



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

**EFFECTO DE LA SALINIDAD EN SUELOS  
ARCILLOSOS EN TUBERÍAS DE ACERO GRADO B  
DE ALTA TEMPERATURA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERIA**

MECANICA-METALMECANICA

P R E S E N T A :

**LIC. CARIÑO RUIZ CAMARGO**

A S E S O R A :

**DRA. MA. FRIDA LEÓN RODRÍGUEZ**

2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## AGRADECIMIENTOS

*A todas aquellas personas que de alguna forma participaron en la realización de este trabajo, especialmente a los miembros del jurado:*

*Dr. Vladimir Tchijov*

*Dr. Armando Aguilar Márquez*

*Dra. León Rodríguez Frida María*

*M. I. José Juan Contreras Espinosa*

*M. I. Jesús García Lira*

*Por la paciencia, la atención, el cuidado, y las sugerencias hechas a este trabajo de tesis.*

*A la **Dra. Frida Ma. León** y al **Dr. Armando Aguilar**, por la ayuda otorgada y sobre todo por el apoyo incondicional que me concedieron durante mis estudios en la UNAM.*

*A todas las personas que me facilitaron tanto las instalaciones correspondientes para el desarrollo del trabajo experimental, como su experiencia profesional y su atención. Un agradecimiento especial al **Dr. Edvino J. Vega** por su amable colaboración. A los encargados de las instalaciones del laboratorio de Edafología, de la FESC –C 4, a los encargados del laboratorio de Corrosión que se encuentra en el CAT.*

*A mis amigos y compañeros que me apoyaron y ayudaron en todo momento.*

*A mis padres **Manuel Ruiz Morales** y **Josefa Camargo Romero** y a mi hermana **Tonantzi Ruiz Camargo**, por todo el apoyo y la confianza que siempre me dieron y que nunca dudaron en dar. Por la paciencia y el cariño que han mantenido durante todos los años de mi vida, a ellos GRACIAS.*

## **INTEGRACIÓN DEL JURADO:**

Presidente: Dr. TCHIJOV VLADIMIR

Secretario: Dr. AGUILAR MÁRQUEZ ARMANDO

Vocal: Dra. LEÓN RODRÍGUEZ FRIDA MARÍA

1<sup>er</sup>. Suplente: M. I. CONTRERAS ESPINOSA JOSÉ JUAN

2<sup>do</sup>. Suplente: M. I. GARCÍA LIRA JESÚS

Lugar donde se realizó la tesis:



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN**

**ASESORA DE TESIS:**

**DRA. LEÓN RODRÍGUEZ FRIDA MARÍA**

## ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRAC	2
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	6
HIPÓTESIS	6
JUSTIFICACIÓN	7
1. CORROSIÓN METÁLICA	8
1.1 Clasificación de la Corrosión	8
1.1.1 Clasificación según el Medio	9
1.1.2 Clasificación según la Forma	9
1.2 Corrosión Electroquímica	11
1.3 Procesos de la Corrosión Electroquímica	13
1.4 Ecuación de Tafel	15
1.5 Potencial de Electrodo	19
1.6 Potencial Electroquímico	20
1.7 Curvas de Polarización	22
1.8 Pasividad de los Metales	24
1.9 Costos de la corrosión.	25

2.	TIPOS DE SUELOS Y SUS PROPIEDADES	28
2.1	Tipos de Suelos	28
2.2	Clasificación de los suelos	28
2.3	Propiedades de los suelos	30
3.	CORROSIÓN EN SUELOS	34
3.1	Propiedades Físicas y Químicas de los Suelos	34
3.2	Tuberías Enterradas	39
3.2.1	Corrosión en tuberías Enterradas	40
3.2.2	Corrosividad Absoluta y Relativa	42
3.2.2.1	Corrosividad absoluta	42
3.2.2.2	Corrosividad Relativa	42
3.3	Corrosión Galvánica en Suelos	43
3.4	Corrosión por Corrientes Vagabundas	44
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	48
4.1	Extracción del Suelo	49
4.1.1	Procedimiento	49
4.2	Preparación de las Probetas	52
4.2.1	Procedimiento	52
4.3	Preparación de las Soluciones Salinas y las Mezclas de Suelo	54
4.3.1	Procedimiento	54
4.4	Montaje del Experimento	55
4.4.1	Procedimiento	55
5.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	58
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	95

7.	CONCLUSIONES	100
8.	BIBLIOGRAFÍA	102
	REFERENCIAS	104
	ÍNDICE DE FIGURAS	105
	ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS	108
	ÍNDICE DE GRÁFICAS	111

## RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa el efecto de la salinidad de suelos arcillosos, en la corrosividad de placas de acero grado B de alta temperatura, tomadas de una sección de tubería normalmente utilizada en los sistemas de transporte subterráneo de agua, gas y derivados del petróleo en la industria petroquímica.

Para determinar el efecto de la corrosión debido a la textura y la salinidad en los sistemas de tubería utilizados en México. Se midió la velocidad mediante la exploración de Curvas Tafel, las cuales se obtuvieron en el potenciostato Gamry Framework. Se utilizaron tres tipos de fertilizantes (Sulfato de Amonio, Triple 17 y Urea) para variar la salinidad del suelo, con dos tamaños de grano del suelo arcilloso. El suelo se tomó de la zona agrícola ubicada en la FESC – Campo 4, una zona aledaña a un sistema de tuberías enterrado y se preparó para su uso en laboratorio, tamizándolo y desecándolo.

Las mezclas de suelo/solución utilizadas en los experimento se prepararon al punto de saturación con soluciones al 1% de concentración. Las placas se expusieron durante 15 minutos dentro de la mezcla de suelo/solución, en tres variantes, utilizando la superficie con el recubrimiento exterior del tubo, la superficie con el recubrimiento interior del tubo y por último la superficie sin recubrimiento.

## **ABSTRAC**

In the present work is evaluated the effect of the salinity of clay soils, in the corrosiveness of badges of steel grade B of high temperature, taken of a pipe section usually used in the systems of transport underground of water, gas and derived of the petroleum in the petrochemical industry.

To determine the effect of the corrosion due to the texture and the salinity in the pipe systems used in Mexico. The rate was measured by means of the exploration of Curved Tafel, which were obtained in the potenciostato Gamry Framework. Three types of fertilizers were used (Sulfate of Ammonium, Triple 17 and Urea) to vary the salinity of the soil, with two sizes of grain of the clay soil. The soil took of the agricultural area located in the FESC - Field 4, a neighboring area to a buried system of pipes and he/she got ready for its use in laboratory, sifting it and drying up it.

The soil/solution mixtures used in the experiment got ready to the saturation point with solutions to 1% concentration. The badges were exposed during 15 minutes inside the soil/solution mixture, in three variants, using the surface with the external recover of the tube, the surface with the interior recover of the tube and lastly the surface without recover.

## **INTRODUCCIÓN:**

La necesidad del ser humano por crear herramientas y objetos para su protección y sustento lo llevó al descubrimiento de los metales. Mediante un proceso “antinatural” ha extraído los minerales que la naturaleza le ha proporcionado y ha encontrado la forma de crear utensilios y herramientas que con gran éxito ha empleado hasta nuestros días, muchos de los materiales que se usan para vestir, construir y proteger estructuras, viviendas y transportes, para conservar y empacar alimentos y producir los incontables bienes que abundan en las ciudades están hechos de metal. Sin embargo, el hombre se dio cuenta casi instantáneamente de los problemas que trajo consigo este descubrimiento, desde los grandes costos que se requieren para transformar los minerales en metales, hasta los enormes gastos que debe hacer para mantener dichos metales en uso. Estimaciones aseguran que una quinta parte del hierro que se utiliza se pierde cada año por la corrosión, lo que supone una pérdida económica para los consumidores además de un gasto excesivo de los depósitos de mineral que conduce a su agotamiento. Algo se tenía que pagar por ir en contra del proceso espontáneo de la degradación metálica, imposible de detener en la biosfera terrestre. Ya que los metales se degradan inevitablemente con el tiempo de muy diversas formas y dejan de ser funcionales, perdiendo sus propiedades físicas y mecánicas, inclusive algunos simplemente se disuelven en su totalidad en el medio que los envuelve [1].

El motivo principal para el estudio de la corrosión y los problemas relacionados con ello está determinado por el factor económico. Las pérdidas económicas se dividen en

pérdidas directas e indirectas, las pérdidas directas se deben a los costos originados por el reemplazo de estructuras y maquinarias o sus componentes corroídos, incluyendo la mano de obra. Las pérdidas directas incluyen el costo extra de usar metales resistentes a la corrosión y aleaciones en lugar de acero al carbón, donde este último tiene propiedades mecánicas adecuadas pero no suficiente resistencia a la corrosión. Se añaden también costos de galvanización o níquel-platinado del acero, costos de adicionar al agua, si es necesario, inhibidores de la corrosión o de humidificar cuartos de almacenaje para equipo metálico.

Dentro de las pérdidas indirectas se pueden considerar: los paros que a menudo se efectúan en una planta para reparación o mantenimiento, las pérdidas que implican por si mismas el mantenimiento y las reparaciones, las pérdidas del producto que las tuberías y tanques de almacenamiento corroídos ocasionan, pérdidas por la ineficiencia del equipo, tuberías, estructuras, etc., las debidas a contaminación del producto, sobrediseño de las instalaciones, efectos por seguridad y confiabilidad, etc. La cuestión de pérdidas de salud o de la vida a causa de una explosión, falla impredecible de algún equipo químico; accidentes de aviones o autos a través de fallas repentinas por corrosión de partes críticas, es hoy en día un problema muy serio. Las pérdidas indirectas por este tipo de problemas son muy difíciles de valorar y están más allá de la interpretación en dinero.

Sin embargo, el hombre desarrolla grandes esfuerzos para evitar que los metales se deterioren, sobre todo aquellos que son de uso industrial básico para la sociedad, cuando los metales se combinan con otros elementos activos tales como el oxígeno, el azufre y el cloro, la mayoría en su estado más puro son inestables en muchos de los ambientes en los que se encuentran como el agua del mar, salmueras, la atmósfera, las soluciones ácidas, neutras o alcalinas y muchos otros ambientes ocasionan que el metal se degrade o deteriore hacia su forma más estable, similar a la de los minerales.

Las tuberías desprotegidas, enterradas bajo tierra, expuestas a la atmósfera o sumergidas en agua son susceptibles a la corrosión. La corrosión es la principal causa de fallas en tuberías alrededor del mundo. Cuando una tubería falla, ocasiona grandes impactos en términos de pérdidas de producción, daños a la propiedad, contaminación y riesgo a vidas humanas (como ya se mencionó anteriormente). Sin el apropiado mantenimiento, cualquier sistema de tuberías eventualmente puede deteriorarse. La corrosión puede debilitar la integridad estructural de la tubería y convertirla en un vehículo inseguro de transporte de fluidos. Son muy numerosas las estructuras metálicas que se encuentran enterradas en el suelo: tuberías de agua y de gas, oleoductos, cables eléctricos y telefónicos con vaina metálica, anclajes de postes metálicos de tendido eléctrico, etc., [2] por lo que, el estudio de la corrosión en tuberías enterradas se vuelve en esencia importante.

Debido a que el suelo engloba cualquier material sólido con el que habitualmente suelen estar en contacto las estructuras metálicas enterradas, es difícil hacer una generalización del comportamiento que tiene respecto a la corrosión. El suelo es un sistema capilar, poroso y a menudo coloidal, sus poros están llenos de aire y de humedad donde el agua puede tener diferentes formas de ligazón: físico – mecánica (agua de los poros o agua bajo forma de película sobre la pared de los poros) o físico - química (formación de hidratos de compuestos químicos) [2]. Las investigaciones que actualmente se llevan a cabo son relativamente pocas, y en general se cree que la solución al problema está en encontrar recubrimientos más apropiados para las estructuras y tuberías, y no hacen un estudio a fondo de lo que ocurre realmente en el suelo. Estudiar el comportamiento de la corrosión *in situ*, es un trabajo que lleva decenas de años en desarrollarse, por lo que en esta ocasión se realizó dicha investigación en el laboratorio utilizando un potenciostato, debido a que la corrosión en tuberías enterradas se realiza mediante un proceso electroquímico.

## **OBJETIVOS**

- Determinar el efecto de la salinidad del suelo en tuberías de acero enterradas en suelos arcillosos.
- Medir la velocidad de corrosión de placas metálicas de una sección de oleoductos de alta temperatura grado B, mediante curvas Tafel.
- Comparar la rapidez de corrosión entre diferentes tipos de salinidad del suelo.
- Comparar el efecto de las diferentes salinidades de suelos arcillosos en la corrosión de tuberías utilizadas en el sector petroquímico e industrial.
- Evaluar los recubrimientos anticorrosivos aplicados en los ductos.

## **HIPÓTESIS**

La velocidad de corrosión es afectada por la salinidad del suelo en tuberías enterradas, el contenido de las diferentes sales en el suelo pueden aumentar o disminuir la corrosividad, al combinarse ésta con otros factores, como la humedad, el pH, textura etc. Si se mantienen constantes todas las otras variables, dejando como única variable a la

salinidad, se pueden conocer los efectos que las sales provocan en la velocidad de la corrosión.

Considerando que la salinidad influye en la corrosividad del suelo, esperamos que al variar el tipo de sal añadida en forma de fertilizante, se presente una variación en la velocidad de corrosión.

## **JUSTIFICACIÓN**

La corrosión hoy en día es un problema que ocasiona pérdidas económicas importantes, los estudios y avances tecnológicos no han resuelto todos los problemas que existen. Sobre todo cuando se habla de corrosión en suelos, ya que el suelo es un medio muy inestable en el que intervienen diversas variables que afectan de forma combinada a la corrosividad. Las estructuras metálicas y tuberías en general, se desgastan con el tiempo inevitablemente, el problema real es que no se sabe con anterioridad cuando se deben reemplazar, ya que un cambio inadecuado en el sistema ocasionaría costos innecesarios o bien accidentes que pudieron prevenirse.

La corrosividad de un suelo depende de la humedad, acidez o alcalinidad, salinidad, etc, siendo esta última una variable que puede ser alterada por el ser humano al fertilizar los campos de cultivo, por ello la salinidad natural del suelo que en un principio no hubiera afectado fuertemente a la corrosión de una tubería, se acelera cuando se fertiliza el campo de cultivo. Por lo que, es importante hacer un estudio para determinar los efectos de la salinidad en placas metálicas comúnmente utilizadas como conductos de productos petroquímicos que recorren grandes superficies de nuestro país.

# 1. CORROSIÓN METÁLICA

La corrosión metálica es el desgaste superficial que sucede cuando los metales se exponen a ambientes reactivos [3]. Es decir, la corrosión es la tendencia que tienen los metales a volver al estado combinado original en que se encontraban en la naturaleza. La mayoría de los metales que se encuentran en contacto con el medio ambiente son termodinámicamente inestables, al reaccionar se convierten en óxidos, si bien la velocidad del deterioro es baja, el metal se ve afectado con el tiempo.

## 1.1 CLASIFICACION DE LA CORROSION

La corrosión metálica, en esencia, consiste en dos procesos de transferencia de electrones en lugares diferentes de la estructura metálica, los procesos anódicos y los catódicos. El proceso de corrosión implica una generación y transferencia del catión metálico a la solución, una transferencia del oxígeno al cátodo metálico, una transferencia electrónica del metal al oxígeno, del paso de los electrones del ánodo al cátodo (proceso llamado electro neutralidad metálica) y de una difusión de los iones  $Fe^{2+}$  y  $OH^-$  en el medio (también llamado electro neutralidad iónica). Por lo que los mecanismos de protección se enfocan en disminuir este proceso lo más posible.

Los procesos de corrosión pueden ser clasificados según el medio en el que se desarrollan o según su morfología.

### 1.1.1 Clasificación según el Medio

*Corrosión química:* Se estudian bajo esta denominación todos aquellos casos en que el metal reacciona con un medio no iónico (por ejemplo, la oxidación en aire a alta temperatura, reacción con una solución de yodo en tetracloruro de carbono).

*Corrosión electroquímica:* Considerados desde el punto de vista de la participación de iones metálicos, todos los procesos de corrosión son electroquímicos. Sin embargo, es usual designar corrosión electroquímica a la que implica un transporte simultáneo de electricidad a través de un electrólito. A este importante grupo pertenecen la corrosión en soluciones salinas y agua de mar, la corrosión atmosférica, la corrosión en suelos, etcétera, [4].

### 1.1.2 Clasificación según la Forma

La clasificación según el medio es útil cuando se estudian los mecanismos de ataque; sin embargo si se quiere evaluar los daños producidos por la corrosión, resulta muy conveniente la clasificación según la forma.

- *Corrosión uniforme:* Es la forma más benigna. Consiste en un ataque homogéneo en toda la superficie. Existe igual penetración en todos los puntos. Se puede calcular la vida útil de los materiales expuestos.

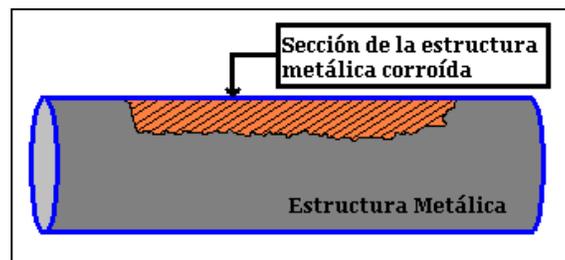


Figura 1.1. Corrosión uniforme.

- *Corrosión en placas*: Es un caso intermedio entre la corrosión uniforme y la corrosión localizada. Ocurre un ataque general pero más extenso en algunas zonas.

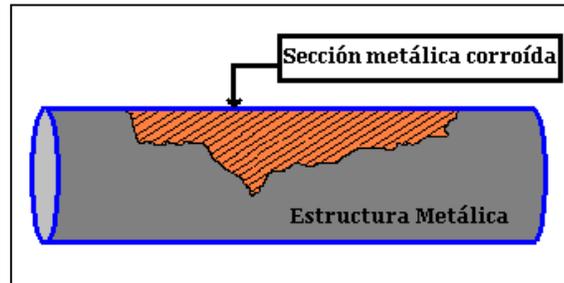


Figura 1.2. Corrosión en placas.

- *Corrosión por picadura*: Este tipo de ataque, así como el intergranular y el ataque figurante, son las formas más peligrosas. El ataque no es proporcional a la magnitud de los daños que puede llegar a causar. El ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas y se propaga al interior del metal. En ocasiones por túneles microscópicos. Se presenta comúnmente como perforación de cañerías o tanques. Una variación de este tipo de corrosión es la *corrosión en rendijas* (“*crevice corrosion*”), se presenta en uniones e intersticios.

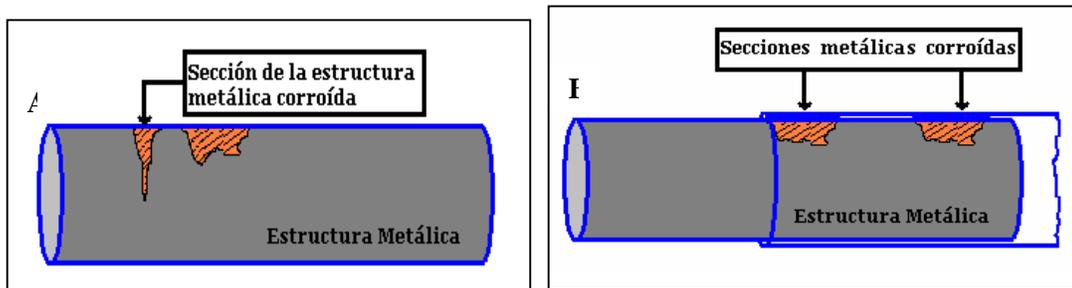


Figura 1.3. A. Corrosión por picadura B. Corrosión en rendijas (“*crevice corrosion*”).

- *Corrosión intergranular*: Se propaga a lo largo de los límites de grano. Se extiende hasta inutilizar el material afectado.

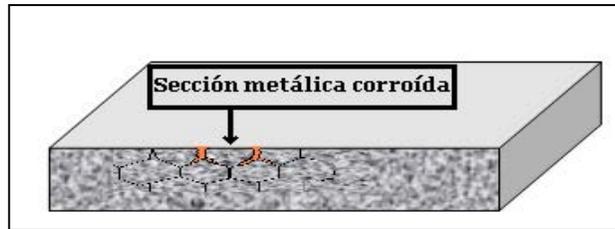


Figura 1.4. Corrosión intergranular.

- *Corrosión bajo tensión (o corrosión figurante)*: Ocurre cuando el metal es sometido simultáneamente a un medio corrosivo y a tensión mecánica de tracción. Aparecen fisuras que se propagan al interior del metal hasta que se relajan o el metal se fractura. La velocidad de propagación puede variar entre 1 y 10 mm/h.

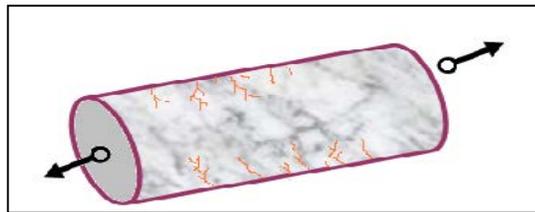


Figura 1.5. Corrosión bajo tensiones.

## 1.2 CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

Si exceptuamos la corrosión a temperaturas elevadas, que es un proceso estrictamente químico, los procesos restantes de corrosión son siempre de naturaleza electroquímica, en el que se trata de la formación de una pila, con una corriente eléctrica que circula entre determinadas zonas de la superficie del metal, conocidas con el nombre de ánodos y cátodos, y a través de una solución llamada electrólito capaz de conducir dicha

corriente. El funcionamiento de estas pilas o celdas electroquímicas da lugar a la corrosión de las zonas anódicas.

Una celda electroquímica es una combinación de tipo:

<b>Conductor electrónico</b> <i>(metal)</i>	<b>Conductor iónico</b> <i>(electrolito)</i>	<b>Conductor electrónico</b> <i>(metal)</i>
------------------------------------------------	-------------------------------------------------	------------------------------------------------

En la celda se dan los procesos electroquímicos con el paso de una corriente eléctrica. Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que tenemos una *celda galvánica o pila*. Si, en cambio, la celda electroquímica consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que tenemos una *celda electrolítica* [5].

El origen de las pilas de corrosión tiene lugar por el contacto de diferentes metales (par galvánico), diferencias en la estructura o propiedades de un mismo metal, o por diferencias en el electrolito, ya sea en sus características físicas como químicas (que afectan a las electroquímicas).

En una celda electroquímica, electrolítica o galvánica, se define al *ánodo* como el electrodo en el cual, o a través del cual, la corriente positiva pasa hacia el electrolito. El *cátodo* es el electrodo en el cual entra la corriente positiva proveniente del electrolito.

Donde, se toman como válidas las siguientes reglas:

- 1) La reacción anódica es una oxidación y la reacción catódica una reducción.
- 2) Los aniones (iones negativos) migran hacia el *ánodo* y los cationes (iones positivos) hacia el *cátodo*. Hay que hacer notar que particularmente en una celda galvánica, por ejemplo en una pila seca (Figura 1.6), la corriente positiva fluye del polo (+) al (-) en el

circuito externo, mientras que dentro de la celda, la corriente positiva fluye del (-) al (+) [5].

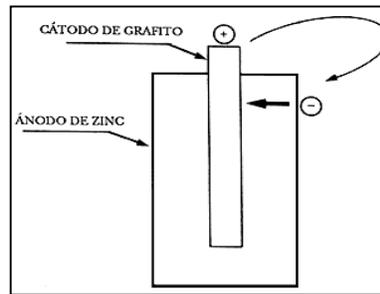


Figura 1.6. Dirección de la corriente positiva en una pila seca.

La hipótesis de que la corrosión es un proceso electroquímico surgió como resultado de los primeros trabajos con pilas galvánicas, donde se supuso que durante la corrosión actuaban micropilas en el metal. Fue Evans y Hoar en 1932, quienes demostraron que durante la corrosión se cumplen las leyes de Faraday [4].

### 1.3 PROCESOS DE LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

En los procesos de corrosión electroquímica, las corrientes circulan sobre el material expuesto, originando el ataque. Las causas más frecuentes son:

- El contacto de dos o más metales distintos (corrosión galvánica). Tal como ocurre con el aluminio en contacto con el cobre o con el grafito.
- Presencia de oxidantes en el medio, que causan la disolución electroquímica de un metal aun cuando éste sea puro, o esté aislado de otros metales.
- Presencia de capas de óxidos conductores de electrones, por ejemplo el óxido de laminación que se presenta en chapas de hierro.

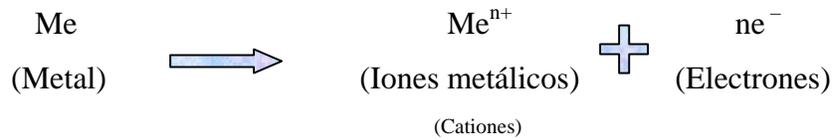
- Presencia de fases diferentes en una misma aleación, que ocurre en aceros inoxidable sensibilizados, en aleaciones de aluminio tratadas térmicamente.
- Diferentes grados de aireación de una pieza metálica, que se observa en las zonas donde escasea el oxígeno, estas zonas se comportan como ánodos cuando están unidas a otras zonas con buena aireación.

Otra causa frecuente son las corrientes vagabundas (especialmente las de corriente continua). Se trata de corrientes que circulan por el suelo, derivadas por ejemplo de la vía de los ferrocarriles electrificados, y que antes de volver a su circuito de origen se conducen por medio de un buen conductor, como por ejemplo una tubería de acero. Las zonas de entrada de corriente son catódicas mientras que las de salida son anódicas y por lo tanto se corroen. La velocidad de corrosión depende de la densidad de corriente anódica, disolviéndose el acero a razón de 9.1 Kg por cada amperio y año (ley de Faraday) [4].

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas) [5]. Esto es, cuando los átomos del ánodo se disuelven para formar los iones, los electrones que se liberan forman el ánodo negativo con respecto a la solución (realmente lo que se polariza negativamente es la capa de difusión entre el ánodo y el electrólito). Los electrones pasan al cátodo a través del metal y neutralizan los iones positivos. Por consiguiente, la corrosión es causada por los procesos simultáneos anódicos y catódicos.

Las reacciones que tienen lugar en las zonas anódicas y catódicas son las siguientes:

Reacciones en el *ánodo*:



Reacciones en el *cátodo*:



Evidentemente la transmisión de corriente, en las pilas de corrosión, es de corriente continua (los electrones en las partes metálicas del conductor y los iones en el electrolito). Aunque se está empezando a considerar la corrosión por corriente alterna, debido a las corrientes vagabundas alternas, o bien a corrientes de inducción, causadas por el paralelismo de conducciones de acero enterradas, con un buen revestimiento (aislamiento) con líneas eléctricas de alta tensión. Anteriormente no se consideraban debido a que la corriente alterna tiene un poder de corrosión muy pequeño si se compara con la corriente continua, pero el aumento en la calidad y el aislamiento de los revestimientos modernos (especialmente los epóxicos en polvo con polietileno extruído) hace que los contactos de las tuberías con tierra (es decir, los defectos del revestimiento) sean menores en cantidad y normalmente también en tamaño, con lo que la resistencia entre la tubería y el suelo es mayor y por lo tanto también el voltaje de las corrientes inducidas, provocando que en los pequeños defectos del revestimiento tengan lugar salidas de corriente alterna de gran densidad de corriente (relación corriente/superficie), y por tanto pueden causar daños por corrosión serios en las tuberías.

#### 1.4 ECUACIÓN DE TAFEL

Al sumergir un metal en una solución acuosa se inicia un intercambio continuo de iones metálicos entre la fase metálica y la fase acuosa [4]. En este tipo de estudios, donde se debe tomar en cuenta la cinética del proceso de disolución del metal, lo más elemental es

empezar con metales puros y desnudos, en los que la única reacción posible es la disolución metálica.

Los átomos metálicos en la superficie del metal están situados en pozos de energía asociados a la estructura reticular. Su paso a la solución exige cierta energía, llamada energía de activación (o energía libre), cuya función es facilitar la verificación del proceso por el cual el átomo se separa de la red, penetra en la capa de moléculas de agua en contacto con el metal y, rodeándose de éstas, constituye un catión metálico hidratado, que es el producto final de esta serie de reacciones [6]. La densidad de corriente de intercambio se produce con la disolución anódica y la precipitación de cationes cuando se desarrollan a una misma velocidad. La disolución de átomos metálicos de las irregularidades en la superficie se da predominantemente en los límites de grano, dislocaciones emergentes, semiplanos superficiales, etc., porque el número de enlaces es menor y su empaquetamiento es más irregular.

Si la energía libre para la formación del estado de transición a partir de la red y de la solución en calorías mol, correspondientes a la disolución anódica es  $\Delta G_A^*$  y la energía libre de la precipitación catódica es  $\Delta G_C^*$ , ambas en calorías mol, entonces la densidad de corriente de intercambio,  $i_0$  ( $A\ cm^{-2}$ ), es:

$$i_0 = L_A e^{\left(\frac{-\Delta G_A^*}{RT}\right)} = L_C e^{\left(\frac{-\Delta G_C^*}{RT}\right)} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde  $L_A$ ,  $L_C$  son constantes dimensionales.

Ahora si se aplica un potencial  $\eta$ , al metal que lo haga actuar de ánodo, el equilibrio se rompe (ver figura 1.7), y la relación de distancias  $\alpha$ , entre la distancia del estado de transición al pozo de energía/distancia total desde el pozo de energía en la red al pozo de energía en la solución hace que ocurra un cambio regular a lo largo de la distancia total y que el efecto de la sobretensión anódica se ejerza por completo sobre dicha distancia.

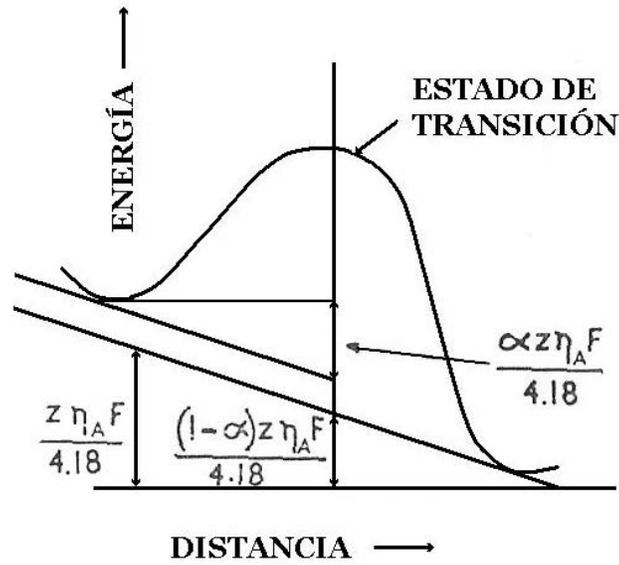


Figura 1.7. Relación energía/distancia en la superficie de separación metal/solución, al someterse a una sobretensión anódica  $\eta_A$ .

La inclinación del diagrama de energía libre se reparte entre las reacciones anódica y catódica en la proporción de  $\alpha/(1 - \alpha)$ . El cambio total de energía libre debido a la sobretensión aplicada se deduce de la ecuación general  $\Delta G = -zE_0F$ , haciendo el cambio del valor del potencial, resulta igual a  $z\eta_A F$  Julios y, por tanto,

$$\Delta G = \frac{z\eta_A F}{4.18} \text{ calorías.} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Si  $i_A$  es la densidad de corriente anódica aplicada en  $\text{A cm}^{-2}$  entonces:

$$i_A = L_A e^{\left( \frac{-\left[ \Delta G_A^* - \frac{\alpha z \eta_A F}{4.18} \right]}{RT} \right)} - L_C e^{\left( \frac{-\left[ \Delta G_C^* + \frac{(1-\alpha) z \eta_A F}{4.18} \right]}{RT} \right)} \quad \text{Ec. (1.3)}$$

Por tanto,

$$i_A = i_0 \left[ e^{\left( \frac{\alpha z \eta_A F}{4.18RT} \right)} - e^{\left( \frac{(1-\alpha) z \eta_A F}{4.18RT} \right)} \right] \quad \text{Ec. (1.4)}$$

Si el segundo término de la derecha es mucho más pequeño que el primero, por ejemplo,  $\alpha = 0.5$ ,  $z = 2$  y  $\eta_A > 0.025$  a temperatura ambiente.

$$i_A = i_0 e^{\left( \frac{\alpha z \eta_A F}{4.18RT} \right)} \quad \text{Ec. (1.5)}$$

Por tanto,

$$\eta_A = \frac{2.303 \times 4.18RT}{\alpha z F} (\log i_A - \log i_0) = \beta_A \log i_A + \beta_c \quad \text{Ec. (1.6)}$$

O bien,

$$\eta_A = \beta_A \log i_A + \beta_c \quad \text{Ec. (1.7)}$$

Donde

$$\beta_c = -\beta_A \log i_0 \quad \text{Ec. (1.8)}$$

Esta es la *ecuación de Tafel*, y  $\beta_A$ , la constante de Tafel para la reacción anódica [6]. Julios Tafel (1863 – 1919) la formulo en 1905 y es la ecuación más importante en cinética de electrodos, también llamada “La primera ley de cinética de electrodos” [7].

Los cambios de potencial del metal, conocidos como “polarización”, puede ser anódicos o catódicos. La aplicación de una corriente externa, puede provocar un cambio en la polarización, la representación del potencial  $\eta_A$  frente a la densidad de corriente aplicada constituye la curva de polarización. La figura 1.8 muestra una gráfica de Tafel típica, donde se observan las dos polarizaciones [8].

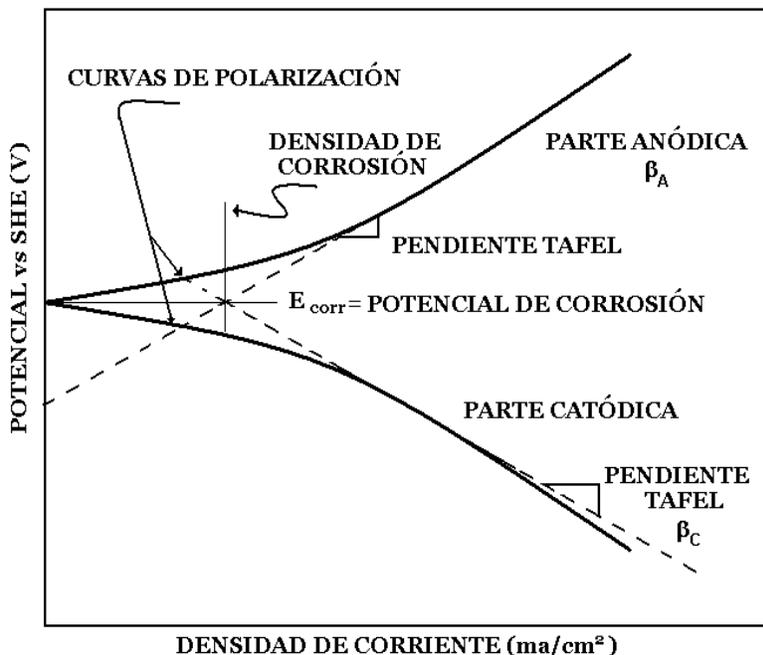


Figura 1.8. Diagrama de polarización Anódico y Catódico Típico.

Hasta que no se alcanza un valor de  $\eta_A > 0.025$ , la línea aparece curvada por representar una diferencia creciente entre la velocidad de disolución y la de precipitación del metal. En el caso de la polarización anódica, el término para la precipitación de metal se hace despreciable cuando  $\eta_A > 0.025$ . Para trazar la curva de polarización debe medirse el potencial  $E_i$  del electrodo metálico, correspondiente a la densidad de corriente aplicada  $i$ , que es la diferencia entre los procesos de disolución anódica y precipitación catódica,  $i = i_A - i_C$ . Por tanto,  $\eta_A = E_i - E_0$ , donde  $E_0$  es el potencial reversible [6].

### 1.5 POTENCIAL DE ELECTRODO

El potencial de electrodo es el que se establece entre un metal y una solución. Las variaciones en la diferencia de potencial pueden atribuirse al electrodo metálico que se investiga si el potencial del segundo electrodo no cambia, por ejemplo, cuando se trata de un electrodo de referencia. Se dispone de varios electrodos de referencia que son

constantes mientras no pase corriente por ellos, por ejemplo electrodos de grafito o platino. Entre un metal que está en contacto con una solución de sus iones de actividad unitaria y cualquier otro metal en las mismas condiciones se establece una diferencia fija de potencial [6]. La serie electroquímica de potenciales normales de electrodo, se obtuvo con las diferencias de potencial entre el metal y el hidrógeno, cuyo potencial se ha fijado arbitrariamente igual a cero, esta serie es de gran utilidad para comprender y predecir muchos fenómenos de corrosión.

Combinando los potenciales con datos de solubilidad de óxidos e hidróxidos y las constantes de equilibrio de estos compuestos, se obtienen los diagramas de Pourbaix, que proporcionan información sobre las fases termodinámicamente estables en función del potencial de electrodo y del pH.

## 1.6 POTENCIAL ELECTROQUIMICO

La energía libre de un sistema electroquímico varía al modificar la concentración iónica en la solución. El cambio de energía libre proporciona una medida de la fuerza impulsora de una reacción química (ver ecuación 1.9). Si retomamos la ecuación 1.2, en la que se estableció la participación de especies cargadas, el potencial químico  $\eta_0$ , de tal especie aumenta con la energía eléctrica adicional  $z_i F_i \eta_i$  (J/mol), ya que está situada en un medio donde el potencial eléctrico es  $\eta_i$ .

$$\Delta G = \sum n_i \eta_i \quad (\text{en el estado final}) - \sum n_i \eta_i \quad (\text{en el estado inicial}) \quad \text{Ec. (1.9)}$$

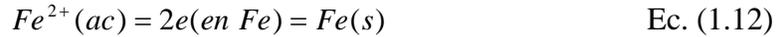
Entonces se define el potencial electroquímico:

$$\eta_i = \eta_0 + z_i F_i \eta_i \quad \text{Ec. (1.10)}$$

Donde la fuerza promotora es el cambio en energía libre electroquímica.

$$\Delta\tilde{G} = \sum n_i \tilde{\eta}_i(\text{estado final}) - \sum n_i \tilde{\eta}_i(\text{estado inicial}) \quad \text{Ec. (1.11)}$$

En el equilibrio  $\Delta\tilde{G} = 0$ . Por ejemplo la reacción de reducción que se lleva a cabo en el hierro, es:



El cambio de energía libre electroquímica es

$$\Delta G = \eta_{Fe} - \eta_{Fe^{2+}} - 2\eta_e \quad \text{Ec. (1.13)}$$

Luego, expresando los potenciales químicos en función de las actividades raoutlianas y henrianas, se tiene lo siguiente:

$$\Delta G = (G_{Fe} + RT \ln a_{Fe}) - (\mu_{Fe^{2+}}^m + RT \ln h_{Fe^{2+}} + 2F\varphi^S) - 2(\mu_e^\ominus - F\varphi^M) \quad \text{Ec. (1.14)}$$

Donde

$G_{Fe}$  : es la energía libre del metal (del hierro)

R: es la constante de Boltzman

T: es la temperatura

$a_{Fe}$  : es la actividad del hierro

$\mu_{Fe^{2+}}^m$  : es el potencial químico estándar resultante de la reacción

$h_{Fe^{2+}}$  : es la actividad Henriana (Debida a la ley de Henry)

$\mu_e^\ominus$  : es el potencial químico de la carga electrónica

- F: es la carga en 1 mol de electrones en coulombs

$\varphi^S$  : es el potencial eléctrico en la interfase de la reacción en la solución acuosa.

$\varphi^M$  : es el potencial eléctrico dentro del metal en la solución acuosa.

Reacomodando los términos en la ecuación anterior se obtiene en el equilibrio ( $\Delta\tilde{G} = 0$ )

$$2F(\varphi^M - \varphi^S) = (\mu_{Fe^{2+}}^m - G_{Fe} + 2\mu_e^\ominus) + RT \ln(h_{Fe^{2+}} / a_{Fe}) \quad \text{Ec. (1.15)}$$

La cual regula el equilibrio en cualquier interfase de electrodo. Relaciona las diferencias de potencial a través de la interfase con un cambio de energía libre estándar y un término de la actividad [3].

### 1.7 CURVAS DE POLARIZACIÓN

La figura 1.9 muestra el diseño de un circuito para conseguir las curvas de polarización. La corriente aplicada se modifica a través de una resistencia variable R. La batería en el circuito de la figura 1.9 está conectada de manera que el metal actúa de ánodo, para obtener así, una curva de polarización anódica. La curva de polarización catódica se adquiere al invertir las conexiones de la batería.

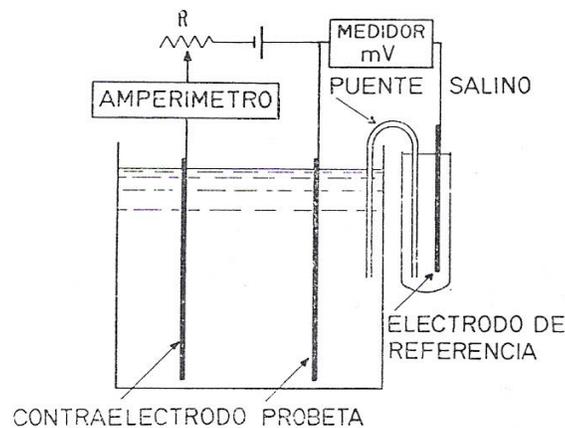


Figura 1.9. Circuito para obtener curvas de polarización.

Es conveniente que el electrodo auxiliar, o contra electrodo, que completa el circuito, no se polarice demasiado cuando la corriente pase a través; tampoco debe contaminar la solución. Por ello se diseñan normalmente de platino, en soluciones de cloruro se usan electrodos de referencia de plata/cloruro de plata o mercurio/calomelanos. Para evitar la

contaminación por los iones cloruro, los electrodos de referencia se disponen fuera de la célula que contiene el electrodo que se investiga, conectándose a ella por medio de un puente salino. Los montajes experimentales incluyen a menudo un capilar Luggin muy próximo a la probeta, el cual, actuando de sonda, permite efectuar medidas de potencial sobre sitios específicos de la superficie del electrodo de trabajo. Es necesario el uso del electrodo sonda cuando se dan grandes variaciones de potencial sobre la superficie y cuando la magnitud de la corriente motiva una fuerte polarización, pues la caída de potencial entre la superficie metálica y el capilar (igual a corriente por resistencia) es función de la separación entre ambos [6].

Para determinar la velocidad de corrosión de un sistema, se deben conocer las curvas de polarización de cada una de las reacciones electroquímicas que lo componen. El estudio de las curvas de polarización es fundamental en los trabajos de corrosión.

Las curvas de polarización se pueden determinar mediante una corriente constante y midiendo el potencial. Se repite este procedimiento a diferentes valores de corriente, midiendo en cada caso el nuevo potencial alcanzado. Se obtienen así las llamadas curvas *galvanostáticas*. Esta es la técnica de medición más simple en cuanto a equipo se refiere, si bien sólo puede usarse cuando las curvas de polarización muestran una variación monótona. No es adecuada en casos durante la pasivación de metales. Otra forma de determinar la relación  $i - E$  consiste en aplicar un potencial constante y determinar la forma en que varía la corriente. Estas curvas *potenciostáticas* requieren equipos más complejos que los anteriores, pero son las que encuentran mayor aplicación en los estudios de corrosión de metales [4].

Cuando se requiere de equipos más sofisticados, donde no es posible mantener una probeta a un potencial constante, que no sea afectado por la corriente, y se pide un circuito electrónico que mantenga el potencial constante y además tenga una velocidad de respuesta suficientemente grande, se utilizan los *potenciostatos*. Estos fueron desarrollados inicialmente por Hickling en 1942 [4]. Un potenciostato mantiene

constante el potencial de la probeta, medido respecto al electrodo de referencia. Una característica importante es su velocidad de respuesta, logrando que desde la detección de una diferencia en el potencial hasta su compensación, se tarde no más de 10 microsegundos. La corriente medida es igual a la que circula por la probeta, y se usa como medida de la velocidad de corrosión de la probeta. La curva de polarización potencioestática se obtiene a partir de los valores de corriente medidos para cada potencial.

Una vez que se conoce la densidad de corriente a la que se diluye un metal, es posible calcular la velocidad de corrosión. Como se indica en la práctica estándar, para el cálculo de la velocidad de corrosión mediante mediciones electroquímicas, Norma G 102, de la “American Society for Testing and Materials” (ASTM), en la que se muestra una guía del empleo de los diferentes tipos de curvas potencioestáticas [9]. El empleo de los potencioestatos es muy socorrido por su fácil aplicación, además de que resulta relativamente económico. Por ejemplo, la velocidad de corrosión en el acero en concreto puede ser determinado por pérdida de peso o por la reducción en la sección transversal del reforzamiento, pero estas son técnicas destructivas que en la práctica son inservibles, así que para determinar la velocidad de corrosión se pueden realizar mediciones electroquímicas mediante el uso de curvas de *resistencia a la polarización* [10].

Existen dudas sobre el uso del potencioestato, como una técnica para medir la velocidad de corrosión, sin embargo diversos estudios han mostrado que esta técnica es realmente práctica, y que puede ser empleada con las precauciones necesarias, así pues en un sistema de hierro puro, en una solución de  $H_2SO_4$ , realizado para verificar la magnitud y la reproducibilidad de la técnica, se reportó que bajo condiciones similares la reproducibilidad era aceptable, y que la variabilidad natural del sistema cambia de acuerdo al método y equipo que se emplee [11].

## 1.8 PASIVIDAD DE LOS METALES

La pasividad se estudió principalmente en el hierro, porque el metal se comporta como si fuera noble en condiciones en que cabría esperar fuera atacado muy severamente. En 1836 Faraday atribuyó el fenómeno a la formación de una fina película de óxido sobre la superficie metálica, y tal explicación sigue vigente [4]. La pasivación se presenta en casi todos los metales, y se logra al aplicar una corriente exterior o al usar un oxidante lo bastante energético para hacer que el metal adquiera un potencial superior al de Flade. En la mayoría de los casos prácticos parece bien establecido que la pasividad se mantiene por una película superficial, probablemente de óxido o tal vez de algún otro compuesto.

Hoar y Schwabe visualizan en forma similar la aparición de la pasivación. Según estos autores, al aumentar el potencial de un metal, la reacción de formación directa del óxido a partir del metal se hace posible desde el punto de vista termodinámico, y acaba por entrar en competencia con la reacción de disolución del metal [4]. Otros autores han relacionado la pasividad de los metales con el pH, consiguiendo establecer algunas relaciones, aunque no se han generalizado.

### 1.9 COSTOS DE LA CORROSIÓN

Los efectos globales de la corrosión implican un costo importante del producto bruto nacional, desde el gasto que se realiza para prevenirla, hasta los enormes costes que se realizan en mantenimiento tanto para evitarla, como para reparar los efectos provocados por la misma.

Estudios efectuados en las décadas de los 70's en Estados Unidos reportan que los costos totales de la corrosión metálica pueden estimarse de hasta el 4.2 % del Producto Nacional Bruto (PNB). En Egipto por ejemplo, se estimaron en aproximadamente 475 millones de dólares, un 4.9% del PNB de Egipto.

Estudios de 1949 a 1979, que provienen básicamente de nueve países, dan los siguientes resultados globales (Tabla 1.1), con la indicación del costo total de la corrosión

expresado en dólares americanos del valor del año de estudio. Asimismo y en aquellos casos en que ha sido posible, se expresa el porcentaje del Producto Nacional Bruto para el año en que se realizó el estudio.

Tabla 1.1 Costo de la corrosión por año.

<i>Año</i>	<i>País</i>	<i>En millones de dólares EUA</i>	<i>En % del PNB</i>
<b>1949</b>	<b>EUA</b>	<b>5 500</b>	
<b>1960-61</b>	<b>India</b>	<b>320</b>	
<b>1964</b>	<b>Suecia</b>	<b>58 a 77</b>	
<b>1965</b>	<b>Finlandia</b>	<b>47 a 62</b>	<b>0.58 a 0.77</b>
<b>1968-69</b>	<b>RFA</b>	<b>6 000</b>	<b>3.0</b>
<b>1969</b>	<b>URSS</b>	<b>6 700</b>	<b>2.0</b>
<b>1969</b>	<b>Gran Bretaña</b>	<b>3 200</b>	<b>3.5</b>
<b>1973</b>	<b>Australia</b>	<b>550</b>	<b>1.5 a 3.0</b>
<b>1974</b>	<b>URSS</b>	<b>18 850</b>	<b>4.1</b>
<b>1975</b>	<b>EUA</b>	<b>70 000</b>	<b>4.2</b>
<b>1976 — 77</b>	<b>Japón</b>	<b>9 200</b>	<b>1.8</b>

El estudio realizado en la Gran Bretaña, conocido como *informe Hoar*, precisa que para este país los costos debidos a la corrosión, soportados por algunos sectores industriales, se pueden desglosar aproximadamente así: transportes (26%), naval (21%), la industria de la construcción (18%), el petróleo y la química (13%), etc. Muchos de los estudios efectuados han señalado que entre un 20 y un 25% del costo total de la corrosión pudiera haberse evitado, mediante una mejor aplicación de las diferentes técnicas anti-corrosión existentes, y con una mayor toma de conciencia de los riesgos que conlleva la corrosión [1].

Actualmente hay muy poca información acerca de los costos reales atribuibles a la corrosión, sin embargo se sigue sosteniendo en diversos estudios que la corrosión es un problema que se deriva en tres situaciones:

- 1) Económica (pérdidas directas e indirectas);
- 2) Conservación de recursos (agotamiento de las reservas naturales);
- 3) Seguridad humana (fallos fatales en medios de transporte, corrosión de bidones que contienen residuos radioactivos, escapes en tuberías de refrigeración de plantas nucleares, etc.)

La pérdida de vidas humanas es, desgraciadamente, una posibilidad que se puede presentar como una consecuencia directa o indirecta de la corrosión.

Desafortunadamente en México no existe información confiable que de un indicativo de los costos de la corrosión. Una encuesta realizada sobre los problemas que plantea la corrosión a la Industria Química Mexicana (*Ciencia y Desarrollo* núm. 64 p. 103, septiembre-octubre 1985) señaló que el fenómeno afecta en más de un 90% a las empresas que contestaron la encuesta. Esto indica una cantidad importante de dinero que debe invertirse en la industria mexicana. No obstante, eso no es tan preocupante, como la incidencia que la corrosión tiene en la seguridad humana. El costo social de los daños por la corrosión puede ser tan grande que debería ser más atendido por las autoridades. Estos costos podrían reducirse si se pusiera mayor atención en la educación, tanto técnica como profesional, así mismo al hacer conciencia de forma personal en todos los niveles. Las nuevas tecnologías tanto en sistemas de protección como en la creación de materiales que puedan llegar a sustituir el uso de los metales, conseguirán hacer que estos costos disminuyan, pero es necesario seguir realizando los esfuerzos suficientes para lograrlo.

## **2. TIPOS DE SUELOS Y SUS PROPIEDADES**

### **2.1 TIPOS DE SUELOS**

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de la actividad humana.

Los agricultores se interesan en detalle por todas sus propiedades, porque el conocimiento de los componentes minerales y orgánicos, de la aireación y capacidad de retención del agua, así como de muchos otros aspectos de la estructura de los suelos, es necesario para la producción de buenas cosechas. Sin embargo, el conocimiento básico de la textura del suelo es importante para los ingenieros que construyen edificios, carreteras y otras estructuras sobre y bajo la superficie terrestre.

### **2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS**

La clasificación del suelo se basa en su morfología y su composición, con énfasis en propiedades que se pueden ver, sentir o medir, por ejemplo la profundidad, el color, la textura, la estructura y la composición química. La mayoría de los suelos tienen capas características, llamadas horizontes: El horizonte A, más próximo a la superficie, suele ser más rico en materia orgánica, mientras que el horizonte C contiene más minerales y sigue pareciéndose a la roca madre. Con el tiempo, el suelo puede llegar a sustentar una

cobertura gruesa de vegetación reciclando sus recursos de forma efectiva. En esta etapa, el suelo puede contener un horizonte B, donde se almacenan los minerales lixiviados.

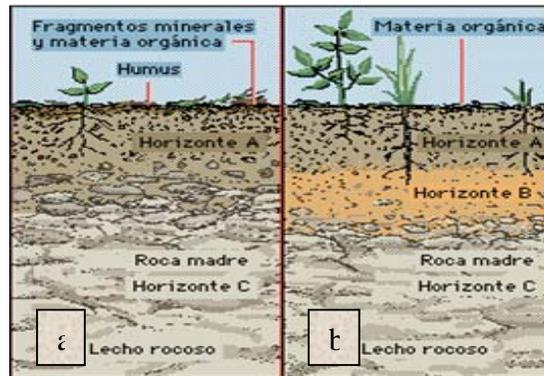


Figura 2.1. a) Se forman los horizontes; b) El suelo desarrollado sustenta una vegetación densa.

La naturaleza, el número, el grosor y la disposición de éstas también son importantes en la identificación y clasificación de los suelos.

Básicamente la clasificación se realiza de acuerdo al porcentaje relativo de grava, arena, limo y arcilla que contienen y se establece en el tamaño de partícula de las especies más finas:

Tabla 2.1 Clasificación del suelo según la Textura

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Tamaño de partícula (en mm)</i>
Arena	0,07 a 2
Limo	0,005 a 0,07
Arilla	Menor de 0,005

Otras veces, la ubicación de un determinado suelo en el diagrama ternario se hace teniendo en cuenta el contenido de arena, cal y arcilla. Pero, puesto que los suelos contienen frecuentemente materia orgánica, se ha ideado una representación en forma de tetraedro, en cuyos vértices se sitúan: arena, cal, arcilla y humus. En la figura 2.2 se muestra esta representación desarrollada sobre un plano [2].

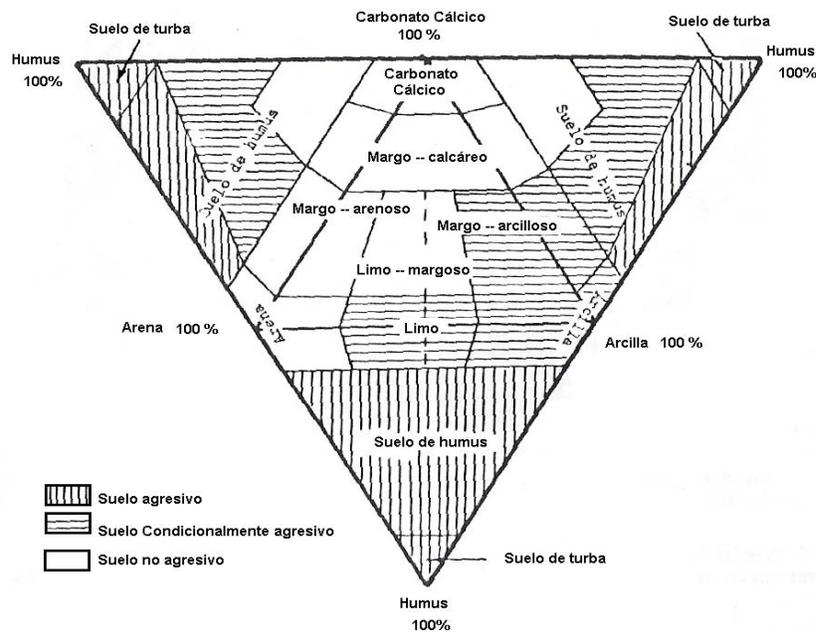


Figura 2.2. Clasificación del suelo según sus componentes.

En general, las partículas de arena pueden verse con facilidad y son rugosas al tacto. Las partículas de limo apenas se ven sin la ayuda de un microscopio y parecen harina cuando se tocan. Las partículas de arcilla son invisibles si no se utilizan instrumentos ópticos y forman una masa viscosa cuando se mojan. Así entonces, se forman diferentes tipos de suelos como: la arcilla arenosa, la arcilla limosa, el limo arcilloso, el limo arcilloso arenoso, el fango arcilloso, el fango, el limo arenoso y la arena limosa.

### 2.3 PROPIEDADES DE LOS SUELOS

La textura de un suelo afecta en gran medida a su productividad. Los suelos con un porcentaje elevado de arena suelen ser incapaces de almacenar agua suficiente como para permitir el crecimiento adecuado de las plantas y pierden grandes cantidades de minerales nutrientes por lixiviación hacia el subsuelo. Los suelos que contienen una proporción mayor de partículas pequeñas, por ejemplo las arcillas y los limos, son

depósitos excelentes de agua y encierran minerales que pueden ser utilizados con facilidad. Sin embargo, los suelos muy arcillosos tienden a contener un exceso de agua y tienen una textura viscosa que los hace resistentes al cultivo y que impide, con frecuencia, una aireación suficiente para el crecimiento normal de las plantas. Estas características interesan también a los ingenieros, ya que la construcción de un edificio, o la cimentación de un sistema de tuberías depende de ellas, a un ingeniero le interesa saber si el suelo retiene o no agua, pues con el paso del tiempo esta retención de agua puede ocasionar el colapso del edificio cuando no está bien cimentado, o cuando no se realizó un estudio completo del suelo. Para la instalación de una red de tuberías también es importante conocer el tipo de suelo donde se instalará la misma, y en el estudio geográfico se incluyen estudios topográficos y edafológicos, entre otros, que conllevan al éxito de la instalación del sistema, sin embargo los problemas que pueden llegar a suceder en un sistema de tuberías se presentan después de cierto tiempo, y la mayoría de ellos están relacionados a la corrosión. Especialmente cuando los suelos son de tipo arcilloso, ya que la retención de agua excesiva hace que las tuberías formen celdas salinas, ocasionando el desgaste acelerado del metal de las tuberías y pérdidas locales que son detectadas cuando el desgaste es irreversible.

Cuando un suelo se inunda y se satura por largos periodos, el intercambio gaseoso entre el suelo y el aire disminuye drásticamente. El oxígeno,  $O_2$  y otros gases atmosféricos pueden penetrar solamente por el lento proceso de difusión molecular en el agua intersticial, proceso que es  $10^4$  veces más lento que en el aire. Este proceso de difusión disminuye aún más debido a la baja solubilidad de la mayoría de los gases en agua. Así, entonces, la difusión del  $O_2$  decrece súbitamente cuando el suelo alcanza la saturación con agua. En pocas horas, tras el surgimiento del suelo, los microorganismos usan todo el  $O_2$  disuelto en el agua o atrapado en el suelo en los agregados, dejando al suelo prácticamente desprovisto de  $O_2$  molecular. Diversas mediciones de campo han demostrado que suelos de diferente naturaleza, campos de suelos de arrozal (suelos tipo Paddy), pantanos, chinampas, sedimentos lacustres y marinos, etcétera, muestran muy bajas o nulas concentraciones de oxígeno molecular, excepto quizá para suelos de

textura gruesa (arenosa), bajos en materia orgánica y con inundaciones someras, los cuales pueden presentar los niveles de  $O_2$  requeridos por los ambientes aeróbicos [12]. La diversidad de tipos de suelos que hay en México se debe a la zona geográfica en la que se encuentra, y en general el suelo es del tipo arcilloso con grandes extensiones de humedales, como lo describe el Dr. Arturo Aguirre en su libro [12].

Aparte de la heterogeneidad que le caracteriza al suelo, en cuanto a su naturaleza, tamaño de partícula y humedad, existen otras variables que son determinantes frente a los metales enterrados, como, por ejemplo: el contenido en sales solubles, la aireación, la acidez y la alcalinidad totales, la materia orgánica, y la presencia de bacterias anaerobias [2].

El suelo se puede comparar con un laboratorio químico muy complicado, en el cual ocurren un sinnúmero de reacciones que involucran a casi todos los elementos químicos conocidos. Algunas reacciones se pueden considerar sencillas y se comprenden con facilidad, pero otras son muy complejas. En general, los suelos se componen de silicatos que varían desde el sencillo óxido de silicio (cuarzo) hasta los silicatos de aluminio hidratados, que son muy complejos, y que se encuentran en los suelos de tipo arcilla. Los elementos más importantes del suelo para que las plantas se desarrollen correctamente son el fósforo, el azufre, el nitrógeno, el calcio, el hierro y el magnesio y actualmente han mostrado que las plantas también necesitan cantidades pequeñas pero fundamentales de elementos como boro, cobre, manganeso y zinc.

Las plantas obtienen nutrientes de los coloides del suelo, pequeñas partículas parecidas a la arcilla que se mezclan con el agua, aunque no se disuelven en ella. Se forman como producto de la meteorización física y química de minerales primarios. Consisten de óxidos hidratados de hierro, aluminio y silicio y de minerales cristalinos secundarios.

Los coloides tienen algunas propiedades físicas marcadas que afectan fuertemente las características agrícolas de los distintos suelos. En las regiones con poca precipitación y

pequeñas porciones de agua subterránea están sometidos a lixiviación moderada, en tanto, contienen gran cantidad de compuestos originales, como calcio, potasio y sodio. Los coloides de este tipo tienden a expandirse, se humedecen y se dispersan en el agua. Cuando se secan toman una consistencia gelatinosa y después de secarse forman masas impermeables al agua.

En los bosques, los coloides inorgánicos y orgánicos penetran en la tierra transportados por el agua subterránea después de lluvias o inundaciones, forman una capa concentrada en la parte inferior del suelo y se forman otras partículas de él para producir una masa densa y sólida.

Una característica importante de las partículas coloidales, es su facilidad para participar en el intercambio de bases. En esta reacción un compuesto cambia al sustituir uno de sus elementos por otro. De esta forma, los elementos que estaban unidos a un compuesto pueden quedar libres en la solución del suelo y estar disponibles como nutrientes para las plantas. Cuando se añade a un suelo materia fertilizante como el potasio, una porción del elemento requerido entra en la solución del suelo de forma inmediata, y queda disponible, mientras que el resto participa en el intercambio de bases y permanece en el suelo incorporado a los coloides.

### 3. CORROSIÓN EN SUELOS

#### 3.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS

La corrosión en suelos es asombrosamente variable, el desgaste de los metales enterrados puede ser despreciable para suelos con poca humedad y porosos, o bien puede ser muy importante en suelos húmedos con gran salinidad y con un alto contenido de bacterias. La corrosión que se da en estos casos, está entre la corrosión atmosférica y la corrosión en inmersión en una solución acuosa; el que se aproxime más a uno u otro extremo depende de diversos factores, como textura, porosidad, resistividad, pH, acidez o alcalinidad total, potencial red-ox, salinidad, materia orgánica presencia de sulfuros y de la humedad del suelo. En suelos totalmente carentes de humedad no tendría lugar el proceso corrosivo. Sin embargo en suelos arcillosos y húmedos, como los que se encuentran en México, el proceso corrosivo es un factor de suma importancia, sobre todo para las industrias que tienen grandes necesidades de emplear sistemas de tuberías enterradas, como las de gas, oleoductos, etc.

La corrosión en suelos es de tipo electroquímico por lo que la resistividad del terreno esta íntimamente ligada con la corrosividad, de la forma que se señala en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad

<b><i>Resistividad (<math>\Omega</math>- m)</i></b>	<b><i>Grado de agresividad</i></b>
< 10	Severo
10 – 100	Discreto
100 – 1000	Escaso
> 1000	Nulo

Por ejemplo, en lo que se refiere a un suelo arcilloso, con un 5% de humedad, dicho suelo puede presentar una resistividad de 10 000 ohm-m, en cambio, con un 20% de humedad, la resistividad disminuye hasta 100 ohm-m. Es obvio, por tanto, que la resistividad de un terreno y especialmente la de los estratos superiores, puede variar notablemente con las estaciones del año, la precipitación pluvial, la actividad agrícola e industrial, etcétera [5].

En lo que se refiere a la acidez, los suelos muy ácidos (con **pH <5.5**) pueden deteriorar muy rápidamente a un metal desnudo, y la agresividad del suelo aumenta con el incremento de la acidez (disminución del pH), aunque estos valores de pH son escasos. La mayor parte de los suelos tienen pH comprendidos entre 5.0 y 8.0, en cuyo caso la corrosión depende de otros factores. En suelos alcalinos parece existir una cierta correlación entre conductividad y agresividad. Varios investigadores han estudiado la relación entre el pH y corrosividad, como, por ejemplo, Klas y Steinrath. Sin embargo, no es lo más relevante en la corrosión en un medio ácido es acidez total, similarmente en un medio alcalino, lo más importante es la alcalinidad total.

En un medio anaerobio se puede conocer la corrosividad midiendo el pH y el potencial red-ox y así conocer las condiciones que favorecen la actividad microbiológica responsable de la corrosión anaerobia. En estas condiciones, la medida del potencial red-ox efectuada con un electrodo de platino, permite establecer si un terreno está predispuesto al crecimiento de bacterias sulfatoreductoras.

Basándose en los datos reportados en la tabla 3.2, es posible determinar la agresividad potencial de un suelo desde el punto de vista del crecimiento de bacterias sulfatoreductoras, lo cual permite establecer una clasificación de los suelos. Por ejemplo, un suelo cuyo contenido en sulfatos sea apreciable y su potencial red-ox esté alrededor de +200 mV está en condiciones favorables para que esta corrosión pueda tener efecto. Si en otro terreno se obtiene un valor del potencial red-ox de +400 mV, es posible excluir

la posibilidad del crecimiento y desarrollo de bacterias anaerobias. Naturalmente existe la posibilidad de que se desarrollen otras familias de bacterias [5].

Tabla 3.2. Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato-reductoras en función del potencial rédox

<i>Valor del potencial red- ox en mV vs. Electrodo de Hidrógeno</i>	<i>Grado de agresividad potencial (posibilidad de corrosión anaerobia)</i>
< 100	Severa
100 – 200	Moderada
200 – 400	Escasa
> 400	Nula

Un grupo de bacterias aerobias particularmente nocivas son los tiobacilos (*Ferrobacillus ferrooxidans*), que son capaces de oxidar el azufre y los sulfuros para convertirlos en ácido sulfúrico.

En la tabla 3.3 se presentan unos índices que permiten determinar las características agresivas de un suelo basándose en el contenido de aniones del mismo, cloruros, sulfatos y sulfuros, pH, potencial red-ox y resistividad. Este tipo de información resulta de interés para predecir la agresividad de un suelo frente a, por ejemplo, una tubería enterrada y con base en esto, evaluar la corrosión y la protección correspondiente [5].

Una tubería de acero vista al microscopio tiene una disposición granulada similar a la que se observa en la figura 3.1. Cada grano se comporta como un electrodo con una tendencia anódica o catódica específica, según el proceso de fabricación y calidad del material.

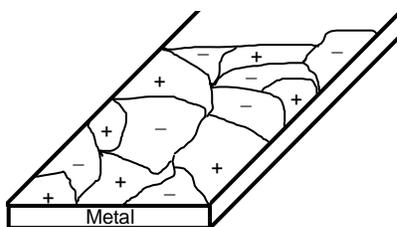


Figura 3.1. Superficie metálica vista desde un microscopio.

Tabla 3.3. Determinación de la agresividad de suelos

		<i>INDICE</i>
Resistividad, $\rho$ ( $\Omega$ -cm)	> 12 000 .....	0
	12 000 - 5 000 .....	-1
	5 000 - 2 000 .....	-2
	< 2 000 .....	-4
Potencial rédox, $E_{rédox}$ (mV vs. enh)	> + 400 .....	+2
	400 - 200 .....	0
	200 - 0 .....	-2
	< 0 .....	-4
pH	> 5 .....	0
	< 5 .....	-1
Cloruros, $Cl^-$ (mg/kg)	< 100 .....	0
	100 - 1 000 .....	-1
	> 1 000 .....	-4
Sulfatos, $SO_4^{2-}$ (mg/kg)	< 200 .....	0
	200 - 300 .....	-1
	> 300 .....	-2
Sulfuros, $S^{2-}$ (mg/kg)	0 .....	0
	0 - 0.5 .....	-2
	> 0.5 .....	-4
<i>Características del suelo</i>		<i>Suma</i>
No agresivo .....		0
Débilmente agresivo .....		-1 a -8
Medianamente agresivo.....		-8 a -10
Sumamente agresivo .....		< -10

Para que se forme la pila o se cierre el circuito entre estos polos, es necesario un cable o medio electrolítico que transporte los electrones. Para una tubería enterrada este medio de transporte de electrones lo conforma el suelo y la tubería misma como se muestra en la figura 3.2.

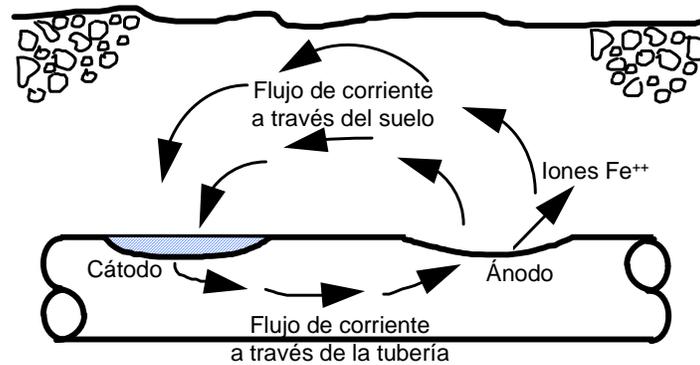


Figura 3.2. Esquema del transporte de electrones entre el cátodo y el ánodo.

La zona con tendencia anódica cede electrones y la zona de tendencia catódica los recibe. El equivalente eléctrico de este circuito o celda de corrosión se observa en la siguiente figura.

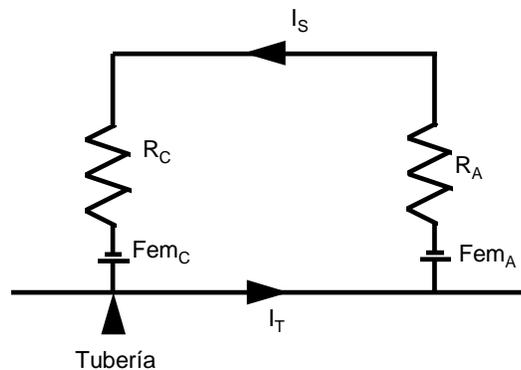


Figura 3.3. Circuito de la celda de corrosión entre la tubería y el suelo que la rodea.

En la interfase, entre el metal y el suelo, existe una fuerza electromotriz (FEM), también llamado potencial de referencia. Cuando la corriente fluye, la fuerza electromotriz

cambia de tal manera que las proximidades entre el metal y el suelo pueden ser representadas por una resistencia en serie con una fuente de FEM.

Estos dos circuitos juntos representan una celda de corrosión en la cual  $Fem_C$  es el potencial del cátodo,  $R_C$  la resistencia del cátodo,  $Fem_A$  es el potencial del ánodo,  $R_A$  es la resistencia del ánodo y finalmente  $I$  es la corriente a través del circuito.

Por otra parte, desde el punto de vista químico, la reacción anódica del proceso corrosivo es el paso del metal al estado iónico. Por ejemplo, en el caso del hierro es:



Mientras que la reacción catódica es,



En tanto que en un medio neutro o alcalino, o cuando se trata de un suelo ácido, la reacción es:



Todo proceso de oxidación electroquímica (Ec. 3.1), va acompañado necesariamente de otro de reducción en el cátodo. Es decir que en ausencia de oxígeno, o de la posibilidad de descarga de hidrógeno, no habría corrosión [2].

Los pronósticos del comportamiento corrosivo de un suelo, a partir de su estudio, se refieren a un suelo “natural”. Las excavaciones, el relleno de zanjas, las alteraciones que el suelo sufre por desechos orgánicos e inorgánicos que el humano desaloja, etcétera, transforman considerablemente el medio y por lo tanto los resultados de su análisis.

### 3.2. TUBERIAS ENTERRADAS

En la figura 3.4 se muestra esquemáticamente la situación de una tubería con respecto al material de relleno de la zanja y del suelo original (O). La tubería (T) va asentada en un lecho de arena y rodeada por ella (A), cubierto todo por la sub-base de relleno (S), y con una capa última de base o de sub-base con mayor compactación que la inferior (B). La compactación en la zona removida es siempre menor que en la original, por lo que en aquella la permeabilidad al aire y al agua serán siempre mayores; del mismo modo, la humedad en la zona de asiento de la tubería será mayor que en la existente sobre ella [2].

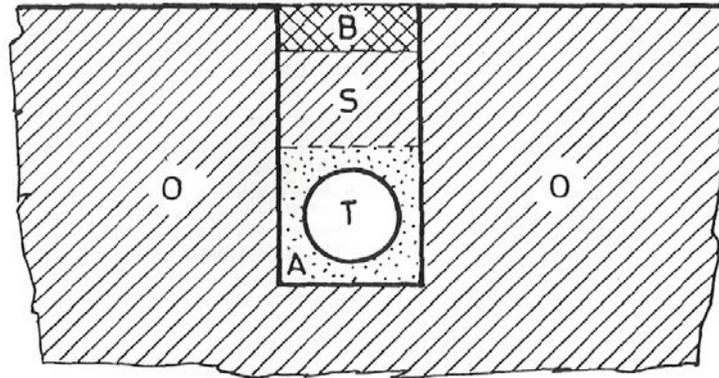


Figura 3.4 Situación de una tubería en una zanja. O, suelo original; A, arena; S, sub-base; B, base.

La zona A, se utiliza para tratar de aislar la tubería del suelo natural, esto ocurre frecuentemente en suelos arcillosos. La zona S es el suelo original pero removido por la excavación y la base B es la última capa con la que se cubre la zanja.

#### 3.2.1 Corrosión en Tuberías Enterradas

Las estructuras metálicas enterradas pueden sufrir muy diferentes tipos de corrosión ya que, como se decía en el punto anterior, un suelo es un medio peculiar, en el que el

efecto corrosivo puede ser extraordinariamente diferente de unos casos a otros. Así se da desde corrosión uniforme, en medios homogéneos, a corrosión localizada, cuando existen heterogeneidades en el suelo en contacto con la estructura metálica, o bien cuando la heterogeneidad proviene del propio metal, como por ejemplo: fases distintas, tratándose entonces de ataque selectivo.

En estructuras enterradas puede tener lugar la corrosión bajo tensión, aunque este fenómeno es poco frecuente en suelos. El primer fallo conocido de un gasoducto, achacado a la corrosión bajo tensión, data de 1965.

Se han enumerado los siguientes factores como contribuyentes a este fenómeno corrosivo:

Humedad en contacto con el acero bajo un revestimiento despegado.

Protección catódica aplicada a la tubería.

Cascarilla de laminación o herrumbre sobre la superficie del acero.

Temperatura de trabajo por encima de 30° C.

Tensión superior al 60 por 100 del límite elástico.

Tensiones cíclicas debidas a fluctuaciones de presión.

Según Beavers, Christman y Parkins, la mayor parte de este tipo de fallas muestra una serie de peculiaridades que les son comunes:

El agrietamiento es intergranular y ramificado.

Normalmente se observa una película negra, formada por  $\text{FeCO}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , sobre la superficie de la fractura.

La mayor parte de los fallos por corrosión bajo tensión se dan en tubería revestida y todos los fallos se dan en tuberías protegidas catódicamente. Una investigación realizada por Camiz y Vinka, en Suecia reportó los efectos ocasionados por el suelo a placas metálicas de acero al carbón, el estudio se hizo durante 4 años aproximadamente

[13]. Se pueden realizar estudios que permitan conocer la relación entre los diversos factores que afectan la corrosión en tuberías y en general en estructuras metálicas, como lo indica la norma [14]. Pero desafortunadamente estos estudios son a largo plazo, por lo cual hay poca literatura al respecto.

### 3.2.2 Corrosividad Absoluta y Relativa

#### 3.2.2.1 Corrosividad Absoluta

La corrosividad absoluta es la que se asocia a las micropilas de corrosión. En estas micropilas las zonas anódicas y catódicas se hallan tan próximas que se confunden entre sí. La resistencia interna de estas pilas es prácticamente nula y no depende o depende muy poco de la resistividad del medio. La suma de las intensidades de corriente que se intercambian por unidad de superficie se llama intensidad de corrosión  $i_{corr}$ , mientras que el potencial que alcanza el metal, potencial de corrosión,  $E_{corr}$ , es un potencial mixto entre el potencial de la reacción anódica y el de la catódica.

La corrosión por micropilas es una corrosión sensiblemente uniforme y solamente se encuentra en el caso de un electrólito perfectamente homogéneo, con un metal sin heterogeneidades y estado superficial uniforme.

La corrosividad absoluta de un suelo es función de sus características físicas (estructura, granulometría, interacción suelo/agua, etc.), propiedades químicas (pH, acidez total, alcalinidad total, tipo y concentración de iones solubles en agua, etc.), y de las propiedades biológicas (por ej. Colonias de bacterias reductoras de sulfato).

### 3.2.2.2 Corrosividad Relativa

La corrosividad relativa, es la que se asocia a las micropilas de corrosión. En estas pilas las zonas anódicas y catódicas son de dimensiones microscópicas claramente diferenciadas, pudiendo ser sus superficies relativas muy diferentes. La corrosión que originan las macropilas es de tipo localizado.

La dimensión de las macropilas puede ser muy variable, desde algunos centímetros para las pequeñas hasta cientos de metros para las mayores. Este es el caso de las pilas de aeración diferencial, las propias de largas distancias, y las debidas a heterogeneidades de composición del suelo o de la superficie del metal, o a pares galvánicos.

Cuando el suelo en contacto con un metal muestra distinta concentración de oxígeno se crea una pila de concentración de oxígeno (aeración diferencial). La zona más rica en oxígeno será catódica, mientras que la más empobrecida será anódica y en ella se producirá el ataque corrosivo. El gradiente de oxígeno, para que tenga lugar la pila correspondiente, podrá deberse bien a diferencia de humedad o de compactación; en la zona más húmeda o más compactada el acceso del oxígeno del aire hasta la estructura estará más dificultado que en aquellas zonas de suelo más seco o menos compactado.

Cuando una tubería, con continuidad eléctrica entre sus tubos, discurre por suelos de muy distinta naturaleza, pueden crearse a lo largo del trazado, corrientes de bastante intensidad, dando lugar con ello a problemas de corrosión graves [15]. El ataque corrosivo se produce en la sección de la tubería que se encuentre en contacto con el suelo poroso y de mayor humedad retenida, es decir en la zona en contacto con la arcilla.

Cuando en un suelo existen heterogeneidades de composición pueden originarse, igualmente, pilas de corrosión. Este es el caso cuando la zanja por donde discurre la

tubería se rellena con material de echadizo conteniendo escombros, materias orgánicas, residuos carbonosos, etc., Las heterogeneidades de la superficie del metal también pueden dar lugar a pilas de corrosión. Entre estas heterogeneidades se hallan las inclusiones no metálicas y las fases diferentes, cuya corrosión selectiva puede dar lugar a fenómenos como la deszincificación de los latones o la grafitización de la fundición.

### 3.3 CORROSIÓN GALVÁNICA EN SUELOS

Este tipo de corrosión se origina cuando dos metales que se hallan muy distantes entre sí en la serie galvánica se ponen en contacto en el seno de un electrólito.

La diferencia de potencial de la pila dependerá de los potenciales de corrosión que muestren ambos metales, cuando la intensidad de corrosión relacionada directamente con la conductividad del medio corrosivo.

En la corrosión galvánica es muy importante la relación entre área anódica y catódica. Una relación pequeña dará lugar a una concentración acusada del ataque en la zona anódica, mientras que si la relación fuese muy grande, el ataque se repartiría por una amplia zona y no revestiría gravedad.

Cuando sobre una tubería de acero o fundición se sitúa un accesorio de aleación de cobre, como latón o bronce, el ánodo será el metal férreo, que sufrirá ataque. Si bien es cierto que el accesorio suele suponer pequeña superficie frente a la de la tubería, no es menos cierto que el ataque puede concentrarse en la zona del acoplamiento cuando el suelo es allí más corrosivo, dando con ello lugar a ataque intenso.

En algunos casos ha llegado a dictaminarse un mal comportamiento del material metálico del tubo, cuando en realidad se debía a casos de corrosión galvánica, por no

haber tomado la precaución de aislar el accesorio del tubo en el que se había hecho la toma.

### 3.4 CORROSIÓN POR CORRIENTES VAGABUNDAS

Corrientes vagabundas o erráticas son aquellas corrientes eléctricas que circulan a través de un electrólito fuera de los circuitos previstos.

Las corrientes vagabundas son, por lo general, una pequeñísima parte de la corriente principal, pese a ello los efectos corrosivos pueden ser muy acusados. Estas corrientes se originan por defecto de aislamiento de los conductores, debido a ello, parte de la corriente sigue otro itinerario distinto del previsto, circulando, por ej., a través de estructuras metálicas enterradas de cualquier tipo, como: tuberías metálicas, vainas de cables, armaduras de hormigón armado o pretensado, etc. El origen de las corrientes vagabundas se halla principalmente en las líneas electrificadas de tranvías y trenes eléctricos, instalaciones de galvanotecnia, equipos de soldadura, etc.

Este fenómeno corrosivo, conocido también como «electrólisis», puede ser extraordinariamente intenso con la corriente continua en aquellas zonas en que la fracción de corriente que ha pasado a la estructura enterrada retorna al conductor negativo de la línea electrificada.

El tranvía recibe la corriente eléctrica a través de la catenaria en contacto con el conductor aéreo, conectado al polo positivo del generador, y a través de los raíles que se hallan conectados al polo negativo. Con una buena conexión eléctrica entre raíles, y buen aislamiento de éstos, la mayor parte de la corriente sigue el camino adecuado. Sin embargo, cuando la unión eléctrica entre raíles es deficiente o el aislamiento es malo, parte de la corriente abandona los raíles y busca otros caminos alternativos, a través de

conducciones metálicas, hasta retornar de nuevo a los raíles en su camino hacia la subestación.

En el fenómeno corrosivo sobre una tubería enterrada, en aquellas zonas en que la corriente abandona la tubería, se produce corrosión por tratarse de zona anódica. Igualmente sufren corrosión de este tipo los raíles, aunque revista menor importancia.

La corrosión no reviste gran importancia en el caso de fugas de corriente alterna. Parece ser que se han de dar circunstancias de formación de productos de corrosión que tengan algún poder rectificador de la corriente, para que se produzca un cierto ataque del metal. Sin embargo, cuando se superpone una corriente alterna a la continua, puede potenciarse el efecto corrosivo de aquélla. En una pila electroquímica la corriente alterna actúa como despolarizante, tanto anódico como catódico.

De acuerdo con el gradiente de potencial hallado, se clasifican las corrientes vagabundas en:

Menos de 0,5 mV/m: débiles.

De 0,5 a 5 mV/m: medianamente intensas.

Más de 5 mV/m: intensas.

Influencia de la composición del metal

Los metales enterrados muestran un comportamiento muy distinto según sean las características de agresividad del suelo en que se encuentran. Booth y otros, encontraron que Fe, Pb, Cu, Zn y Al, enterrados en diversos suelos, suelen corroerse de acuerdo con las velocidades de corrosión previstas. Sin embargo, se ha encontrado que la profundidad de picadura esta función del área de la muestra, es decir, que la penetración del ataque corrosivo será mayor en una tubería de diámetro grueso que en una de diámetro delgado. Por lo que se tiene la siguiente relación  $P = b A^a$ .

Donde  $P$  es la profundidad de la picadura, más honda en el área  $A$ ;  $a$  es una constante que depende de las condiciones de exposición; y  $b$  es la profundidad media de las picaduras más profundas por unidad de área [2].

Se han realizado diversos trabajos para examinar el comportamiento de los metales enterrados. No obstante, es difícil realizar un estudio completo de lo que es la corrosión “in situ”, se destacan los trabajos realizados por Bureau of Standards a lo largo de medio siglo, [corrosión y protección metálicas] sin embargo, hay en la actualidad algunos métodos de laboratorio que se pueden implementar y acondicionar para lograr este objetivo. Como el potencióstato, una herramienta que permite medir la corrosión electroquímica de diversos metales incluyendo el acero. El potencióstato utiliza un electrolito líquido y funciona, como ya se vio, como una celda electroquímica, en la que se puede medir al unísono, la corriente de corrosión el voltaje de corrosión y por tanto el potencial.

Entonces, utilizando una mezcla saturada de suelo con algún líquido se puede formar un electrolito en el que se pueden reproducir algunas condiciones que se tienen “in situ” en las estructuras y tuberías enterradas, como se verá posteriormente.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El experimento consistió en la simulación de probetas metálicas sumergidas en suelos de diferente salinidad, por lo que en principio se procedió con la extracción del suelo eligiendo una zona cercana a donde se encuentra un sistema de tuberías enterradas (Campo de cultivo de la FESC - Campo IV, Cuautitlán, Estado de México). Después se procedió con la preparación del suelo de acuerdo a la norma, y a la forma tradicional; desecando y tamizando hasta obtener un grano aproximadamente de 5 y 10  $\mu\text{m}$ . Esto se realizó mediante el empleo de un pistón recubierto totalmente con madera, para no alterar la composición química del suelo (ver figura 4.1).



Figura 4. 1. Pistón utilizado para tamizar el suelo tipo arcilloso.

Posteriormente, se prepararon las probetas de una sección de tubería de alta temperatura grado B, y finalmente se prepararon las soluciones salinas y las mezclas con el suelo, para la elaboración de los experimentos con el potenciostato Gamry Framework, que se encuentra en las instalaciones de la FESC – UNAM, en el laboratorio de corrosión del CAT.

#### 4.1.1 EXTRACCIÓN DEL SUELO

De acuerdo a las normas que dicta la edafología se procedió con la extracción del suelo, mediante el proceso siguiente.

##### 4.1.1 Procedimiento:

1. Se trazó un cuadro de un metro de largo por un metro de ancho, para extraer el suelo que se ocuparía posteriormente.

2. Se hizo una excavación de 120 cm. de profundidad, tomando muestras a cada 20 cm. de profundidad, para su posterior análisis. La excavación se realizó a 120 cm. debido a que los sistemas de redes de las tuberías en campo se colocan a una profundidad no mayor a 150 cm., que en muchas de las zonas agrícolas es donde se encuentra el suelo duro (suelo rocoso, horizonte C).



Figura 4.2. Estas fotografías muestran: (a) El recuadro que se hizo al iniciar la excavación. (b) La profundidad de 120 cm. a la cual se realizó la excavación.

3. Se extrajeron las muestras de suelo clasificándolas de acuerdo a la profundidad y los horizontes A, B y C, donde las observaciones se registran en la tabla 4.1. Las propiedades físicas y químicas de este terreno se registraron de la literatura [16].

Tabla 4.1. En esta tabla se muestran las profundidades a las que se tomó cada muestra de suelo.

<i>No. Muestra</i>	<i>Profundidad (cm.)</i>	<i>Observaciones</i>
1	100 – 120	Después de esta profundidad comienza el suelo “duro” y en algunos lugares el manto freático.
2	60 – 80	Esta profundidad se encuentra en el horizonte B, donde la mayoría de los microorganismos desaparece, y en zonas con las condiciones adecuadas, comienza a aparecer la bacteria anaeróbica.
3	20 – 40	En esta profundidad es poco usual encontrar tubería enterrada, pues en esta zona hay una gran diversidad de microorganismos que dañan el sistema de instalación, a menos que el manto freático se encuentra al ras de esta profundidad.

4. Después de un análisis de diseño se decidió utilizar el suelo con la mayor profundidad (muestra 1), considerando que en la zona donde se extrajo este perfil, los sistemas de redes de tuberías son enterrados a esta profundidad aproximadamente.



Figura 4.3 En la fotografía se puede observar el suelo (número de muestra 1) que se utilizó en el experimento.

5. Ya seleccionada la muestra a utilizar, se desecó durante, aproximadamente 40 días, esto porque el día que se extrajeron las muestras de suelo, y mientras se realizaba la excavación, llovió con gran intensidad, mojando el suelo y las muestras del mismo que se tomaron. Por supuesto, esto no afecta a los experimentos.

6. Transcurrido ese tiempo se disgregó y tamizó el suelo, con un pistón neumático marca Ingersoll – Rand Modelo PAT’ D serial 46520 recubierto con madera para no contaminar la composición química del suelo con el metal propio del pistón. El pistón se conectó a un compresor de aire, lubricado con capacidad de tanque de 50 Lt marca TRUPER Modelo COMP – SOL a una presión de 100 lb. Cada sección tratada se sometió a este procedimiento en dos o tres ocasiones, hasta obtener un tamaño de grano aproximado de 0.001 mm. Esto es, hasta obtener polvo, que fue posible ya que el suelo es de tipo arcilloso [14], y como se explico en el capítulo 2, este tipo de suelo tiene esa cualidad.

7. Por último se tamizó una vez más obteniendo dos tamaños de grano: Tamaño 1: *polvo* y Tamaño 2: *grano grande*.



<i>Tipo de grano</i>	<i>Tamaño del grano (mm.)</i>
Polvo	< 0.005
Grano grande	> 0.1mm



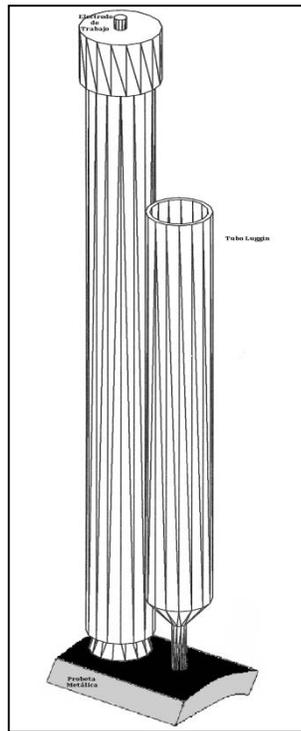


Figura 4.5 Esquemas del diseño de las probetas y sus dimensiones, que se obtuvieron de una sección del tubo de acero de alta temperatura grado B bajo la norma API 5L – B, de 6 pulgadas de diámetro.

2. Se les hizo un pequeño orificio con rosca a las probetas, para colocar en él, la varilla que se conectaría al electrodo.

Figura 4.6

Esquema del diseño de la probeta y el Electrodo de Trabajo (Varilla).



3. Se prepararon 36 probetas con el orificio en la parte superior del tubo para examinar la velocidad de la corrosión del tubo desde el contacto superficie exterior – suelo, también se prepararon 36 probetas con el orificio en la parte interior del tubo para examinar la velocidad de la corrosión del tubo desde el contacto superficie interior – suelo. Y se prepararon otras 36 probetas desnudas (se limpiaron y pulieron cuidadosamente) para examinar la velocidad de la corrosión del metal desnudo – suelo, las cuales sirvieron como probetas testigo.

4. Las probetas se recubrieron en las orillas con parafina, un material adherente al metal que permitió aislar los efectos de la corrosión en las orillas, partes donde las placas no estaban cubiertas y donde se realizaron los cortes. La parafina se derritió con un calentador marca Wax Bath, Serie 0424060791. De

esta forma se dejó un área superficial de  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  libre en la probeta para su análisis.

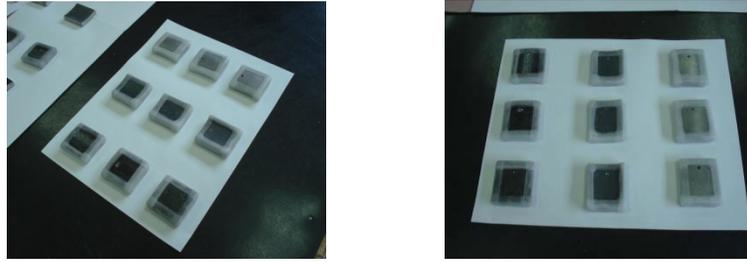


Figura 4.7 En ambas fotografías se muestran las probetas después de de recubrir las orillas con parafina.

5. Las probetas se limpiaron con alcohol isopropílico (marca PROLICOM) como lo indica la norma ASTM G1 [17] antes de iniciar el experimento.

#### 4.3 PREPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES SALINAS Y LAS MEZCLAS DE SUELO

Las soluciones salinas se prepararon al 1 % con tres diferentes tipos de fertilizantes (Sulfato de Amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), Triple 17 (N, P, K al 17%) y Urea  $(\text{CO}(\text{NH}_2)_2)$ ), la solución en cada caso se hizo con agua destilada para considerar únicamente la salinidad del fertilizante.

Las mezclas solución – suelo se realizaron de acuerdo al punto de saturación del suelo debido a que el potencióstato generalmente se utiliza con soluciones totalmente líquidas, y en esta ocasión se utilizó una mezcla. El punto de saturación de acuerdo al tipo de suelo y el grado de humedad propia del suelo, (considerando que éste se desecó a temperatura ambiente previamente), se alcanzó con un 1 kg. de suelo por 0.400 mL de solución aproximadamente, aunque en algunos casos esta relación cambió ligeramente debido a las condiciones climáticas.

##### 4.3.1 Procedimiento:

1. En la preparación de las soluciones, primero se pesaron con una balanza (marca Gebr Bosch S200 Feinwaagnfabrik, Modelo D – 7455), 10 gm del fertilizante en cuestión, (manejando tres fertilizantes diferentes: Sulfato de Amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), Triple 17 (N, P, K al 17%) y Urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ )), después, en un vaso de precipitado se le agregó 1 Lt de agua destilada, y se agitó hasta disolver lo más asequible, (en el caso del Fertilizante Triple 17, los ingredientes como el fosforo, son insolubles en agua). Logrando así una solución al 1 %.

2. En la preparación de las mezclas, en un recipiente debidamente limpio y seco se introdujo 1 kg de suelo, se agregó la mitad de la porción de la solución fertilizada al 1% previamente preparada y se agitó hasta obtener una mezcla lo más homogénea posible, después se añadió el resto de la solución necesaria hasta obtener una mezcla uniforme y lo suficientemente líquida (o sólida), en el punto de saturación de la mezcla.

#### 4.4 MONTAJE DEL EXPERIMENTO

Como las mezclas de las soluciones fertilizadas y el suelo debían estar al punto de saturación exactamente, el experimento se realizo en series, con 9 pruebas cada una, utilizando una misma mezcla fertilizada en cada serie, beneficio que otorgaron las condiciones propias del experimento, pues las mediciones de corrosión que se debía obtener en la probeta no alteraría las condiciones del electrólito (la mezcla) y por tanto no afectarían los resultados. La realización de las series se organizó en tres mediciones para probetas con exposición superficial en el recubrimiento superior (o exterior), tres mediciones con exposición superficial en el recubrimiento interior y tres más en la superficie de la probeta sin recubrimiento (placas desnudas).

#### 4.4.1 Procedimiento:

1. Se atornilló la probeta al electrodo de trabajo perfectamente y se colocó un tapón cónico de teflón, para evitar cualquier contacto de la mezcla con la varilla del electrodo de trabajo, (ver figura 4. 8).

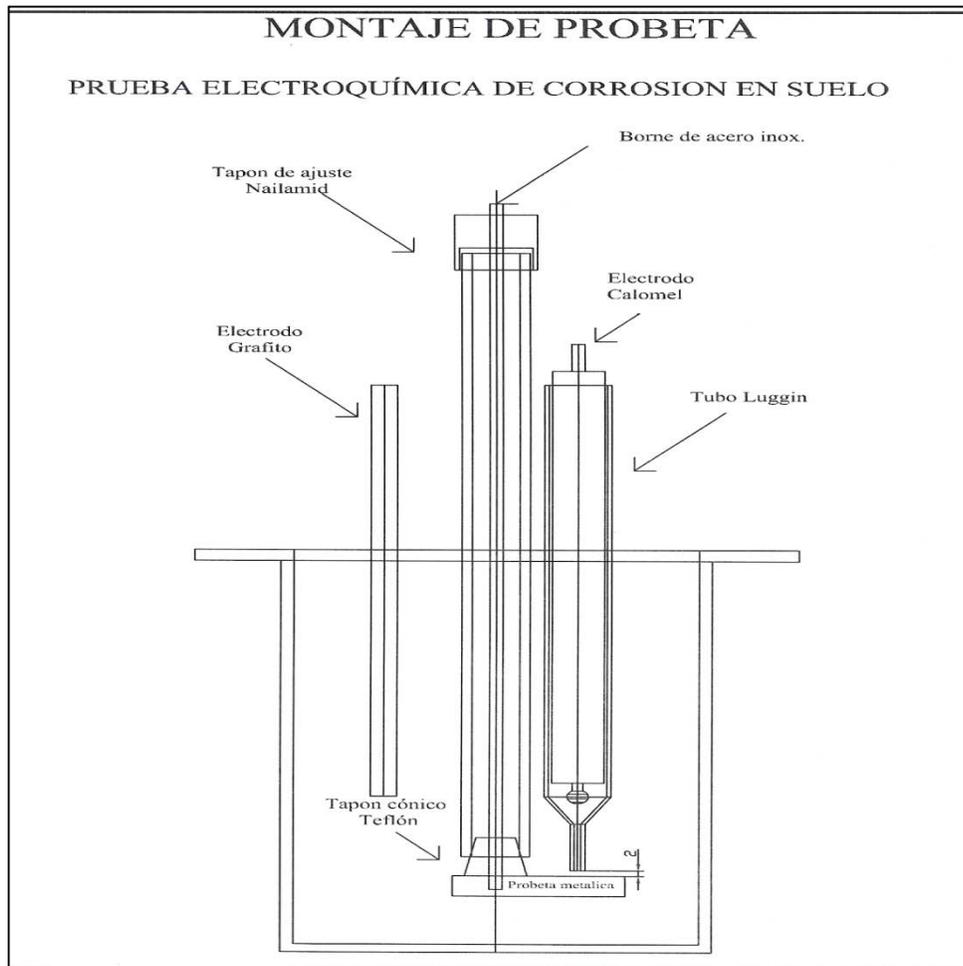


Figura 4.8 Esquema del Montaje de la Probeta, el Electrodo Calomel (de Referencia), el Electrodo de Trabajo y el electrodo de Grafito.

2. Se diseñó una cubierta con tres orificios al potencióstato para colocar el electrodo de trabajo, el “luggin” donde va el electrodo de referencia y el último,

para colocar el electrodo de grafito. Ver figura 4.7. De acuerdo al diseño de la cubierta se colocaron los electrodos, fijando con un tapón cónico de teflón, para mantener fijos dichos electrodos, ya que no se tiene visibilidad durante el experimento.

3. El tubo del luggin se ajustó a la cubierta del potencióstato asegurando una separación entre la probeta y el luggin de 1 a 2 mm, (norma ASTM G5 – 94 [18]).

4. En el recipiente del potencióstato se agregó la mezcla, y se colocó la cubierta agitando la mezcla para asegurar la homogeneidad en la probeta.

5. En el tubo del luggin se agregó un poco de la mezcla y después se colocó el electrodo de referencia, confirmando así la homogeneidad de la mezcla en todo el arreglo experimental.

6. Finalmente se iniciaron las mediciones con el “software” GAMRY FRAMEWORK.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Debido a que el software que el potencióstato utiliza, realiza las mediciones al mismo tiempo que va generando las gráficas de las curvas TAFEL, primero se registraron las curvas.

Después de realizar todos los experimentos, se procedió a realizar los ajustes de las curvas Tafel, con el software Analyzer chemical Gamry, cuyos resultados se presentan en las tablas. Posteriormente se registraron las curvas de los ajustes según los arreglos que se presentan en los cuadros 5.1, 5.2 y 5.3:

El cuadro 5.1 presenta el arreglo de las mediciones que se efectuaron con las soluciones sin suelo (como electrolito), para los tres fertilizantes: *Agua destilada simple*, *Agua Destilada – Sulfato de Amonio al 1%*, *Agua Destilada – Triple 17 al 1%* y *Agua Destilada – Urea al 1%*.

El cuadro 5.2 presenta el arreglo para las mediciones con mezclas de “*Suelo – Solución Fertilizada al 1%*” como Electrolito y con un suelo tipo arcilloso (*Polvo*), cuyo tamaño de grano es menor a los 0.005 mm, para Fertilizantes de *Sulfato de Amonio*, *Triple 17* y *Urea*.

El cuadro 5.3 presenta el arreglo para las mediciones y los ajustes realizados a las gráficas de las curvas Tafel, de la mezcla “*Suelo – Solución Fertilizada al 1%*” como Electrolito ahora con un suelo tipo arcilloso (*Grano*), cuyo tamaño de grano es mayor a los 0.005 mm, utilizando los fertilizantes de *Sulfato de Amonio*, *Triple 17* y *Urea*.

**Cuadro 5.1** Arreglo de los resultados experimentales para el electrolito base de Agua Destilada en soluciones fertilizadas al 1%. Los símbolos ●, ☺ y ✓, indican que la medición, el ajuste y la gráfica ajustada se realizaron positivamente. En tanto que ☒, --, indican que no se efectuó.

Tipo de Suelo	Sin Suelo (Agua Destilada)												
Tipo de Fertilizante		Agua Destilada			Sulfato de Amonio			Triple 17			Urea		
Tipo de Recubrimiento	Repetición	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Recubrimiento Superior	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Recubrimiento Inferior	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sin Recubrimiento	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☒	☒	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	✓	--	--	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**En el cuadro 5.1 se muestra que en las mediciones realizadas para una solución Agua Destilada sin Suelo con las probetas desnudas, no hubo repetitividad.**

**Cuadro 5.2** Arreglo de los resultados experimentales para el electrolito “Suelo (Polvo) – Solución Fertilizada al 1%”. Los símbolos ●, ☺ y ✓, indican que la medición, el ajuste y la gráfica ajustada se realizaron positivamente. En tanto que ☒, --, indican que no se efectuó.

Tipo de Suelo	Suelo Arcilloso (Polvo)												
Tipo de Fertilizante		Agua Destilada			Sulfato de Amonio			Triple 17			Urea		
Tipo de Recubrimiento	Repetición	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Recubrimiento Superior	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☒	☒	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	✓	--	--	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Recubrimiento Inferior	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sin Recubrimiento	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

**En el cuadro 5.2 se muestra que de las mediciones realizadas para la Mezcla de Agua Destilada - Polvo en las mediciones R2 y R3 con recubrimiento exterior, no arrojaron resultados satisfactorios, por lo que no hubo repetitividad.**

**Cuadro 5.3** Arreglo de los resultados experimentales para el electrolito “Suelo (Grano) – Solución Fertilizada al 1%”. Los símbolos ●, ☺ y ✓, indican que la medición, el ajuste y la gráfica ajustada se realizaron positivamente. En tanto que ☒, --, indican que no se efectuó.

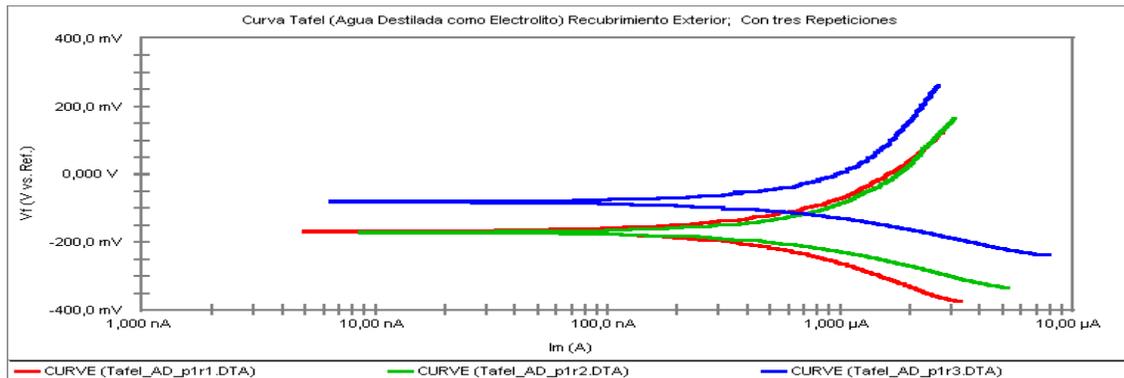
Tipo de Suelo	Suelo Arcilloso (Polvo)												
Tipo de Fertilizante		Agua Destilada			Sulfato de Amonio			Triple 17			Urea		
Tipo de Recubrimiento	Repetición	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Recubrimiento Superior	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☒	☒	☒
	Gráfica Ajustada	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	--	--	--
Recubrimiento Inferior	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☺	☺	☺	☺	☒	☒	☺	☺	☺	☒	☒	☒
	Gráfica Ajustada	✓	✓	✓	✓	--	--	✓	✓	✓	--	--	--
Sin Recubrimiento	Medición	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Ajuste Tafel	☒	☺	☺	☒	☒	☒	☺	☺	☺	☺	☺	☺
	Gráfica Ajustada	--	✓	✓	--	--	--	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*En el cuadro 5.3 se muestra que de las mediciones realizadas para la Mezcla de Agua Destilada y Polvo de la probeta R1 sin recubrimiento, no arrojó resultados satisfactorios, de igual forma las probetas R2, R3, con recubrimiento interior. Similarmente las probetas R1, R2 y R3 sin recubrimiento, con la mezcla Gano – Solución de Sulfato de Amonio al 1%, no dio resultados aprobatorios por lo que no se registraron resultados. Finalmente se puede observar que para la mezcla Gano – Solución de Urea al 1%, resulto muy inestable como electrolito, y no permitió la realización de mediciones placenteras, para las probetas con recubrimiento exterior e interior, haciendo notar que se realizaron más de tres mediciones, y en ningún caso se obtuvo una medición efectiva.*

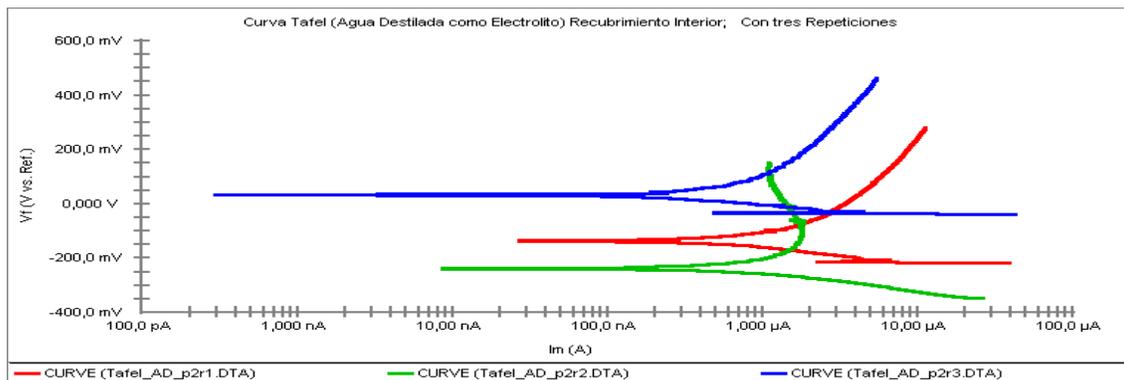
Después de registrar los resultados obtenidos de las mediciones y los ajustes, en los cuadros 5.1, 5.2 y 5.3 se editaron las gráficas, agrupándolas de acuerdo a cada medición y sus repeticiones para el mismo tipo de probeta y el mismo tipo de electrolito utilizado, como se muestra en las próximas páginas.

Gráficas Tafel de los experimentos realizados en potenciostato (Gamry Framework) con Agua Destilada como electrolito.

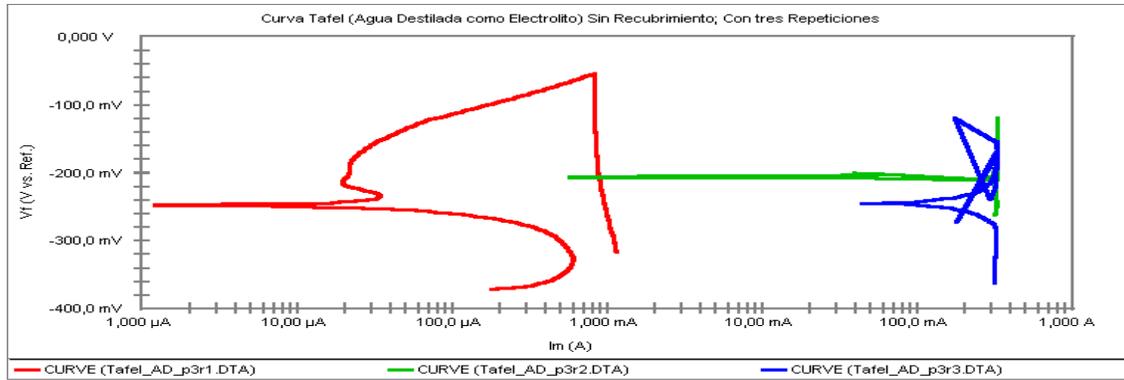
Gráfica 5.1. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.2. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

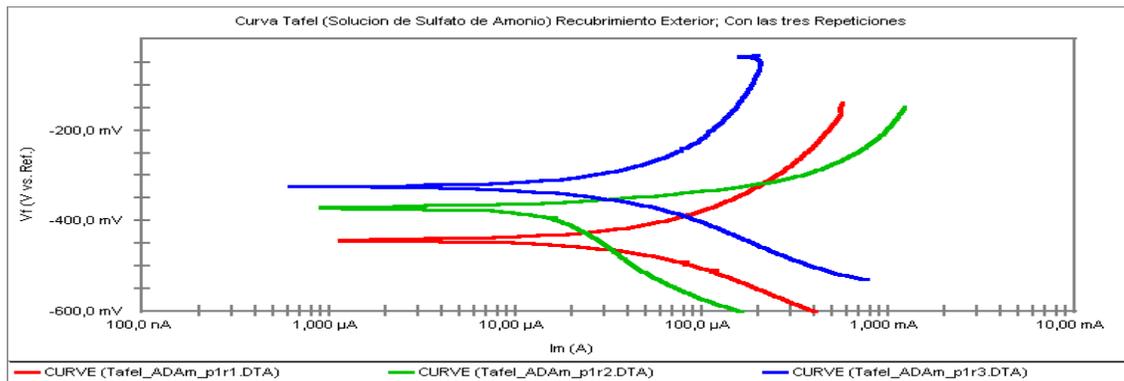


Gráfica 5.3. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

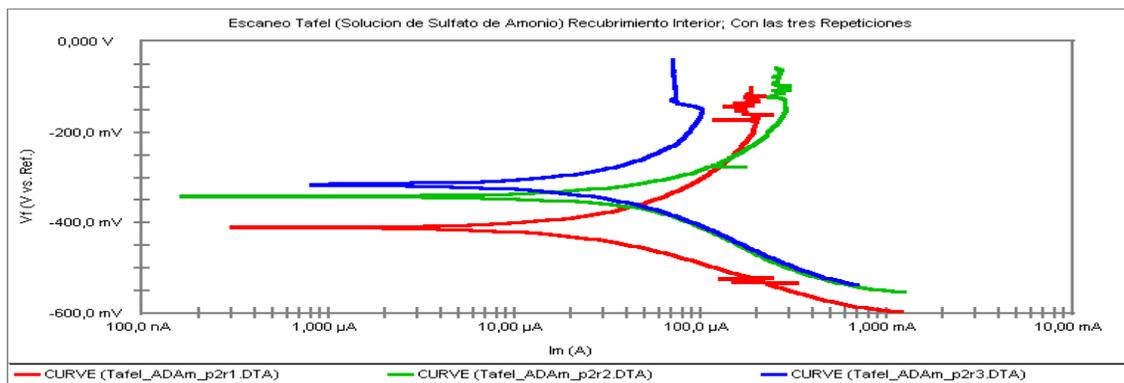


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una solución de Agua Destilada al 1% de Sulfato de Amonio (Sin Suelo)

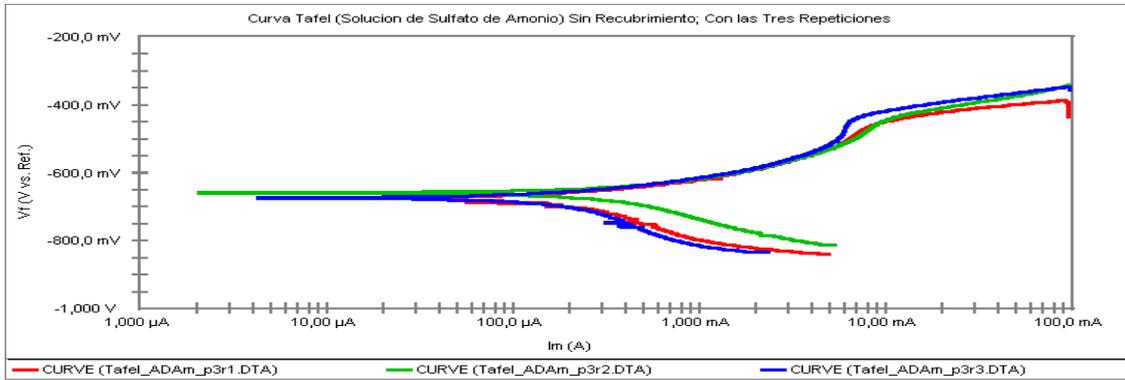
Gráfica 5.4. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.5. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

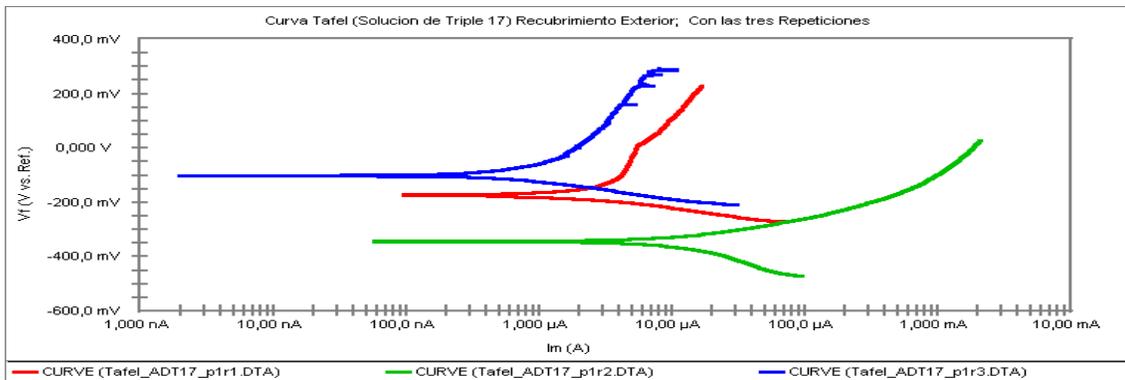


Gráfica 5.6. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

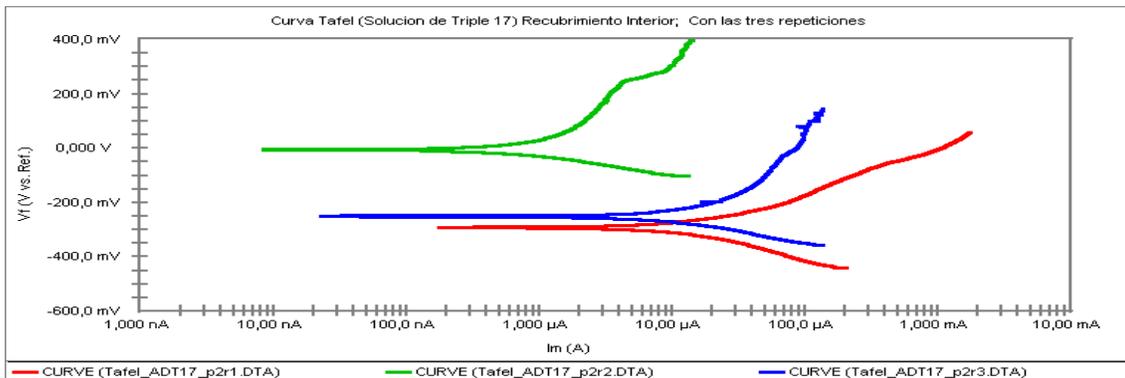


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una solución de Agua Destilada al 1% de Triple 17 (Sin Suelo)

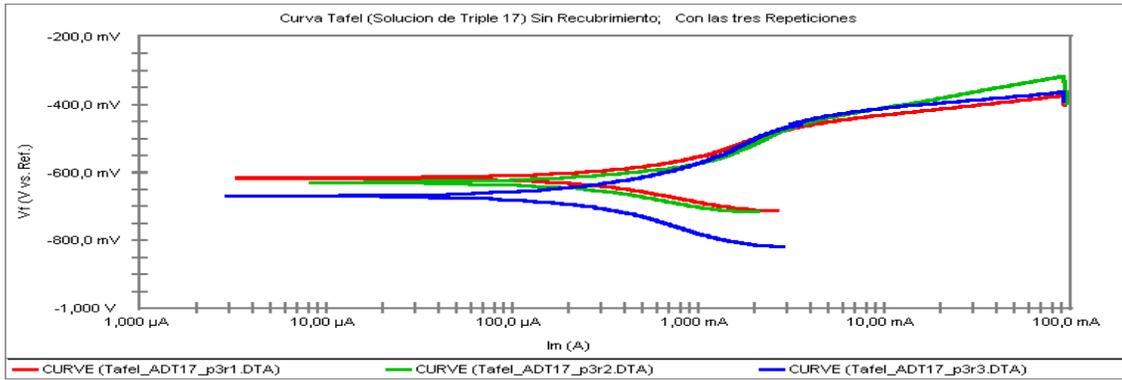
Gráfica 5.7. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.8. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

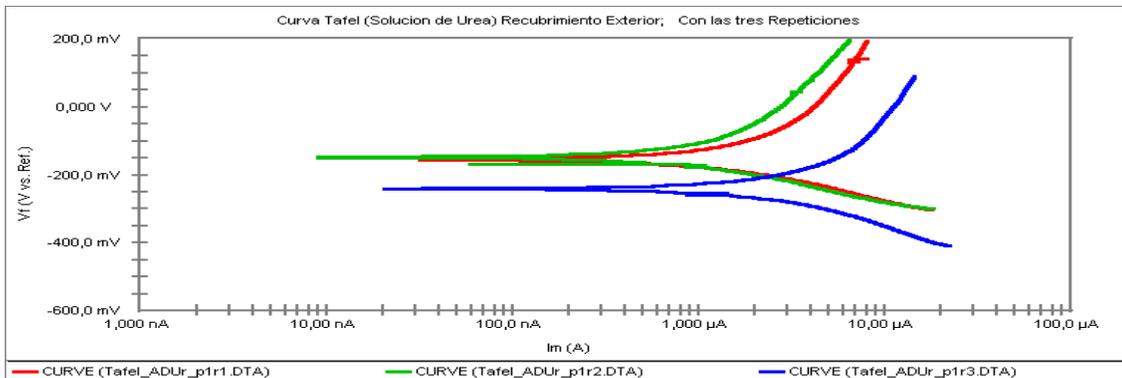


Gráfica 5.9. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

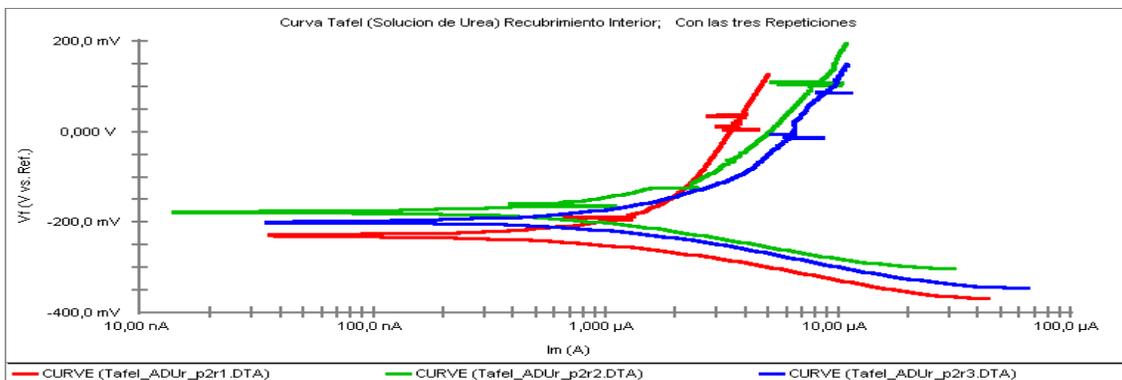


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una solución de Agua Destilada al 1% de Urea (Sin Suelo)

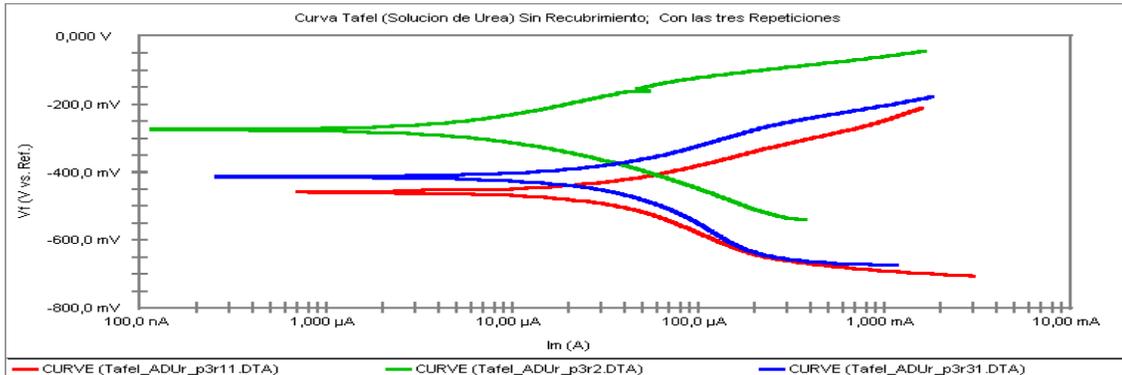
Gráfica 5.10. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.11. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

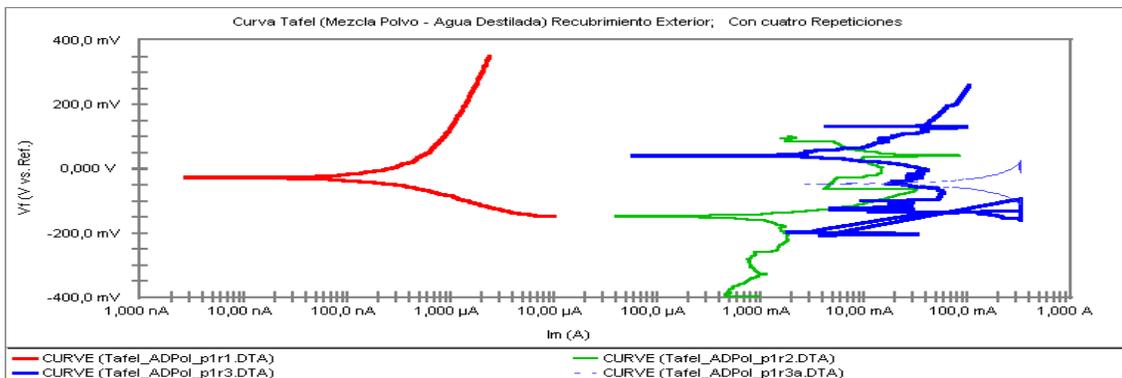


Gráfica 5.12. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

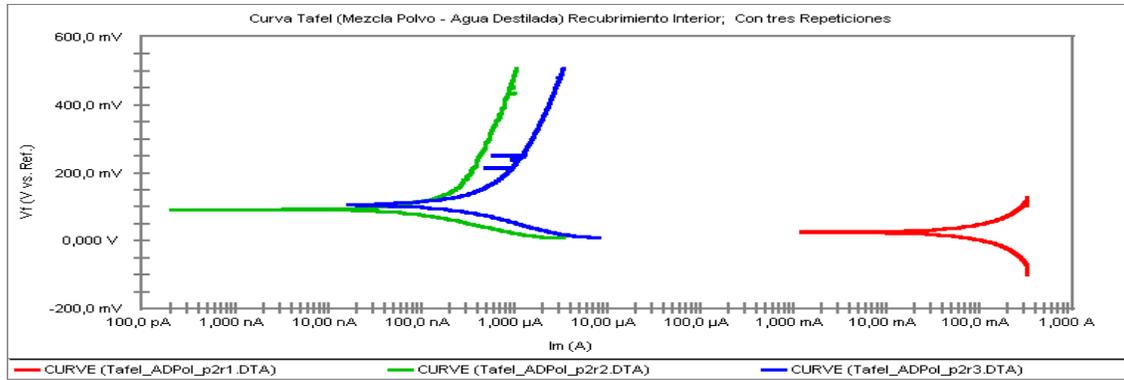


Gráficas Tafel de los experimentos realizados en potenciostato (Gamry Framework), con Mezcla de Suelo (Polvo) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.)

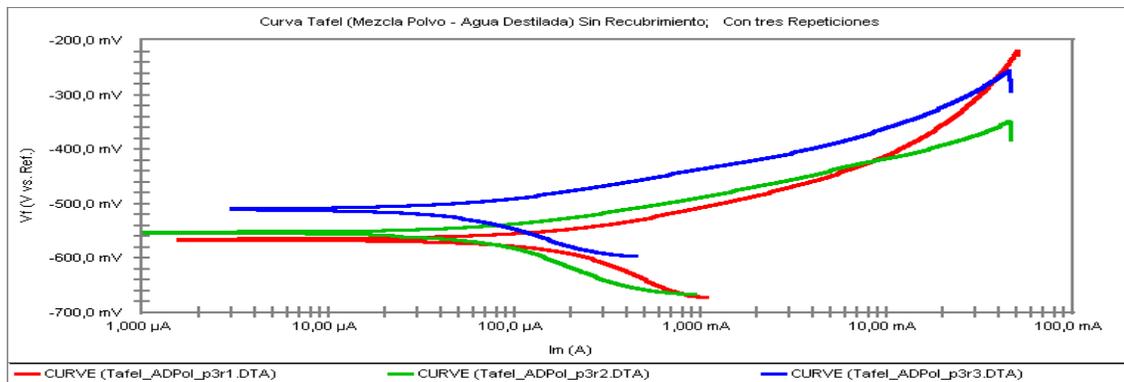
Gráfica 5.13. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.14. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

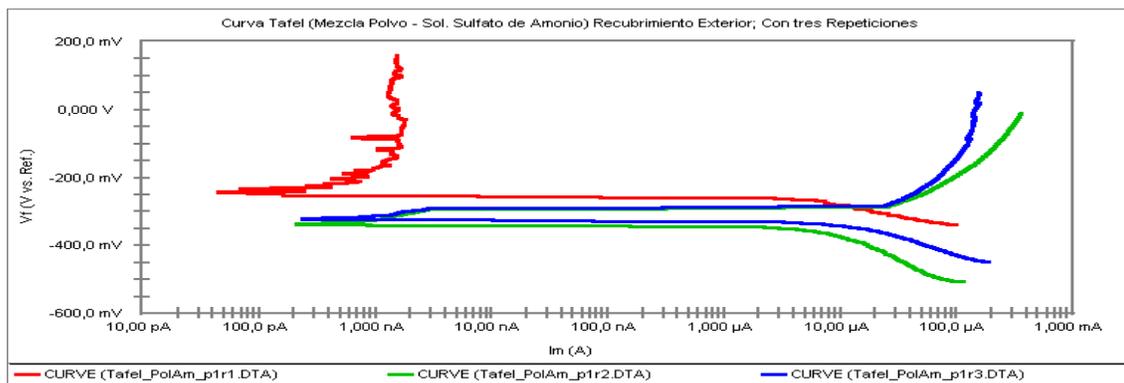


Gráfica 5.15. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

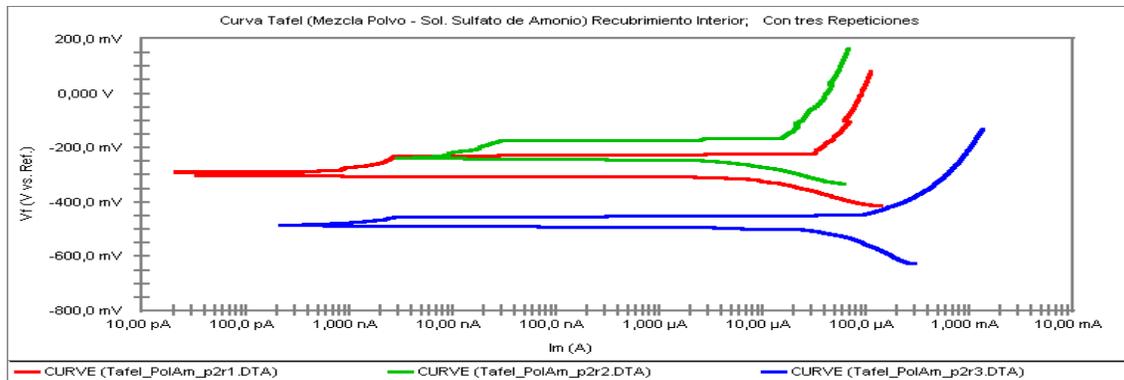


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%.

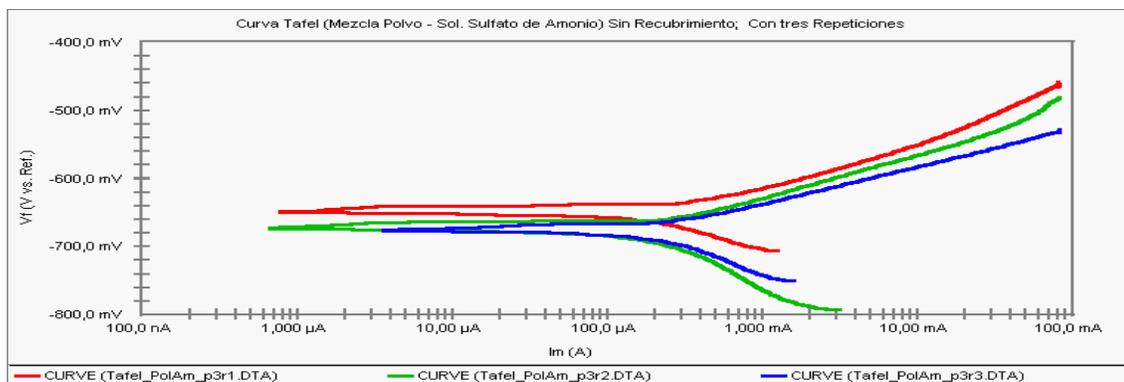
Gráfica 5.16. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.17. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

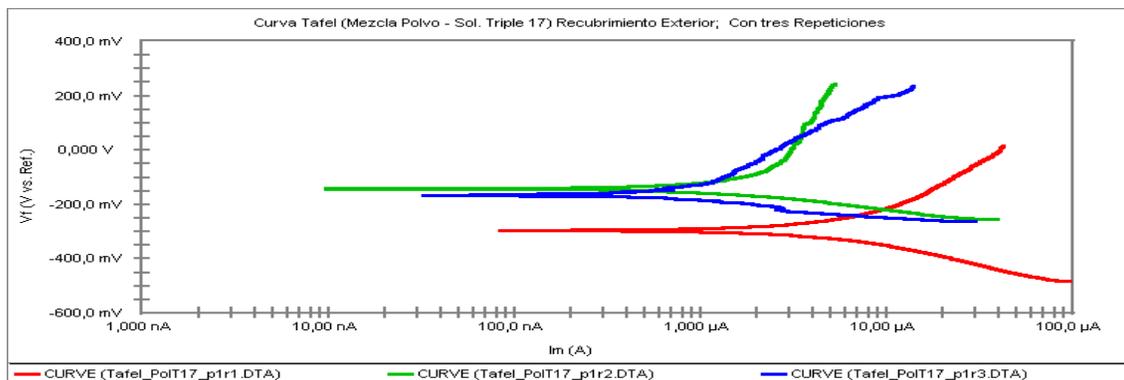


Gráfica 5.18. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

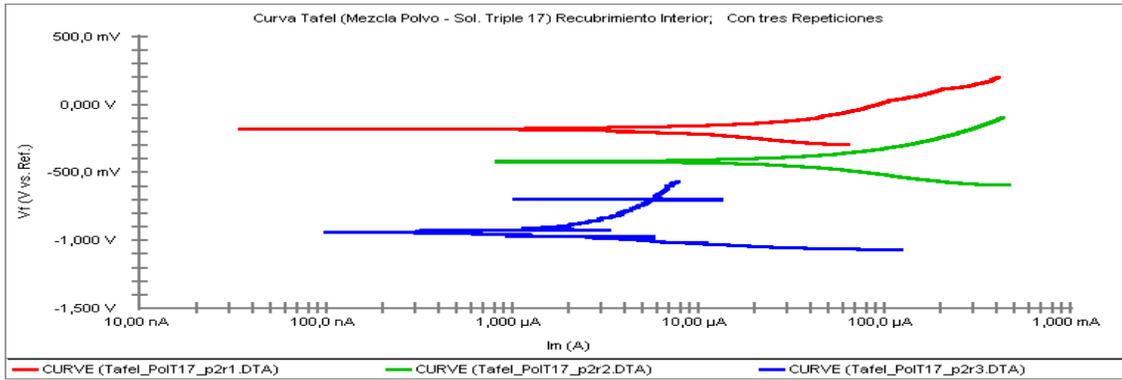


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Triple 17 al 1%.

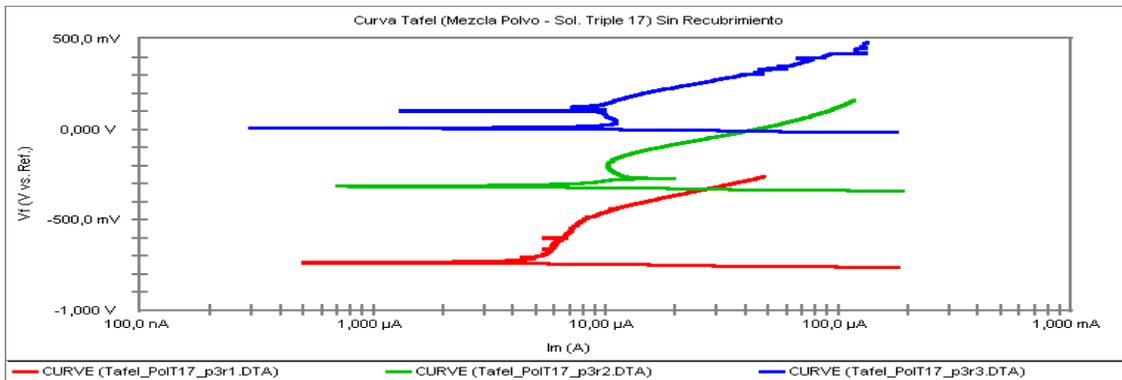
Gráfica 5.19. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.20. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

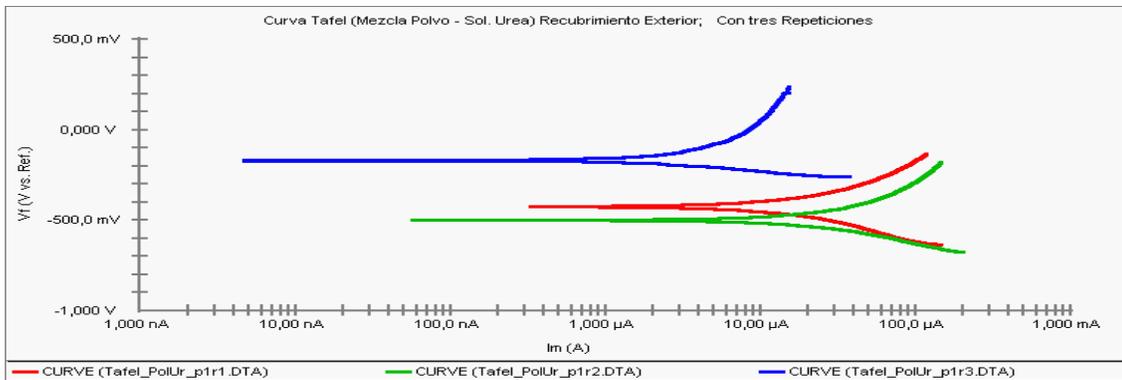


Gráfica 5.21. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

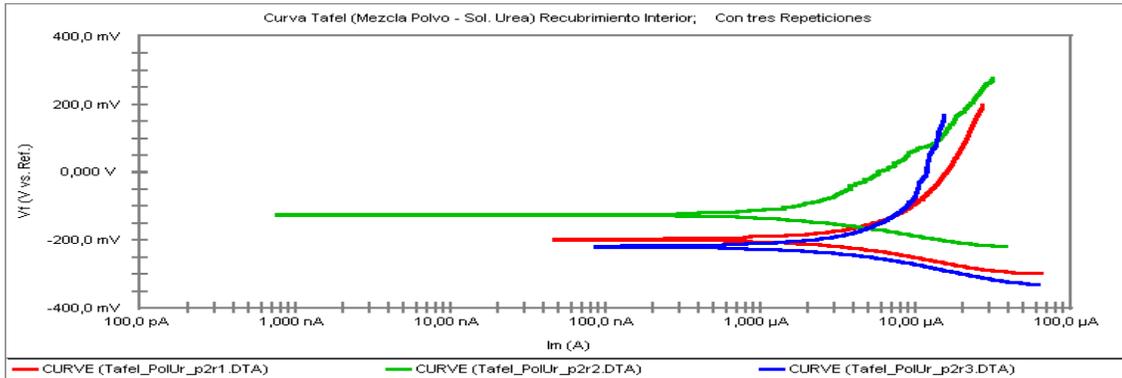


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Urea al 1%.

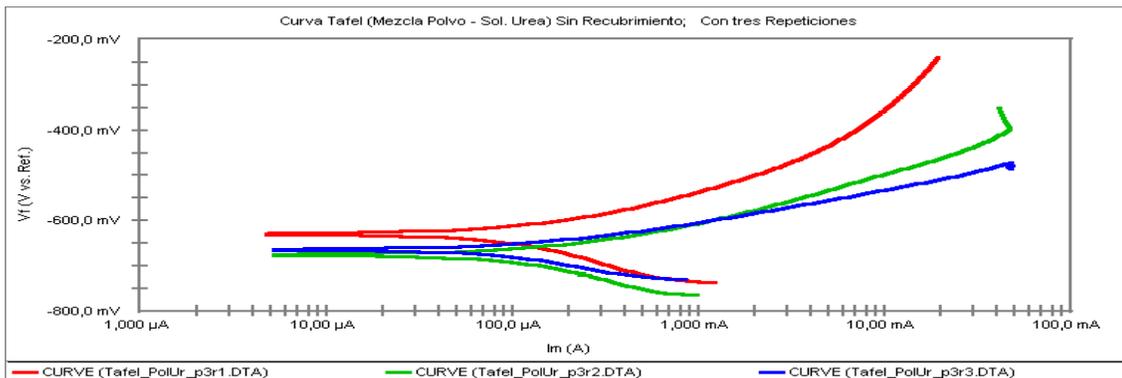
Gráfica 5.22. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.23. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

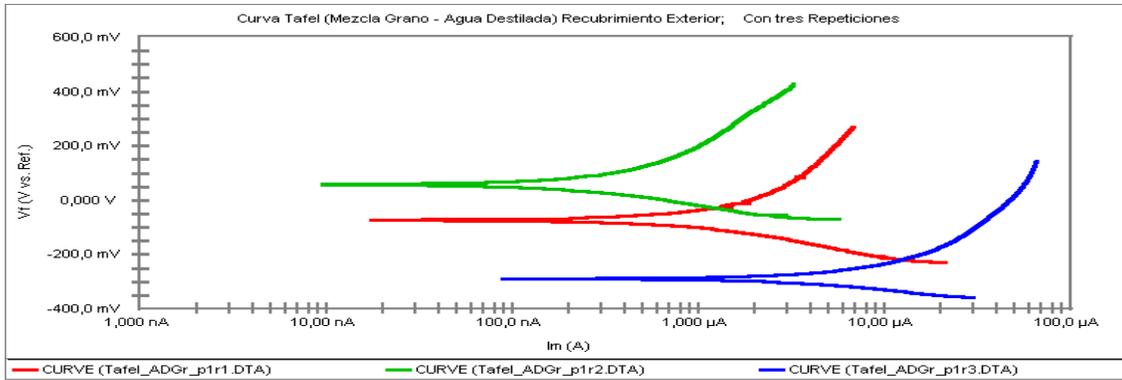


Gráfica 5.24. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

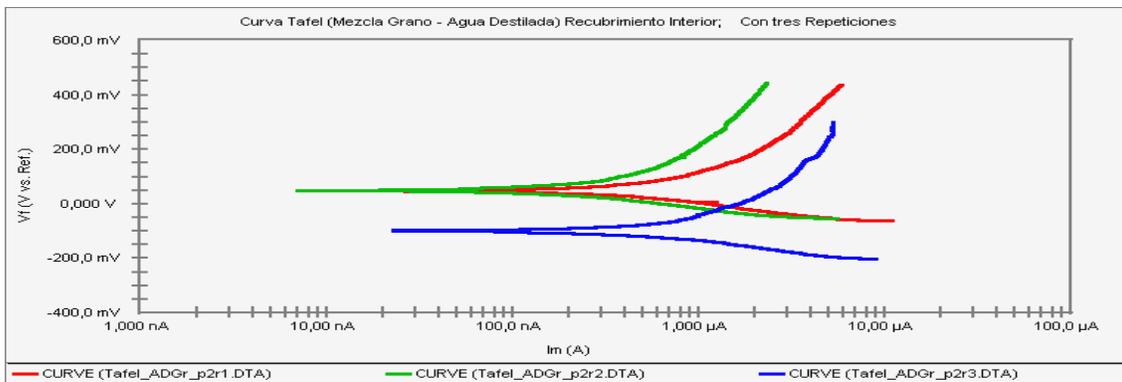


Gráficas Tafel de los experimentos realizados en potenciostato (Gamry Framework), con Mezcla de Suelo (Grano) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 400 mLt. agua.)

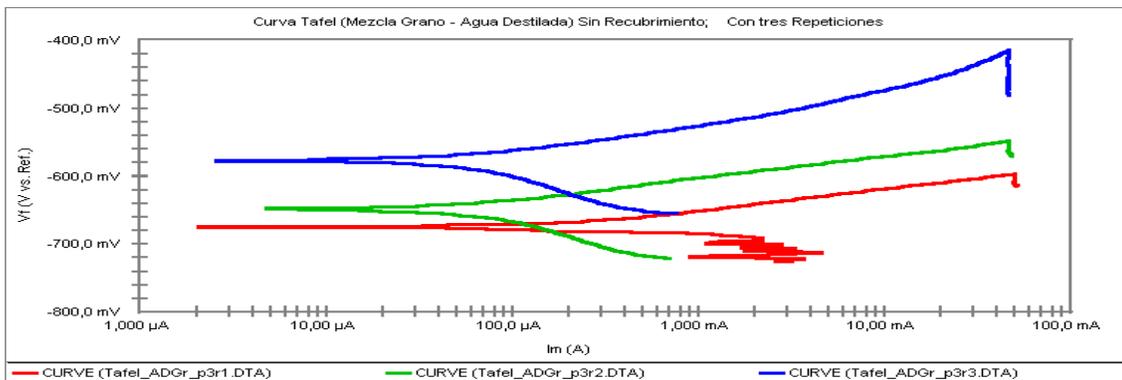
Gráfica 5.25. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.26. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

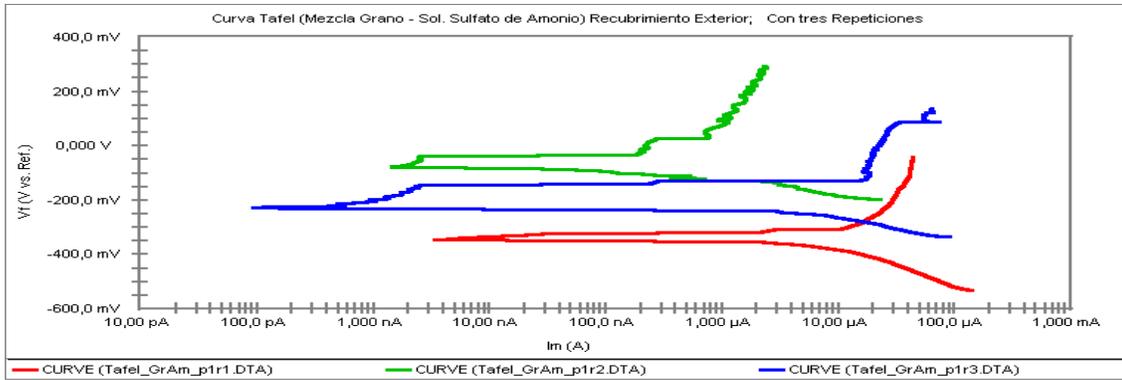


Gráfica 5.27. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

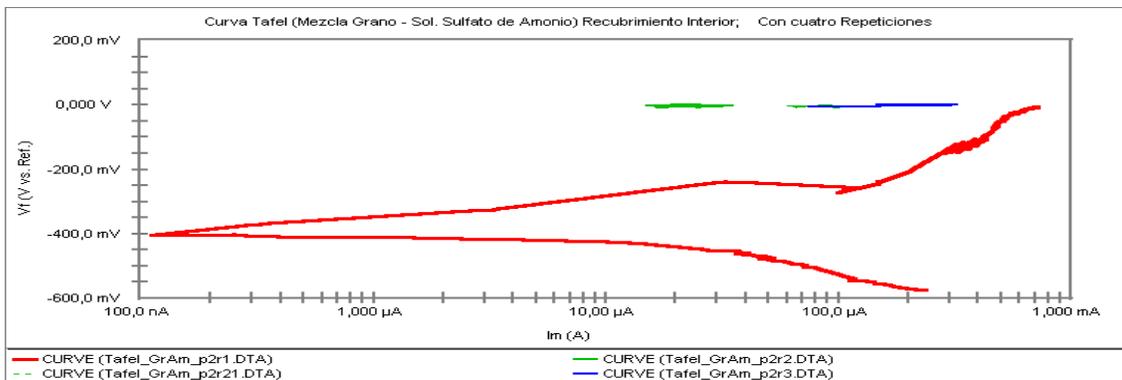


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%.

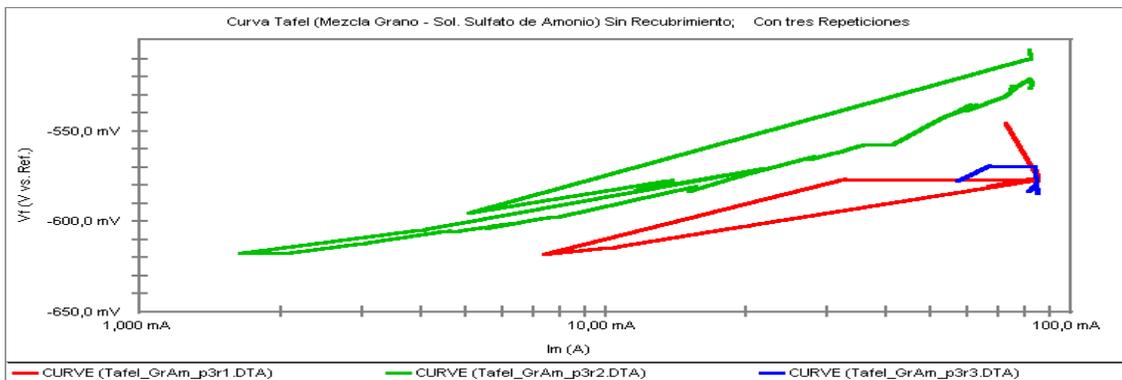
Gráfica 5.28. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.29. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

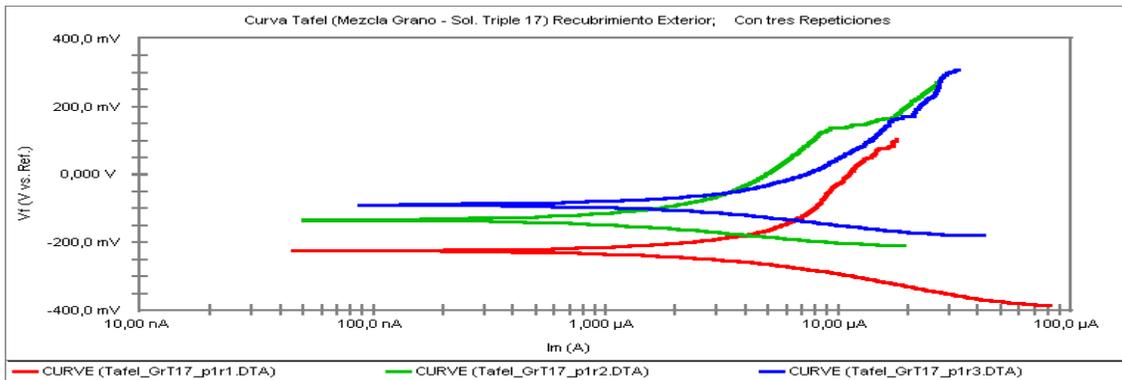


Gráfica 5.30. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

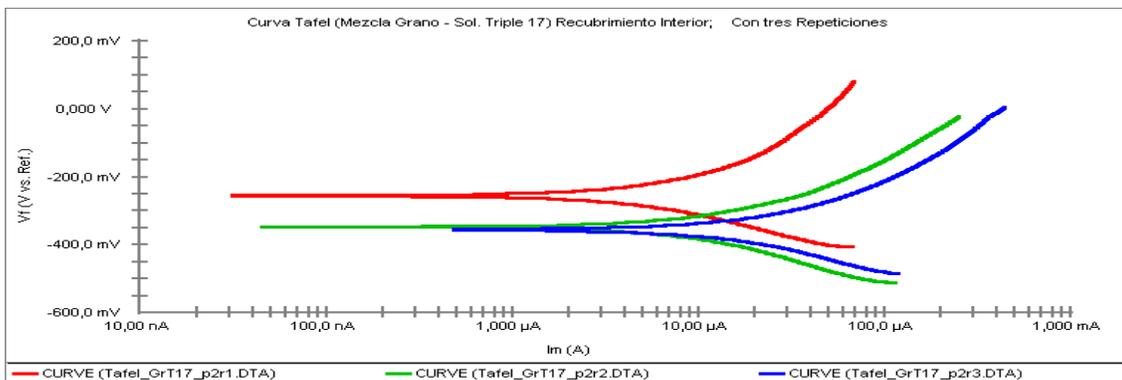


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Triple 17 al 1%.

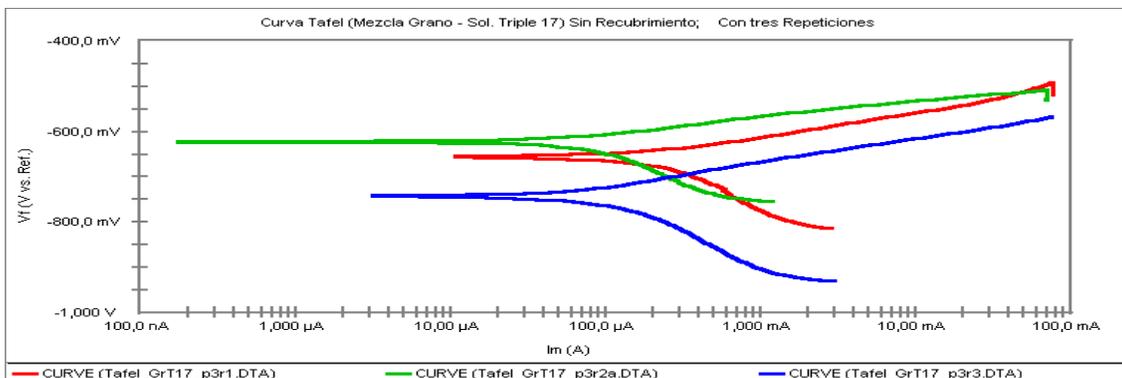
Gráfica 5.31. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.32. Para probetas con exposición en la superficie Interior.

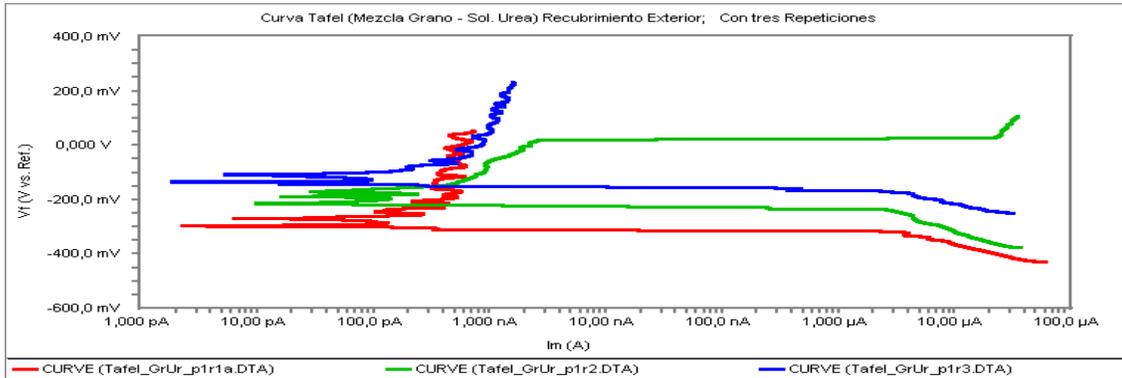


Gráfica 5.33. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).

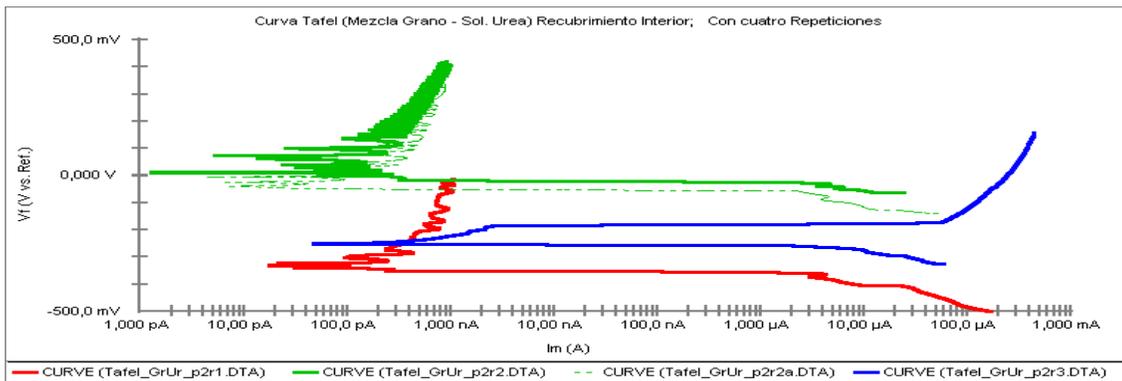


Gráficas Tafel de los experimentos realizados con una mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Urea al 1%.

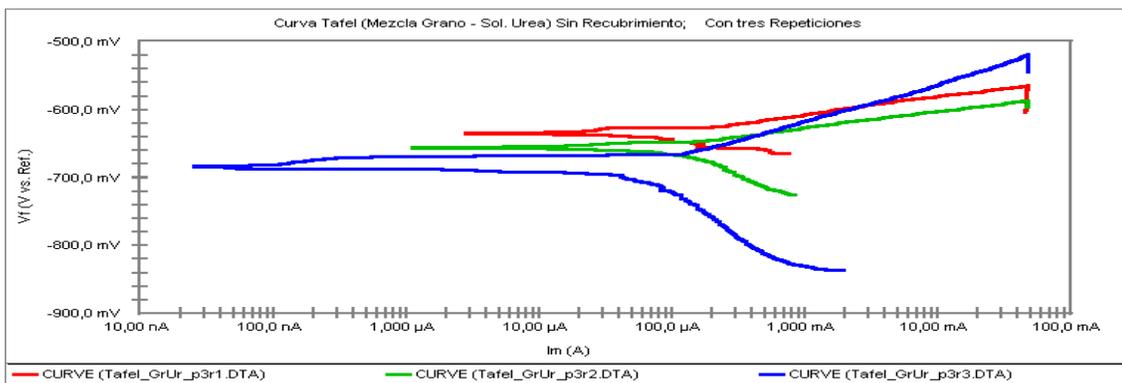
Gráfica 5.34. Para probetas con exposición en la superficie Exterior.



Gráfica 5.35. Para probetas con exposición en la superficie Interior.



Gráfica 5.36. Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento).



A continuación se presentan los resultados de los ajustes realizados para cada gráfica obtenida en las mediciones, utilizando el software Analyzer chemical Gamry.

**Cuadro 5.4** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para Agua Destilada como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Solución	Sin Suelo ( <i>Agua Destilada</i> )			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	1.041	0.97	0.943
	$\beta_C$ (V/década)	0.642	0.279	0.198
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.8	1.4	1.15
	$E_{corr}$ (mV)	-166	-169	-79.2
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	0.205	0.16	0.132
	<b>Chi Cuadrada</b>	0.489	0.352	0.252
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	0.561	1.00E+18	0.701
	$\beta_C$ (V/década)	0.176	0.0914	0.338
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	2.16	1.4	1.36
	$E_{corr}$ (mV)	-135	-236	34
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	0.2466	0.1594	0.1552
	<b>Chi Cuadrada</b>	3.419	8.699	18.2
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	0.1235	---	---
	$\beta_C$ (V/década)	0.0359	---	---
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	8.04	---	---
	$E_{corr}$ (mV)	-245	---	---
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	0.9182	---	---
	<b>Chi Cuadrada</b>	35.04	---	---

**Cuadro 5.5** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la solución de Sulfato de Amonio al 1% como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Solución	Sin Suelo ( <i>Agua Destilada – Sulfato de Amonio</i> )			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	0.3556	0.1171	0.6914
	$\beta_C$ (V/década)	0.2563	0.4061	0.2726
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	100	28	91.9
	$E_{corr}$ (mV)	-441	-371	-323
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	11.42	3.196	10.5
	<b>Chi Cuadrada</b>	2.556	44.29	1.899
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	0.3598	0.5313	0.5906
	$\beta_C$ (V/década)	0.1747	0.4121	0.2636
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	50.4	158	70.7
	$E_{corr}$ (mV)	-409	-341	-314
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	5.762	18.03	8.077
	<b>Chi Cuadrada</b>	4.41	5.229	1.394
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	1.57E-01	1.62E-01	2.16E-01
	$\beta_C$ (V/década)	4.14E-01	2.39E-01	8.96E+12
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	492	656	884
	$E_{corr}$ (mV)	-672	-657	-672
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	56.19	74.96	101
	<b>Chi Cuadrada</b>	20.93	13.54	19.7

**Cuadro 5.6** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la solución Triple 17 al 1% como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Solución	Sin Suelo ( <i>Agua Destilada – Triple 17</i> )			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	5.64E-01	2.24E-01	4.76E-01
	$\beta_C$ (V/década)	7.57E-02	1.00E+18	9.16E-02
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	3.08	67.5	1.15
	$E_{corr}$ (mV)	-173	-343	-101
	Velocidad de Corrosión (mpa)	3.52E-01	7.713	1.32E-01
	Chi Cuadrada	1.601	23.83	2.455
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	1.70E-01	3.53E-01	3.08E-01
	$\beta_C$ (V/década)	1.66E-01	9.60E-02	1.00E+18
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	18.5	1.05	11.6
	$E_{corr}$ (mV)	-291	-4.99	-249
	Velocidad de Corrosión (mpa)	2.111	1.20E-01	1.326
	Chi Cuadrada	7.624	4.255	125.8
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	1.21E-01	1.46E-01	1.90E-01
	$\beta_C$ (V/década)	1.13E-01	1.31E-01	1.92E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	271	334	311
	$E_{corr}$ (mV)	-614	-627	-667
	Velocidad de Corrosión (mpa)	31.01	38.12	35.52
	Chi Cuadrada	13.74	11.34	13.32

**Cuadro 5.7** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la solución de Urea al 1% como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Solución	Sin Suelo ( <i>Agua Destilada – Urea</i> )			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	7.00E-01	2.67E-01	1.048
	$\beta_C$ (V/década)	1.93E-01	1.08E-01	3.33E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	2.69	469.0 e-5	7.47
	$E_{corr}$ (mV)	-153	-147	-240
	Velocidad de Corrosión (mpa)	3.07E-01	5.36E-02	8.54E-01
	Chi Cuadrada	2.99E-01	76.06	2.677
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	7.42E-01	4.79E-01	4.66E-01
	$\beta_C$ (V/década)	1.16E-01	1.55E-01	1.37E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.67	2.05	2.19
	$E_{corr}$ (mV)	-228	-176	-198
	Velocidad de Corrosión (mpa)	1.91E-01	2.35E-01	2.51E-01
	Chi Cuadrada	1.659	5.294	3.768
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	1.42E-01	1.23E-01	1.53E-01
	$\beta_C$ (V/década)	2.15E-01	1.50E-01	2.64E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	31.6	6.26	31.3
	$E_{corr}$ (mV)	-456	-273	-411
	Velocidad de Corrosión (mpa)	3.611	7.15E-01	3.57
	Chi Cuadrada	9.139	14.49	6.179

**Cuadro 5.8** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla Agua Destilada – Polvo como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso ( <i>Agua Destilada – Polvo</i> )			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	5.42E-01	---	---
	$\beta_C$ (V/década)	1.27E-01	---	---
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	507.0 e-5	---	---
	$E_{corr}$ (mV)	-25.4	---	---
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	5.79E-02	---	---
	<b>Chi Cuadrada</b>	1.767	---	---
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	9.75E-01	5.82E-01	4.88E-01
	$\beta_C$ (V/década)	9.06E+04	1.07E-01	1.24E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.580 e 4	221.0 e-5	559.0 e-5
	$E_{corr}$ (mV)	27.1	93.5	107
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	1.80E+05	2.53E-02	6.38E-02
	<b>Chi Cuadrada</b>	2.384	2.732	4.254
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	1.65E-01	7.15E-02	1.00E-01
	$\beta_C$ (V/década)	1.00E+18	1.80E-01	1.00E+18
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	697	100	208
	$E_{corr}$ (mV)	-564.0	-553.0	-509.0
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	79.63	11.45	23.76

	<b>Chi Cuadrada</b>	40.86	9.556	12.96
--	---------------------	-------	-------	-------

**Cuadro 5.9** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante de Sulfato de Amonio al 1% “Sol. Sulfato de Amonio – Polvo” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso (Sol. Sulfato de Amonio – Polvo)			
	Repetición	Primera repetición	Segunda repetición	Tercera repetición
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	8.822	6.16E-02	8.93E-02
	$\beta_C$ (V/década)	1.96E-02	1.00E+18	7.32E+09
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.35	7.01	19.3
	$E_{corr}$ (mV)	-237	-319	-323
	Velocidad de Corrosión (mpa)	1.54E-04	8.01E-04	2.20E+00
	Chi Cuadrada	28.66	196	214.8
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	7.03E-02	9.63E-02	6.46E-02
	$\beta_C$ (V/década)	2.47E-02	2.33E-02	1.00E+18
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.22	8.06	13.1
	$E_{corr}$ (mV)	-284	-237	-473
	Velocidad de Corrosión (mpa)	1.39E-04	9.21E-04	1.50E+00
	Chi Cuadrada	165.3	157.8	201.3
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	5.12E-02	4.42E-02	1.00E-01
	$\beta_C$ (V/década)	1.00E+18	4.54E-02	1.00E+18
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	20	7.8	208

	<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	-649	-672	-509
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	2.283	8.91E-01	23.76
	<b>Chi Cuadrada</b>	89.48	86.56	12.96

**Cuadro 5.10** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante Triple 17 al 1% “Triple 17 – Polvo” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso (Triple 17 – Polvo)			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	<b><math>\beta_A</math> (V/década)</b>	4.40E-01	1.09	3.60E-01
	<b><math>\beta_C</math> (V/década)</b>	2.02E-01	1.07E-01	8.39E-02
	<b>I<sub>corr</sub> (<math>\mu</math>A)</b>	8.7	2.3	928.0 e -5
	<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	-294	-141	-164
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	9.94E-01	2.63E-01	1.06E-01
	<b>Chi Cuadrada</b>	4.86E-01	2.564	5.658
Recubrimiento Inferior	<b><math>\beta_A</math> (V/década)</b>	3.74E-01	4.14E-01	7.53E-01
	<b><math>\beta_C</math> (V/década)</b>	1.386	3.55E-01	1.09E-01
	<b>I<sub>corr</sub> (<math>\mu</math>A)</b>	41.7	81.5	2.02
	<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	-175	-414	-936
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	4.764	9.313	2.31E-01
	<b>Chi Cuadrada</b>	7.922	1.808	48.79
Sin Recubrimiento	<b><math>\beta_A</math> (V/década)</b>	5.06E-02	4.74E-02	4.87E-02
	<b><math>\beta_C</math> (V/década)</b>	1.00E+18	1.00E+18	2.74E-01

	<b><math>I_{corr}</math> (<math>\mu A</math>)</b>	123.0E-8	23.90E-8	3.870E-8
	<b><math>E_{corr}</math> (mV)</b>	-592	-169	45.6
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	1.40E-05	2.73E-03	4.42E-07
	<b>Chi Cuadrada</b>	536.6	226.4	2.81E+03

Cuadro 5.11 El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante de Urea al 1% “Sol. Urea – Polvo” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso (Sol. Urea – Polvo)			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	<b><math>\beta_A</math> (V/década)</b>	4.80E-01	---	6.19E-01
	<b><math>\beta_C</math> (V/década)</b>	3.90E-01	---	1.31E-01
	<b><math>I_{corr}</math> (<math>\mu A</math>)</b>	32.9	---	3.95
	<b><math>E_{corr}</math> (mV)</b>	-423	---	-169
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	3.753	---	4.51E-01
	<b>Chi Cuadrada</b>	5.64E-01	---	13.22
Recubrimiento Inferior	<b><math>\beta_A</math> (V/década)</b>	7.49E-01	3.56E-01	1.138
	<b><math>\beta_C</math> (V/década)</b>	1.68E-01	9.32E-02	1.47E-01
	<b><math>I_{corr}</math> (<math>\mu A</math>)</b>	8.53	2.7	7.35
	<b><math>E_{corr}</math> (mV)</b>	-196	-124	-217
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	9.74E-01	3.08E-01	8.39E-01
	<b>Chi Cuadrada</b>	1.312	2.679	1.067
Sin Recubrimiento	<b><math>\beta_A</math> (V/década)</b>	2.43E-01	1.49E-01	7.44E-02

	$\beta_c$ (V/década)	1.00E+18	1.00E+18	1.53E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	699	552	161
	$E_{corr}$ (mV)	-628	-674	-662
	Velocidad de Corrosión (mpa)	79.81	63	18.39
	Chi Cuadrada	10.96	12.81	1.461

Cuadro 5.12 El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de Agua Destilada y suelo tipo Grano como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso (Agua Destilada – Grano)			
	Repeticón	Primera repeticón	Segunda repeticón	Tercera repeticón
Tipo de Recubrimiento	Medicón			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	6.12E-01	4.41E-01	7.06E-01
	$\beta_c$ (V/década)	1.94E-01	1.66E-01	2.64E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.99	488.0 e -5	18
	$E_{corr}$ (mV)	-71.7	58.3	-289
	Velocidad de Corrosión (mpa)	2.28E-01	5.57E-02	2.057
	Chi Cuadrada	2.032	1.508	9.85E-01
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	5.05E-01	5.79E-01	6.03E-01
	$\beta_c$ (V/década)	1.67E-01	1.50E-01	1.69E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	1.07	522.0 e -5	1.38
	$E_{corr}$ (mV)	49.2	50.8	-98.2
	Velocidad de Corrosión (mpa)	1.23E-01	5.97E-02	1.58E-01
	Chi Cuadrada	2.24	1.794	2.341

Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	---	3.10E-02	5.94E-02
	$\beta_c$ (V/década)	---	6.50E-02	4.52E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	---	45.8	159
	$E_{corr}$ (mV)	---	-647	-576
	Velocidad de Corrosión (mpa)	---	5.234	18.16
	Chi Cuadrada		32.77	65.49

**Cuadro 5.13** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante de Sulfato de Amonio al 1% “Sol. Sulfato de Amonio – Grano” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso (Sol. Sulfato de Amonio – Grano)			
	Repeticón	Primera repeticón	Segunda repeticón	Tercera repeticón
Tipo de Recubrimiento	Medicón			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	8.66E-02	1.38E-01	6.72E-02
	$\beta_c$ (V/década)	4.80E-02	3.76E-02	2.32E-02
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	27.40 e -5	10.40 e -5	772.0 e -8
	$E_{corr}$ (mV)	-342	-67.1	-213
	Velocidad de Corrosión (mpa)	3.13E-03	1.19E-03	8.82E-05
	Chi Cuadrada	169.1	113	145.8
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	1.28E-01	---	---
	$\beta_c$ (V/década)	6.24E-02	---	---
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	631.0 e -5	---	---
	$E_{corr}$ (mV)	-405	---	---

	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	7.21E-02	---	---
	<b>Chi Cuadrada</b>	61.44	---	---
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	---	---	---
	$\beta_C$ (V/década)	---	---	---
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	---	---	---
	$E_{corr}$ (mV)	---	---	---
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	---	---	---
	<b>Chi Cuadrada</b>	---	---	---

**Cuadro 5.14** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante Triple al 1% “*Sol. Triple 17 – Grano*” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso ( <i>Sol. Triple 17 – Grano</i> )			
	<i>Repeticón</i>	<i>Primera repeticón</i>	<i>Segunda repeticón</i>	<i>Tercera repeticón</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	7.33E-01	3.53E-01	5.02E-01
	$\beta_C$ (V/década)	1.64E-01	9.52E-02	1.46E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	5.82	1.96	5.59
	$E_{corr}$ (mV)	-224	-132	-87.8
	<b>Velocidad de Corrosión (mpa)</b>	6.65E-01	2.24E-01	6.38E-01
	<b>Chi Cuadrada</b>	1.046	2.791	2.018
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	4.09E-01	2.70E-01	3.41E-01
	$\beta_C$ (V/década)	2.57E-01	2.66E-01	3.66E-01

	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	11.7	17.7	42.3
	$E_{corr}$ (mV)	-254	-347	-355
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	1.339	2.024	4.827
	<b>Chi Cuadrada</b>	1.669	2.652	1.227
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	6.18E-02	3.85E-02	6.03E-02
	$\beta_C$ (V/década)	1.87E-01	1.05E-01	1.33E-01
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	244	44.4	71.4
	$E_{corr}$ (mV)	-654	-621	-741
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	27.9	5.077	8.156
	<b>Chi Cuadrada</b>	6.821	7.77	6.978

**Cuadro 5.15** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante Urea al 1% “Sol. Urea – Grano” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo.

Tipo de Mezcla	Con Suelo Arcilloso (Sol. Urea – Grano)			
	<i>Repetición</i>	<i>Primera repetición</i>	<i>Segunda repetición</i>	<i>Tercera repetición</i>
Tipo de Recubrimiento	Medición			
Recubrimiento Superior	$\beta_A$ (V/década)	---	---	---
	$\beta_C$ (V/década)	---	---	---
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	---	---	---
	$E_{corr}$ (mV)	---	---	---
	<b>Velocidad de Corrosión</b> (mpa)	---	---	---
	<b>Chi Cuadrada</b>	---	---	---
Recubrimiento Inferior	$\beta_A$ (V/década)	---	---	---

	$\beta_c$ (V/década)	---	---	---
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	---	---	---
	$E_{corr}$ (mV)	---	---	---
	Velocidad de Corrosión (mpa)	---	---	---
	Chi Cuadrada	---	---	---
Sin Recubrimiento	$\beta_A$ (V/década)	2.18E-02	2.03E-02	2.93E-02
	$\beta_c$ (V/década)	2.65E-02	4.90E-02	3.83E-02
	$I_{corr}$ ( $\mu A$ )	42.3	37.7	202.0 e -5
	$E_{corr}$ (mV)	-634	-656	-683
	Velocidad de Corrosión (mpa)	4.836	4.312	2.31E-02
	Chi Cuadrada	168.6	30.49	104.9

De los resultados que se presentan en los cuadros anteriores se tomaron las velocidades de corrosión para cada medición, tomando el promedio de solo dos de las repeticiones realizadas como parte del diseño, ya que la primer repetición sirvió para estandarizar el equipo, y así asegurar la reproducibilidad y la repetitividad del experimento. De lo cual se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Resultados de los promedios de las velocidades de corrosión en *mpa*, que se extrajeron de los datos del ajuste Tafel, considerando dos repeticiones.

Tipo de Suelo	Tipo de Fertilizante	Agua Destilada (Sin Suelo)			Polvo			Grano		
		Repetición	R2	R3	Promedio	R2	R3	Promedio	R2	R3
Agua Destilada	Recubrimiento Exterior	0.16	0.132	<b>0.146</b>	---	5.79E-02	<b>5.79E-02</b>	2.28E-01	5.57E-02	<b>0.14181</b>
	Recubrimiento Interior	0.1594	0.1552	<b>0.1573</b>	2.53E-02	6.38E-02	<b>0.044555</b>	1.23E-01	1.58E-01	<b>0.14045</b>
	Sin Recubrimiento			<b>0.9182</b>	11.45	23.76	<b>17.605</b>	5.234	18.16	<b>11.697</b>
Sulfato de Amonio	Recubrimiento Exterior	11.42	10.5	<b>10.96</b>	1.54E-04	8.01E-04	<b>0.0004774</b>	3.13E-03	1.19E-03	<b>0.0021595</b>

Triple 17	Recubrimiento Interior	5.762	8.077	<b>6.9195</b>	1.39E-04	9.21E-04	<b>0.00052975</b>	---	7.21E-02	<b>7.21E-02</b>
	Sin Recubrimiento	74.96	101	<b>87.98</b>	2.283	23.76	<b>13.0215</b>	---	---	---
	Recubrimiento Exterior	3.52E-01	1.32E-01	<b>0.2418</b>	2.63E-01	1.06E-01	<b>0.1846</b>	6.65E-01	6.38E-01	<b>0.65145</b>
	Recubrimiento Interior	2.111	1.326	<b>1.7185</b>	4.764	9.313	<b>7.0385</b>	2.024	4.827	<b>3.4255</b>
	Sin Recubrimiento	38.12	35.52	<b>36.82</b>	1.40E-05	2.73E-03	<b>0.001372</b>	5.077	8.156	<b>6.6165</b>
	Recubrimiento Exterior	3.07E-01	5.36E-02	<b>0.18028</b>	3.753	4.51E-01	<b>2.10205</b>	---	---	---
Urea	Recubrimiento Interior	2.35E-01	2.51E-01	<b>0.24255</b>	9.74E-01	8.39E-01	<b>0.90665</b>	---	---	---
	Sin Recubrimiento	3.611	3.57	<b>3.5905</b>	79.81	63	<b>71.405</b>	4.836	4.312	<b>4.574</b>

De la tabla anterior se extraen los siguientes datos:

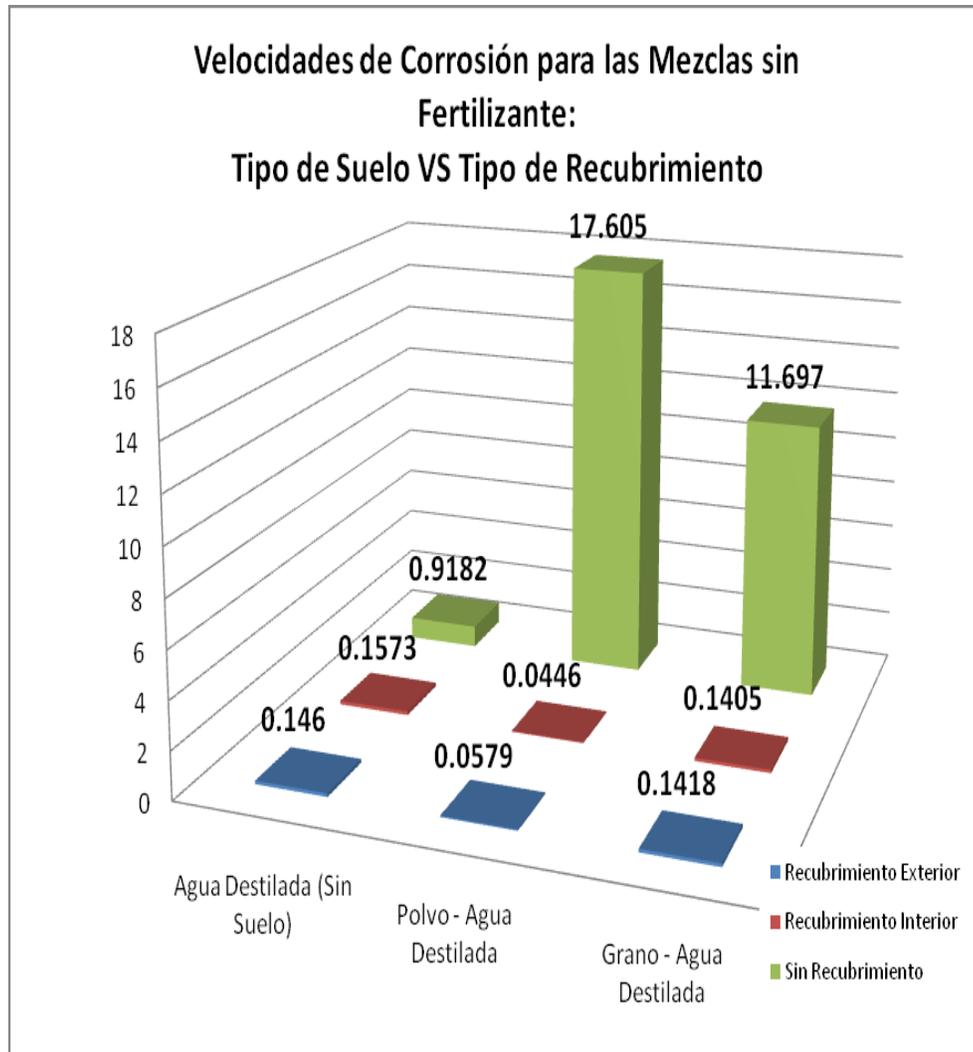
Tabla 5.2 Resumen de los resultados de las velocidades de corrosión en *mpa*, que se extrajeron de los datos del ajuste Tafel.

Tipo de Suelo		Agua Destilada (Sin Suelo)	Polvo	Grano
Tipo de Fertilizante				
Agua Destilada	Recubrimiento Exterior	0.1460	0.0579	0.1418
	Recubrimiento Interior	0.1573	0.0446	0.1405
	Sin Recubrimiento	0.9182	17.6050	11.6970
Sulfato de Amonio	Recubrimiento Exterior	10.9600	0.0005	0.0022
	Recubrimiento Interior	6.9195	0.0005	0.07210
	Sin Recubrimiento	87.9800	13.0215	---
Triple 17	Recubrimiento Exterior	0.2418	0.1846	0.6515

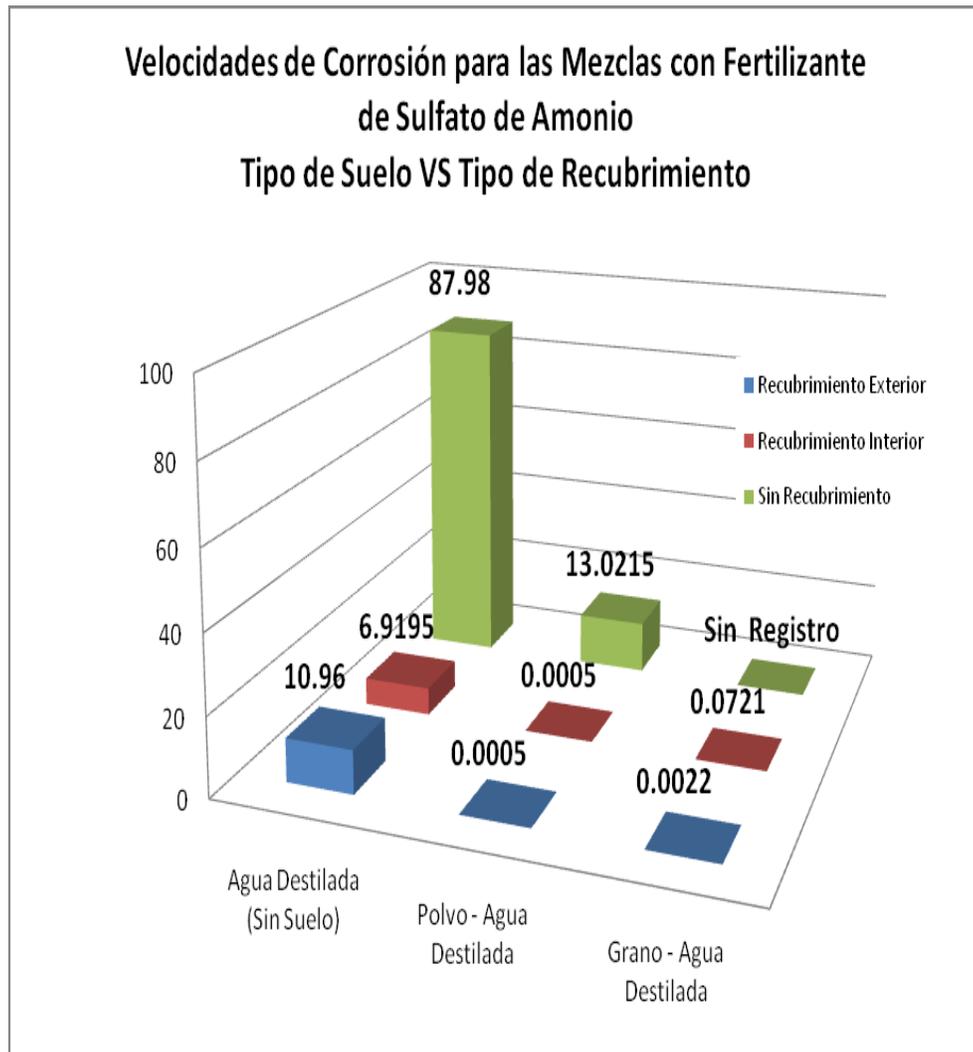
	Recubrimiento Interior	1.7185	7.0385	3.4255
	Sin Recubrimiento	36.8200	0.0014	6.6165
Urea	Recubrimiento Exterior	0.1803	2.1021	---
	Recubrimiento Interior	0.2426	0.9067	---
	Sin Recubrimiento	3.5905	71.4050	4.5740

En esta tabla se registran los cálculos de las velocidades de corrosión de acuerdo al ajuste realizado en el potencióstato para las curvas Tafel que se obtuvieron en las mediciones. Donde se realizaron mediciones utilizando tres diferentes fertilizantes para alterar la salinidad de un mismo tipo de suelo, Suelo Arcilloso, con dos diferentes tipos de tamaño de grano.

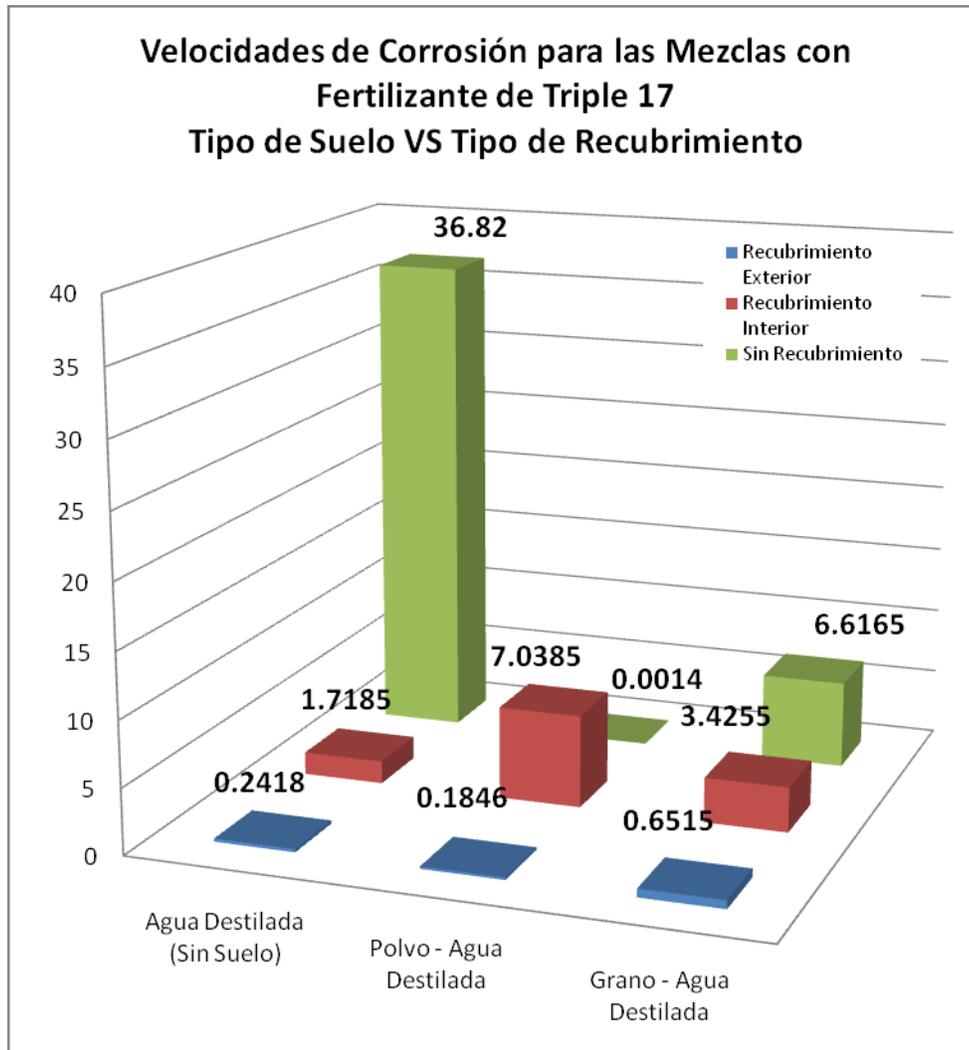
De la tabla 5.2, se obtienen las siguientes gráficas, donde se puede observar la variabilidad de las velocidades de corrosión respecto a cada superficie expuesta de la sección de tubería utilizada en el experimento, recordando que este tipo de tubería es el más comúnmente utilizado en la industria Mexicana.



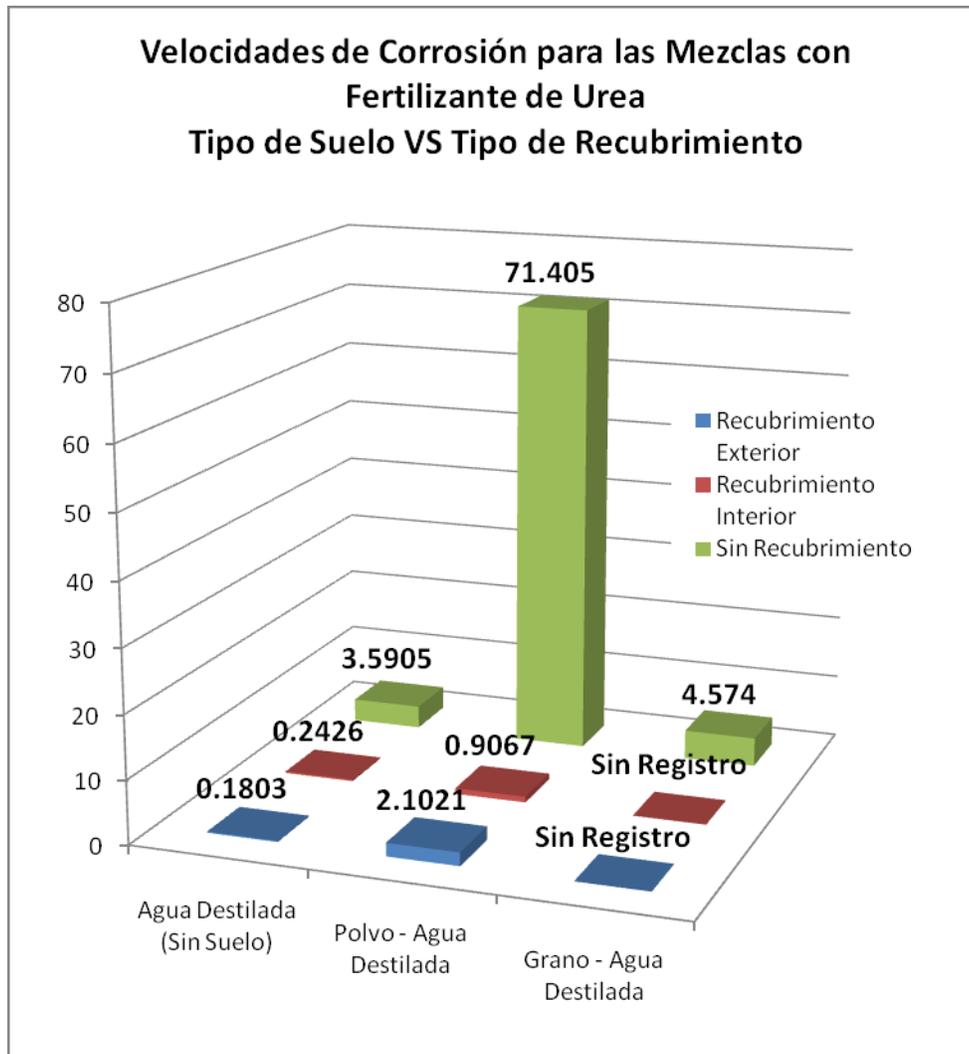
Gráfica 5. 37 La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión resultantes (en mpa) para las Mezclas de Suelo y Agua destilada sin fertilizante, “Suelo – Agua Destilada”, para los diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas.



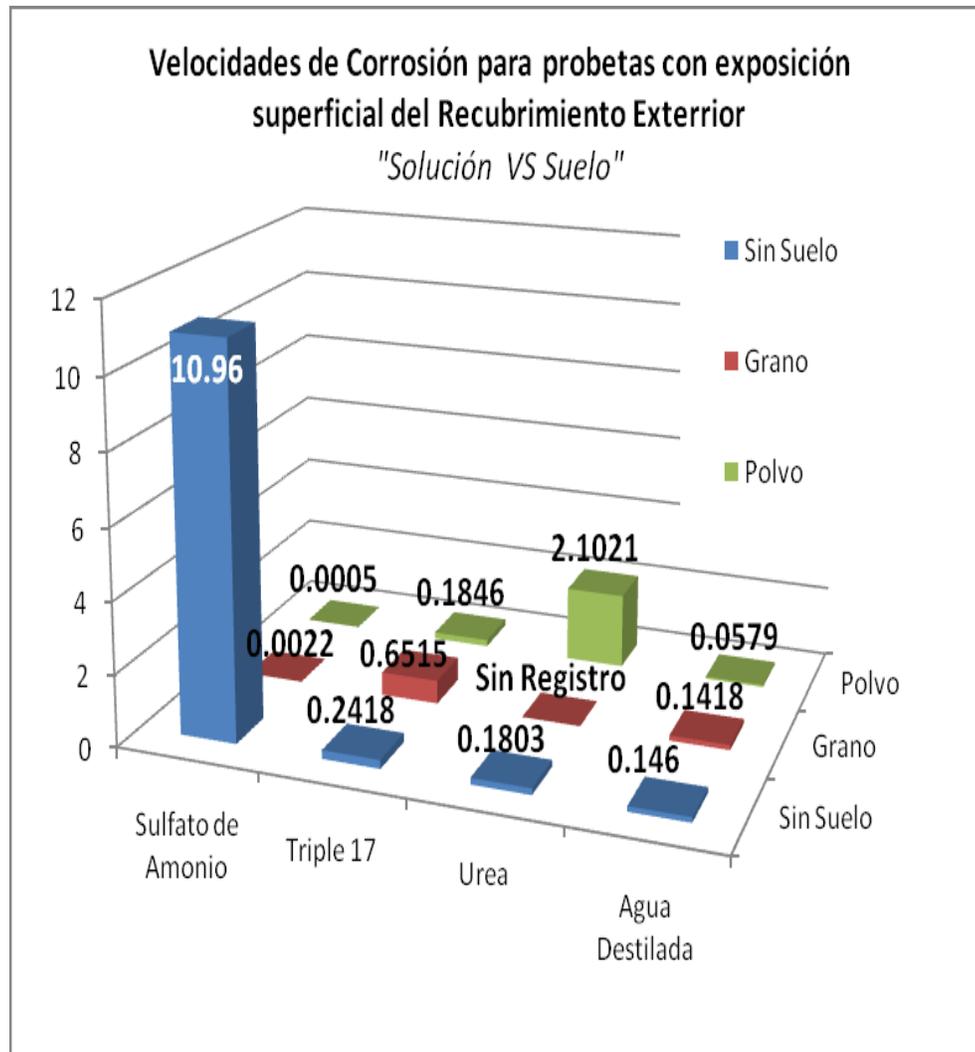
Gráfica 5. 38La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en las Mezclas de suelo fertilizadas, “Sol. Sulfato de Amonio al 1% – Suelo”, para los dos diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas.



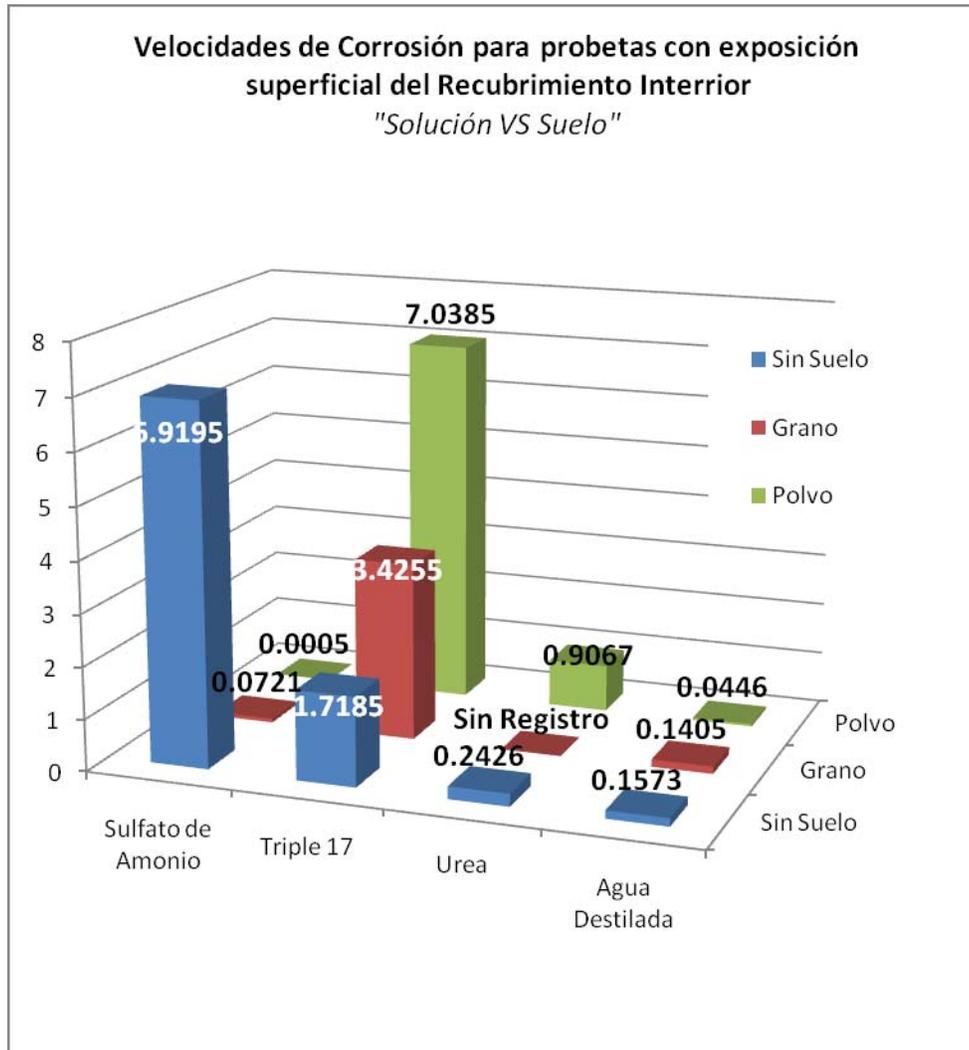
Gráfica 5. 39 La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en las Mezclas de suelo fertilizadas, “Sol. Triple 17 al 1% – Suelo”, para los dos diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas.



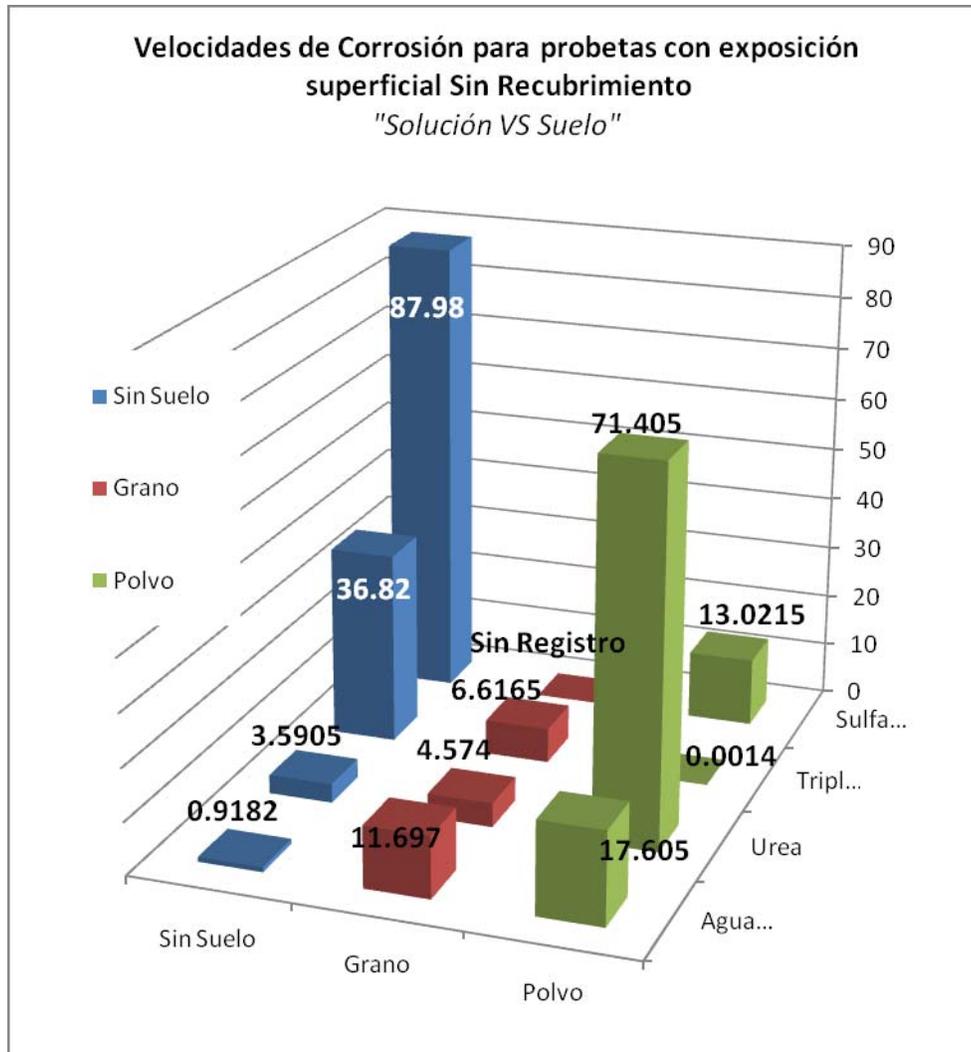
Gráfica 5. 40 La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en las Mezclas de suelo fertilizadas, “Sol. Urea al 1% – Suelo”, para los dos diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas.



Gráfica 5. 41 La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en todas las Mezclas fertilizadas de suelo “Sol. Fertilizadla 1% – Suelo”, para las probetas con exposición a la corrosión en su Recubrimiento Exterior del Tubo de Alta temperatura Grado B utilizado.



Gráfica 5. 42 La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en todas las Mezclas fertilizadas de suelo “Sol. Fertilizadla 1% – Suelo”, para las probetas con exposición a la corrosión en su Recubrimiento Interior del Tubo de Alta temperatura Grado B utilizado.



Gráfica 5. 43La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en todas las Mezclas fertilizadas de suelo “Sol. Fertilizadla 1% – Suelo”, para las probetas con

exposición a la corrosión en su superficie Sin Recubrimiento del Tubo de Alta temperatura Grado B utilizado.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS:

La gráfica 5. 37 muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión respecto a la salinidad propia del suelo con las tres diferentes áreas superficiales expuestas de las probetas:

- a.) Recubrimiento Exterior
- b.) Recubrimiento Interior
- c.) Sin Recubrimiento

En esta gráfica se observa que la rapidez de corrosión es constante en ambos recubrimientos, pues:

$$V_{\text{corr}} (\text{Polvo, Rec. Exterior}) = 0.0579 \text{ mpa} \text{ y } V_{\text{corr}} (\text{Polvo, Rec. Interior}) = 0.0446 \text{ mpa}$$

Entonces, para la textura fina como el suelo polvo:

$$V_{\text{corr}} (\text{Polvo, Rec. Exterior}) = V_{\text{corr}} (\text{Polvo, Rec. Interior})$$

De igual forma, para la textura suelo grano, las velocidades de corrosión resultantes fueron  $V_{\text{corr}} (\text{Grano, Rec. Exterior}) = 0.1418 \text{ mpa}$  y  $V_{\text{corr}} (\text{Grano, Rec. Interior}) = 0.1405 \text{ mpa}$ .

Entonces se tiene que

$$V_{\text{corr}} (\text{Grano, Rec. Exterior}) = V_{\text{corr}} (\text{Grano, Rec. Interior})$$

Por último, para Agua destilada y sin suelo:  $V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo, Rec. Exterior}) = 0.146 \text{ mpa}$  y  $V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo, Rec. Interior}) = 0.1573 \text{ mpa}$ . Entonces:

$$V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo, Rec. Exterior}) = V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo, Rec. Interior})$$

Se observa también, que en ambientes controlados, sin salinidad, la corrosividad del material aumenta considerablemente para la mezcla suelo polvo, cuya velocidad de corrosión es  $V_{\text{corr}}(\text{Polvo, Sin Rec.}) = 17.605 \text{ mpa}$ , aumenta también aunque en menor grado, la  $V_{\text{corr}}(\text{grano, Sin Rec.}) = 11.697 \text{ mpa}$ . Esto implica que la corrosión tiene un incremento acelerado cuando la tubería queda desprotegida.

En la gráfica 5. 38 se presentan las velocidades de corrosión, ahora con la salinidad del Sulfato de Amonio para el suelo con las tres diferentes áreas superficiales expuestas de las probetas:

- a.) Recubrimiento Exterior
- b.) Recubrimiento Interior
- c.) Sin Recubrimiento

Donde la variación en la corrosividad para el material es relativamente grande, ya que la  $V_{\text{corr}}(\text{Polvo, Rec. Exterior}) = 0.0005 \text{ mpa}$  y  $V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo, Rec. Exterior}) = 10.96 \text{ mpa}$ . Análogamente, para la  $V_{\text{corr}}(\text{Polvo, Rec. Interior}) = 0.0005 \text{ mpa}$  y  $V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo, Rec. Interior}) = 6.9195 \text{ mpa}$ , pero para el acero desnudo (sin recubrimiento), la  $V_{\text{corr}}(\text{Polvo, Sin Rec.}) = 13.0215 \text{ mpa}$  y  $V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo, Rec. Exterior}) = 87.98 \text{ mpa}$ , Entonces, la textura fina de suelo polvo afecta directamente a la corrosividad como:

$$V_{\text{corr}}(\text{Polvo}) \ll V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo})$$

Por otra parte, para la solución sin ningún tipo de suelo, las velocidades de corrosión con los recubrimientos varían muy poco en comparación con la velocidad de la corrosión para la probeta desnuda. Entonces:

$$V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo, Rec. Interior}) < V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo, Rec. Exterior}) \ll V_{\text{corr}}(\text{Sin Suelo, Sin Rec.})$$

Pero esta relación cambia para el caso del suelo polvo y en el suelo grano, las únicas velocidades de corrosión resultantes fueron  $V_{\text{corr}}(\text{Grano, Rec. Exterior}) = 0.0022 \text{ mpa}$  y

$V_{\text{corr}}$  (Grano, Rec. Interior) = **0.0721 mpa**. Lo anterior indica que el deterioro debido a la corrosión corresponde a que en la textura granular los poros o espacios entre los granos son más grandes permitiendo un mayor flujo del oxígeno, por lo que hay mayor reacción con el material.

La gráfica 5. 39 exhibe la variabilidad de las velocidades de corrosión respecto a la sal Triple 17. Donde las probetas con Recubrimiento Exterior, reportan poca variabilidad tanto en la solución sin suelo, como en las mezclas con suelo, la corrosividad varía entre 0.2 y 0.7 mpa,

Las probetas con Recubrimiento Interior, reportan una variabilidad igualmente pequeña, ya que el valor más pequeño de la velocidad de corrosión es de  $V_{\text{corr}}$  (Sin Suelo, Rec. Interior) = **1.7185 mpa**. En tanto que la velocidad más alta es  $V_{\text{corr}}$  (Polvo, Rec. Interior) = **7.0385 mpa**.

Las probetas Sin Recubrimiento, en cambio reportan una variabilidad muy alta, la  $V_{\text{corr}}$  (Sin Suelo, Sin Rec.) = **36.82 mpa**, y la menor  $V_{\text{corr}}$  (Polvo, Sin Rec.) = **0.0014 mpa**. No obstante en esta gráfica se observa que el comportamiento de la rapidez de corrosión con respecto a la textura es irregular, pues en los tres casos (suelo, polvo, suelo grano y solución sin suelo) el comportamiento con el tipo de recubrimiento es distinto en las tres repeticiones.

La gráfica 5. 40 muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión respecto a la solución con Urea. En la cual se puede observar que la mezcla de suelo grano fue muy inestable y por lo que no se registraron los valores de la rapidez de corrosión en las probetas con recubrimiento Exterior e Interior. Si se analizan la gráficas de las curvas Tafel (5.34 y 5.35), se observa que la parte anódica de las curvas son completamente inestables, luego no hay una polarización adecuada para registrar el valor de la corriente anódica.

A pesar de lo anterior, la variabilidad en la corrosión es mínima, para las probetas sumergidas en la solución sin suelo, los valores de la corrosividad están entre (**0.1803 mpa, 3.5905 mpa**); a diferencia de las probetas sumergidas en la mezcla de suelo polvo, pues, los valores de la corrosión varían entre (**0.9067 mpa hasta 71.405 mpa**).

Al comparar la velocidad de corrosión de las probetas con Recubrimiento Exterior en la gráfica 5. 41, se visualiza poca variabilidad por efecto de la salinidad, excepto para la sal del Sulfato de Amonio, que reporta una  $V_{\text{corr}}$  (Sin Suelo, Sol. Sulfato de Amonio) = **10.96 mpa**.

En cambio para las probetas con Recubrimiento Interior en la gráfica 5.42 se observa que el efecto de las sales es muy irregular, ya que:

a.) En la sal Sulfato de Amonio:

$$V_{\text{corr}} (\text{Polvo}) < V_{\text{corr}} (\text{Grano}) < V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo})$$

Indicando que la textura inhibe la corrosión.

b.) En la Solución con Triple 17,

$$V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo}) < V_{\text{corr}} (\text{Grano}) < V_{\text{corr}} (\text{Polvo})$$

En esta sal si hay efector nocivos, y estos aumentan al disminuir el tamaño de grano del suelo.

c.) Para la sal Urea se tiene:

$$V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo}) < V_{\text{corr}} (\text{Polvo})$$

Solo que no hay registro para la textura con suelo grano.

En cambio en el Agua Destilada (sin salinidad), se obtiene:

$$V_{\text{corr}} (\text{Polvo}) < V_{\text{corr}} (\text{Grano}) < V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo})$$

De lo cual se deduce que la humedad aumenta la velocidad de corrosión, luego entonces la corrosividad disminuye cuando la textura es más compacta.

Finalmente la gráfica 5. 43 muestra las velocidades de la corrosión para las muestras Sin Recubrimiento, donde se observa que:

- a.) Cuando no hay suelo, la sal que más daña a la tubería es el Sulfato de Amonio, con una  $V_{\text{corr}} (\text{Sin Suelo, Sin Rec.}) = 87.98 \text{ mpa}$ .
- b.) Con textura de suelo Grano, el Sulfato de Amonio reacciona de forma irregular y no hay efectos en las zonas catódicas de las microceldas que se forman en la superficie del metal (ver gráfica 5.3).
- c.) Con textura suelo Polvo, la sal de Urea reporta la  $V_{\text{corr}}$  más alta ( $V_{\text{corr}} (\text{Urea, Polvo}) = 71.405 \text{ mpa}$ ). Así la variabilidad de la corrosividad es relativamente grande pues, la  $V_{\text{corr}} (\text{Triple 17, Polvo}) = 0.0014 \text{ mpa}$ , es la más pequeña.

## 7. CONCLUSIONES

De los resultados logrados, se concluye que:

1. Los recubrimientos Inferior y Exterior de la tubería de alta temperatura Grado B, inhiben la corrosividad del metal cuando se encuentran en ambientes controlados no salinos, (gráfica 5.37). Cumpliéndose la siguiente relación:

$$V_{\text{corr}} (\text{Re c. Exterior}) = V_{\text{corr}} (\text{Re c. Interior}) \ll V_{\text{corr}} (\text{Sin Re c.})$$

1. En ambientes controlados sin salinidad, el Suelo con textura Polvo afecta directamente al material, cuya  $V_{\text{corr}} (\text{Sin Rec.}, \text{Polvo}, \text{Agua Destilada}) = 17.605 \text{ mpa}$  (ver gráfica 5.37)
2. La solución de Sulfato de Amonio (Sin Suelo) acelera la corrosividad del metal en todos los casos de exposición de las probetas, pues la  $V_{\text{corr}} (\text{Rec. Interior}) = 6.9195 \text{ mpa}$ ; la  $V_{\text{corr}} (\text{Rec. Exterior}) = 10.96 \text{ mpa}$  y la  $V_{\text{corr}} (\text{Sin Rec.})$  aumenta hasta  $87.98 \text{ mpa}$ . (Gráfica 5.38).
3. La sal Triple 17 presenta comportamientos irregulares, al realizar el análisis potencioestático, por lo que se recomienda un estudio químico para examinar cómo reaccionan los iones de este fertilizante en el metal y sus recubrimientos. (Ver gráfica 5.39).
4. La salinidad debida a la Urea acelera la corrosión en el material, cuando la tubería esta desprotegida (ir a la gráfica 5.40), por lo que se recomienda tener especial cuidado en no maltratar la tubería cuando se sabe que el suelo tiene cantidades considerables de este fertilizante.

5. El Suelo con textura Polvo con salinidad causada por triple 17, afecta mayormente en la parte interna del ducto, debido a que la  $V_{\text{corr}}$  (Polvo, Rec. Interior, Triple 17) = **7.0348 mpa** que es la más grande, (gráfica 42). Sin embargo, este no es un problema grave, a menos que por descuido o un mal mantenimiento se deje descubierta la parte interna de la tubería o se utilicen los ductos con soluciones salinas. Se recomienda no abandonar la tubería o permitir que haga contacto con suelos cuya salinidad corresponda a la del Triple 17, por largos periodos, por ejemplo en inundaciones o encharcamientos.
  
6. En esta misma gráfica (gráfica 5.42), se observa que las sales tienen comportamientos irregulares, en suelos con ambas texturas, así que el tratamiento para retrasar la corrosión debe ser estudiado por separado.
  
7. Finalmente, la gráfica 5. 43 muestra que el Sulfato de Amonio sin suelo afecta en gran medida la corrosividad. Por otra parte, cuando la textura es suelo grano, el Sulfato de Amonio reacciona de forma irregular y no hay efectos en las zonas catódicas de las microceldas que se forman en la superficie del metal (ver gráfica 5.3).

## BIBLIOGRAFÍA

1. Ávila J. y Genescá J., Más Allá de la Herrumbre, Editorial: Fondo de Cultura Económica; Ed. 1996.
2. Andrade Ma. C., Feliu S., Corrosión y Protección Metálicas Vol. II, Editorial: Consejo Superior de Investigaciones Científicas Madrid, Ed. 1991.
3. West Jhon M., Corrosión y Oxidación Fundamentos, Editorial Limusa, Ed. 1986.
4. Galvele José R., Corrosión, Editado por la Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos PRDCyT. Washington, D. C. Ed. 1979.
5. Ávila J. y Genescá J., Más Allá de la Herrumbre II. La Lucha Contra la Corrosión, Editorial: Fondo de Cultura Económica; Ed. 1997.
6. J. C. Scully, Fundamentos de la Corrosión, Editorial Alambra, S. A. Madrid, Buenos Aires, México, Ed. 1968.
7. E. Gileadi, E. Kirowa – Eisner, Some observations concerning the Tafel equation and its relevance to charge transfer in corrosion, Corrosion Science 47 (2005) pág. 3068 – 3085.
8. Norma ASTM G 3, Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, 2004.
9. Norma ASTM G102 – 89, Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, 1994.

10. B. Elsener, Corrosion rate of steel in concrete – Measurements beyond the Tafel law, *Corrosion Science* 47 (2005) pág. 3019 – 3033.
11. D. Paul Schweinsberg, Harvey J. Flitt, Reproducibility of corrosion parameters for the acidic dissolution of pure iron: potentiostatic polarization, *Corrosion Science* 47 (2005) pág. 1520 – 1533.
12. Aguirre A. G., *Química de los Suelos de Inundación Temporal y Perenne*, Editorial: UNMAM Cuautitlán, Ed. 2007.
13. Victor Chaker ans J. David Palmer, Effects of Soil characteristics on Corrosion, P. 37, ASTM – 1989.
14. Norma ASTM G 162 – 99. Standard Practice for Conducting and Evaluating Laboratory Corrosions test in Soils, 2004.
15. E. Lopez, A. Osella, L. Martino, Controlled experiments to study corrosion effects due to external varying fields in embedded pipelines, *Corrosion Science* 48 (2006) pág. 389 – 403.
16. Vega Rojas E. J., Garcia Perea M. A., Gomez Santoyo O., *Cultivo de cebolla Allium cepalin variedad contessa mediante manejo integrado en terrenos de la FESC*, Editorial: UNMAM Cuautitlán, Ed. 2004.
17. Norma ASTM G 1 – 90, Standard Practice for Preparing, Cleaning, an Evaluating Corrosion Test Specimens, 2004.
18. Norma ASTM G5 – 94, Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements, 2004.

## REFERENCIAS

1. Zhijian Tang, Seungkwan Hong, Weizhong Xiao, James Taylor, Characteristics of iron corrosion scales established under blending of ground, surface, and saline waters and their impacts on iron release in the pipe distribution system. *Corrosion Science* (2005).
2. Galvele J. R., Tafel's law in pitting corrosion and crevice corrosion acceptability, *Corrosion Science* 47 (2005), pág, 3053 – 3067.
3. Barbosa, S. M. C. de Souza, R. O. Centeno, I. C. Abud and O. B. Ferraz, Failure analysis of pipes used in a hydrodesulfuration system of a petrochemical plant, *Corrosion Science* (2005).
4. P. Linhardt, G. Ball, E. Schlemmer, Electrochemical investigation of chloride induced pitting of stainless steel under the influence of a magnetic field, *Corrosion Science* 47 (2005), pag, 1599 – 1603.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Corrosión Uniforme.	9
<b>Figura 1.2.</b> Corrosión en placas.	10
<b>Figura 1.3.</b> A. Corrosión por picadura    B. Corrosión en rendijas (“crevice corrosion”).	10
<b>Figura 1.4.</b> Corrosión intergranular.	11
<b>Figura 1.5.</b> Corrosión bajo tensiones.	11
<b>Figura 1.6.</b> Dirección de la corriente positiva en una pila seca.	13
<b>Figura 1.7.</b> Relación energía/distancia en la superficie de separación metal/solución, al someterse a una sobretensión anódica $\eta_A$ .	17
<b>Figura 1.8.</b> Diagrama de polarización Anódico y Catódico Típico.	19
<b>Figura 1.9.</b> Circuito para obtener curvas de polarización.	22
<b>Figura 2.1.</b> a) Se forman los horizontes; b) El suelo desarrollado sustenta una vegetación densa.	29
<b>Figura 2.2.</b> Clasificación del suelo según sus componentes.	30
<b>Figura 3.1.</b> Superficie metálica vista desde un microscopio.	36

<b>Figura 3.2.</b> Esquema del transporte de electrones entre el cátodo y el ánodo.	38
<b>Figura 3.3.</b> Circuito de la celda de corrosión entre la tubería y el suelo que la rodea.	38
<b>Figura 3.4</b> Situación de una tubería en una zanja. O, suelo original; A, arena; S, sub-base; B, base.	40
<b>Figura 4. 1.</b> Pistón utilizado para tamizar el suelo tipo arcilloso.	48
<b>Figura 4.2.</b> Estas fotografías muestran: (a) El recuadro que se hizo al iniciar la excavación. (b) La profundidad de 120 cm. a la cual se realizó la excavación.	49
<b>Figura 4.3.</b> En la fotografía se puede observar el suelo (número de muestra 1) que se utilizó en el experimento.	50
<b>Figura 4.4.</b> En las fotografías se puede observar el proceso para el desecado y tamizado del suelo. a) El suelo se puso a desecar. b) el suelo formo “rocas” que se disgregaron para comenzar a tamizarlo. c) El suelo está completamente desecado y tamizado, hasta obtener polvo.	51
<b>Figura 4.5.</b> Esquemas del diseño de las probetas y sus dimensiones, que se obtuvieron de una sección del tubo de acero de alta temperatura grado B bajo la norma API 5L – B, de 6 pulgadas de diámetro.	52
<b>Figura 4.6.</b> Esquema del diseño de la probeta y el Electrodo de Trabajo (Varilla).	53

- Figura 4.7.** En ambas fotografías se muestran las probetas después de recubrir las orillas con parafina. 53
- Figura 4.8.** Esquema del Montaje de la Probeta, el Electrodo Calomel (de Referencia), el Electrodo de Trabajo y el electrodo de Grafito. 56

## ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS

<b>Tabla 1.1</b> Costo de la corrosión por año.	26
<b>Tabla 2.1</b> Clasificación del suelo según la Textura	29
<b>Tabla 3.1.</b> Grado de agresividad del suelo en función de la resistividad.	34
<b>Tabla 3.2.</b> Grado de agresividad del suelo por bacterias sulfato-reductoras en función del potencial red-ox.	36
<b>Tabla 3.3.</b> Determinación de la agresividad de suelos	37
<b>Tabla 4.1</b> En esta tabla se muestran las profundidades a las que se tomó cada muestra de suelo.	50
<b>Cuadro 5.1</b> Arreglo de los resultados experimentales para el electrolito base de Agua Destilada en soluciones fertilizadas al 1%.	59
<b>Cuadro 5.2</b> Arreglo de los resultados experimentales para el electrolito “ <i>Suelo (Polvo) – Solución Fertilizada al 1%</i> ”.	60
<b>Cuadro 5.3</b> Arreglo de los resultados experimentales para el electrolito “ <i>Suelo (Grano) – Solución Fertilizada al 1%</i> ”.	61

- Cuadro 5.4** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para Agua Destilada como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 74
- Cuadro 5.5** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la solución de Sulfato de Amonio al 1% como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 75
- Cuadro 5.6** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la solución Triple 17 al 1% como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 76
- Cuadro 5.7** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la solución de Urea al 1% como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 77
- Cuadro 5.8** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla Agua Destilada – Polvo como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 78
- Cuadro 5.9** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante de Sulfato de Amonio al 1% “*Sol. Sulfato de Amonio – Polvo*” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 79
- Cuadro 5.10** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante Triple 17 al 1% “*Triple 17 – Polvo*” como electrolito, variando la 80

superficie de exposición del tubo.

**Cuadro 5.11** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante de Urea al 1% “*Sol. Urea – Polvo*” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 81

**Cuadro 5.12** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de Agua Destilada y suelo tipo Grano como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 82

**Cuadro 5.13** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante de Sulfato de Amonio al 1% “*Sol. Sulfato de Amonio – Grano*” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 83

**Cuadro 5.14** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante Triple al 1% “*Sol. Triple 17 – Grano*” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 84

**Cuadro 5.15** El cuadro presenta los resultados del ajuste realizado a cada gráfica de cada medición efectuada, para la mezcla de la solución del Fertilizante Urea al 1% “*Sol. Urea – Grano*” como electrolito, variando la superficie de exposición del tubo. 85

**Tabla 5.1** Resultados de los promedios de las velocidades de corrosión que se extrajeron de los datos del ajuste Tafel, considerando dos repeticiones. 86

**Tabla 5.2** Resumen de los resultados de las velocidades de corrosión que se 87

extrajeron de los datos del ajuste Tafel.

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica 5.1.</b> Para probetas con exposición en la superficie Exterior, en Agua Destilada	62
<b>Gráfica 5.2.</b> Para probetas con exposición en la superficie Interior, en Agua Destilada.	62
<b>Gráfica 5.3.</b> Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), en Agua Destilada.	62
<b>Gráfica 5.4.</b> Para probetas con exposición en la superficie Exterior, en Agua Destilada al 1% de Sulfato de Amonio (Sin Suelo).	63
<b>Gráfica 5.5.</b> Para probetas con exposición en la superficie Interior, en Agua Destilada al 1% de Sulfato de Amonio (Sin Suelo).	63
<b>Gráfica 5.6.</b> Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), en Agua Destilada al 1% de Sulfato de Amonio (Sin Suelo).	63

- Gráfica 5.7.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, en Agua Destilada al 1% de Triple 17 (Sin Suelo). 64
- Gráfica 5.8.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, en Agua Destilada al 1% de Triple 17 (Sin Suelo). 64
- Gráfica 5.9.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), en Agua Destilada al 1% de Triple 17 (Sin Suelo). 64
- Gráfica 5.10.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, en Agua Destilada al 1% de Urea (Sin Suelo). 65
- Gráfica 5.11.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, en Agua Destilada al 1% de Urea (Sin Suelo). 65
- Gráfica 5.12.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), en Agua Destilada al 1% de Urea (Sin Suelo). 65
- Gráfica 5.13.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.) 66
- Gráfica 5.14.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.) 66
- Gráfica 5.15.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento) con Mezcla de Suelo (Polvo) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.) 66

- Gráfica 5.16.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%. 67
- Gráfica 5.17.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%. 67
- Gráfica 5.18.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%. 67
- Gráfica 5.19.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Triple 17 al 1%. 68
- Gráfica 5.20.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Triple 17 al 1%. 68
- Gráfica 5.21.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Triple 17 al 1%. 68
- Gráfica 5.22.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Urea al 1%. 69
- Gráfica 5.23.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Urea al 1%. 69
- Gráfica 5.24.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Polvo) y una solución de Urea al 1%. 69

- Gráfica 5.25.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Grano) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.) 70
- Gráfica 5.26.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Grano) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.) 70
- Gráfica 5.27.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Grano) y Agua Destilada al Punto de Saturación del suelo (1 Kg suelo – 425 mLt. agua.) 70
- Gráfica 5.28.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%. 71
- Gráfica 5.29.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%. 71
- Gráfica 5.30.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Sulfato de Amonio al 1%. 71
- Gráfica 5.31.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Triple 17 al 1%. 72
- Gráfica 5.32.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Triple 17 al 1%. 72
- Gráfica 5.33.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Triple 17 al 72

1%.

**Gráfica 5.34.** Para probetas con exposición en la superficie Exterior, con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Urea al 1%. 73

**Gráfica 5.35.** Para probetas con exposición en la superficie Interior, con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Urea al 1%. 73

**Gráfica 5.36.** Para probetas con exposición en la superficie Desnuda (Sin Recubrimiento), con Mezcla de Suelo (Grano) y una solución de Urea al 1%. 73

**Gráfica 5. 37.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión resultantes (en mpa) para las Mezclas de Suelo y Agua destilada sin fertilizante, “*Suelo – Agua Destilada*”, para los diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas. 88

**Gráfica 5. 38.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en las Mezclas de suelo fertilizadas, “*Sol. Sulfato de Amonio al 1% – Suelo*”, para los dos diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas. 89

**Gráfica 5. 39.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en las Mezclas de suelo fertilizadas, “*Sol. Triple 17 al 1% – Suelo*”, para los dos diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas. 90

**Gráfica 5. 40.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en las Mezclas de suelo fertilizadas, “*Sol. Urea al 1% – Suelo*”, para los dos diferentes tipos de tamaño de grano del Suelo Arcilloso empleado *contra* el Tipo de Recubrimiento de exposición de las probetas. 91

**Gráfica 5. 41.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en todas las Mezclas fertilizadas de suelo “*Sol. Fertilizadla 1% – Suelo*”, para las probetas con exposición a la corrosión en su Recubrimiento Exterior del Tubo de Alta temperatura Grado B utilizado. 92

**Gráfica 5. 42.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en todas las Mezclas fertilizadas de suelo “*Sol. Fertilizadla 1% – Suelo*”, para las probetas con exposición a la corrosión en su Recubrimiento Interior del Tubo de Alta temperatura Grado B utilizado. 93

**Gráfica 5. 43.** La gráfica muestra la variabilidad de las velocidades de corrosión (en mpa) que se obtuvieron en todas las Mezclas fertilizadas de suelo “*Sol. Fertilizadla 1% – Suelo*”, para las probetas con exposición a la corrosión en su superficie Sin Recubrimiento del Tubo de Alta temperatura Grado B utilizado. 94