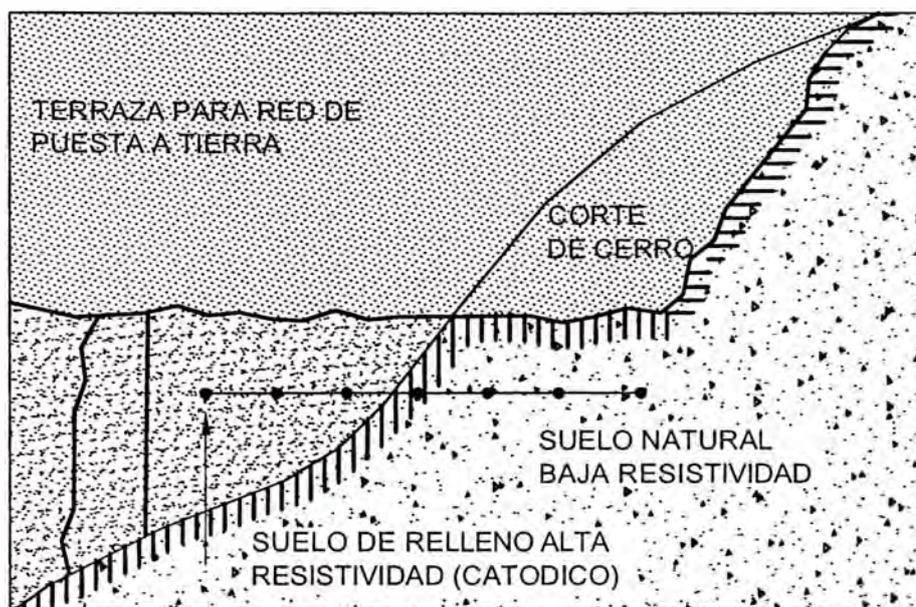


Fig. N° 3.5: Esquema de la Formación de una Celda Formada por Resistencia Diferencial [10].

3.3.5. - Celdas de Película de Oxido Superficial

Debido a que el metal limpio se oxida en contacto con el medio ambiente formando una película protectora heterogénea con zonas anódicas y catódicas se presenta una corrosión superficial cuando se destruye la capa pasivante formada en la superficie del metal, la cual limitaba la ulterior corrosión. La formación de estas celdas es de particular importancia en el caso del Aluminio, cuya corrosión debido a la destrucción de la capa superficial puede ocasionar una corrosión localizada virulenta en las micro fisuras de la capa superficial del metal.

3.3.6. - Celdas de Bacterias Sulfato Reductoras

Estas celdas se forman a partir de los sulfatos del suelo y del agua, que originan la formación de sulfuros en la zona de corrosión, estos aniones no capturan Protones (H^+) y en consecuencia su acumulación produce acidificación, disolviendo los óxidos pasivantes del metal.

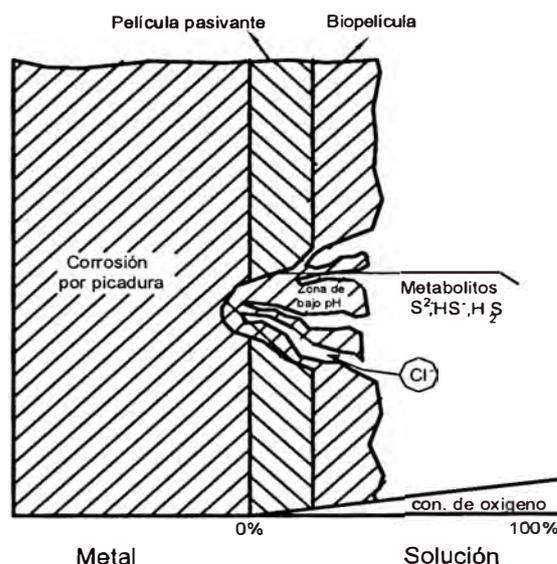


Fig.: 3.6: Esquema de Rotura Local de una película pasiva por reducción de pH facilitada por la actuación de bacterias sulfatoredutoras [11]

3.3.7. - Celdas de Solicitación Mecánica

Estas celdas se forman por los esfuerzos residuales que presenta el electrodo de puesta a tierra, producto de los esfuerzos residuales de fabricación ó de la instalación; la zona bajo tensión mecánica se comporta como el ánodo y las zonas adyacentes como cátodo.

La corrosión bajo tensión aparece en general en metales cubiertos con una película pasivante, cuando se aplica una deformación mecánica, las dislocaciones producidas en el metal comienzan a propagarse y al llegar a la superficie, si la capa de oxido es frágil, se perforara dejando expuesto el metal a la acción corrosiva del medio.

El fenómeno anteriormente descrito se presenta principalmente cuando la instalación del electrodo de puesta a tierra es por clavado en el suelo, en cuya penetración la superficie sufre deformación por contacto con superficies de mayor dureza con los que tiene contacto el electrodo.

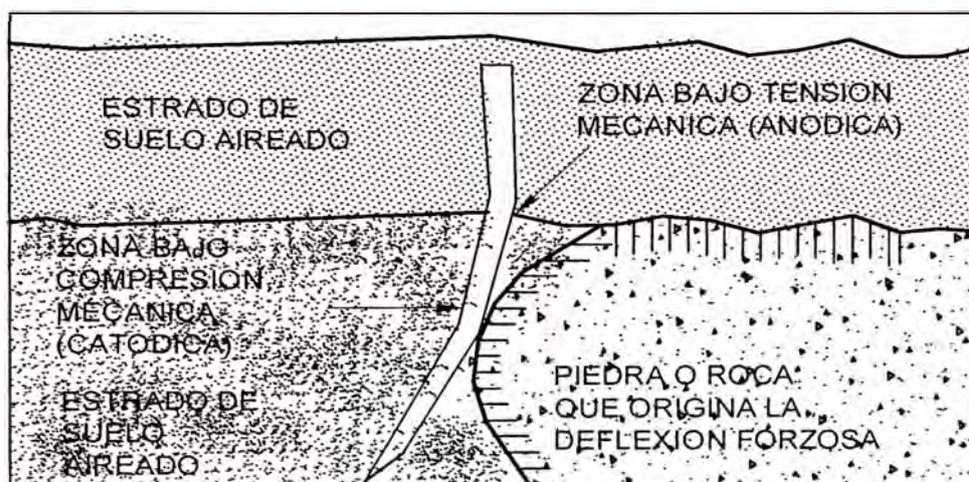


Fig. N° 3.7: Esquema de Celda de Sollicitación Mecánica [10].

CAPITULO IV
LA CORROSIÓN EN EL COBRE, HIERRO Y EL ALUMINIO EN LOS
ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

Por ser los metales más usados analizaremos el comportamiento del cobre, el hierro y el aluminio respecto al proceso de corrosión. Las principales propiedades de estos metales se describen en la tabla adjunta.

Tabla N° 4.1: Propiedades de los metales: Cobre, Hierro y el Aluminio[10]

Propiedades de los Metales	Unidad de Medida	Cobre Recocido	Hierro	Aluminio Tratado
Densidad	Gr/cm ³	8.71 – 8.94	7.85 – 7.88	2.69 – 2.70
Punto de Fusión	°C	1083	1540	657 - 660
Elongación a Rotura	%	50	40	35
Prueba de Dureza		45 Brinell	30 Rockwell B	23 Brinell
Calor Especifico	Kcal/ Kgf /°C	0.0920 – 0.0985	0.106 – 0.107	0.2081 - 0.2250
Módulo de Elasticidad	Gpa	125	70 - 165	70
Resistencia a la Tracción	Mpa	250 – 400	170 - 340	75 -180
Conductividad Térmica a 20°C	Cal/s/cm ² / °C	0.92 – 0.94	0.19 – 0.20	0.53 – 0.54
Coefficiente de Dilatación Lineal a 20°C	1/ °C	0.000017	0.000012	0.000024
Resistividad Eléctrica	u.Ohm-cm	1.72 – 1.77	10.10	2.83
Conductividad Eléctrica	s.m/mm ²	57.0 – 58.0	6.30 –6.38	35.6 - 36

Para determinar el comportamiento de la corrosión de estos metales analizaremos el comportamiento termodinámico del sistema Metal – Solución, mediante los diagramas de POURBAIX, el cual indica el estado final de las tendencias y no la velocidad como se llega a este estado.

CAPITULO IV
LA CORROSIÓN EN EL COBRE, HIERRO Y EL ALUMINIO EN LOS
ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA

Por ser los metales más usados analizaremos el comportamiento del cobre, el hierro y el aluminio respecto al proceso de corrosión. Las principales propiedades de estos metales se describen en la tabla adjunta.

Propiedades de los Metales	Unidad de Medida	Cobre Recocido	Hierro	Aluminio Tratado
Densidad	Gr/cm ³	8.71 – 8.94	7.85 – 7.88	2.69 – 2.70
Punto de Fusión	°C	1083	1540	657 - 660
Elongación a Rotura	%	50	40	35
Prueba de Dureza		45 Brinell	30 Rockwell B	23 Brinell
Calor Especifico	Kcal/ Kgf /°C	0.0920 – 0.0985	0.106 – 0.107	0.2081 - 0.2250
Módulo de Elasticidad	Gpa	125	70 - 165	70
Resistencia a la Tracción	Mpa	250 – 400	170 - 340	75 -180
Conductividad Térmica a 20°C	Cal/s/cm ² / °C	0.92 – 0.94	0.19 – 0.20	0.53 – 0.54
Coefficiente de Dilatación Lineal a 20°C	1/ °C	0.000017	0.000012	0.000024
Resistividad Eléctrica	u.Ohm-cm	1.72 – 1.77	10.10	2.83
Conductividad Eléctrica	s.m/mm ²	57.0 – 58.0	6.30 –6.38	35.6 - 36

Tabla N° 4.1: Propiedades de los metales: Cobre, Hierro y el Aluminio[10]

Para determinar el comportamiento de la corrosión de estos metales analizaremos el comportamiento termodinámico del sistema Metal – Solución, mediante los diagramas de POURBAIX, el cual indica el estado final de las tendencias y no la velocidad como se llega a este estado.

Los diagramas de POURBAIX, muestran la variación del potencial de electrodo (Voltios), respecto del carácter de la solución (ph), determinándose zonas de estabilidad química que son:

Zona de Inmunidad

Es la región en la que el metal (Me), es termodinámicamente estable, éste no solo no será atacado, sino que si en el medio corrosivo hubieran iones del mismo metal (Me^{2+}) estos tenderán a depositarse. En esta región el metal no sufrirá corrosión alguna, estando libre de reacciones químicas que le dan origen, la zona de inmunidad se presenta para cualquier nivel de pH (ácido, neutro o básico), pero asociado a un nivel de tensión de electrodo máximo.

Zona de Pasivación

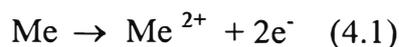
Corresponde a las zonas de formación de productos sólidos que retardan la posterior corrosión, este fenómeno se explica por la formación de una fina película de óxido sobre la superficie metálica. La pasivación puede lograrse aplicando una corriente exterior o usando un oxidante, para hacer que el metal adquiera un potencial superior al potencial de pasivación, llamado potencial de Flade [2].

Zona de Corrosión

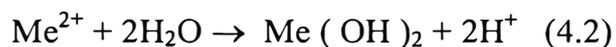
Corresponde a las zonas de formación de compuestos solubles, donde la tendencia es a la disolución del metal; en esta zona del diagrama, las fases estables son especies disueltas por lo cual el metal tenderá a transformarse totalmente en tales especies. Se presenta generalmente para valores de pH pequeños y grandes (ácido ó básico), asociados también a valores mínimos de tensión de electrodo. Las regiones antes descritas están delimitadas por líneas horizontales, verticales y oblicuas:

Las líneas horizontales corresponden a reacciones en que hay intercambio de electrones

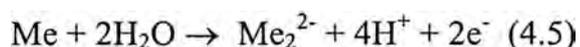
independientes del pH, con reacciones típicas:



Las líneas verticales corresponden a las reacciones dependientes del pH, pero independientes del potencial; las reacciones típicas son:



Las líneas oblicuas de los diagramas de Pourbaix, son aquellas que dependen a la vez del potencial y del pH pueden presentar diversas pendientes; las reacciones típicas son:



4.1. - El Cobre

Material metálico no ferroso de amplio uso industrial por sus características de alta conductividad eléctrica, térmica, facilidad para maquinabilidad y fabricación; generalmente se presenta en aleaciones con otros metales en porcentajes variables que le confieren características especiales como por ejemplo, el cobre arsenical que contiene 0.3% de arsénico confiriéndole alta resistencia a la corrosión para ciertas aplicaciones especiales como en intercambiadores de calor.

4.1.1. - Propiedades y Características Generales del Cobre

El cobre es un metal que tiene una serie de propiedades, que permiten un amplio uso en la industria, sus propiedades de: alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, maquinabilidad, resistencia y facilidad de fabricación, además de sus propiedades no magnéticas, y su atractivo color, fácil soldabilidad; permiten su aplicación en: tuberías, empaques para automóvil, radiadores, cubas, recipientes de presión, equipos para destilería y otros procesos. La mayor parte del cobre que se utiliza para conductores eléctricos contiene 99.9% de cobre y se identifica ya

sea como cobre electrolítico resistente al depósito de grasa(típico del cobre) (ETP) o como cobre libre de oxígeno de alta conductividad (OFHC). El cobre electrolítico contiene de 0.02 a 0.05% de oxígeno, el cual se combina con el cobre en forma de compuesto óxido cuproso (Cu_2O).

En la condición de fundido (sin tratamiento térmico), el óxido de cobre y el cobre forman una mezcla interdendrítica eutéctica, como se puede apreciar en la siguiente figura.

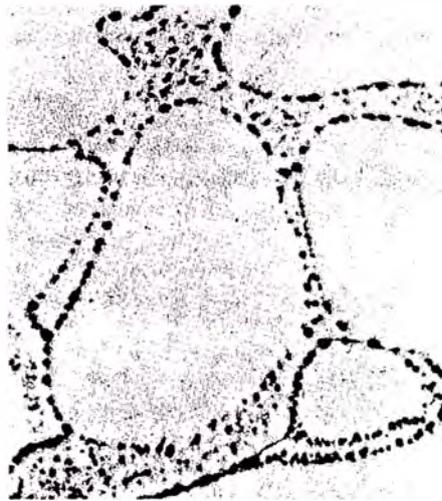


Fig. N° 4.1: Mezcla ínter dendrítica eutéctica de cobre y óxido de cobre (Ligeramente atacado con dicromato de sodio, 500x) [1]

4.1.2. - Comportamiento Termodinámico del Cobre

El cobre presenta dos zonas de corrosión asociadas a los medios ácidos y alcalinos fuertes; puede ser atacado lentamente por las sales de amoníaco (presentes en las tierras de cultivo), por cloruros, sulfuros y agentes oxidantes, presentando una zona de pasivación marcada entre los límites de $7.5 < \text{pH} < 11.5$, en esta zona una capa protectora de Cu_2O , protege al metal, para cualquier valor de potencial de electrodo

En la zona ácida con un $\text{pH} < 5.4$, el límite de la corrosión es una línea horizontal a aproximadamente 0.15 voltios, al incrementarse el pH, la línea cambia de dirección, formándose una capa de Cu_2O , que protege completamente al metal de la solución y de la

destrucción, siempre que esta capa este adherida y no sea porosa, adicionalmente se forma $\text{Cu}(\text{OH})_2$ y CuO .

Para la zona alcalina con un $\text{pH} > 11.6$, los hidróxidos y los óxidos se disuelven originando una nueva zona de corrosión la cual se incrementara con un aumento del pH aun cuando el potencial de electrodo sea menor a 0.15 voltios.

La nobleza del cobre se comprueba por su inmunidad a la corrosión para valores de potencial de electrodo menores a 0.15 voltios y para cualquier tipo de concentración del electrolito en el rango de $0 < \text{pH} < 14$, asimismo el cobre es estable en presencia del agua, pues no se corroe liberando hidrógeno (H_2), para soluciones con pH neutro.

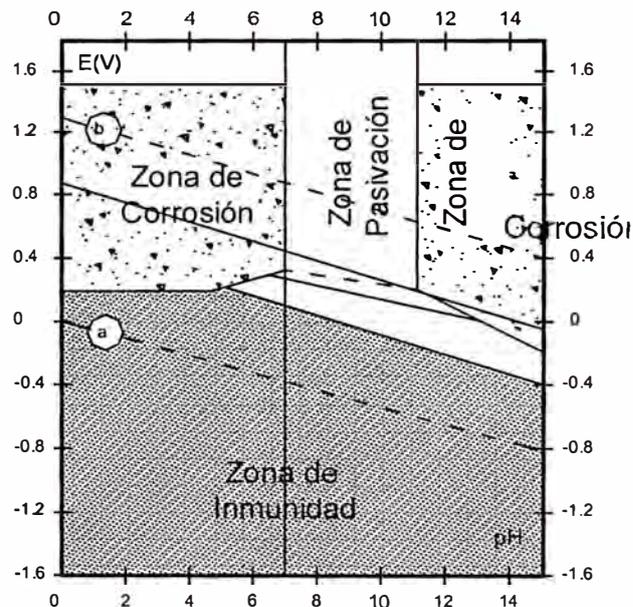


Fig. N° 4.2: Diagrama de Pourbaix, de Comportamiento del Cobre en Soluciones Acuosas (Capa Pasivante Cu_2O) [10].

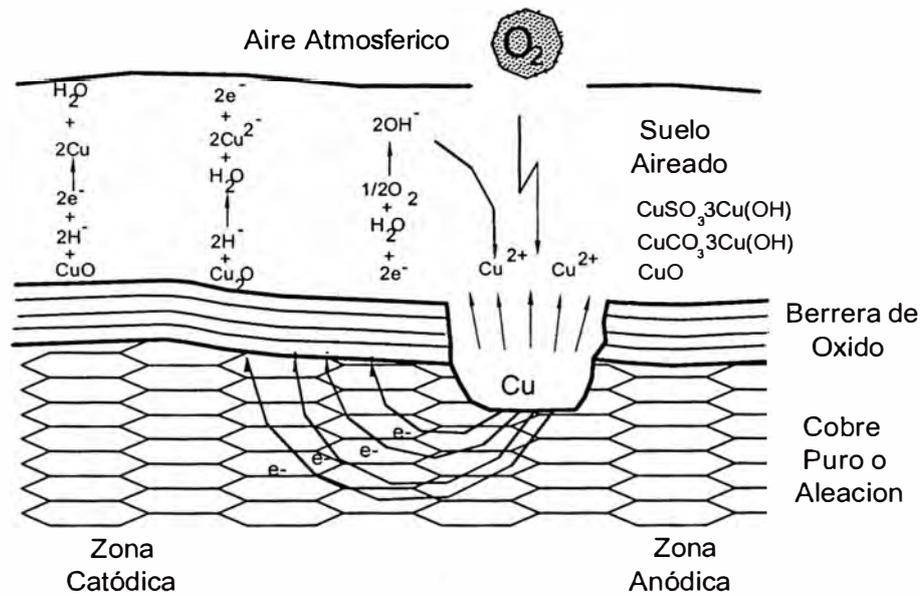


Fig. N° 4.3: Corrosión en la Superficie de un Electrodo de Cobre como Puesta a Tierra [10].

4.2. - El Hierro

El hierro es un constituyente fundamental de algunas de las más importantes aleaciones de la Ingeniería. En su forma casi pura, conocida como hierro dulce, se utiliza en alcantarillas, material para techos y conductos.

4.2.1. - Propiedades y Características Generales del Hierro

El hierro es un metal alotrópico, lo cual significa que puede existir en más de un tipo de estructura reticular, dependiendo de la temperatura, lo cual se puede apreciar en la curva de enfriamiento del hierro puro figura adjunta.

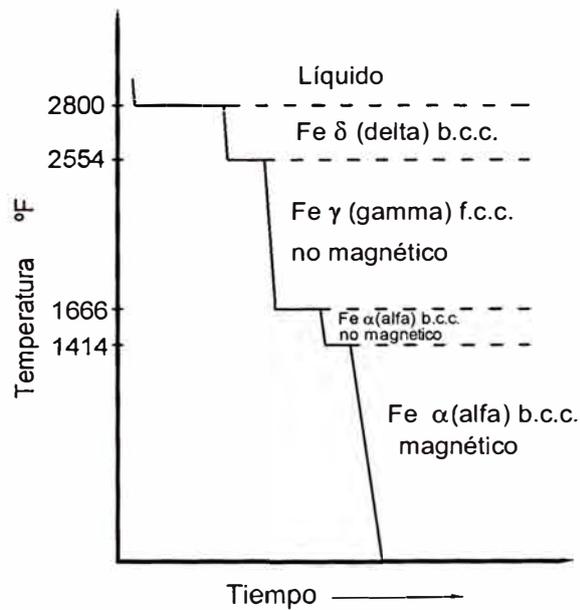


Fig. N° 4.4: Curva de enfriamiento del hierro puro [1]

El hierro dulce normalmente tiene la siguiente composición: carbono 0.012%, manganeso 0.017%, fósforo 0.005%, azufre 0.025%.

Las propiedades mecánicas típicas del hierro dulce son:

- Resistencia tensil: 40000 lb / pul²
- Elongación en 2 pulg. : 40%
- Dureza Rockwell B: 30

La ductibilidad del hierro depende del porcentaje de carbono que este contenga para un porcentaje, menor a 2%, se le denomina acero y para un porcentaje entre 2 al 6.67% se le denomina hierro fundido, lo cual se puede apreciar en el diagrama de equilibrio hierro – carbono de la siguiente figura.

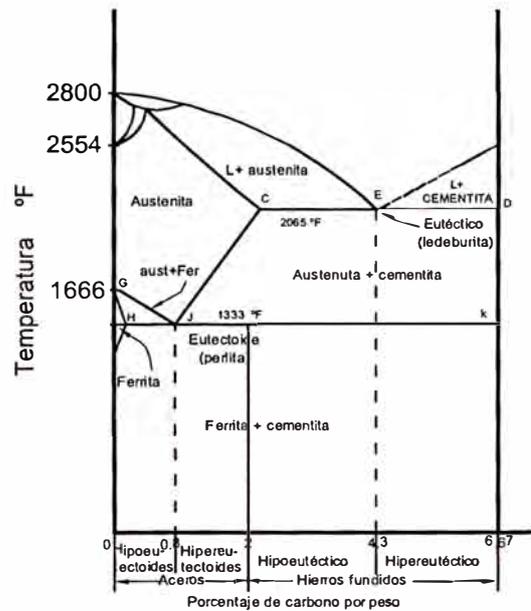


Fig. N° 4.5: Diagrama de Equilibrio hierro – carburo de hierro [1].

La ductilidad del hierro fundido es muy baja y éste no puede laminarse, estirarse o trabajarse a temperatura ambiente; aunque los hierros fundidos comunes son frágiles y tienen más bajas propiedades de resistencia que la mayoría de los aceros, son baratos, pueden fundirse más fácilmente que el acero y tienen otras propiedades útiles.

4.2.2. - Comportamiento Termodinámico del Hierro

Al ser inestable en presencia del agua, se produce corrosión en soluciones acuosas oxigenadas o no, liberando hidrógeno, estas reacciones son fuertes en medios ácidos y se moderan con el aumento del pH del electrolito, hasta cesar en el intervalo de 10 – 13, en el que el metal se cubre de una capa de óxidos protectores

Para valores de $\text{pH} > 13$, las soluciones libres de los agentes oxidantes resultan nuevamente corroídas, como se puede apreciar en la gráfica adjunta.

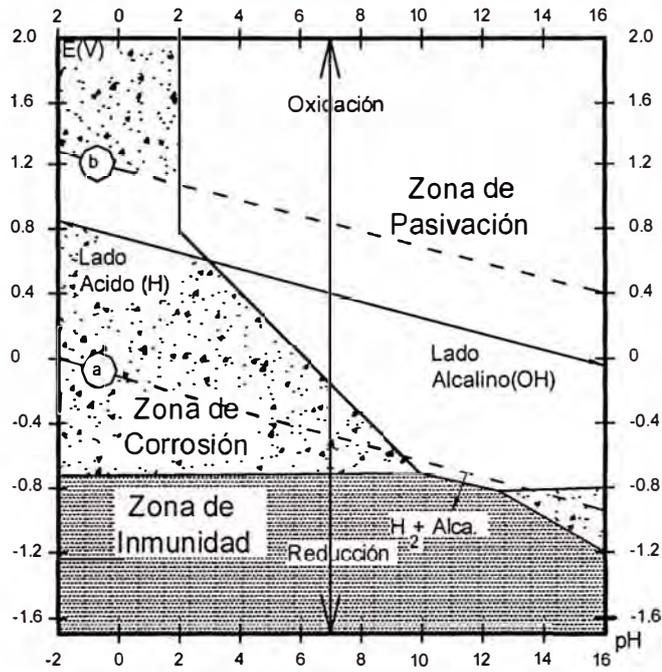


Fig. N° 4.6: Diagrama de Pourbaix simplificado del Comportamiento del Hierro en Soluciones acuosas (Capa Pasivante Fe_2O_3) [10].

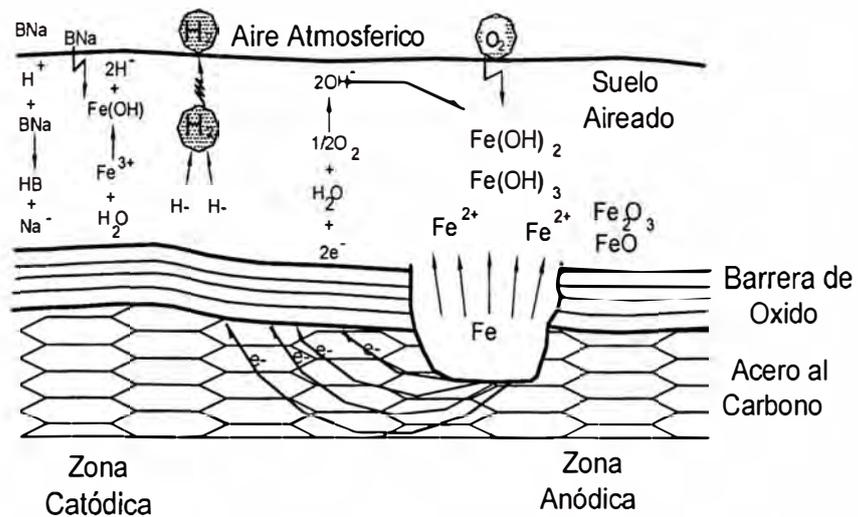


Fig. N° 4.7: Corrosión en la Superficie de un Electrodo de Acero Enterrado como Puesta a Tierra [10].

4.3. - El Aluminio

El aluminio es un metal no ferroso caracterizado por su ligero peso, siendo su densidad la tercera parte de la del acero o de las aleaciones de cobre, ciertas aleaciones del aluminio tienen mejor proporción resistencia / peso que la de los aceros de alta resistencia.

4.3.1. - Propiedades y Características Generales del Aluminio

El aluminio tiene buena maleabilidad y formabilidad, alta resistencia a la corrosión y gran conductividad eléctrica y térmica, en una de sus formas el aluminio ultra puro se utiliza para reflectores fotográficos con el fin de aprovechar sus características de reflectividad a la luz y de no-decoloración superficial; el aluminio asimismo no es tóxico ni magnético y no produce chispa. La característica no magnética hace al aluminio útil para diversos fines de protección eléctrica, como cajas para barras conductoras o cubiertas para equipo eléctrico.

Aunque la conductividad eléctrica del aluminio de la clase conductor eléctrico (EC) es como el 62 % que la del cobre, su peso ligero hace que sea más apropiado como conductor eléctrico para muchas aplicaciones industriales.

Una de las características más importantes del aluminio es su maquinabilidad y su capacidad de trabajado; el aluminio comercialmente puro, aleación 1 100 (99.0 % de aluminio), es adecuado para aplicaciones en las que se requiere buena formabilidad o gran resistencia a la corrosión.

4.3.2. - Comportamiento Termodinámico del Aluminio

Presenta dos zonas de corrosión, una en medio ácido y la otra en medio alcalino.

En la zona ácida para un $\text{pH} < 4$, el límite de la corrosión es una línea horizontal para aprox. -1.9 voltios, en esta zona se descompone el agua con evolución de Hidrógeno (H^-), disolviéndose en iones metálicos. Al incrementarse el pH para el intervalo de 4-9, el

electrodo se recubre con una capa protectora de Al_2O_3 , impidiendo esta capa que progrese la corrosión siempre y cuando se encuentre adherida al electrodo.

Para valores de $\text{pH} > 9$, al descomponerse el agua se disuelve en forma de iones de aluminato (AlO_2^-), incrementándose la corrosión con un aumento del pH aun para valores menores a -1.9 voltios de potencial de electrodo.

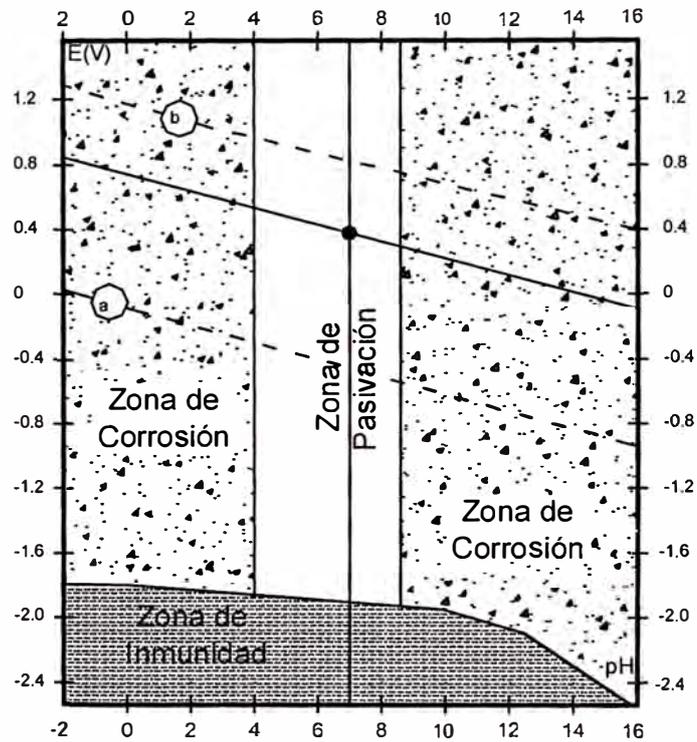


Fig. N° 4.8: Diagrama de Pourbaix Simplificado, del Comportamiento del Aluminio en Soluciones Acuáticas (Capa Pasivante Al_2O_3) [10]

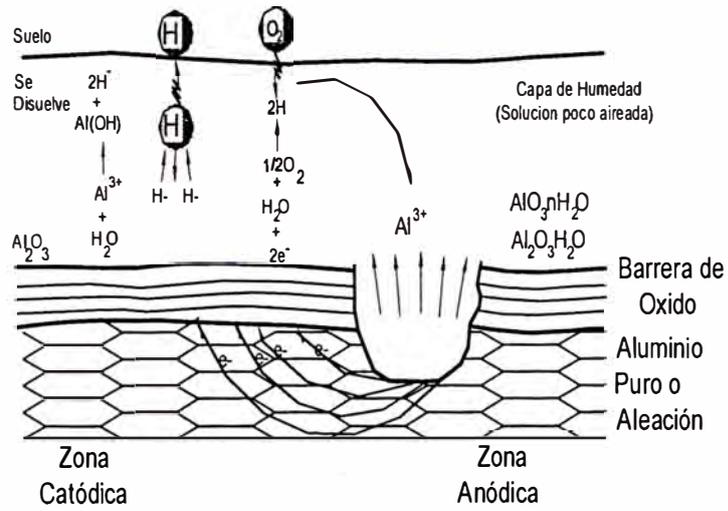


Fig. N° 4.9: Corrosión en la Superficie de un Electrodo de Aluminio Enterrado como Puesta a Tierra. [10]

CAPITULO V CONTROL DE LA CORROSIÓN EN EL SUELO

El control de la corrosión del suelo, esta ligada a la disminución de las corrientes de corrosión (corrientes que abandonan el electrodo), lo cual se contradice con el principio y objetivo de las puestas a tierra que es el de conducir y dispersar con la mínima resistencia las corrientes alternas o continuas, permanentes o erráticas.

Asimismo existen factores importantes que afectan la corrosión y que están ligadas estrechamente a los electrodos de puesta a tierra: el oxígeno disuelto en el suelo, la concentración de iones libres de hidrógeno y la humedad de existente en el entorno del electrodo.

Para un electrolito ácido con un $\text{pH} < 7$, el exceso de iones libres de hidrógeno la neutralizan de los electrones de la disolución del metal e incrementan la corriente de corrosión, originando de este modo una zona Anódica en la zona ácida del electrolito; como producto de la corrosión se forma una capa gaseosa de hidrógeno en la superficie catódica, esta capa limita el incremento de la corriente de corrosión al constituirse como una barrera aislante, sin embargo el oxígeno disuelto en el electrolito puede reaccionar con el hidrógeno formando agua que destruye la capa protectora permitiendo que la corrosión continúe al incrementarse las zonas catódicas con concentración elevada de oxígeno disuelto.

Por ello las alternativas para controlar la corrosión del electrodo de puesta a tierra y al mismo tiempo preservar las prestaciones eléctricas de los mismos son pocas.

5.1. - Uso de Materiales Resistentes a la Corrosión

Para los electrodos de puesta a tierra deben usarse metales nobles o catódicos de esta manera se tendrán niveles altos de tensión de electrodo, con lo cual disminuye la posibilidad de corrosión; los metales que pueden usarse son: el cobre, el hierro, ó aleaciones de níquel.

5.2. - Utilización de Rellenos Adecuados

El relleno del entorno del electrodo de puesta a tierra debe ser homogéneo, estable en cuanto a su nivel de iones libres de hidrógeno (pH), de preferencia neutro-alcalino, que debe ser mezclada con agregados neutros como la bentonita que es un compuesto con propiedades conductivas, aglutinantes y selladoras, limitando la migración de sales corrosivas hacia el metal.

5.3. - Protección Catódica

Es procedimiento consiste en la inyección al suelo mediante un electrodo de sacrificio de una corriente de mayor magnitud y de sentido contrario que la corriente de corrosión, esto es aplicable para suelos de baja resistividad y cuando se emplean materiales electronegativos.

CONCLUSIONES

1. - Para obtener una puesta a tierra estable con alta capacidad de dispersión de corriente, se debe utilizar un electrodo resistente a la corrosión enterrado en un relleno neutro y conductivo, el Cobre presenta un comportamiento superior al de los metales de optimo desempeño como el Acero resistente a la corrosión.
2. - Para evitar las celdas de macocorrosión se debe rellenar la instalación con un relleno de un solo tipo de mezcla, de esta manera la resistencia a lo largo de la longitud del electrodo será uniforme, la modalidad tradicional de aplicar rellenos por capas superpuestas de materiales o mezclas diferentes debe evitarse
3. - Se deberá evitar la instalación de electrodos de diferente material, por ello todas las ampliaciones se realizaran con el mismo material, este concepto se amplia a la presencia de tuberías de acero que estando conectadas a electrodos de cobre o cerca de ellos pueden sufrir corrosión acelerada.
4. – En la medida de lo posible deberá emplearse electrodos de cobre pues debido a sus características de: metal noble y la formación de una capa protectora muy dura, lo hacen muy resistente a la corrosión, sobre todo si no están sometidos a deformaciones o esfuerzos de tracción o a cambios bruscos de temperatura
5. – La instalación del electrodo así como de sus empalmes, deberá reducir en lo posible las zonas con diferente concentración de oxígeno así como sollicitaciones mecánicas permanentes o concentradas, para evitar la formación de zonas anódicas y catódicas; los empalmes y uniones deben hacerse con soldadura de alta temperatura de fusión (700°C)

6. – Para aplicaciones donde se requiere alta confiabilidad de las puestas a tierra, se podría emplear electrodos de grafito rígido, al tratarse de un electrodo constituido enteramente por grafito, tiene una baja velocidad de desgaste por corrosión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AVNER. Introducción a la Metalurgia Física.
- [2] GALVELE R. JOSÉ. Corrosión, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C.- 1979.
- [3] P. GORDON, Trans-AIME, vol.203, pág.1043, 1955.
- [4] THE INTERNATIONAL NICKEL COMPANY.
- [5] FÁBRICA ARGENTINA DE CONDUCTORES BIMETÁLICOS S.A., Jabalinas Acero- Cobre, IRAM 2309.
- [6] PROCAINSA, S.A., Sistemas de Puesta a Tierra
- [7] RESUMEN DE NORMAS TÉCNICAS PERUANAS (NTP) DEL SISTEMA DE CONEXIÓN A TIERRA
- [8] J. YANQUE M., ¿Cómo Incide la Agresividad del Suelo en los Electrodo de Aterramiento?, ElectroRedes 98 N° 2, Lima 1998.
- [9] J. YANQUE M., ¿Qué Parámetros del Entorno Participan en la Elección del Material de los Conductores?, ElectroRedes 97 N° 1, Lima 1997.
- [10] J. YANQUE M., Corrosión en Electrodo de Puesta a Tierra, Conferencia Internacional ACIEM – Colombia, Puestas a Tierra, Bogotá 28 – 30 Junio 2001
- [11] OTERO HUERTA. ENRIQUE, Corrosión y degradación de materiales, Editorial Síntesis, S.A., Septiembre 2001