

00580



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA

TESIS

"EVALUACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS  
APLICADOS EN DUCTOS ENTERRADOS, MEDIANTE EL EMPLEO  
DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS"

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA  
(INGENIERÍA QUÍMICA)

PRESENTA

ING. JOSÉ LUIS CHOLULA SIMANCAS

MÉXICO, D. F. 2005

2005

CHOLULA SIMANCAS, JOSE LUIS

0346493



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.

## JURADO

PRESIDENTE	DR. LUIS S. HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
VOCAL	DR. MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ NÚÑEZ
SECRETARIO	DR. JUAN GENESCA LLONGUERAS
SUPLENTE	M. en C. CARLOS R. ARGANIS JUÁREZ
SUPLENTE	DR. MANUEL E. PALOMAR PARDAVE

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

FACULTAD DE QUÍMICA UNAM

EDIFICIO "D"

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

LABORATORIO DE CORROSIÓN.

ASESOR DEL TEMA

SUSTENTANTE

DR. FRANCISCO J. RODRÍGUEZ GÓMEZ

ING. JOSÉ L. CHOLULA SIMANCAS

---

---

## ÍNDICE

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

#### CAPÍTULO I.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1	Recubrimientos Anticorrosivos	4
1.1.1	Antecedentes	4
1.1.2	Definición	4
1.2	Clasificación de los Recubrimientos Anticorrosivos	5
1.2.1	Recubrimientos Orgánicos	5
1.2.1.1	Componentes Básicos de un Recubrimiento Tipo Orgánico	6
1.2.1.2	Recubrimientos Epóxicos	6
1.2.1.3	Recubrimientos Epóxi-Alquitrán de Hulla	8
1.2.2	Recubrimientos Inorgánicos	8
1.2.2.1	Recubrimientos Inorgánicos de Zinc	9
1.2.2.2	Silicatos Inorgánicos	9
1.2.2.3	Silicatos Autocurantes Base Acuosa	9
1.2.2.4	Silicatos de Base Solvente Autocurante	9
1.2.2.5	Silicatos Inorgánicos de Post-Curado	10
1.2.3	Recubrimientos Metálicos	10
1.2.4	Propiedades Generales	10
1.3	Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo	11

#### CAPÍTULO II.- PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

2.1	Introducción	13
2.2	Preparación de Superficie	14
2.2.1	Limpieza Química y/o con Solventes	14
2.2.2	Limpieza con Herramienta Manual	15
2.2.3	Limpieza con Herramientas Mecánicas	15
2.2.4	Limpieza con Abrasivos	16
2.2.5	Grados de Herrumbre	17
2.2.6	Grados de Herrumbre en Superficies de Acero y Grados de Preparación de estas Superficies para la Aplicación de Recubrimientos Anticorrosivos	17
2.2.7	Tipos de Abrasivos	18
2.2.8	Anclaje	18

#### CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1	Introducción	19
3.2	Descripción de Recubrimientos y Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo	19

3.3	Aplicación de los Productos A, B, C y D	20
3.4	Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina	20
3.4.1	Objetivo	20
3.4.2	Alcance	21
3.4.3	Desarrollo del Trabajo	21
3.4.3.1	Descripción de Probetas	21
3.4.3.2	Condiciones de Prueba	22
3.4.3.3	Condiciones de Operación del Equipo	22
3.4.3.4	Adherencia	22
3.4.3.5	Evaluación de las Probetas Expuestas a la Niebla Salina	22
3.5	Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	23
3.5.1	Objetivo	23
3.5.2	Alcance	23
3.5.3	Desarrollo del Trabajo	23
3.5.3.1	Descripción de la celda CFC-13	23
3.5.3.2	Condiciones de Operación del Equipo	24
3.5.3.3	Evaluación de las Probetas	24
3.6	Prueba de Resistencia en Esfuerzo de Suelos	26
3.6.1	Objetivo	26
3.6.2	Alcance	26
3.6.3	Desarrollo del Trabajo	26
3.6.3.1	Descripción de las Muestras	26
3.6.3.2	Condiciones de Prueba	27
3.6.3.3	Condiciones de Operación del Equipo	27
3.7	Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	28
3.7.1	Condiciones de Prueba	28
3.7.2	Condiciones de Operación del Equipo	28
	Referencias fotográficas	29
3.7.3	Evaluación de las Probetas	34
3.8	Análisis de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint)	34
3.8.1	Objetivo	34
3.8.2	Alcance	34
3.8.3	Desarrollo del Trabajo	35
3.8.3.1	Descripción de Probetas	35
3.8.3.2	Condiciones de Prueba	36
3.8.3.3	Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	36
3.8.3.4	Desarrollo de la Prueba	36
3.8.3.5	Condiciones de Operación del Equipo	36
3.8.3.6	Evaluación de las Probetas	37

#### *CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS*

4.1	Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina	38
4.1.1	Análisis de los resultados	38
4.1.2	Evaluación visual	38
4.1.3	Ampollamiento	39
4.1.4	Descascaramiento	39

---

4.1.5	Adherencia	40
4.2	Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	45
4.2.1	Análisis de los resultados	45
4.3	Prueba de Resistencia en Esfuerzo de Suelos	66
4.3.1	Análisis de los resultados	66
4.3.2	Evaluación visual	67
4.3.3	Ampollamiento	67
4.3.4	Descascaramiento	67
4.3.5	Adherencia	68
4.4	Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	68
4.4.1	Análisis de los resultados	68
4.5	Características del Suelo	91
4.5.1	Ensayo de Ph	91
4.5.1.1	Procedimiento	91
4.5.1.2	Resultados	91
4.5.2	Ensayo de Resistividad Eléctrica	91
4.5.2.1	Procedimiento	91
4.5.2.2	Método de Evaluación: ASTM G – 57	91
4.5.2.3	Resultados	92
4.6	Análisis de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint)	92
4.6.1	Análisis de los resultados	92
4.6.2	Adherencia	92
4.6.3	Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica	92
4.6.4	Análisis de los resultados	92

## *REFERENCIAS*

---

---

## *RESUMEN*

En el presente trabajo se evaluaron dos recubrimientos y dos sistemas de protección anticorrosiva, mediante la combinación de métodos tradicionales (resistencia a la niebla salina y resistencia al esfuerzo en suelos) y la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

Los recubrimientos anticorrosivos Alquitrán de Hulla Epoxi Amina y Elastómero de Uretano; así como los sistemas de protección anticorrosiva que consisten de un primario inorgánico de zinc y como acabado los dos recubrimientos antes descritos, se aplicaron sobre láminas y tubos de acero, para evaluar sus propiedades y desempeño en las condiciones prácticas de exposición de líneas enterradas.

La prueba de resistencia a la niebla salina es agresiva, acelerada y proporciona información referente a la alta o baja permeabilidad que tienen los recubrimientos. Respecto a los recubrimientos y sistemas que fueron evaluados en este trabajo, presentaron baja permeabilidad, no mostraron ampollamiento, descascaramiento, ni corrosión bajo película, por lo que también demostraron buena adherencia al sustrato metálico.

La prueba de resistencia al esfuerzo en suelos no se encuentra especificada o regularizada bajo la normatividad actual existente. Es una prueba que fue innovada, se diseñó y desarrolló para este trabajo en particular, a fin de simular las condiciones a las que se exponen los ductos enterrados. Los recubrimientos estuvieron sometidos a diferentes condiciones de temperatura, humedad y secado.

A las muestras (láminas y tubos protegidos con los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva), se les practicó la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica para obtener su respuesta en el momento que se presentaran la falla, ya que se expusieron a diferentes intervalos de tiempo en niebla salina y esfuerzo en suelos, con defectos previamente realizados en cruz y punto.

Con respecto a la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, algunos diagramas presentaron de ligera a severa dispersión de puntos, por lo que no fue posible encontrar el momento de falla; aunado a que los productos evaluados presentaron buenas propiedades de resistencia a los medios agresivos a que fueron expuestos.

Adicionalmente, se utilizó la técnica de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint), la cual es un proyecto de norma, que indica los parámetros que se deben evaluar para obtener de una manera relativamente rápida el comportamiento de los recubrimientos o en su defecto, en el momento que llegaran a presentar alguna falla.

---

---

## *ABSTRACT*

In the present work two, coatings and two anticorrosive protection systems were evaluated through the combination of traditional techniques (salt spray fog and soil stress) and Electrochemical technique (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS).

The anticorrosive coatings: coal tar, epoxy amine and urethane, as well as the anticorrosive protection systems, which are composed by a primary Zn inorganic and the two coatings before described as finishing, were applied on steel sheets and tubes, in order to evaluate their properties and performance under the practical exposition conditions for underground pipelines.

The Salt Spray Fog Test is aggressive, accelerated and gives information regarding the coatings permeability. The coatings and systems that were evaluated in this work exhibit low permeability, they didn't show blistering, shelling, neither under film corrosion. Therefore, they proved to have good adherence to the metallic substrate.

Nowadays, the soil stress test is not standardized. This test was innovated, designed and developed for this research, to simulate the service conditions at which the underground pipelines are exposed. The coatings were exposed to different temperature, moisture and drying conditions.

EIS technique was applied to the samples (sheets and tubes protected with the coatings and anticorrosive protection systems), in order to obtain the behavior response when the failure occurred. The samples were subjected to different time intervals during the salt spray fog test and soil stress test. Some defects were previously made in cross and points forms.

Regarding the EIS tests, it was not possible to found the time when the fail occurred, because some diagrams exhibited point's dispersion from slight to severe range. Additionally, the evaluated products showed good resistance properties to the aggressive environments at which they were exposed.

Moreover, the Rapid Electrochemical Assessment of Paint (REAP) technique was used. This technique is considered as a standard project and establishes the parameters that should be evaluated for obtaining, in a relatively rapid way, the coatings behavior or the time when the fail is presented.



---

---

## *INTRODUCCIÓN*

La corrosión es un fenómeno natural que ha sido reconocido mundialmente como un problema de gran importancia. En países como los Estados Unidos o el Reino Unido, los gastos directos que genera la corrosión han sido cuantificados en el orden de un 4% de su Producto Nacional Bruto (PNB).<sup>[43]</sup> La importancia que este fenómeno tiene sobre la economía de un país ha impulsado en el mundo la creación de diversos grupos de investigación, los cuales generan el conocimiento básico necesario para lograr su control.

Por lo que respecta a la Industria Petrolera, la corrosión siempre ha sido un problema inevitable en las operaciones de producción, de transporte, petroquímicas y de refinación. Un gran número de los problemas que se presentan en dichas operaciones, es debido a la corrosión. Estudios realizados recientemente reportan a la corrosión como la principal causa de las fallas en los ductos de transporte de gas y crudo.<sup>[44]</sup>

En México, a la corrosión todavía no se le ha dado la gran importancia que tiene, por consiguiente, no se ha desarrollado una tecnología que vaya de acuerdo a la economía del país. Como consecuencia de este desconocimiento, los materiales, equipos e instalaciones en general, que sufren de este proceso algunas veces tienen que ser reemplazados completamente, lo que provoca una mayor inversión y elevadas pérdidas, ya que si se les aplicara el mantenimiento adecuado, se evitarían grandes pérdidas y se tendría que invertir sólo lo necesario.

Es claro decir que los gastos generados directamente por la corrosión son considerables, no obstante, existe un rubro aún más importante y corresponde a los gastos indirectos relacionados con algún problema ocasionado por este fenómeno. Estos gastos son difíciles de cuantificar y se relacionan con paros de planta, producción diferida, pérdida de producto, disminución de la eficiencia de procesos, contaminación de productos y a sobre diseños con tolerancias por corrosión. Por lo que respecta a este último punto, es práctica común considerar en el diseño de tuberías de transporte, factores de sobre diseño por corrosión. No obstante, es bien sabido que esta tolerancia incrementa substancialmente el costo de las instalaciones y no garantiza el control de corrosión.

Es imprescindible puntualizar que un control inadecuado de corrosión puede ser inicio de accidentes que, en el peor de los casos, pueden tener como resultado la pérdida de vidas humanas y la generación de daños irreversibles al entorno ecológico.

La corrosión puede describirse como la destrucción de un material metálico debida a la interacción entre dicho metal y su entorno. Dicha interacción es de naturaleza electroquímica y por lo tanto implica reacciones de oxidación y reducción. La mayoría de los metales se encuentran en la naturaleza en estado combinado en forma de minerales y para obtener o reducir el metal a partir de ellos, es necesario aplicar

---

---

enormes cantidades de energía. Esta misma cantidad de energía es liberada de manera espontánea, durante los procesos químicos que suceden durante la corrosión u oxidación metálica.

Cuando la corriente eléctrica directa se imprime en una estructura de acero recubierta con recubrimientos del tipo orgánico en presencia de humedad y/o sales metálicas, en el caso de haber poros ó discontinuidades en la película protectora, los iones metálicos alcalinos se depositan en la superficie metálica (ánodo) y se inicia una sucesión de reacciones que producen un pH alcalino, que pueden terminar en el deterioro y desprendimiento del recubrimiento de la superficie metálica. Con los recubrimientos inorgánicos como es el caso del inorgánico de zinc, no sucede lo antes expuesto, debido a que el zinc forma un galvanizado en frío y evita el paso de las especies agresivas hacia el metal.

Estos problemas suelen ser controlados en estructuras enterradas o sumergidas, mediante sistemas combinados de protección catódica y recubrimientos. El uso de complejos sistemas de recubrimientos ha representado la opción más viable; no obstante, el avance mundial referente a nuevas tecnologías hace necesaria la revisión, actualización y adecuación de las ya existentes.

La elección de un recubrimiento o sistema de protección anticorrosiva (aplicación de un recubrimiento primario + un recubrimiento acabado) debe considerar varias características como son: material a proteger, la función que va a desempeñar, condiciones ambientales y exposición entre otras; además, se debe conocer la preparación de superficie para su aplicación, el proceso de aplicación, tiempo de secado, adherencia al metal, su permeabilidad y desempeño bajo las condiciones prácticas donde va a estar expuesto, por último la compatibilidad con otros recubrimientos para su mantenimiento posterior.

En varios ductos de Petróleos Mexicanos se encuentran aplicados los mismos recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva con los que se experimentó en el presente trabajo. Se realizaron varias pruebas de laboratorio que son significativas para evaluar su desempeño en campo.

La prueba de cámara de niebla salina a diferentes tiempos de exposición define la alta o baja permeabilidad que tienen los productos anticorrosivos, continuidad de película y la eficiencia de protección contra la corrosión ante un medio muy corrosivo como es el ambiente salino. La prueba es acelerada, por lo que las concentraciones de sal son muy superiores a las que cabe encontrar en una brisa marina.

El esfuerzo en suelos es un ensayo que permite determinar la resistencia aparente de los sistemas de protección anticorrosiva aplicados exteriormente en tuberías, a la deformación provocada por la acción de los esfuerzos del terreno, al someter la tubería recubierta a ciclos de humectación y secado en ese medio.

El análisis de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint) es un anteproyecto de norma ASTM para evaluar el comportamiento de recubrimientos en corto tiempo.<sup>[1]</sup>

---

---

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica hoy en día es de gran utilidad para desarrollar estudios de corrosión. Cuando se aplica esta técnica en la caracterización de una superficie metálica recubierta con una película orgánica, permite obtener información referente a las propiedades del sistema, tales como la presencia de defectos, reactividad de la interfase, propiedades de barrera ante la humedad o ciclos de humedad con temperatura, etc., con estos parámetros se puede predecir el comportamiento anticorrosivo del recubrimiento en servicio. Con los espectros obtenidos se procedió a realizar las simulaciones correspondientes con el circuito eléctrico equivalente propuesto por los autores M. Kending y colaboradores.<sup>[1]</sup>

Los resultados obtenidos con esta técnica se representan en dos tipos de diagramas: en los diagramas de Nyquist se representa la Impedancia parte real ( $Z'$ ) contra Impedancia parte imaginaria ( $Z''$ ) y en los diagramas de Bode el logaritmo de la frecuencia ( $f$ ) contra logaritmo del módulo de la impedancia  $|Z|$ .

---

---

## ***CAPÍTULO I- FUNDAMENTOS TEÓRICOS***

### **1.1 Recubrimientos Anticorrosivos**

#### **1.1.1 Antecedentes**

Desde la más remota antigüedad el hombre ha empleado la pintura como medio de expresión artística y como medio de protección de un sustrato. Las pinturas rupestres de las Cuevas de Altamira en España son un ejemplo de lo primero, y acabados de los antiguos sarcófagos egipcios son una muestra de lo segundo.<sup>[11]</sup>

Con el desarrollo industrial que tuvo lugar en los siglos XVIII y XIX, comenzó a surgir la pintura como un producto comercial. Sin embargo, los componentes básicos seguían siendo los aceites y resinas naturales usados tradicionalmente por los artistas. Al llegar el siglo XX, los desarrollos industriales comenzaron a presentar fuertes demandas de pinturas y los hombres de ciencia principiaron a investigar el arte tradicional de la preparación de las pinturas, con el objeto de mejorarlas.<sup>[12]</sup>

A través de los siglos la fabricación de pinturas ha evolucionado de un arte gremial que empleaba unas cuantas docenas de materiales, a la moderna industria de pinturas que hace uso de literalmente cientos de compuestos químicos, materiales y equipos.<sup>[11]</sup>

Durante las últimas tres décadas, los esfuerzos científicos han revolucionado materialmente la manufactura de pinturas. Se puede disponer de pinturas que resisten casi todas las sustancias químicas y ambientes corrosivos. Estos recubrimientos protectores se distinguen comúnmente de las pinturas para fines sólo decorativos, de aquí que se les llame recubrimientos protectores para diferenciarlos, haciendo posible con ellos, el uso en estructuras, equipos, tanques de almacenamiento, líneas superficiales, así como también estructuras enterradas y/o sumergidas.<sup>[12]</sup>

#### **1.1.2 Definición**

Recubrimiento anticorrosivo es un material que se aplica sobre una superficie metálica con la finalidad de protegerla de la acción de la corrosión. Se considera una dispersión relativamente estable de un pigmento finamente dividido en una solución de una resina y aditivos que se usan para prevenir la corrosión de un metal por aislamiento del medio ambiente.<sup>[13]</sup>

Para que un recubrimiento sea efectivo en la prevención de la corrosión debe tener ciertas propiedades, por ejemplo: resistir al medio ambiente expuesto, excluir a los iones, excluir a la humedad, excluir al oxígeno, adherirse a la superficie, entre otras características.

---

---

Actualmente no existe un recubrimiento perfecto que satisfaga todos estos requisitos, pero hay una gran variedad de recubrimientos y cuando se presenta un serio problema de corrosión, es indispensable seleccionar el tipo o sistema más apropiado.<sup>[12, 13]</sup>

## **1.2 Clasificación de los Recubrimientos Anticorrosivos**

El control de la corrosión a base de recubrimientos anticorrosivos mediante la creación de una barrera entre un metal y su medio ambiente, conocido como electrolito, es uno de los métodos más ampliamente usados por su gran versatilidad y fácil aplicación.

La efectividad de un recubrimiento depende de su integridad (que esté libre de poros o picaduras), de su facilidad para adherirse al metal base y de su propiedad para aislar el flujo de corriente eléctrica. El material de recubrimiento también debe ser económicamente factible.<sup>[13]</sup>

En la actualidad existe en el mercado una gran diversidad de recubrimientos anticorrosivos, muestra de ello son los que se indican en las normas de PEMEX.<sup>[19, 22, 25]</sup> Por lo que respecta al presente trabajo, se seleccionaron y evaluaron dos sistemas y dos recubrimientos, por las propiedades de uso específico para tuberías enterradas que conducen hidrocarburos en PEMEX.

Los recubrimientos se pueden clasificar en tres grupos principales:<sup>[30]</sup> orgánicos (naturales y sintéticos), inorgánicos (principalmente de zinc y aplicados sobre estructuras de acero) y metálicos.

### **1.2.1 Recubrimientos Orgánicos**

Los recubrimientos orgánicos son aquellos que en general pueden aplicarse en forma líquida sobre una superficie y después secarse para dar como resultado una capa sólida continua. El proceso de secado involucra reacciones químicas, frecuentemente polimerizaciones o simplemente una evaporación del solvente. Los más comunes son pinturas, lacas, esmaltes y barnices.<sup>[30]</sup>

Los recubrimientos orgánicos pueden estar formados de uno o varios componentes de acuerdo a su tipo genérico (nombre de la resina más abundante) y normalmente están constituidos por vehículo (parte líquida) y pigmento (parte sólida finamente dividida), que forman una dispersión. Los orgánicos pueden ser naturales y sintéticos.<sup>[18]</sup>

- a) Recubrimientos Naturales: se tiene a los de aceite, alquitrán de hulla y asfálticos o gilsonita.
- b) Recubrimientos sintéticos: en este caso se menciona a los vinílicos, alquidálicos, epóxicos, poliuretanos y hule clorado.

---

---

### 1.2.1.1 Componentes Básicos de un Recubrimiento Tipo Orgánico

Un recubrimiento tipo orgánico consta de dos componentes fundamentales: el vehículo y el pigmento. Estos pueden estar constituidos a la vez por otros componentes individuales, como se muestra en el siguiente diagrama.

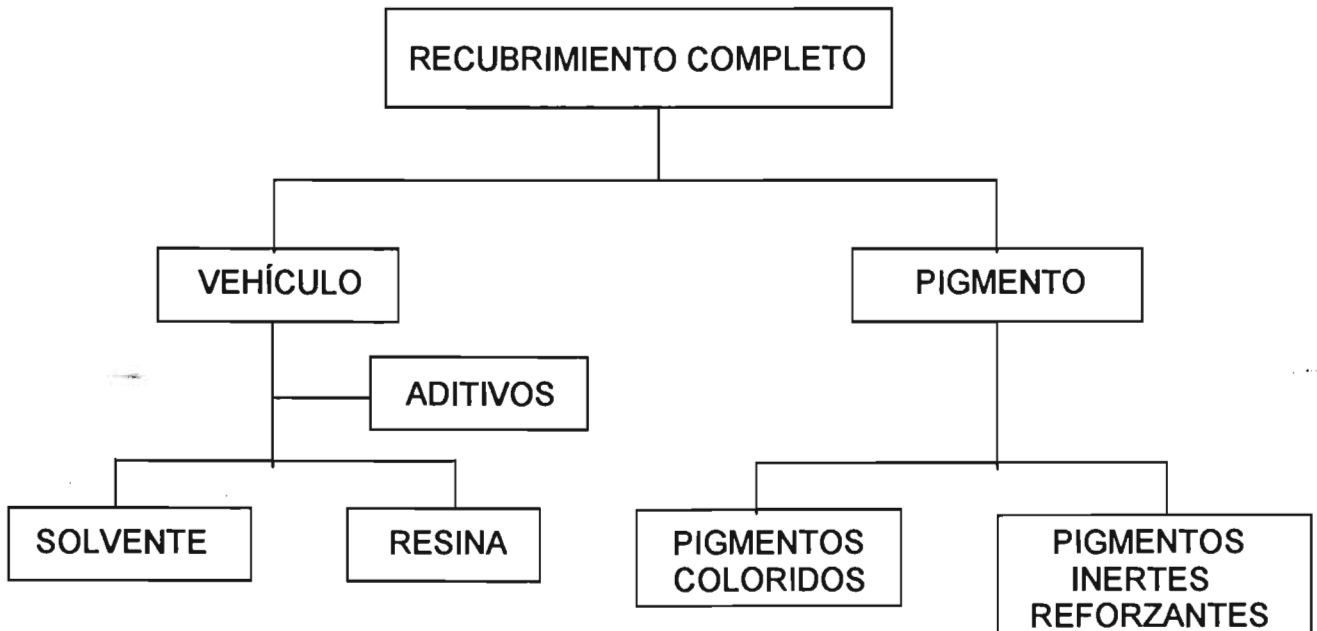


Diagrama I.1 Componentes de un recubrimiento

Estos componentes se mezclan en un orden adecuado, claramente definido en la formulación y a través de métodos específicos para obtener el producto terminado.

Para efectos de formulación-comportamiento de un recubrimiento, la relación resina-pigmento representa una de las variables más importantes. El pigmento debe estar en la cantidad suficiente para lograr las propiedades mecánicas y anticorrosivas deseadas, pero sin llegar a un exceso tal que la cantidad de resina disponible no alcance a cubrirlo totalmente.

La eficiencia de protección contra la corrosión y el buen comportamiento de un recubrimiento dependen, además de su buena calidad, de otros factores igualmente importantes tales como: preparación de superficie, técnica de aplicación y de una adecuada selección del sistema de recubrimiento que va a ser aplicado, con base en la naturaleza del medio corrosivo.

### 1.2.1.2 Recubrimientos Epóxicos

La mayoría curan a temperatura ambiente y están formulados básicamente de resinas de bajo peso molecular. Tienen un grupo epoxi reactivo al final de la molécula, teniendo una afinidad en particular por los derivados del amoníaco, como las aminas. Las

poliaminas tienen el grupo amino en moléculas de cadenas cortas y largas, y las poliamidas lo tienen más ampliamente dispersado en moléculas de cadenas largas. En ambos casos, el grupo amino contenido en las cadenas de la molécula de resina epóxica hace una estructura densa y entrecruzada. Las películas obtenidas con poliaminas son más densas, teniendo mejor resistencia química y resistencia a los solventes, con menor flexibilidad y de carácter más quebradizo que los poliamídicos.

Químicamente existen 2 procedimientos para la preparación de las resinas epóxi los cuales son:<sup>[11, 45]</sup>

a) Epoxidar una doble ligadura

b) Introducción del grupo epoxi indirectamente haciendo reaccionar Epiclorhidrina (consta de unión epoxi) y Bisfenol A en presencia de un álcali como se muestra en el siguiente mecanismo:

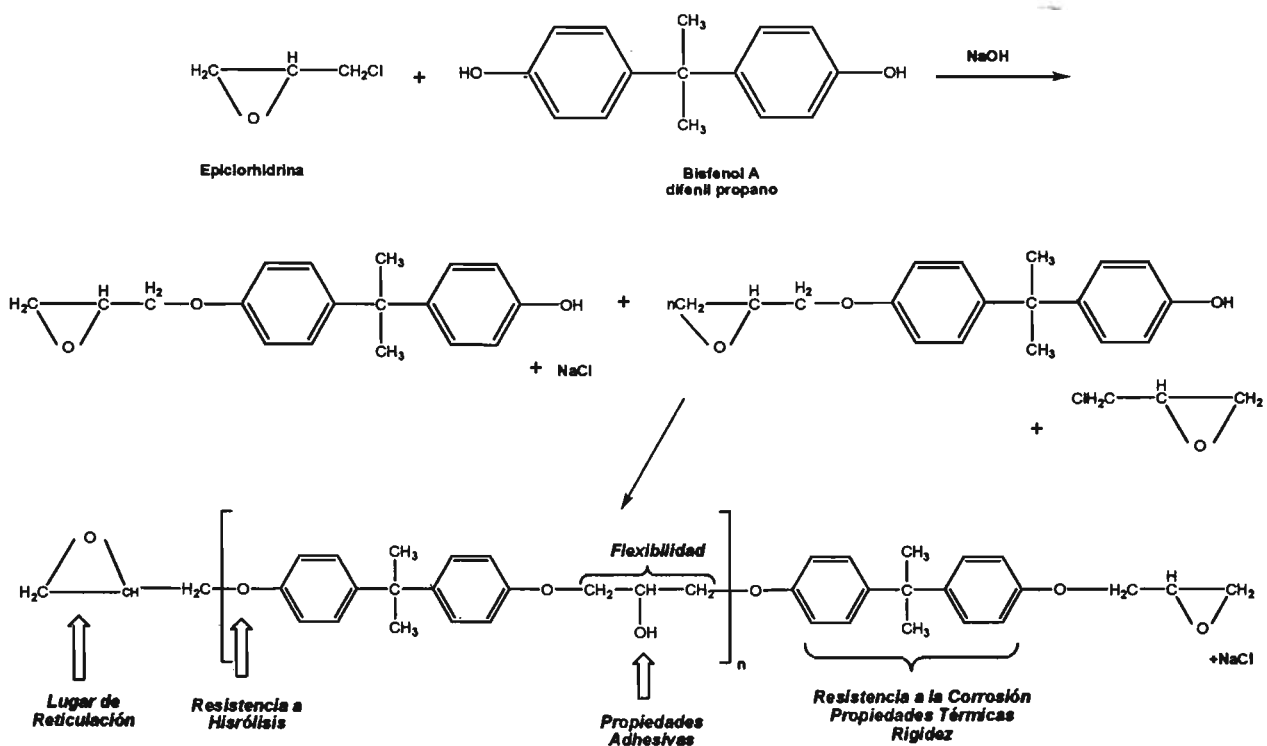


Figura I.2 Mecanismo de reacción para obtener resina epóxica.

En términos generales el nivel de adherencia, dureza, flexibilidad y resistencia a los medios corrosivos de los recubrimientos epóxicos no ha sido superado por ningún otro tipo de recubrimientos actuales. Puede aplicarse sobre superficies de concreto, metálicas, galvanizadas o inorgánicos de zinc; presenta una excepcional resistencia a los medios alcalinos y buena resistencia a los medios ácidos; soporta salpicaduras, escurrimientos e inmersiones continuas de la mayoría de los hidrocarburos alifáticos, alcoholes, etc. Presenta un alto grado de impermeabilidad permaneciendo inalterable ante la exposición e inmersión en agua dulce, salada y vapor de agua. Todas las

---

---

características antes mencionadas no las adquiere por sí solo, requiere de un agente de polimerización o entrecruzamiento denominado catalizador.<sup>[17]</sup>

Una de las limitaciones que presentan los recubrimientos epóxicos es el fenómeno de "caleo" en ambientes exteriores. Estos recubrimientos son susceptibles a los rayos del sol, por lo que al ser expuestos la resina epóxica se degrada, al degradarse se forma polvo fino y éste queda adherido sobre la superficie del mismo recubrimiento en el metal.

Estos materiales también son susceptibles a los agentes oxidantes como el cloro, peróxidos y ácido nítrico.

### **1.2.1.3 Recubrimientos Epóxi-Alquitrán de Hulla**

Estos recubrimientos tienen un alto contenido de sólidos por volumen y dejan una película dura sobre el sustrato, se han formulado con la adición de altas concentraciones de alquitrán de hulla por lo que existen dos tipos, "A" y "B". Se preferirá el tipo "B" cuando se requiera mayor flexibilidad.

Los recubrimientos epoxi-alquitrán de hulla presentan buenos resultados cuando se exponen en inmersión continua por largo tiempo en: agua salada, agua cruda y agua tratada, así como petróleo crudo y combustóleo, incluyendo temperatura máxima de 70 °C.<sup>[19, 22, 25]</sup>

Una de las desventajas que presentan es la resistencia a los solventes, ya que se ve afectada por lo que no se recomienda una inmersión continua en los mismos. Por otra parte, considerando la influencia del alquitrán de hulla, el recubrimiento tiende a cuartearse y calearse cuando se expone por largo tiempo a la acción de los rayos solares.

Otro de los usos específicos de los recubrimientos epoxi-alquitrán de hulla, es la aplicación exterior en ductos enterrados que transportan hidrocarburos. El espesor mínimo de película seca es de 16 milésimas de pulgada (406 µm).

Los recubrimientos epoxi alquitrán de hulla son aplicados como primario y acabado con altos espesores de película seca, porque tienen buena resistencia a la abrasión, sin importar la apariencia del acabado.

### **1.2.2 Recubrimientos Inorgánicos**

En cierta forma este recubrimiento es un "galvanizado en frío", en el cual la película es formada por la aplicación de una mezcla homogénea de polvo de zinc y una solución acuosa de silicato orgánico o inorgánico; la eliminación de agua y solvente e interacción de los componentes permite obtener una película de silicato de zinc con inclusiones de zinc en polvo, por lo que finalmente su naturaleza es inorgánica.<sup>[17]</sup>



---

---

### 1.2.2.1 Recubrimientos Inorgánicos de Zinc

Los recubrimientos primarios inorgánicos de zinc son los que proporcionan mejor protección a los sustratos metálicos, ya que actúan como barrera entre el medio ambiente y el acero, proporcionando además protección catódica al acero. La película de zinc que se forma es de alta conductividad eléctrica capaz de sacrificarse anódicamente para proteger el acero.<sup>[12, 17]</sup>

Dado que el espesor de la película y la cantidad de material disponible para el sacrificio es pequeña 2.0 - 2.5 milésimas de pulgada (51 - 63.5  $\mu\text{m}$ ), es necesario recubrirlo posteriormente con acabados del tipo epóxico, a fin de que la película de inorgánico de zinc o protección catódica sólo actúe en presencia de discontinuidades, grietas o raspaduras.

Estos recubrimientos son sumamente duros y ofrecen buena resistencia a la abrasión, con excelente resistencia a la mayoría de los solventes, a los ambientes húmedo, salino y marino, con excepción de hidrocarburos clorados en presencia de humedad.<sup>[19]</sup>

Los recubrimientos inorgánicos de zinc de dos componentes requieren de un mínimo de 60% de humedad relativa en el ambiente para curar satisfactoriamente.<sup>[19, 22, 25]</sup>

### 1.2.2.2 Silicatos Inorgánicos

Son productos formulados a partir de vehículos que no contienen en su molécula al carbono, por esta razón no son combustibles y no les afecta la luz ultravioleta. Sirven como matriz para el zinc metálico en los recubrimientos inorgánicos de zinc, la cadena está formada por átomos de Silicio.

### 1.2.2.3 Silicatos Autocurantes Base Acuosa

Son mezclas de silicatos alcalinos y sílica coloidal pigmentadas con polvo de zinc o zinc y un óxido metálico. Estos materiales constan de dos componentes y para aplicarse debe mezclarse el polvo en el líquido e incorporarlo totalmente. El mecanismo de insolubilización al agua de este tipo de películas depende de la absorción de bióxido de carbono de la atmósfera durante el proceso de curado.<sup>[19, 22, 25]</sup>

### 1.2.2.4 Silicatos de Base Solvente Autocurante

Son ésteres orgánicos parcialmente hidrolizados, que al curar dejan películas duras semejantes a las de base acuosa. Una de las ventajas de este tipo de inorgánicos es que a los pocos minutos de aplicado son insolubles al agua. Estos productos constan de dos componentes, aunque ya existe el de un solo componente, que lo hace más práctico.

---

---

### 1.2.2.5 Silicatos Inorgánicos de Post-Curado

Están basados en soluciones acuosas de silicatos alcalinos pigmentados con polvo de zinc o zinc y un óxido metálico. Estos materiales constan de tres componentes. Se mezcla el polvo y el líquido al momento de aplicarse. Esta mezcla se aplica a espesores de 2.5 - 3.0 milésimas de pulgada (63.5 – 76  $\mu\text{m}$ ), el secado se lleva a cabo muy rápidamente, usualmente una hora, en este punto la película es dura pero es necesaria una aplicación de una solución curadora ácida para llevar a cabo la conversión de silicato a sílica insoluble.<sup>[19, 22, 25]</sup>

### 1.2.3 Recubrimientos Metálicos

Durante mucho tiempo los recubrimientos orgánicos e inorgánicos fueron considerados como el único medio de protección de los materiales. Sin embargo, al estar sometidos los materiales a ambientes naturales más agresivos y debido a la necesidad de producción industrial de un recubrimiento de duración eficaz similar o mejor al de la estructura, se originó la búsqueda de otros sistemas protectores o combinación de los ya existentes.

Los recubrimientos metálicos tienen un número importante de aplicaciones en diferentes industrias como la química, nuclear, petrolera y eléctrica, entre otras. El propósito principal de estos recubrimientos es alterar las características de la superficie de manera que resistan ambientes corrosivos, así como también abrasión, erosión, etc.

La mayoría de los recubrimientos metálicos se aplican por inmersión en caliente o por electro-depositación. También pueden aplicarse por aspersión, cementación y algunas veces por reacción en fase gaseosa en menor escala.

Los recubrimientos metálicos que se aplican comercialmente deben presentar coloración uniforme sobre el sustrato, si se observa decolorado es probable que exista porosidad en la película y tienden a dañarse durante el embarque, al igual que los recubrimientos convencionales. Desde el punto de vista de corrosión, los recubrimientos metálicos se clasifican en dos clases: nobles y de sacrificio.

Los recubrimientos llamados nobles emplean metales como níquel, plata o cobre, que son nobles en la serie galvánica con respecto a la base metálica; para los recubrimientos de sacrificio, se emplean los metales como el zinc y cadmio y en ciertos ambientes, aluminio y estaño.

### 1.2.4 Propiedades Generales

Es necesario hacer notar que el recubrimiento perfecto no existe.

No obstante el uso de recubrimientos reduce sustancialmente la corrosión en estructuras de acero, tanques de almacenamiento, instalaciones superficiales y líneas

---

---

enterradas entre otras, el usuario debe estar consciente de la posibilidad de algunos defectos.

- Los recubrimientos aplicados en fábrica o taller se pueden dañar durante el embarque, el manejo, el embalaje o la construcción. Es posible reparar estos recubrimientos en campo.
- Si existen poros en un recubrimiento ligado a un ambiente corrosivo, se puede desarrollar una celda de concentración que socavará al recubrimiento y causará una corrosión similar a la corrosión por hendidura.
- Si un metal unido con un recubrimiento de tipo orgánico está bajo protección catódica, la corriente excesiva puede causar desprendimiento del recubrimiento.

Por estas razones y como protección adicional, se acepta que los recubrimientos orgánicos ligados a los ambientes corrosivos se deben complementar con protección catódica.

### **1.3 Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo**

Para el desarrollo del presente trabajo, sistema de recubrimientos anticorrosivo se define de la siguiente manera: la combinación compatible de dos o más recubrimientos, específicamente primario (Inorgánico de Zinc) + acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina y/o Elastómero de Uretano), para proveer una barrera protectora a un sustrato metálico de un ambiente corrosivo.

El recubrimiento primario debe cumplir con los siguiente requisitos: buena adherencia al sustrato metálico cuando éste se ha limpiado o preparado adecuadamente, proporcionar adherencia a la siguiente capa, que inhiba o retarde la velocidad de corrosión, debe proporcionar buena resistencia química y a la intemperie; además, poseer las mismas características de resistencia o similares al enlace o acabado.

Las capas intermedias o enlaces pueden ser requeridas dentro de un esquema para dar las siguientes propiedades: espesor adecuado al sistema, adherencia entre el primario y el acabado y finalmente proporcionar mayor resistencia química al esquema.

Los recubrimientos de acabado constituyen la capa final y están directamente en contacto con el ambiente; las características más importantes deben ser: apariencia agradable, buena resistencia química, resistencia a la intemperie, resistencia a medios húmedos y salinos; en algunos casos particulares deben ser del tipo antiderrapante con buena resistencia a la abrasión y en otros ofrecer resistencia a altas temperaturas, entre otras. A este conjunto se le conoce como sistema de recubrimientos anticorrosivo.

Los sistemas de recubrimientos poseen una permeabilidad natural en menor o mayor grado, que permite el paso de una cantidad suficiente de agua y oxígeno, que ocasiona

---

---

corrosión ininterrumpida de la superficie, por tal motivo y para efectos de protección anticorrosiva deben aplicarse a un espesor tal que la película seca nunca sea inferior a seis milésimas de pulgada.<sup>[13,17]</sup>

Generalmente es necesario contar con un esquema de primario, intermedio y acabado, para dar control adecuado a un determinado problema de corrosión. Los componentes de un esquema de protección anticorrosiva, pueden ser del mismo tipo de resina o de otras, en donde cada una de ellas contribuye a dar mayor resistencia al esquema.

Para diferenciar las pinturas de los recubrimientos y revestimientos; se dice que las pinturas se usan con fines estéticos y decorativos y generalmente se aplican a espesores de película seca bajos, menores de 2.0 milésimas de pulgada (51  $\mu\text{m}$ ).

Los sistemas de recubrimiento dan protección anticorrosiva y se aplican a espesores de película seca entre 6.0 y 40 milésimas de pulgada (152 y 1016  $\mu\text{m}$ ).<sup>[13,17,31]</sup>

Por último, los revestimientos tienen espesores mayores a 40 milésimas de pulgada (1016  $\mu\text{m}$ ); ejemplos de ellos son los que se aplican sobre estructuras metálicas en plataformas marinas en la zona de mareas y oleaje, cintas anticorrosivas para tuberías enterradas y/o sumergidas y recubrimientos con refuerzo de fibra de vidrio.<sup>[13,17,31]</sup>

---

---

## CAPÍTULO II- PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

### 2.1 Introducción

Una de las etapas de mayor influencia en el buen funcionamiento de un recubrimiento es la limpieza o preparación de superficie. El recubrimiento no podrá adherirse firmemente a la superficie y protegerla, si existe sobre ésta óxido, escama de laminación, polvo, aceite, humedad o cualquier otro material suelto. Algunas impurezas como el agua, aceite y sales hidrosolubles evitan la adherencia, aún cuando estén presentes en cantidades tan pequeñas que no sean visibles a simple vista.<sup>[12,17]</sup>

Además de impedir la adherencia, algunas impurezas contribuyen a la ruptura de la película de recubrimiento por ser sales solubles al agua, provocando un efecto osmótico, ocasionando ampollamiento y corrosión del metal.

Por otra parte, estas impurezas, incluyendo la herrumbre, son más nobles en la serie galvánica, por lo que actuarán como cátodos en presencia de humedad acelerando la corrosión del metal.<sup>[12, 17]</sup>

La preparación de la superficie con el método apropiado contribuirá decisivamente a la función del recubrimiento como barrera protectora contra la corrosión.

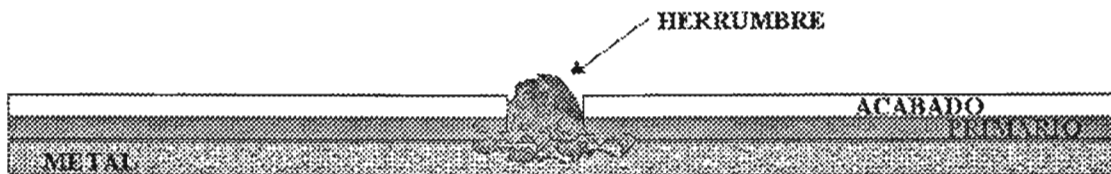


Figura II.1 A

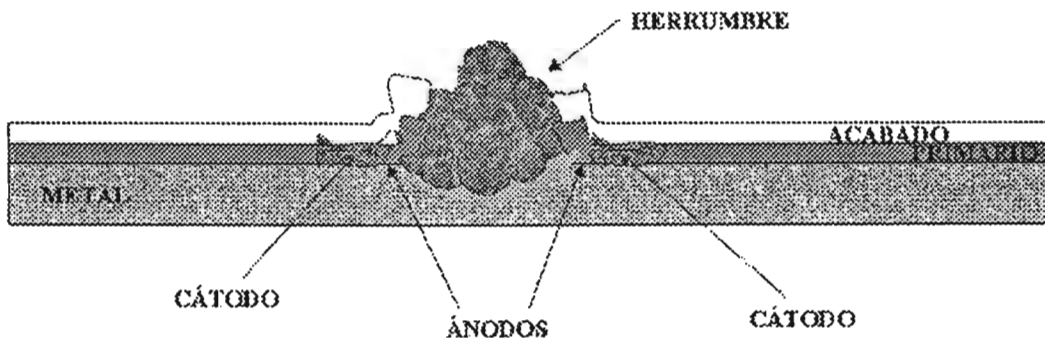


Figura II.1 B

---

---

La figura II.1 A representa la falla (herrumbre) del sistema de protección anticorrosiva.

La figura II.1 B el incremento de la misma y la pérdida de adherencia del sistema de protección.

## 2.2 Preparación de Superficie

La preparación de superficie se define como el tratamiento del metal u otro tipo de material que asegure el contacto íntimo entre la superficie a ser recubierta con el recubrimiento aplicado.<sup>[31]</sup>

Una regla importante que no se debe dejar pasar por alto es cuando se selecciona el grado, método de limpieza y preparación de superficie es que el servicio y la vida esperada de un sistema de recubrimiento dado es directamente proporcional al grado de preparación de superficie realizado antes de la aplicación del recubrimiento.<sup>[31]</sup>

El perfil de anclaje es una medida de la rugosidad de una superficie que resulta de la preparación con abrasivos a presión. Este perfil de anclaje se mide desde el fondo del valle mas profundo al tope del pico más alto; se establece que la profundidad (o altura) del anclaje no debe exceder un tercio del espesor de la película seca del recubrimiento primario.<sup>[13,31]</sup>

Los métodos de limpieza de superficies metálicas que se utilizan son los siguientes:

- Limpieza química y/o con solventes (L. Q.)
- Limpieza con herramienta manual (L. M.)
- Limpieza con herramientas Mecánicas (L. H. M.)
- Limpieza con abrasivos (L. A.)

### 2.2.1 Limpieza Química y/o con Solventes, (L. Q.) [SSPC-SP-1]<sup>[14, 16, 20]</sup>

Es usada para remover contaminantes como el aceite y la grasa que se encuentran sobre el metal antes del tratamiento mecánico o del decapado. Aunque no remueve la herrumbre, incrustación o residuos de recubrimientos viejos, la limpieza mediante solventes es una etapa necesaria en la preparación del metal, ya que es el único método efectivo para remover depósitos pesados de lubricantes.

Este método de limpieza es un prerrequisito para casi todos los otros métodos de limpieza.

**[SSPC]** son las iniciales de Steel Structures Painting Council.

---

---

Una observación importante es el uso frecuente de solventes limpios en el último lavado para evitar la formación de una película superficial residual. La superficie del metal debe quedar libre de cualquier contaminante; para ello debe lavarse con agua dulce. Finalmente, una forma de evaluar la efectividad del lavado puede hacerse con papel indicador de pH sobre el acero húmedo, hasta obtener un valor igual al del agua empleada.<sup>[20]</sup>

### **2.2.2 Limpieza con Herramienta Manual, (L. M.) [SSPC-SP-2]<sup>[14, 16, 20]</sup>**

La limpieza con herramientas manuales como son los cepillos de alambre, martillos, rasquetas o cinceles es una operación muy lenta y no es un método razonable y recomendable para limpiar grandes áreas. Generalmente este método es empleado para remover todo lo suelto, como la pintura no adherida, la herrumbre o las incrustaciones. Este procedimiento con frecuencia es satisfactorio para retoques y reparaciones en servicios menos críticos de recubrimientos.<sup>[20]</sup>

#### **Procedimientos:**

**I.-) Rasqueteo y cepillado:** Las superficies deben de rasquetearse y cepillarse con alambre de acero, hasta desaparecer los restos de óxido, pintura u otras materias extrañas.

**II.-) Descostrado:** Las costras de óxido, escamas y restos de soldadura o escorias pueden eliminarse de la superficie metálica con la ayuda de marro, martillo y cincel.

**III.-) Lijado:** Los restos de óxido, pintura, etc. que no se desprendan por medio de las operaciones anteriores, deben lijarse para obtener un anclaje adecuado.

**IV.-) Eliminación de polvo:** La superficie debe limpiarse con brocha de cerda o cepillo para eliminar partículas de polvo o sopleteando la superficie con chorro de aire seco y limpio. Tratándose de tableros o instrumentos eléctricos y neumáticos, debe usarse una aspiradora. Algunas de las etapas señaladas pueden realizarse mediante el uso de herramientas neumáticas o eléctricas portátiles.

### **2.2.3 Limpieza con Herramientas Mecánicas, (L. H. M.) [SSPC-SP-3]<sup>[14, 16, 20]</sup>**

La limpieza con herramientas mecánicas como son las cardas, los cepillos neumáticos, esmeriles o cualquier otro dispositivo de impacto, es más eficiente que las herramientas manuales. Sin embargo, la limpieza excesiva puede producir una superficie pulida, de tal manera que el recubrimiento no presente adherencia. La limpieza con herramienta de potencia no es un método que se recomiende para limpiar acero a excepción de retoques y reparaciones. Este método no se considera como un solo método aislado de preparación de superficie y es usado en muchas ocasiones en combinación con otros métodos.<sup>[20]</sup>

---

---

## 2.2.4 Limpieza con Abrasivos, (L. A.)<sup>[14, 16, 20]</sup>

Se refiere a la limpieza de superficies metálicas aplicando chorro de abrasivo a presión. Existen abrasivos metálicos y no metálicos que se seleccionan de acuerdo al servicio que se requiere.

Este es el método más eficaz en la preparación de superficies metálicas, dado que, además de eliminar eficientemente la herrumbre, escamas, escoria y otros contaminantes proporciona una superficie áspera uniforme, excelente para promover una buena adherencia del recubrimiento.

De acuerdo con las especificaciones de la superficie preparada con chorro de abrasivo podemos diferenciar los siguientes acabados:<sup>[14,16]</sup>

### 1) Limpieza con Chorro de Abrasivo a Metal Blanco [Sa 3, NACE-1, SSPC-SP5] <sup>[14, 16, 20]</sup>

Este grado de limpieza se aplica cuando se requiere una excelente preparación de superficie. Se le considera la limpieza ideal del acero, remueve completamente toda la herrumbre y la escoria dejando una superficie de color gris ligero, uniforme y sin manchas negras, sombras o manchas de herrumbre. Cuando una superficie cumple este estándar, se dice que está de acuerdo al grado metal blanco.

### 2) Limpieza con Chorro de Abrasivo Cercano a Metal Blanco [Sa 2½, NACE-2, SSPC-SP10]<sup>[14, 16, 20]</sup>

Este grado de limpieza remueve completamente toda la herrumbre y la escoria dejando una superficie de color gris ligero, uniforme pero con ligeras sombras, o coloraciones causadas por la herrumbre, o por la pintura que se encontraba en la superficie.

Estas ligeras sombras no deben ser mayores al 5% del área que se esté preparando; el 95% de la superficie queda libre de materias extrañas.

Si existiera alguna duda al adoptar este criterio de aceptación puede recurrirse a los métodos visuales de comparación [SSPC – Vis 1 - 89]<sup>[16]</sup> que se encuentran internacionalmente aceptados. El estándar [SSPC – Vis 1 - 89] proporciona grabados a color para los diferentes grados de preparación de superficies como una función de las condiciones iniciales de la superficie metálica, así mismo tenemos "The NACE Visual Comparator for Surfaces".

### 3) Limpieza con Chorro de Abrasivo Grado Comercial [Sa 2, NACE-3, SSPC-SP6]<sup>[14, 16, 20]</sup>

Este grado de limpieza remueve el óxido, escoria, aceite, pintura y otras sustancias extrañas, dejando una superficie de color gris oscuro y no se requiere que sea



---

---

uniforme, con ligeras sombras o coloraciones. Estas ligeras sombras no deben ser mayores del 33% de cada unidad de área de superficie, si existiera alguna duda, se puede recurrir a los métodos visuales de comparación [SSPC – Vis 1 - 89].<sup>[16]</sup>

#### **4) Limpieza con Chorro de Abrasivo Grado Ráfaga [Sa 1, NACE-4, SSPC-SP7]** [14, 16, 20]

Este tipo de limpieza remueve las escamas sueltas, productos de óxido y residuos de pintura sueltos. La superficie debe quedar libre de grasa, polvo o cualquier sustancia extraña o suelta. Las escamas, óxidos o pinturas fuertemente adheridas pueden observarse sobre la superficie; para cerciorarse de su adherencia puede utilizarse una espátula sin filo. Si existiera alguna duda se puede recurrir a los métodos visuales de comparación [SSPC – Vis 1 - 89].<sup>[16]</sup>

La versión de la Norma **SIS 05 59 00** comprende cuatro grados diferentes de herrumbre (A, B, C, y D).

#### **2.2.5. Grados de Herrumbre**

- A** Superficie de acero con la capa de laminación intacta en toda la superficie y prácticamente sin corrosión.
- B** Superficie de acero con principio de corrosión y de la que la capa de laminación comienza a despegarse.
- C** Superficie de acero donde la capa de laminación ha sido eliminada por la corrosión o de la que la capa de laminación puede ser eliminada por raspado, pero en la cual no se han formado en gran escala cavidades visibles.
- D** Superficie de acero donde la capa de laminación ha sido eliminada por la corrosión y donde se han formado en gran escala cavidades visibles.

#### **2.2.6 Grados de Herrumbre en Superficies de Acero y Grados de Preparación de estas Superficies para la Aplicación de Recubrimientos Anticorrosivos**

Al aplicar recubrimientos anticorrosivos es de suma importancia el grado de preparación de las superficies de acero antes de la aplicación de los recubrimientos para la duración de éstos. También es de importancia poder precisar de una manera clara el grado de preparación deseado para cada caso particular. La Norma Sueca SIS 05 59 00 ha fijado cuatro grados de herrumbre en superficies de acero y, además, un número de grados de preparación para el tratamiento de superficies de acero para estos grados de herrumbre antes de aplicar los recubrimientos anticorrosivos. Estos grados de herrumbre y de preparación son reproducidos en grabados. Los grabados dan una información más clara y detallada que las descripciones de palabras.<sup>[16]</sup>

En la siguiente tabla puede verse la relación conjunta del Instituto Sueco de Corrosión de acuerdo con la, National Association of Corrosion Engineers NACE y Steel Structures Painting Council SSPC, referentes a la preparación de superficie para la aplicación del recubrimiento.

<b>Tipo de limpieza</b>	<b>SIS 05 59 00</b>	<b>NACE</b>	<b>SSPC – Vis 1</b>
Metal blanco	A Sa 3, B Sa 3, C Sa 3, y D Sa 3.	NACE 1	SSPC – SP 5
Cercano a metal blanco	A Sa 2½, B Sa 2½ C Sa 2½ y D Sa 2½	NACE 2	SSPC – SP 10
Limpieza comercial	B Sa 2, C Sa 2 y D Sa 2.	NACE 3	SSPC – SP 6
Ráfaga	B Sa 1, C Sa 1 y D Sa 1.	NACE 4	SSPC – SP 7.

Tabla II 2.- Estudio comparativo de preparación de superficies de acero, correspondientes a la norma SIS 05 59 00, National Association of Corrosion Engineers NACE y Steel Structures Painting Council SSPC.

### 2.2.7 Tipos de Abrasivos

Los diversos tipos de abrasivos que se emplean, actúan diferente y producen varios tipos de patrones de superficie con sus características propias. El patrón o perfil de anclaje que se obtenga es muy importante en su efecto sobre el funcionamiento del recubrimiento. Si la superficie es demasiado lisa, no habrá un adecuado anclaje para el recubrimiento. Por otra parte si la superficie es demasiado rugosa, las crestas pronunciadas del metal probablemente se proyectarán a través del recubrimiento y permanecerán sin proteger.

### 2.2.8 Anclaje

La rugosidad o máxima profundidad del perfil que se obtenga en la superficie limpia y que servirá como anclaje para el recubrimiento, estará comprendido entre 1 y 3 milésimas de pulgadas, de acuerdo al espesor de película del primario, el cual debe ser mayor que la profundidad del perfil o anclaje.<sup>[13,17,31,32]</sup>

---

---

## ***CAPÍTULO III DESARROLLO EXPERIMENTAL***

### **3.1 Introducción**

PEMEX cuenta con una extensa red de ductos, la cual sirve de medio para recolectar, transportar y distribuir la producción de hidrocarburos y sus derivados. Esta red distribuida en la mayor parte del territorio nacional, está expuesta a los efectos de la corrosión debido a la presencia de agentes corrosivos en el medio en el que se encuentran.<sup>[15]</sup>

Para prevenir o controlar los efectos de la corrosión en la parte externa de los ductos, incrementar la seguridad y vida útil de los mismos, PEMEX aplica una protección a partir de recubrimientos anticorrosivos, cuya selección, preparación y aplicación debe realizarse de acuerdo con los requisitos de calidad y propiedades exigidos por la normatividad nacional e internacional, a fin de cumplir con los aspectos de seguridad y protección al medio ambiente.<sup>[19, 22, 23, 25]</sup>

### **3.2 Descripción de Recubrimientos y Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo**

Tradicionalmente las pruebas más significativas para evaluar recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva aplicados exteriormente en ductos son la resistencia a la niebla salina, intemperismo acelerado, impacto y pruebas de resistencia química, entre otras, de acuerdo con las normas de PEMEX.<sup>[19, 22, 23, 25]</sup>

El desarrollo experimental de este trabajo pretende hacer un estudio entre las pruebas tradicionales de la normatividad de PEMEX y la aplicación de Técnicas Electroquímicas para evaluar a corto plazo el desempeño de los recubrimientos anticorrosivos que se encuentran en la superficie exterior de los ductos.

Se seleccionaron dos recubrimientos anticorrosivos de uso frecuente en los ductos de PEMEX, estos productos comúnmente se aplican en campo como primario y acabado; en el presente trabajo también se aplicaron de igual forma que en las condiciones prácticas de operación. Por otra parte, a estos mismos materiales se les aplicó un recubrimiento Primario Inorgánico de Zinc, para observar el desempeño de los recubrimientos solos y como sistema de protección anticorrosiva al aplicar el primario de zinc.

El trabajo se desarrolló sobre dos recubrimientos y dos sistemas de protección anticorrosiva; los productos se aplicaron sobre sustratos metálicos de acero AISI 1018 (UNS 10180), previa preparación de la superficie.<sup>[14]</sup>

- 
- 
- **A.-** Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.
  - **B.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).
  - **C.-** Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.
  - **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).

Las pruebas que se aplicaron a los recubrimientos y sistemas de recubrimiento anticorrosivo fueron las siguientes:

- ✓ Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina.
- ✓ Prueba de Resistencia en Esfuerzo de Suelos.
- ✓ Prueba de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint).
- ✓ Pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE).

Para cada una de las pruebas citadas y que a continuación se describen, se usaron láminas y tubos de acero AISI 1018 (UNS 10180); la superficie metálica fue preparada usando chorro de abrasivo con acabado a metal blanco, de acuerdo con la especificación SSPC-SP-5;<sup>[14]</sup> el abrasivo usado fue arena sílica mallas 16/30. A continuación se eliminó el polvo remanente con aire limpio y seco a presión, finalmente se aplicaron los productos anticorrosivos de acuerdo con su información técnica indicándose el espesor promedio de película seca recomendado, (Ver Apéndice, aplicación de recubrimientos).

### 3.3 Aplicación de los Productos A, B, C y D,

(Ver Apéndice, aplicación de recubrimientos).

### 3.4 Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina<sup>[21]</sup>

#### 3.4.1 Objetivo

El objetivo de esta prueba es determinar la continuidad de película y la eficiencia de protección contra la corrosión ante un medio corrosivo como es el ambiente salino. La prueba es acelerada, por lo que las concentraciones de sal son superiores a las que se encuentran en una brisa marina. Al término del tiempo de exposición especificado, se puede detectar sobre la superficie del recubrimiento aplicado las siguientes fallas: ampollamiento,<sup>[26]</sup> descascamiento<sup>[27]</sup> y pérdida de adherencia.<sup>[29]</sup>

---

---

### 3.4.2 Alcance

El ensayo ASTM B-117-02 establece las condiciones requeridas para la prueba de resistencia en la niebla salina. El método no limita el tipo de muestra a ser ensayada ni los períodos de exposición para un producto específico, ni la interpretación que debe darse a los resultados. Se notará que en algunas ocasiones existe una relación directa entre la resistencia en la cámara de niebla salina y la resistencia a la corrosión en otros medios, debido a la química de las reacciones, así como la formación de películas.<sup>[21]</sup>

Este método es aplicable al ensayo en cámara de niebla salina de materiales ferrosos y no ferrosos, así como también para ensayar recubrimientos orgánicos e inorgánicos, especialmente en donde tales ensayos sean la base para las especificaciones de dichos productos.

### 3.4.3 Desarrollo del Trabajo

#### 3.4.3.1 Descripción de Probetas

Se emplearon láminas de acero de 200 x 100 x 4 mm, previa preparación de la superficie a metal blanco,<sup>[14]</sup> posteriormente se aplicaron los siguientes productos:

- **A.-** Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina y
- **B.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).

Los espesores promedio de película seca determinados con el equipo Elcometer 2000 corresponden a 12.6 milésimas de pulgada (320  $\mu\text{m}$ ) para el de Recubrimiento Alquitrán de Hulla Epoxi Amina y 17.0 milésimas de pulgada (432  $\mu\text{m}$ ) para el **Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).

Las láminas que se emplearon para aplicar los otros dos productos anticorrosivos fueron de 150 x 100 x 2 mm, la superficie de las láminas se preparó de igual forma que en el caso anterior;<sup>[14]</sup> a continuación se aplicaron los productos:

- **C.-** Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano y
- **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).

Los espesores promedio de película seca determinados con el mismo equipo fueron de 41.4 milésimas de pulgada (1052  $\mu\text{m}$ ) para el Recubrimiento Elastómero de Uretano y 19.2 milésimas de pulgada (488  $\mu\text{m}$ ) para el **Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).

---

---

Cabe aclarar que las láminas y tubos recubiertos con los productos **A**, **B**, **C** y **D**, fueron preparados y aplicados por las Compañías fabricantes de los recubrimientos a evaluar. Una de las compañías recomiendan aplicar el recubrimiento **A**, con espesores promedio de película seca de 16 mils (406  $\mu\text{m}$ ); la otra recomienda aplicar el producto **C** a 40 mils (1016  $\mu\text{m}$ ). Como sistemas, los espesores se reducen significativamente, el sistema **B** se aplica a 10 mils (254  $\mu\text{m}$ ), mientras que el sistema **D** se aplica a 20 mils (508  $\mu\text{m}$ ).

### 3.4.3.2 Condiciones de Prueba

A cada uno de los recubrimientos y **Sistemas** de protección anticorrosiva que se aplicaron, se les practicó un corte transversal sobre el recubrimiento que llegó hasta el sustrato metálico, lo anterior se realizó para probar la resistencia de los materiales ante un medio agresivo como lo es la niebla salina y observar la alta o baja permeabilidad que tienen los recubrimientos a evaluar. Una vez preparadas las láminas se colocaron en el interior del equipo de nombre Gabinete Salino como se indica en el método de prueba.<sup>[21]</sup>

### 3.4.3.3 Condiciones de Operación del Equipo

Concentración de la solución de cloruro de sodio	5 $\pm$ 1 % en peso
Temperatura interior del gabinete:	35 + 1.1 - 1.7 °C
Tiempo total de exposición:	1,150 horas
pH de la solución:	6.80

Las láminas fueron retiradas del gabinete de niebla salina de acuerdo con el tiempo establecido de exposición para cada una de ellas. Al término de la prueba y después de dos horas de recuperación, los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva no deben presentar sobre la superficie expuesta ampollamiento,<sup>[26]</sup> descascaramiento,<sup>[27]</sup> ni pérdida de adherencia,<sup>[29]</sup> para considerarse aceptables.

### 3.4.3.4 Adherencia<sup>[29]</sup>

El procedimiento para determinar la prueba de adherencia se desarrolló de la siguiente manera: las láminas recubiertas con los productos **A**, **B**, **C** y **D** se acondicionaron a temperatura de 25  $\pm$  2 °C, posteriormente a los recubrimientos se les realizaron dos cortes perpendiculares que llegaron hasta el sustrato metálico, los cortes se hicieron con una herramienta especial denominada peine de ranuras, el peine tiene seis cuchillas y al efectuar los cortes se forman veinticinco cuadros con una separación entre ellos de tres milímetros; a continuación sobre los cortes se adhiere una cinta adhesiva y de un jalón hacia arriba con ángulo de 90° respecto a la horizontal se retira la cinta;

---

---

finalmente se evalúa el área desprendida sobre la cinta, así como también en la pintura de la placa de prueba.

#### **3.4.3.5 Evaluación de las Probetas Expuestas a la Niebla Salina**

Ver Tablas Nos. IV-1, IV-2, IV-3 y IV-4 (páginas 41, 42, 43 y 44)

A las mismas probetas que se retiraron del gabinete salino, se les aplicó la prueba de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE) sobre el corte transversal antes practicado y que además es el área desnuda fácilmente atacada por la corrosión.

### **3.5 Prueba de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica<sup>[1, 33,34]</sup>**

#### **3.5.1 Objetivo**

La técnica de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIE) es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo (metal en corrosión) y se determina la respuesta correspondiente.<sup>[34]</sup>

#### **3.5.2 Alcance**

Una de las aplicaciones más acertadas de la (EIE) ha sido en la evaluación de las propiedades de los metales recubiertos por un polímero y de sus cambios durante la exposición a los ambientes corrosivos. Mientras que en el pasado no había sido posible obtener información significativa con las técnicas tradicionales, la (EIE) ahora se está utilizando en la evaluación de una variedad de capas de polímeros en metales y en aleaciones.<sup>[35]</sup>

#### **3.5.3 Desarrollo del Trabajo**

A las probetas que fueron retiradas de la cámara de niebla salina de acuerdo con el tiempo de exposición para cada una de ellas, se les determinó la prueba Espectroscopía de Impedancia Electroquímica con el arreglo de tres electrodos.

Las placas de ensayo se colocaron y ajustaron en la Celda CFC-13 Coating Flat Cell, Scribner Associates, INC.

---

---

### 3.5.3.1 Descripción de la celda CFC-13

Se compone de dos placas planas de acrílico de 115 x 115 x 11 mm; una de ellas tiene un orificio de 50 mm con cuerda y es precisamente donde se enrosca el tubo del mismo material de 38 mm de  $\varnothing_{int}$  y 120 mm de altura, este tubo solamente tiene cuerda en un extremo; las placas de acrílico tienen un orificio en los cuatro extremos de 6 mm de  $\varnothing_{int}$  donde se insertan los tornillos para sujetar las mismas y también la probeta de ensayo.

Una vez armada la celda CFC-13, se ajustó la placa para su ensayo quedando el corte transversal de la misma exactamente al centro del tubo de acrílico, a este tubo se le adicionó solución al 3% (0.5M) de cloruro de sodio, en la parte superior se insertó un tapón de hule con orificios donde se sostiene el electrodo de referencia y el contraelectrodo; a la probeta de ensayo se le desprendió el recubrimiento en uno de los extremos para asegurar el contacto eléctrico del electrodo de trabajo.

La muestra se dejó durante una hora en las condiciones antes descritas para obtener el potencial de corrosión lo más estable posible y de esta manera correr la prueba de Impedancia; transcurrido el tiempo se procedió a conectar los cables del equipo ACM Instruments GillAC a la Celda CFC-13 en el siguiente orden: cable **WE1** al extremo de la probeta sin recubrimiento (electrodo de trabajo), cable **RE** al electrodo de referencia (Calomel) y cable **AE** al contraelectrodo (varilla de grafito); estos dos últimos dentro del tubo de acrílico con solución de NaCl, finalmente se corrió la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

### 3.5.3.2 Condiciones de Operación del Equipo

La prueba de Impedancia Electroquímica se realizó con el equipo ACM Instruments GillAC, con el software ACM Serial # 844, Versión 4.2.9, con los siguientes parámetros.

Rango de Frecuencia	0.01 - 30,000 Hz
Amplitud	10 mV
Área expuesta	12.88 cm <sup>2</sup>
Lectura	56 puntos

### 3.5.3.3 Evaluación de las Probetas

Ver Tablas Nos. IV-5, IV-6, IV-7 y IV-8 (páginas 50, 51, 52 y 53)



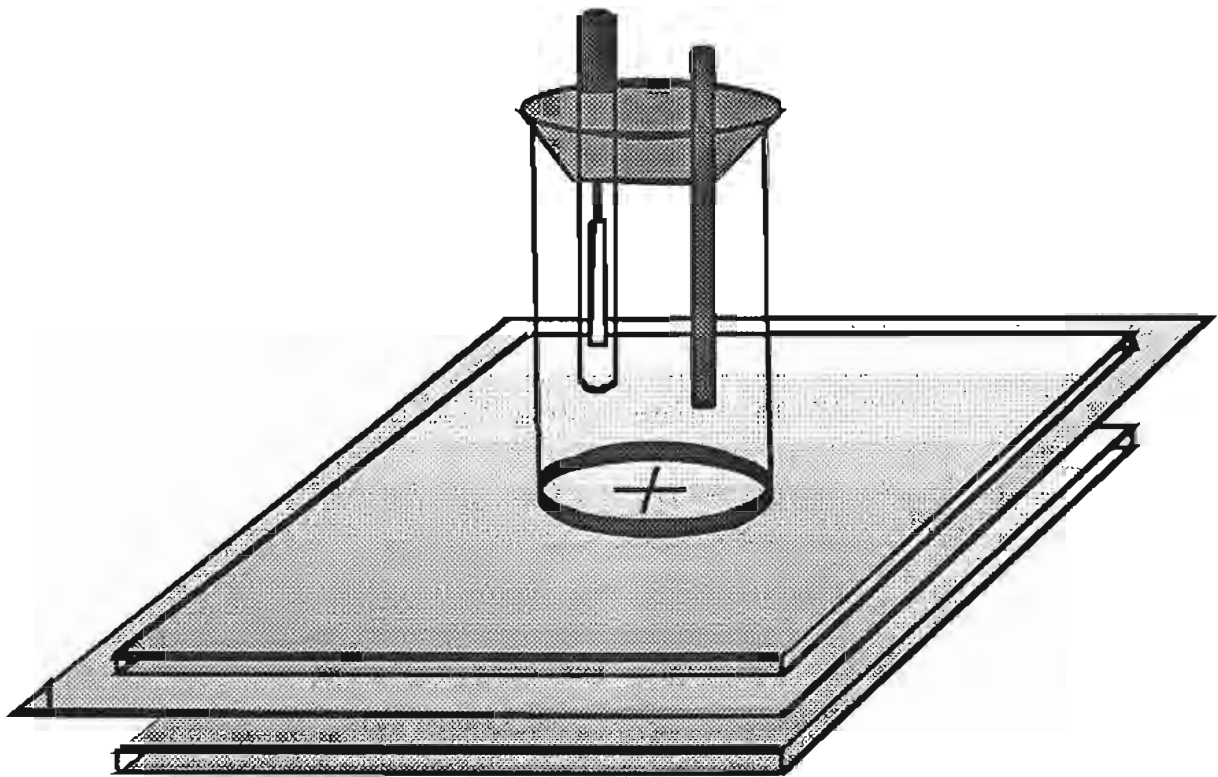


Figura III. 1 CELDA CFC-13 COATING FLAT CELL, SCRIBNER ASSOCIATES, INC.

Celda Scribner, con esta celda se realizaron las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica de las láminas que estuvieron expuestas en la cámara de niebla salina y de la prueba de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint) en donde se dejaron polarizando las muestras durante 1 y 24 horas.

---

---

## 3.6 Prueba de Resistencia en Esfuerzo de Suelos

### 3.6.1 Objetivo

El objetivo de esta prueba es determinar la resistencia aparente de los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva aplicados exteriormente en tuberías, a la deformación provocada por la acción de los esfuerzos del terreno al someter la tubería recubierta a ciclos de temperatura, humectación y secado en ese medio.

### 3.6.2 Alcance

Una tubería de acero sin recubrir expuesta a la humedad del terreno cuando está enterrada o sumergida requiere de una gran cantidad de corriente para proporcionarle protección catódica; estos requerimientos de corriente eléctrica para grandes extensiones de tubería de acero, pueden ser reducidos a cantidades prácticas si la tubería se protege con recubrimientos orgánicos no conductores, de manera que se tenga el mínimo de superficie de acero sin recubrir; estas pequeñas áreas son aquellas que originalmente no fueron recubiertas o que son fallas de la pintura por remoción o maltrato durante el tránsito o instalación de la tubería.

### 3.6.3 Desarrollo del Trabajo

#### 3.6.3.1 Descripción de las Muestras

Para realizar esta prueba se usaron tubos de acero AISI 1018 (UNS 10180) de 25.4 mm (1.0") de diámetro interior por 350 mm (13.8") de longitud con cuerda estándar en ambos extremos; la superficie se preparó usando chorro de abrasivo con acabado a metal blanco de acuerdo con la especificación SSPC-SP-5.<sup>[14]</sup> A continuación se eliminó el polvo remanente con aire limpio y seco a presión, finalmente se aplicaron los productos anticorrosivos de acuerdo con su información técnica indicándose el espesor promedio de película seca recomendado, (Ver Apéndice).

Una vez preparada la superficie de los tubos, éstos fueron recubiertos en la parte exterior con los siguientes productos anticorrosivos:

- **A.-** Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina. Espesor promedio de película seca de 22.4 milésimas de pulgada (569  $\mu\text{m}$ ).
- **B.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina). Espesor promedio de película seca de 26.3 milésimas de pulgada (668  $\mu\text{m}$ ).

- 
- 
- **C.-** Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano. Espesor promedio de película seca de 18.2 milésimas de pulgada (462  $\mu\text{m}$ ).
  - **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano). Espesor promedio de película seca de 18.5 milésimas de pulgada (470  $\mu\text{m}$ ).

### 3.6.3.2 Condiciones de Prueba

A cada uno de los tubos protegidos con los productos **A**, **B**, **C** y **D**, se les practicaron dos daños sobre los recubrimientos aplicados; un corte en cruz sobre el recubrimiento que llegó hasta el sustrato metálico, el corte se realizó con navaja a un ángulo de 45° respecto a la horizontal y fue la intersección de dos líneas perpendiculares de 10 mm de longitud. El otro daño que se realizó fue con una broca de 1.0 mm de diámetro sobre los mismos productos y también llegó hasta el sustrato metálico.

Preparados los tubos se colocaron en el interior del equipo de prueba, se expusieron durante 35 y 44 días.

### 3.6.3.3 Condiciones de Operación del Equipo

En este caso en particular, para evaluar el desempeño en el laboratorio de los cuatro productos aplicados, se diseñó y construyó un equipo especial para simular las condiciones de operación en campo de estos materiales, considerando el efecto que provoca el suelo, humedad y temperatura sobre los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva.

El equipo de prueba se dividió en dos partes, en una de ellas se trabajó a temperatura de  $23 \pm 2$  °C y en la otra a temperatura de  $83 \pm 2$  °C. Las actividades también se dividieron en dos etapas, primero se trabajó con los productos **A**, **B** y en la segunda etapa los productos **C** y **D**.

Los tubos protegidos con los productos **A** y **C** se expusieron a la acción del esfuerzo de un suelo arcilloso, mientras que los productos **B** y **D** a un suelo tipo arena; al mismo tiempo en tres tubos protegidos con los recubrimientos **A** y **C** por la parte interior se hizo circular un fluido a temperatura de  $23 \pm 2$  °C con una bomba de recirculación; en los otros tres tubos recubiertos con los productos **B** y **D** se hizo circular a temperatura de  $83 \pm 2$  °C por medio de una bomba que contiene resistencia de calentamiento y termostato para controlar la temperatura. Sobre la tierra de arcilla y el suelo tipo arenoso se efectuaron ciclos de humectación y secado, además del efecto del fluido circulante; lo anterior se desarrolló con el fin de simular las condiciones prácticas de operación en las líneas de conducción de hidrocarburos. Los tubos fueron enterrados en ambos tipos de suelo a una profundidad de 15 cm y separados entre sí la misma distancia.

---

---

Electrodo auxiliar, se usó una malla de acero inoxidable de 10 mm de ancho y 300 mm de longitud, se enrolló en cada uno de los tubos exactamente encima de los daños (en cruz y puntual) quedando a 10 mm de distancia del daño en cruz, puntual y también en el tubo sin daño. La parte restante de la malla se sujetó a un tubo de PVC de 12.5 mm de diámetro y 250 mm de longitud; este tubo de PVC sobresalió del suelo junto con la malla, y en el interior de éste se introdujo el electrodo de referencia para llevar a cabo las mediciones de la prueba de Impedancia.

Temperatura del fluido circulante:  $23 \pm 2$  °C en tres tubos, recubrimientos con **A** y **C**.

Temperatura del fluido circulante:  $83 \pm 2$  °C en tres tubos, con los sistemas **B** y **D**

Tiempo de exposición: Productos **A**, **B** 35 días, productos **C** y **D** 44 días

Cabe hacer la siguiente observación: la prueba se desarrolló en tres tubos como se dijo anteriormente, un tubo tiene daño en cruz, otro puntual y un tercero sin daño.

### 3.7 Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica<sup>[1, 33, 34]</sup>

El análisis de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica realizado a cada uno de los especímenes enterrados fue precisamente encima de los daños practicados; la prueba se desarrolló de acuerdo con el arreglo de tres electrodos; en este caso particular y tratándose de líneas enterradas se trabajó con el electrodo de referencia de Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado, el contraelectrodo la malla de acero inoxidable y el electrodo de trabajo cada uno de los tubos enterrados.

#### 3.7.1 Condiciones de Prueba

Para desarrollar la prueba de Impedancia Electroquímica con este arreglo, se adicionó agua al suelo y se llenó con la misma el tubo de PVC; se conectaron los cables del equipo ACM en el siguiente orden: **WE1** al electrodo de trabajo, extremo roscado de los tubos, **RE** al electrodo de referencia Cu/CuSO<sub>4</sub> saturado colocado en el interior del PVC y **AE** al electrodo auxiliar o también llamado contraelectrodo, malla de acero inoxidable.

#### 3.7.2 Condiciones de Operación del Equipo

La prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica se realizó con el equipo ACM Instruments GillAC, con el software ACM Serial # 844, Versión 4.2.9.

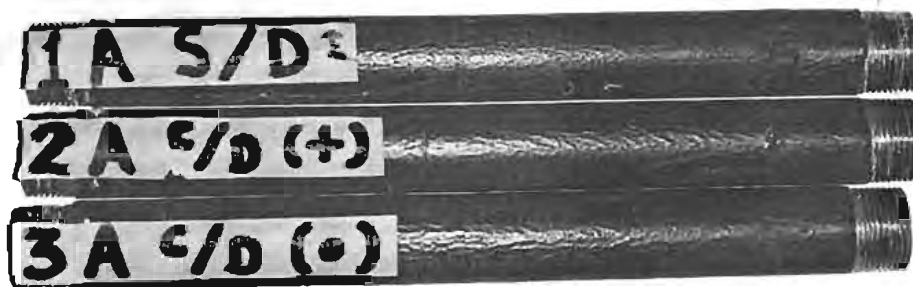
Rango de Frecuencia	0.01 - 10,000 Hz
Amplitud	10 mV
Área expuesta	322 cm <sup>2</sup>
Lectura	48 puntos

---

---

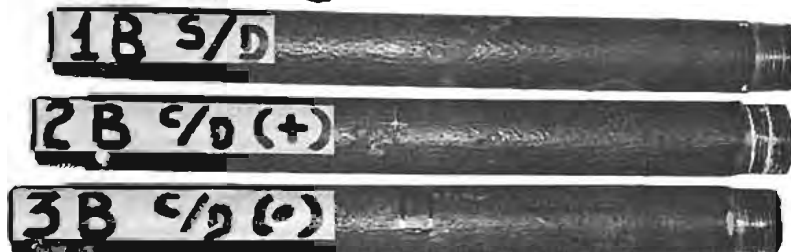
## REFERENCIAS FOTOGRÁFICAS

**RECUBRIMIENTO  
ANTICORROSIVO  
AM-78 HB  
TEMPERATURA  
23 ± 2 °C**



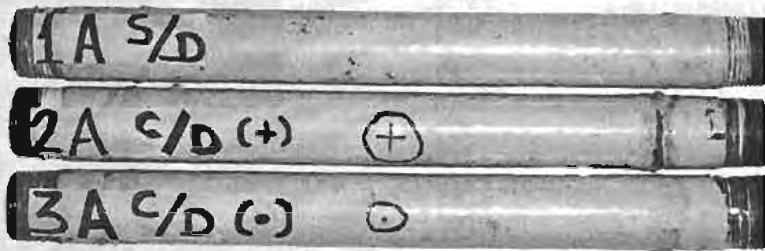
Fotografía No. 1.- Tubos protegidos exteriormente con el Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina, expuestos en la prueba de resistencia en esfuerzo de suelos; los daños realizados sobre el recubrimiento fueron en cruz y puntual, temperatura interior de los tubos 23 ± 2 °C.

**SISTEMA  
ANTICORROSIVO  
GALVADUR, AM78 HB  
TEMPERATURA  
83 ± 2 °C**



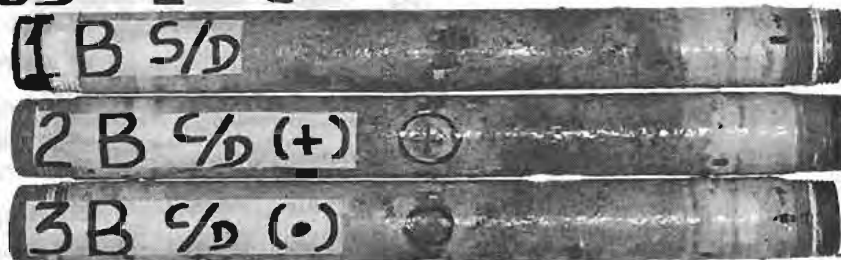
Fotografía No. 2.- Tubos protegidos exteriormente con el Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina), expuestos en la prueba de resistencia al esfuerzo en suelos; los daños realizados fueron en cruz y puntual, temperatura interior de los tubos 83 ± 2 °C.

RECUBRIMIENTO  
ANTICORROSIVO  
ELASTOMERO  
DE URETANO  
TEMPERATURA  
 $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fotografía No. 3.- Tubos protegidos exteriormente con el Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano, expuestos en la prueba de resistencia al esfuerzo en suelos; los daños realizados fueron en cruz y puntual, temperatura interior de los tubos  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

SISTEMA ANTICORROSIVO  
PERMAZINC  
ELASTOMERO  
DE URETANO  
TEMPERATURA  
 $83 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$



Fotografía No. 4.- Tubos protegidos exteriormente con el Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano), expuestos en la prueba de resistencia al esfuerzo en suelos; los daños realizados fueron en cruz y puntual, temperatura interior de los tubos  $83 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

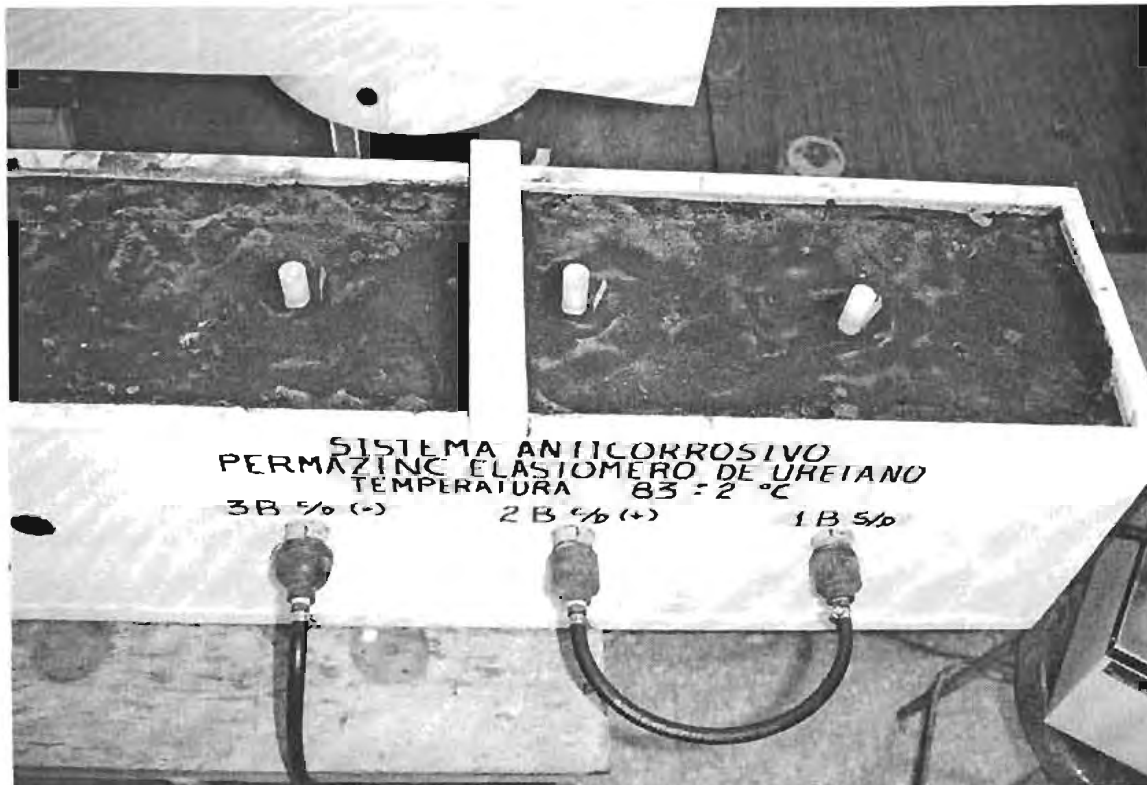


Fotografía No. 5.- Vista interior del arreglo de los tubos expuestos al esfuerzo en suelos, se puede observar los tubos de PVC donde se introdujo en la parte interior el electrodo de referencia, así mismo la malla de acero inoxidable que se sujeto de los mismos y funcionó como contraelectrodo. Los tubos recubiertos se enterraron en el suelo tipo arena, con temperatura de  $83 \pm 2$  °C.



Fotografía No. 6.- Vista interior del arreglo de los tubos expuestos al esfuerzo en suelos, los tubos recubiertos se enterraron en el suelo tipo arcilla.





Fotografía No. 7.- Tubos enterrados en el suelo tipo arena, las mangueras vistas al frente es por donde se hizo circular el fluido a temperatura de  $83 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Fotografía No. 8.- Vista completa de los tubos enterrados; electrodo de referencia en el interior del tubo de PVC, extremo de los tubos recubiertos conectados al electrodo de trabajo y la malla de acero inoxidable al electrodo auxiliar. El equipo ACM Instrument GHIAC y la computadora con el Software ACM Serial # 844 versión 4.2.9, donde se realizaron las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

---

---

### 3.7.3 Evaluación de las Probetas

Los tubos fueron retirados del equipo al término de la prueba y después de dos horas de recuperación, los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva al ser evaluados para considerar un desempeño aceptable, no deben presentar sobre la superficie expuesta ampollamiento,<sup>[26]</sup> descascaramiento,<sup>[27]</sup> ni pérdida de adherencia.<sup>[29]</sup> La evaluación se realizó en forma similar a la niebla salina.

Ver Tablas Nos. IV-9, IV-10, IV-11, IV-12, IV-13, IV-14, IV-15, IV-16, IV-17 y IV-18 (páginas 73 a 78).

### 3.8 Análisis de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint).<sup>[1]</sup>

#### 3.8.1 Objetivo

El desarrollo de la técnica de REAP en este trabajo es de gran importancia, debido a que se puede evaluar rápidamente el funcionamiento de un recubrimiento aplicando ensayos de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, la prueba se desarrolla sobre muestras con diferentes daños y se dejan polarizando durante períodos de 24 horas, al término se efectúa la prueba de Impedancia Electroquímica.

#### 3.8.2 Alcance

The **Rapid Electrochemical Assessment of Paint**, es un procedimiento diseñado para valorar la resistencia a la corrosión de metales recubiertos empleando a corto plazo el análisis Electroquímico. Lo cual involucra desarrollar una serie de experimentos por períodos de 24 horas en dos o más muestras. Al final de los experimentos los datos son analizados para extraer tres parámetros.

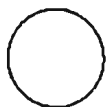
Se pueden usar los parámetros del **REAP** para valorar relativamente el momento cuando se presente la falla del recubrimiento (Time To Failure) [TTF] y clasificar al recubrimiento en términos de su esperado largo tiempo de funcionamiento. Otra aplicación del análisis del **REAP** es la calidad y control de los productos denominados recubrimientos. Se puede seguir la variación de los parámetros del **REAP** sobre tiempo, como una medida de la calidad del recubrimiento.

---

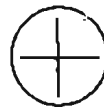
---

## Láminas de Metal Recubiertas

Muestra sin daño



Muestra con daño



Experimentos Realizados

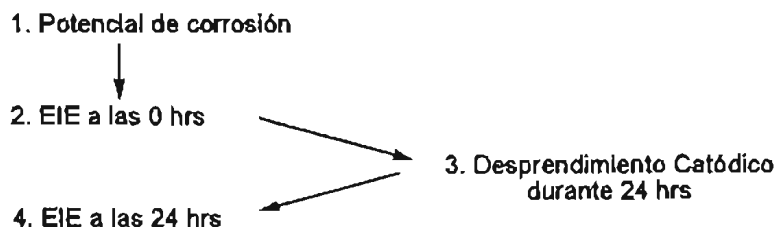


Figura No. III. 2, representa la secuencia de la prueba de REAP.

A las láminas recubiertas se les practicaron dos tipos de daño; en cruz y puntual. Se determinó el potencial de corrosión y la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE) a tiempo 0; se dejaron polarizando durante 24 horas con un potencial de -1050 mV, se determinó nuevamente la prueba de EIE a las 24 horas.

En este caso los recubrimientos fueron evaluados por dos métodos electroquímicos. La Espectroscopia de Impedancia Electroquímica y el Desprendimiento Catódico. Los resultados fueron comparados con el tiempo de exposición en la prueba de resistencia a la niebla salina. El tiempo de falla en la niebla salina se determinó por varios criterios que además correlacionan la evaluación electroquímica.

### 3.8.3 Desarrollo del Trabajo

#### 3.8.3.1 Descripción de Probetas

Se usaron láminas de acero de 200 x 100 x 4 mm, protegidas con el recubrimiento anticorrosivo A y el sistema anticorrosivo B. Los espesores promedio de película seca determinados fueron de 14.6 milésimas de pulgada (371  $\mu\text{m}$ ) y 17.4 milésimas de pulgada (442  $\mu\text{m}$ ).

Las láminas que se usaron para aplicar los otros dos productos fueron de 150 x 100 x 2 mm. El recubrimiento C y el sistema anticorrosivo D reportaron los siguientes espesores promedio de película seca 41.2 milésimas de pulgada (1046  $\mu\text{m}$ ) y 18.2 milésimas de pulgada (462  $\mu\text{m}$ ).

---

---

En los **Sistemas** de Recubrimientos Anticorrosivos, el espesor promedio de película seca del primario inorgánico de zinc es de 2.0 a 3.0 milésimas (50.8 a 76  $\mu\text{m}$ ).

### **3.8.3.2 Condiciones de Prueba**

A las láminas recubiertas con los productos **A, B, C y D**, se les realizó un corte en cruz sobre el recubrimiento que llegó hasta el sustrato metálico, el corte se efectuó con navaja a un ángulo de 45° respecto a la horizontal y fue la intersección de dos líneas perpendiculares de 10 mm de longitud.

El otro daño sobre los mismos productos, se realizó con una broca y fue de 1.0 mm de diámetro que también llegó hasta el sustrato metálico.

Una vez preparadas las láminas se colocaron y sujetaron en la Celda CFC-13, en el punto **3.5.3.1** se describió con detalle la construcción de la misma.

Los daños en cruz y puntual de las probetas de ensayo quedaron al centro del tubo de acrílico, a éste mismo se le ajustó en la parte superior una placa de acrílico que tiene orificio en la parte central y es donde se insertó el electrodo de referencia (Calomel), de esta misma placa se sujeta el contraelectrodo (malla de platino); a la probeta de ensayo se le desprendió el recubrimiento en uno de los extremos para asegurar el electrodo de trabajo; con lo antes expuesto nuestra celda quedó con el arreglo de tres electrodos.

### **3.8.3.3 Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica<sup>[1, 33, 34]</sup>**

#### **3.8.3.4 Desarrollo de la Prueba**

Las probetas de ensayo preparadas como se indicó en el punto **3.8.3.2**, se llevaron al interior de una jaula de Faraday, se conectaron los cables del equipo Solartron SI 1280 B a los correspondientes de la Celda Scribner como sigue: **WE1** al extremo de la probeta sin recubrimiento (electrodo de trabajo), **RE** al electrodo de referencia (Calomel) y **AE** al contraelectrodo (malla de platino); estos dos últimos dentro del tubo de acrílico, a continuación se adicionó solución 0.5M de cloruro de sodio al tubo de acrílico. La muestra se dejó durante una hora en las condiciones antes descritas, para obtener el potencial de corrosión lo mas estable posible y de esta manera correr la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

#### **3.8.3.5 Condiciones de Operación del Equipo**

La prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica se realizó con el equipo Solartron SI 1280 B.

Rango de Frecuencia	0.01 - 10,000 Hz
Amplitud	10 mV
Área expuesta	12.88 cm <sup>2</sup>
Lectura	61 puntos

Al término de la prueba de Impedancia, se desconectaron los cables (equipo Solartron celda Scribner) y se retiró de la jaula de Faraday. A continuación este mismo análisis consistió en conectar nuevamente los cables de la celda Scribner al equipo Vimar que es un potencióstato/galvanostato, este equipo tiene el mismo arreglo de tres electrodos y se dejó la muestra de ensayo polarizando catódicamente con un potencial de -1050 mv durante 24 horas.<sup>[1]</sup>

Después de 24 horas de polarización se corrió la segunda prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica con el equipo Solartron SI 1280 B. Entonces se tienen dos pruebas de impedancia a tiempo ( $T_{inicial} = 0$  hr) y ( $T_{final} = 24$  hr) con polarización catódica.

El último paso en este análisis fue determinar la prueba de adherencia,<sup>[29]</sup> ésta se realizó colocando la cinta adhesiva que marca el método ASTM D 3359 encima del daño sobre el recubrimiento, presionando la cinta con bastante fuerza para adherirse y de un jalón hacia arriba tratar de desprender el recubrimiento aplicado.

El desarrollo de la prueba se realizó a temperatura de  $23 \pm 2$  °C.

### 3.8.3.6 Evaluación de las Probetas

Ver Tablas Nos. IV-19 y IV-20 (páginas 97 y 98)

---

---

## ***CAPÍTULO IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS***

### **4.1 Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina**

#### **4.1.1 Análisis de los resultados**

Como se indicó en las secciones 3.4.3.3 y 3.4.3.5 las láminas protegidas con los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva fueron retiradas del equipo de niebla salina al término del tiempo de exposición para cada una de ellas; se dejaron recuperar durante dos horas a temperatura ambiente; transcurrido el tiempo de recuperación fueron evaluadas de acuerdo con los procedimientos indicados en los métodos ASTM<sup>[26, 27 y 29]</sup>; los recubrimientos aplicados no deben presentar sobre la superficie expuesta las siguientes fallas: ampollamiento,<sup>[26]</sup> descascaramiento,<sup>[27]</sup> ni pérdida de adherencia.<sup>[29]</sup>

Los recubrimientos y sistemas a evaluar son:

- **A.-** Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina, Espesor promedio de película seca de 12.6 milésimas de pulgada (320  $\mu\text{m}$ ).
- **B.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina). Espesor promedio de película seca de 17.0 milésimas de pulgada (432  $\mu\text{m}$ ).
- **C.-** Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano. Espesor promedio de película seca de 41.4 milésimas de pulgada (1052  $\mu\text{m}$ ).
- **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano). Espesor promedio de película seca de 19.2 milésimas de pulgada (488  $\mu\text{m}$ ).

#### **4.1.2 Evaluación visual**

Las láminas protegidas con los recubrimientos **A, B, C y D**, presentan corrosión sobre el corte de prueba de los recubrimientos y sistemas desde las 330 y hasta las 500 horas; de 750 y hasta las 1150 horas muestran corrosión severa en el mismo corte.

La evaluación se realiza sobre la superficie expuesta y principalmente sobre el corte transversal; sobre el corte, el sustrato metálico queda desprotegido y es esta la zona fácilmente atacada por la neblina salina, donde los productos de corrosión que se

---

---

forman pueden ocasionar ampollamiento y pérdida de adherencia. En este trabajo los recubrimientos y sistemas anticorrosivos presentaron buena resistencia al ambiente de la niebla salina.

#### **4.1.3 Ampollamiento**

El ampollamiento es ocasionado por entrapamiento de solventes, gases o líquidos en la película o bajo la misma, que ejercen una presión mayor que la adhesión de la película en el área bajo esfuerzo.

El ampollamiento se presenta principalmente en los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva, cuando éstos se encuentran expuestos a ambientes húmedos y a contaminación entre capas, o cuando el recubrimiento se seca superficialmente con mayor rapidez a la especificada para cada tipo de material.

Las ampollas por vapores de solventes se evitan si los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva se formulan convenientemente y se aplican a los espesores de capa recomendados.

Respecto al ampollamiento, los productos **A, B, C y D** no mostraron esta falla al ser expuestos a la niebla salina; lo anterior se debe a que se limpió y preparó correctamente la superficie metálica antes de aplicar los materiales anticorrosivos; el sustrato se preparó de acuerdo con lo indicado en la especificación SSPC-SP-5<sup>(14)</sup>; los recubrimientos y sistemas se aplicaron conforme a la información técnica especificada para cada uno de ellos. El espesor de película entre capas de recubrimientos (primario + acabado) también es factor decisivo para evitar cualquier otro tipo de situaciones que pudieran afectar el desempeño de los recubrimientos en el presente trabajo.

En las Tablas Nos. 1, 2, 3 y 4 que se encuentran en las (páginas 41, 42, 43 y 44), se pueden observar los resultados de esta prueba, el análisis de ampollamiento se desarrolló de acuerdo con el método ASTM D 714 - 02.

#### **4.1.4 Descascaramiento**

Los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva **A, B, C y D**, no mostraron descascaramiento sobre la superficie expuesta, el método de evaluación aplicado fue ASTM D 772 - 00; esta falla no se presentó en los especímenes de prueba expuestos a la niebla salina; este daño o falla se presenta sobre los recubrimientos cuando éstos no resisten el ambiente salino.

---

---

#### 4.1.5 Adherencia

Prueba de adherencia, método ASTM D 3359 - 02; en esta prueba se debe comprobar que la película del recubrimiento quede bien adherida a la superficie metálica por atracción molecular o por unión mecánica. Al no ocurrir lo anterior, la película se desprende fácilmente.

Para evitar esta falla es necesario emplear recubrimientos a base de materiales que tengan buena adherencia sobre la superficie metálica y que ésta se prepare convenientemente; se debe eliminar cualquier material extraño que impida el contacto íntimo entre ambos.

En el punto **3.4.3.4** del Capítulo III (página 22), se describe el desarrollo de esta prueba.

La falta de adhesión entre las diferentes capas del o los recubrimientos se presenta cuando:

- El tiempo de secado duro exceda al especificado para cada material.
- Hay incompatibilidad entre recubrimientos y solventes.
- Hay humedad o contaminación entre capas.
- Cuando no se prepara correctamente la superficie de acuerdo al grado y calidad indicados.

Los recubrimientos **A**, **B** y **D** presentaron resultados satisfactorios respecto al método indicado, la evaluación se identifica con la clasificación **4B**; desde las 330 y hasta las 1150 horas de exposición en ese medio.

Clasificación **4B**.- Al efectuar el corte en cruz sobre la película del recubrimiento ésta se desprende en pequeños fragmentos en los puntos de intersección de las líneas del enrejado. La superficie desprendida es aproximadamente 5% del área total.

El recubrimiento anticorrosivo **C**, presentó clasificación **3B** en la misma prueba a partir de 750 y hasta las 1150 horas de exposición en el medio antes citado.

Clasificación **3B**.- La pintura se desprende en los bordes de los cortes en franjas amplias y en los puntos de intersección de las líneas del enrejado. Superficie desprendida aproximadamente 15% del área total.

El recubrimiento **C** presenta alta permeabilidad y no resiste la humedad y el ambiente salino, aún cuando el espesor de película seca es mucho mayor comparativamente a los demás productos aplicados. Lo anterior se indica en la Tabla No. 3, y es el resultado de acuerdo con la corrosión severa que presentaron las láminas expuestas en este medio.

Observar las Tablas Nos. IV-1, IV-2, IV-3 y IV-4, (páginas 41, 42, 43 y 44).



**TABLA No. IV-1****Resultados de la Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina**

➤ **A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.**

	Lámina 1	Lámina 2	Lámina 3	Lámina 4	Lámina 5
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
EPPS milésimas de pulgada [Espesor Promedio de Película Seca]	12.2 (310 $\mu\text{m}$ )	12.2 (310 $\mu\text{m}$ )	14.1 (358 $\mu\text{m}$ )	12.8 (325 $\mu\text{m}$ )	11.8 (300 $\mu\text{m}$ )
Evaluación Visual	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba
Ampollamiento <sup>[26]</sup> Método ASTM D - 714 - 02	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento
Descascaramiento <sup>[27]</sup> Método ASTM D - 772 - 00	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento
Adherencia <sup>[29]</sup> Método ASTM D- 3359 - 02	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B

**TABLA No. IV-2**

➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).**

	Lámina 6	Lámina 7	Lámina 8	Lámina 9	Lámina 10
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
EPPS milésimas de pulgada [Espesor Promedio de Película Seca]	17.2 (437 µm)	17.2 (437 µm)	18.0 (457 µm)	16.9 (429 µm)	15.9 (404 µm)
Evaluación Visual	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba
Ampollamiento <sup>[26]</sup> Método ASTM D - 714 - 02	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento
Descascaramiento <sup>[27]</sup> Método ASTM D - 772 - 00	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento
Adherencia <sup>[29]</sup> Método ASTM D- 3359 - 02	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B

**TABLA No. IV-3**

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.**

	Lámina 11	Lámina 12	Lámina 13	Lámina 14	Lámina 15
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
EPPS milésimas de pulgada [Espesor Promedio de Película Seca]	39.1 (993 $\mu\text{m}$ )	47.6 (1209 $\mu\text{m}$ )	36.3 (922 $\mu\text{m}$ )	44.6 (1133 $\mu\text{m}$ )	39.6 (1006 $\mu\text{m}$ )
Evaluación Visual	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba
Ampollamiento <sup>[26]</sup> Método ASTM D - 714 – 02	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento
Descascaramiento <sup>[27]</sup> Método ASTM D - 772 - 00	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento
Adherencia <sup>[29]</sup> Método ASTM D- 3359 –02	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 3 B	Clasificación 3 B	Clasificación 3 B

**TABLA No. IV-4**

➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).**

	Lámina 16	Lámina 17	Lámina 18	Lámina 19	Lámina 20
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
EPPS milésimas de pulgada (Espesor Promedio de Película Seca)	20.4 (518 µm)	14.8 (376 µm)	15.8 (401 µm)	22.4 (569 µm)	22.6 (574 µm)
Evaluación Visual	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba	Corrosión severa en el corte de prueba
Ampollamiento <sup>[26]</sup> Método ASTM D - 714 - 02	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento	No hay ampollamiento sobre el recubrimiento
Descascaramiento <sup>[27]</sup> Método ASTM D - 772 - 00	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento	No se observa Descascaramiento
Adherencia <sup>[29]</sup> Método ASTM D- 3359 – 02	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B	Clasificación 4 B

---

---

## 4.2 Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

### 4.2.1 Análisis de los resultados

Referente a los puntos 3.5, 3.5.3.2 y 3.5.3.3, con los espectros de las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE), se procedió a determinar las simulaciones correspondientes con el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto por M. Kending y colaboradores<sup>[1]</sup>.

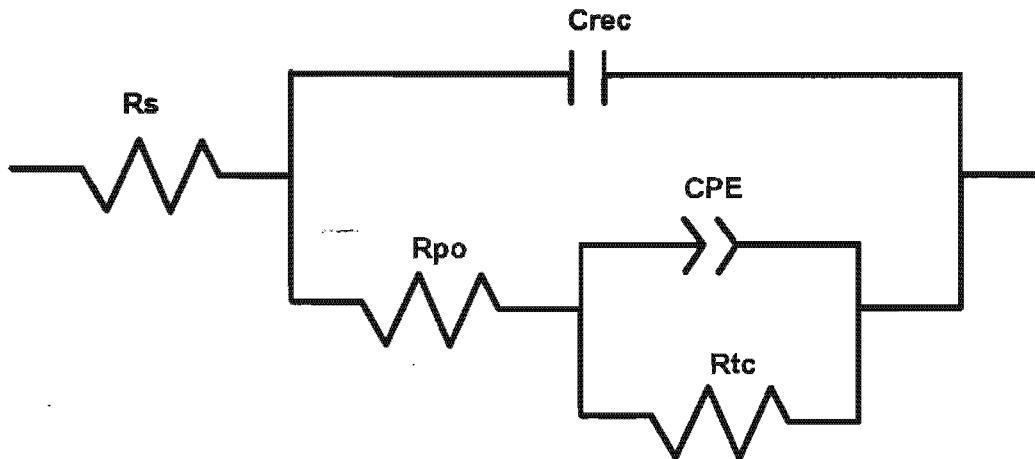


Figura No. IV.1

Circuito Eléctrico Equivalente (simplificado) empleado en los datos de análisis de EIE Impedancia esquematizada para un acero con recubrimiento expuesto a la corrosión.

Donde:

- $R_s$  = Resistencia de la Solución ( $\Omega$ )
- $C_{rec}$  = Capacitancia del recubrimiento ( $F/cm^2$ )
- $R_{po}$  = Resistencia del poro ( $\Omega \times cm^2$ )
- $CPE$  = Elemento de fase constante ( $F/cm^2$ )
- $R_{tc}$  = Resistencia a la transferencia de carga ( $\Omega \times cm^2$ )

#### ➤ A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina

De acuerdo con los diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE), y el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto por M. Kending y colaboradores,<sup>[1]</sup> correspondiente a las pruebas de 330 y 500 horas de exposición en la niebla salina (páginas 54 y 55), se observa una constante de tiempo asociada con valores relativamente grandes de impedancia; el resultado de  $R_s$  se fijó en 200 ( $\Omega$ ), mientras que la  $R_{tc}$  permanece constante  $3.120 \times 10^{+15}$  ( $\Omega \times cm^2$ ); así mismo, el valor de capacitancia disminuye de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$  ( $F/cm^2$ ). Analizando lo anterior y conforme al

---

---

Circuito Equivalente propuesto por M. Kending y colaboradores<sup>[1]</sup> la corriente fluye a través del capacitor, debido a que las resistencias  $R_{po}$  y  $R_{tc}$  se oponen al flujo de corriente en este modelo. Por el capacitor pasan los electrones del medio agresivo convirtiéndose el hierro a  $Fe^{2+}$  de acuerdo con las siguientes reacciones:<sup>[28]</sup>

Reacciones del proceso de corrosión con solución de cloruro de sodio.



Los ocho electrones son consumidos por la reacción del agua y el oxígeno para formar hidróxido de sodio.



Cuando los productos de las áreas anódica y catódica se combinan en presencia de un exceso de oxígeno, el producto final es herrumbre de  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$  (óxido férrico).



Con la reformación indicada de cloruro de sodio, y en presencia de humedad (agua), la reacción total se repite.

Las reacciones anteriores describen los procesos de corrosión si la sal (cloruro de sodio) está presente. Si únicamente están presentes el oxígeno y el agua (y sales no corrosivas) la corrosión electroquímica del hierro (formación de herrumbre) tiene otro proceso químico.<sup>[28]</sup>

Como se describió en el punto 3.4.3.2, las láminas tienen un corte transversal, en este caso el metal desnudo es el ánodo y tiende a disolverse por efecto de las condiciones en que estuvo expuesto, el hierro pierde electrones y entra en solución como ión, así sucede la formación del  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$  (óxido férrico) en el metal.

Continuando la prueba desde 750 y hasta las 1150 horas de exposición, se observa en los diagramas la parte final de un pequeño primer semicírculo, el cual probablemente se asocia a la resistencia del recubrimiento, mientras que el segundo a la difusión de especies (páginas 55 y 56).

Al realizar la simulación del circuito equivalente, no se definen claramente los dos semicírculos, el segundo presenta valores demasiado grandes de  $R_{tc}$   $3.120 \times 10^{+15}$  ( $\Omega \times cm^2$ ), la tendencia se inclina hacia un fenómeno de difusión.

Los resultados del elemento de fase constante (CPE),  $C_{corr-T}$  y  $C_{corr-P}$  expresados en ( $F/cm^2$ ), no tienen variación considerable, los primeros con exponente constante de  $10^{-4}$  ( $F/cm^2$ ) y los segundos con décimas de variación, ver Tablas Nos. IV-5, IV-6, IV-7, y IV-8 (páginas 50, 51, 52 y 53).

---

---

El  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (óxido férrico) que se forma sobre el corte de las placas es en cierta forma protector y sella el daño en corto tiempo; mientras no se desprenda éste del metal no se presentará ninguna alteración, si sucede lo contrario y se desprende, entonces va a permitir el paso del medio agresivo hacia el metal.

Se dice entonces que el recubrimiento protege el sustrato metálico, impide el paso de los cloruros provenientes de la niebla salina a través del corte, existe buena adherencia del recubrimiento (ver Tabla No. IV-1, clasificación 4B), por lo tanto no hay corrosión en la interfase metal recubrimiento.

➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).**

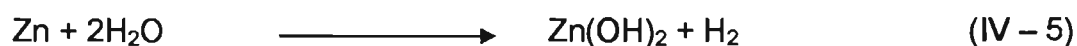
Desde 330 y hasta 500 horas de exposición se observa una constante de tiempo (páginas 57 y 58), la resistencia  $R_s$  se fijó en 200 ( $\Omega$ ), mientras que el valor de la resistencia a la transferencia  $R_{tc}$  nuevamente permanece constante en  $3.120 \times 10^{+15}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), la capacitancia del sistema anticorrosivo no varía, su valor es  $10^{-9}$  (F/cm<sup>2</sup>); el análisis de los resultados indican que el sistema anticorrosivo protege de la corrosión al acero, el producto que probablemente se forma sobre la ranura es  $\text{ZnOZnCl}_2$  (oxicloruro de zinc) e impide el paso de los cloruros hacia el sustrato, el valor de capacitancia  $10^{-9}$  (F/cm<sup>2</sup>) se obtiene cuando los recubrimientos tienen baja permeabilidad y por lo tanto absorben poca agua, aunado al espesor del sistema de recubrimientos.

En este sistema, el zinc proporciona al sustrato metálico protección catódica, la corrosión que se presenta sobre la ranura es probablemente de  $\text{ZnOZnCl}_2$  (oxicloruro de zinc).<sup>[28]</sup>

Algunas de las reacciones del zinc son las siguientes.<sup>[28]</sup>



Esta es la corrosión común de la reacción para el zinc



Las reacciones son propuestas por Charles G. Munger, Zinc-Rich Primers, (ver referencia [28]).

Continuando la prueba de 750 y hasta 1150 horas de exposición (páginas 58 y 59), se observa en los diagramas la parte final de un pequeño primer semicírculo, el cual probablemente se asocia a la resistencia del recubrimiento, mientras que el segundo a la transferencia de carga.

---

---

Al realizar la simulación del circuito equivalente, no se definen claramente los dos semicírculos, el segundo presenta un valor de  $R_{tc}$  de  $3.120 \times 10^{+15}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), valor demasiado grande y no se observa la impedancia total del sistema a bajas frecuencias, mientras que la capacitancia permanece constante en  $10^{-9}$  (F/cm<sup>2</sup>), los fenómenos descritos se asocian con la protección de la doble capa, el zinc se sacrifica para proteger el metal formando la doble capa.

El sistema anticorrosivo protege al acero, impide el paso de los cloruros provenientes de la niebla salina a través del corte y además presenta buena adherencia al metal; por lo que no hay corrosión en la interfase metal recubrimiento, (ver Tabla No. IV-6 y páginas 57, 58 y 59).

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano**

De acuerdo con los diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE), y el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto por Kending y colaboradores<sup>[1]</sup> correspondientes a las pruebas de 500 y hasta 1150 horas de exposición en la niebla salina (páginas 61 y 62), se observa la parte final de un pequeño primer semicírculo, el cual posiblemente se asocia a la resistencia del recubrimiento, mientras que el segundo a la transferencia de carga. Al realizar la simulación con el Circuito Equivalente, no se definen los dos semicírculos y se observa que el segundo presenta valores demasiado grandes de impedancia  $3.120 \times 10^{+15}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), la tendencia de nuevo se enfoca hacia un fenómeno de difusión.

La resistencia  $R_s$  se fijó en 200 ( $\Omega$ ), mientras el valor de capacitancia permanece constante  $10^{-9}$  (F/cm<sup>2</sup>); este último resultado es propio de un recubrimiento protector con baja permeabilidad; en este caso particular el resultado indica que el recubrimiento **C** tiene alta permeabilidad comparándolo con los otros tres productos aplicados, de aquí también se deduce el resultado de adherencia que fue 3B.

Conforme al Circuito Equivalente propuesto por Kending y colaboradores<sup>[1]</sup>, teóricamente la corriente fluye a través del capacitor, las resistencias  $R_{po}$  y  $R_{tc}$  presentan mayor resistencia al flujo de corriente en este modelo. Así sucede la formación del  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  óxido férrico en el metal (ver reacciones IV – 1 a IV – 3).

Los resultados de  $C_{\text{corr-T}}$  y  $C_{\text{corr-P}}$ , no tienen variación considerable, los primeros con exponente constante de  $10^{-3}$  (F/cm<sup>2</sup>) y los segundos con décimas de variación. Comparando este resultado exponencial respecto al obtenido con los recubrimientos **A** y **B** que fue de  $10^{-4}$  (F/cm<sup>2</sup>), posiblemente este cambio exponencial se debe a la alta permeabilidad que tiene el recubrimiento, por lo tanto permite el paso de la humedad y del medio agresivo hacia el metal.

Es necesario señalar que el óxido férrico que se forma sobre el corte durante la prueba, en cierta forma es un óxido protector del acero; mientras no se desprenda este producto de corrosión protegerá al metal en corto tiempo.



---

---

Se dice entonces que se impide en menor grado el paso de los cloruros provenientes de la niebla salina a través de la ranura, existe regular adherencia del recubrimiento, no hay corrosión en la interfase metal recubrimiento, (ver Tabla No IV-7 y páginas 61 y 62).

- **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).**

Se observa una constante de tiempo asociada con valores relativamente grandes de impedancia; el resultado de  $R_s$  se fijó en 200 ( $\Omega$ ), la resistencia  $R_{tc}$  es igual a  $3.120 \times 10^{+15}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ). El valor de capacitancia disminuye de  $10^{-8}$  a  $10^{-11}$  (F/cm<sup>2</sup>), (ver Tabla No. IV-8 y página 63, 64 y 65).

Los resultados obtenidos indican la baja permeabilidad y protección contra la corrosión del acero; en este caso el zinc sigue siendo factor decisivo de sacrificio y protección catódica del acero; la corrosión que se presenta sobre la ranura es de ZnOZnCl<sub>2</sub> oxiclورو de zinc (ver reacciones IV – 4 a IV – 7).

De acuerdo con la constante de tiempo que se observa en los diagramas, no se obtiene el valor final de impedancia a bajas frecuencias, tampoco se observa completamente el semicírculo, la tendencia de este último es hacia la difusión de especies.

Los resultados de  $C_{corr-T}$  y  $C_{corr-P}$  no varían de forma considerable, los primeros con exponente  $10^{-4}$  (F/cm<sup>2</sup>) y los segundos con décimas de variación.

Comparando este sistema con los recubrimientos A y C, el oxiclورو de zinc que se forma en la ranura de las placas es mucho más protector que el de hierro, aísla y protege al metal, impide el paso de los cloruros, presenta buena adherencia y no hay corrosión en la interfase metal sistema de recubrimientos.

**TABLA No. IV-5**

**Resultados de la Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIE)**

➤ **A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina**

	Lámina 1	Lámina 2	Lámina 3	Lámina 4	Lámina 5
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
Potencial de Corrosión (E mV ecs)	<b>-476.89</b>	<b>-478.66</b>	<b>-508.05</b>	<b>-472.81</b>	<b>-481.19</b>
R <sub>s</sub> [Resistencia de la solución], (Ω)	200	200	200	200	200
C <sub>rec</sub> [Capacitancia del recubrimiento], (F/cm <sup>2</sup> )	2.3668 x 10 <sup>-8</sup>	2.919 x 10 <sup>-10</sup>	1.3884 x 10 <sup>-8</sup>	4.181 x 10 <sup>-10</sup>	4.540 x 10 <sup>-10</sup>
R <sub>po</sub> [Resistencia del poro], (Ω x cm <sup>2</sup> )	27.36	245.6	153.7	1943	1664
C <sub>corr</sub> – T [Elemento de fase constante], (F/cm <sup>2</sup> )	3.7451 x 10 <sup>-4</sup>	4.6446 x 10 <sup>-4</sup>	9.718 x 10 <sup>-4</sup>	1.7143 x 10 <sup>-4</sup>	2.4223 x 10 <sup>-4</sup>
C <sub>corr</sub> – P [Elemento de fase constante], (F/cm <sup>2</sup> )	0.4331	0.21223	0.30705	0.20756	0.18725
R <sub>tc</sub> [Resistencia a la transferencia de carga], (Ω x cm <sup>2</sup> )	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>

**TABLA No. IV-6**

➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

	Lámina 6	Lámina 7	Lámina 8	Lámina 9	Lámina 10
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
Potencial de Corrosión (E mV ecs)	<b>-457.55</b>	<b>-505.47</b>	<b>-727.06</b>	<b>-447.72</b>	<b>-467.53</b>
R <sub>s</sub> [Resistencia de la solución], (Ω)	200	200	200	200	200
C <sub>rec</sub> [Capacitancia del recubrimiento], (F/cm <sup>2</sup> )	2.767 x 10 <sup>-9</sup>	2.555 x 10 <sup>-9</sup>	4.513 x 10 <sup>-9</sup>	9.568 x 10 <sup>-9</sup>	1.733 x 10 <sup>-9</sup>
R <sub>po</sub> [Resistencia del poro], (Ω x cm <sup>2</sup> )	105.2	9.284	406.5	245.4	449.6
C <sub>corr</sub> – T [Elemento de fase constante], (F/cm <sup>2</sup> )	4.4512 x 10 <sup>-4</sup>	2.9038 x 10 <sup>-4</sup>	9.5957 x 10 <sup>-4</sup>	3.4502 x 10 <sup>-4</sup>	4.3229 x 10 <sup>-4</sup>
C <sub>corr</sub> – P [Elemento de fase constante], (F/cm <sup>2</sup> )	0.38144	0.38788	0.29492	0.38735	0.31307
R <sub>tc</sub> [Resistencia a la transferencia de carga], (Ω x cm <sup>2</sup> )	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>

**TABLA No. IV-7**

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano**

	Lámina 11	Lámina 12	Lámina 13	Lámina 14	Lámina 15
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
<b>Potencial de Corrosión (E mV ecs)</b>	<b>-530.07</b>	<b>-494.18</b>	<b>-647.51</b>	<b>-520.75</b>	<b>-508.73</b>
<b>R<sub>s</sub> [Resistencia de la solución], (Ω)</b>	200	200	200	200	200
<b>C<sub>rec</sub> [Capacitancia del recubrimiento], (F/cm<sup>2</sup>)</b>	1.3832 x 10 <sup>-8</sup>	4.389 x 10 <sup>-9</sup>	3.524 x 10 <sup>-8</sup>	3.182 x 10 <sup>-9</sup>	4.410 x 10 <sup>-9</sup>
<b>R<sub>po</sub> [Resistencia del poro], (Ω x cm<sup>2</sup>)</b>	158	149.9	56.39	334.5	255.7
<b>C<sub>corr</sub> – T [Elemento de fase constante], (F/cm<sup>2</sup>)</b>	2.7381 x 10 <sup>-3</sup>	2.7144 x 10 <sup>-3</sup>	2.9281 x 10 <sup>-3</sup>	1.5738 x 10 <sup>-3</sup>	1.2491 x 10 <sup>-3</sup>
<b>C<sub>corr</sub> – P [Elemento de fase constante], (F/cm<sup>2</sup>)</b>	0.35494	0.33545	0.58085	0.20195	0.21085
<b>R<sub>tc</sub> [Resistencia a la transferencia de carga], (Ω x cm<sup>2</sup>)</b>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>

**TABLA No. IV-8**

➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)**

	Lámina 16	Lámina 17	Lámina 18	Lámina 19	Lámina 20
Tiempo de Exposición (hrs)	330	500	750	1000	1150
Potencial de Corrosión (E mV ecs)	<b>-619.57</b>	<b>-435.80</b>	<b>-625.65</b>	<b>-496.91</b>	<b>-578.51</b>
R <sub>s</sub> [Resistencia de la solución], (Ω)	200	200	200	200	200
C <sub>rec</sub> [Capacitancia del recubrimiento], (F/cm <sup>2</sup> )	1.2869 x 10 <sup>-8</sup>	8.982 x 10 <sup>-9</sup>	3.2461 x 10 <sup>-8</sup>	7.061 x 10 <sup>-11</sup>	1.648 x 10 <sup>-11</sup>
R <sub>po</sub> [Resistencia del poro], (Ω x cm <sup>2</sup> )	90.18	214.7	114.5	778.7	532.1
C <sub>corr - T</sub> [Elemento de fase constante], (F/cm <sup>2</sup> )	2.8889 x 10 <sup>-4</sup>	7.5252 x 10 <sup>-4</sup>	7.8287 x 10 <sup>-4</sup>	7.6985	3.5394 x 10 <sup>-4</sup>
C <sub>corr - P</sub> [Elemento de fase constante], (F/cm <sup>2</sup> )	0.44009	0.33337	0.47561	0.25377	0.18642
R <sub>tc</sub> [Resistencia a la transferencia de carga], (Ω x cm <sup>2</sup> )	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>	3.120 x 10 <sup>+15</sup>

---

---

## 4.2.1 Análisis de los Resultados

### Diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

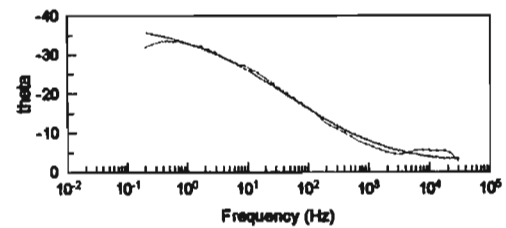
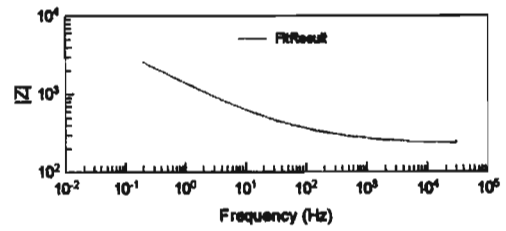
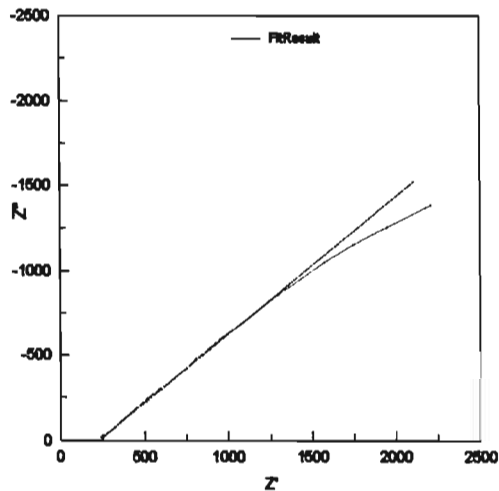
#### Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina

➤ A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.

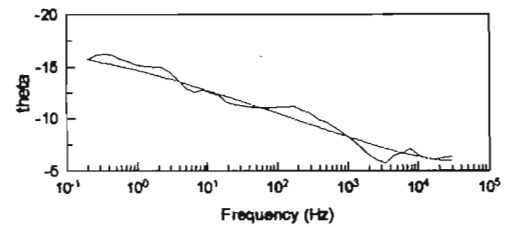
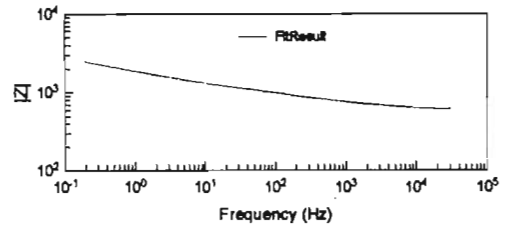
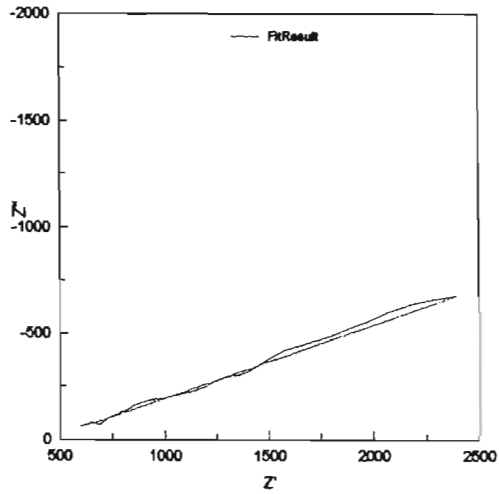
##### Ensayo 1

Lámina No. 1, Tiempo de exposición 330 horas

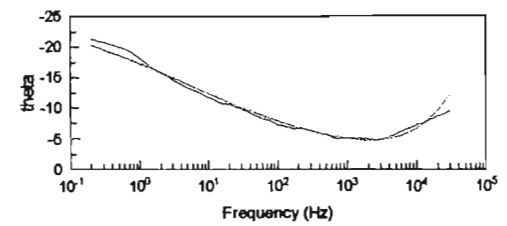
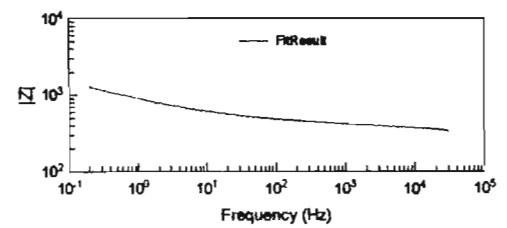
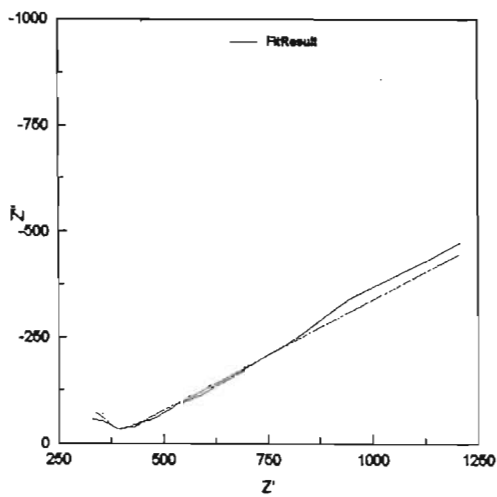
Potencial de Corrosión  $-476.89$  mV ecs



**Ensayo 2**  
**Lámina No. 2, Tiempo de exposición 500 horas**  
**Potencial de Corrosión -478.66 mV ecs**

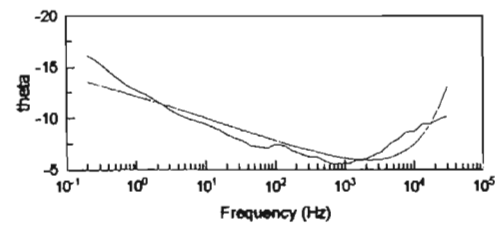
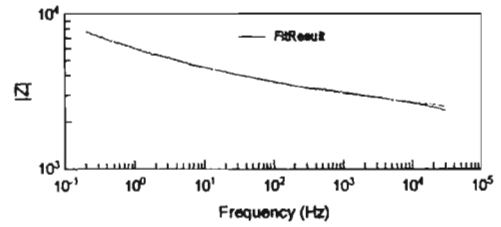
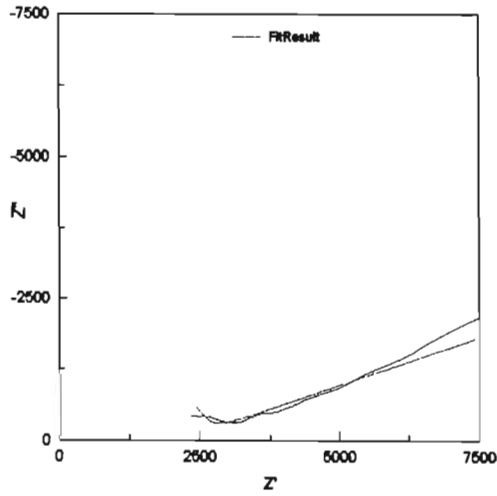


**Ensayo 3**  
**Lámina No. 3, Tiempo de exposición 750 horas**  
**Potencial de Corrosión -508.05 mV ecs**



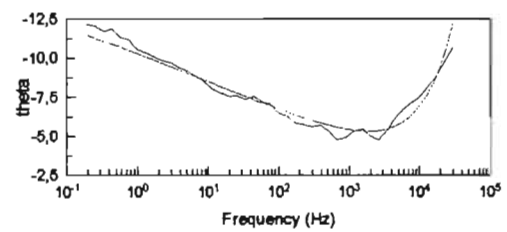
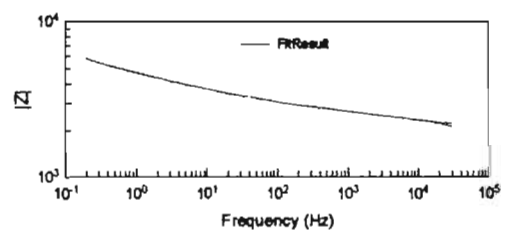
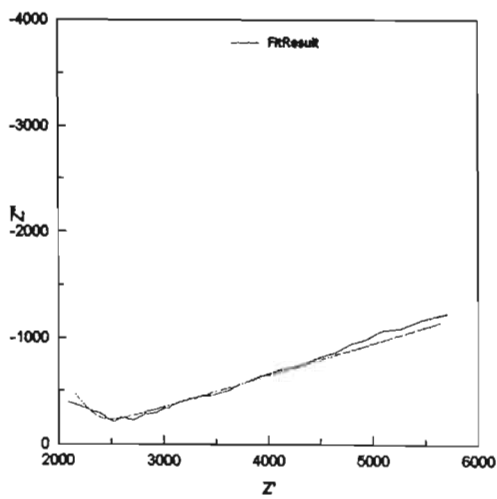
## Ensayo 4

Lámina No. 4, Tiempo de exposición 1000 horas  
Potencial de Corrosión -472.81 mV **ecs**]



## Ensayo 5

Lámina No. 5, Tiempo de exposición 1150 horas  
Potencial de Corrosión -481.19 mV **ecs**





---

---

## 4.2.1 Análisis de los Resultados

### Diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

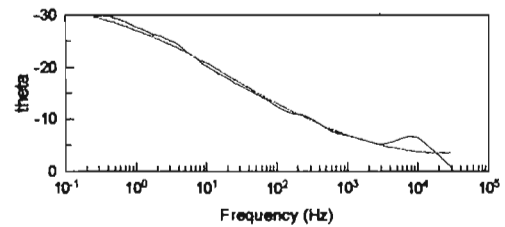
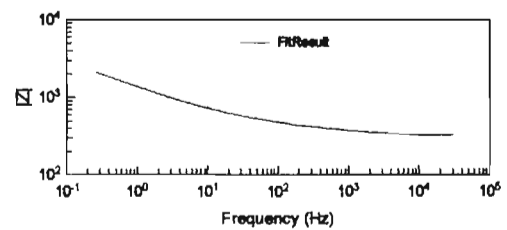
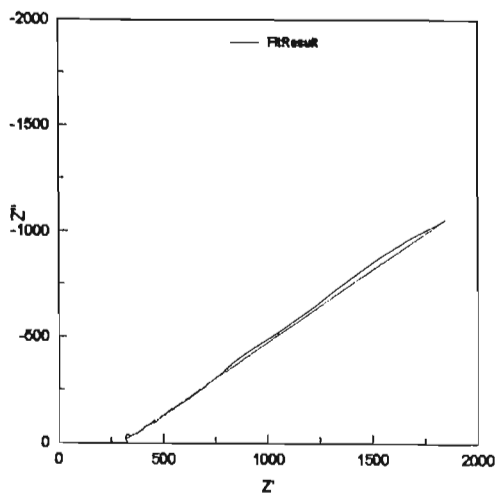
#### Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina

- **B.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)

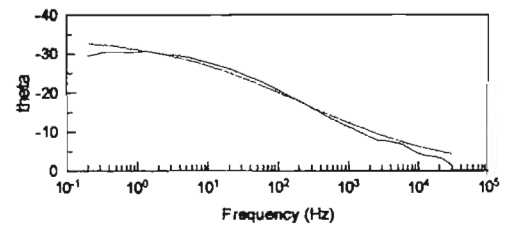
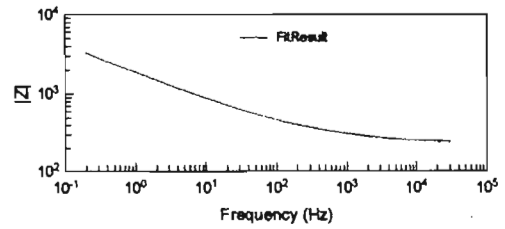
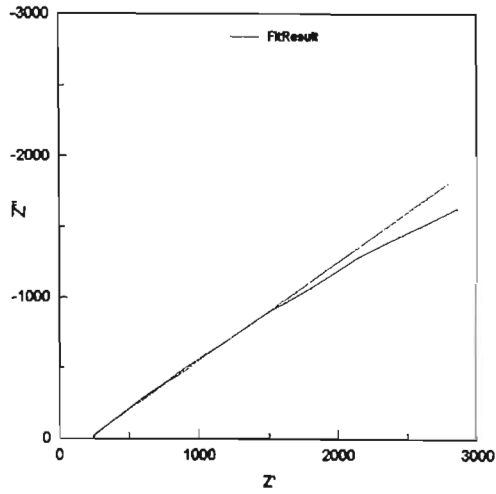
#### Ensayo 1

Lámina No. 6, Tiempo de exposición 330 horas

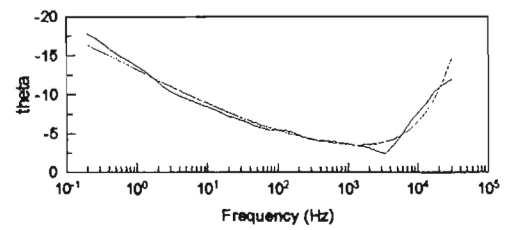
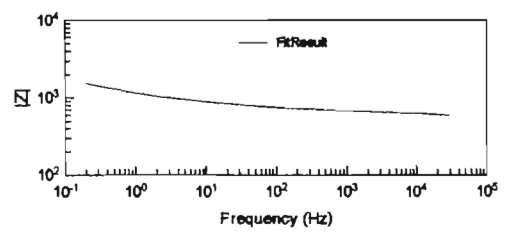
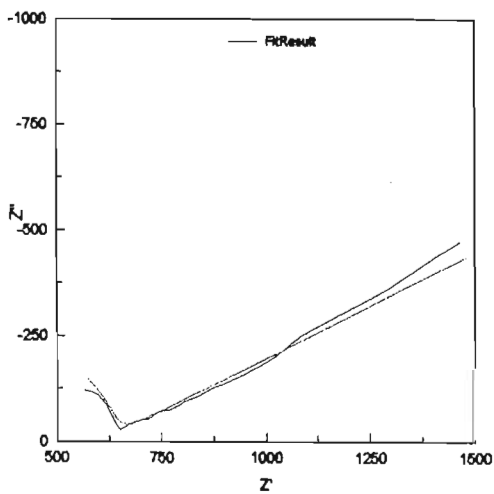
Potencial de Corrosión **-457.55 mV ecs**



**Ensayo 2**  
**Lámina No. 7, Tiempo de exposición 500 horas**  
**Potencial de Corrosión -505.47 mV ecs]**



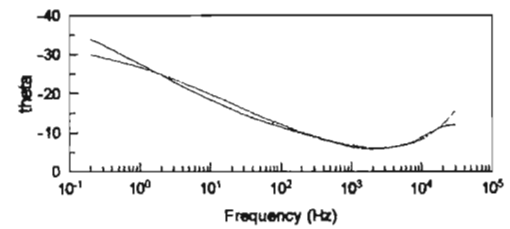
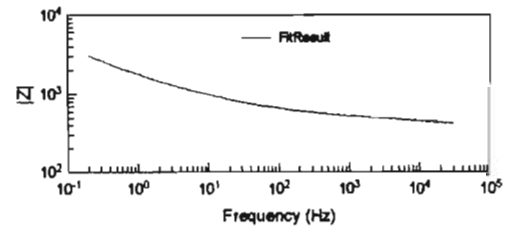
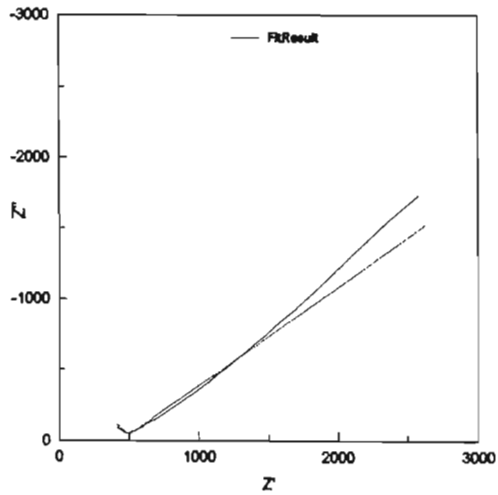
**Ensayo 3**  
**Lámina No. 8, Tiempo de exposición 750 horas**  
**Potencial de Corrosión -727.06 mV ecs]**



## Ensayo 4

Lámina No. 9, Tiempo de exposición 1000 horas

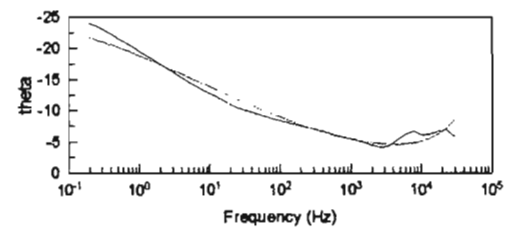
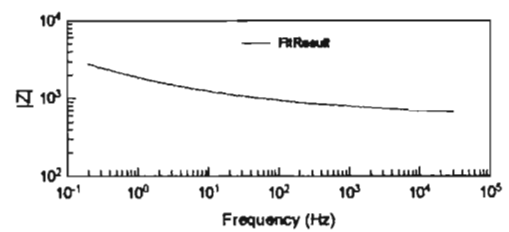
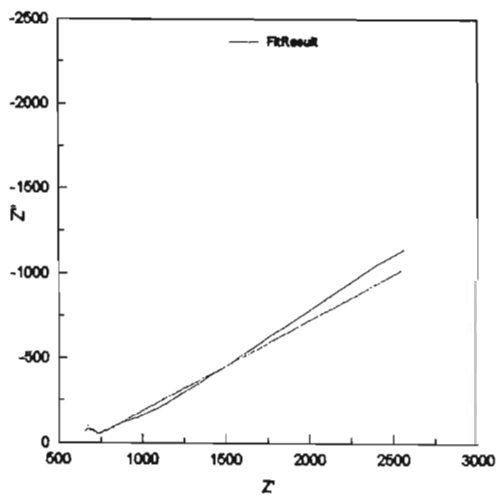
Potencial de Corrosión  $-447.72 \text{ mV ecs}$



## Ensayo 5

Lámina No. 10, Tiempo de exposición 1150 horas

Potencial de Corrosión  $-467.53 \text{ mV ecs}$



## 4.2.1 Análisis de los Resultados

### Diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

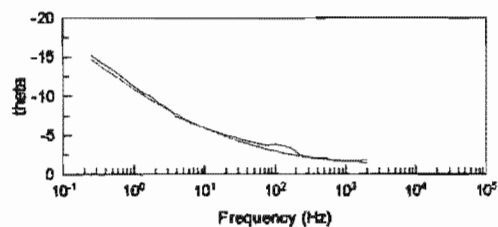
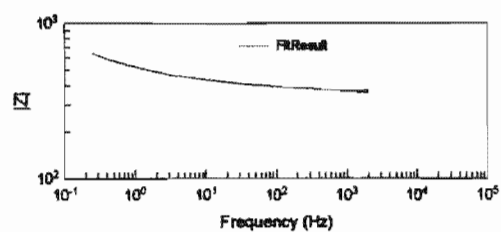
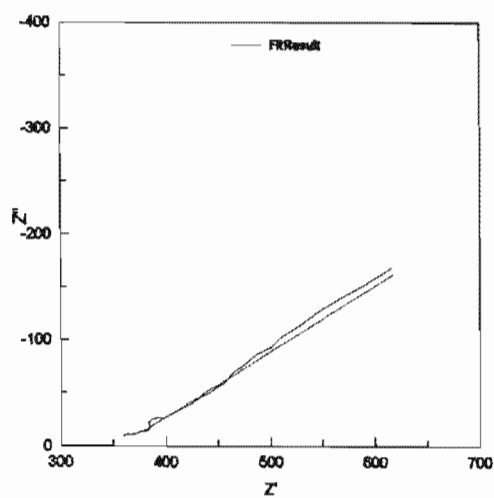
#### Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina

➤ C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.

##### Ensayo 1

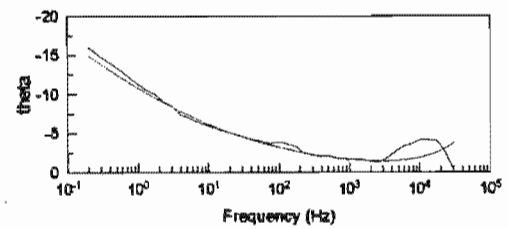
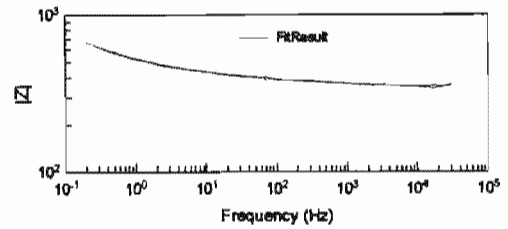
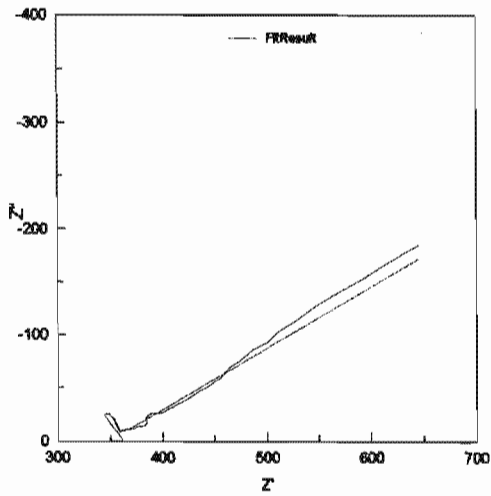
Lámina No. 11, Tiempo de exposición 330 horas

Potencial de Corrosión -530.07 mV *ecs*



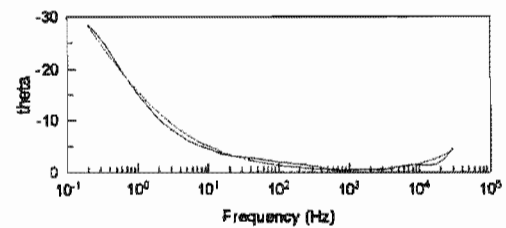
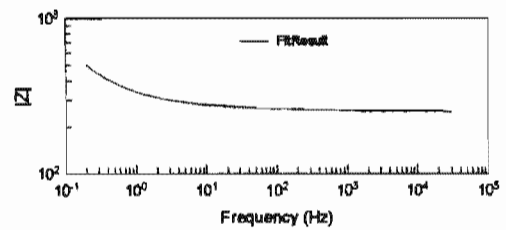
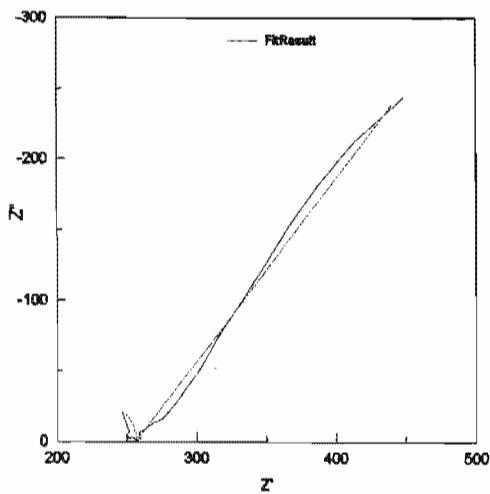
## Ensayo 2

Lámina No. 12, Tiempo de exposición 500 horas  
Potencial de Corrosión -494.18 mV ecs



## Ensayo 3

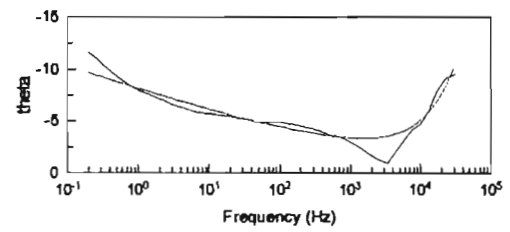
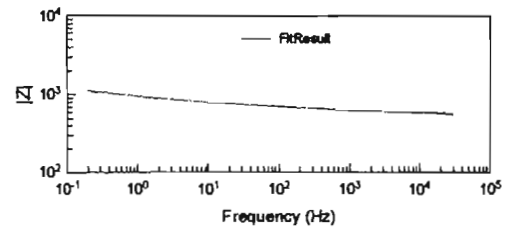
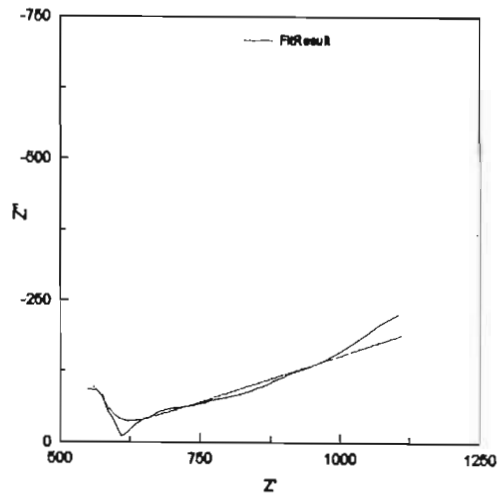
Lámina No. 13, Tiempo de exposición 750 horas  
Potencial de Corrosión -647.51 mV ecs



### Ensayo 4

Lámina No. 14, Tiempo de exposición 1000 horas

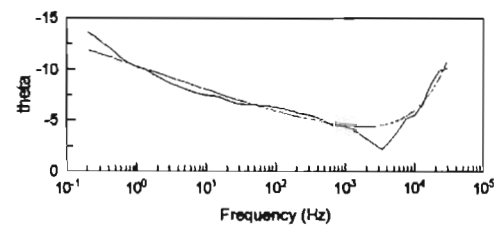
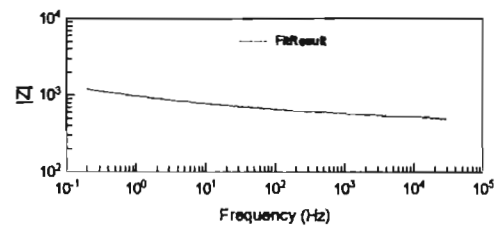
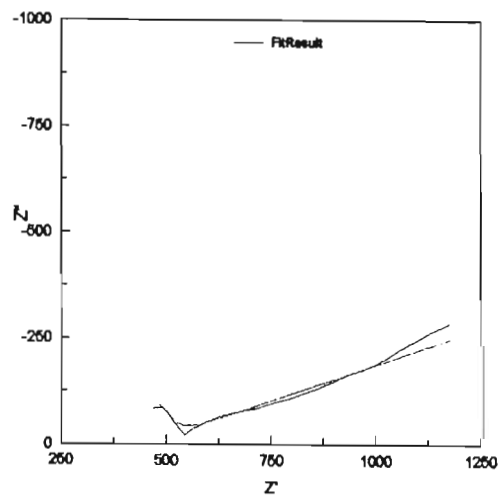
Potencial de Corrosión -520.75 mV *ecs*



### Ensayo 5

Lámina No. 15, Tiempo de exposición 1150 horas

Potencial de Corrosión -508.73 mV *ecs*



## 4.2.1 Análisis de los Resultados

### Diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

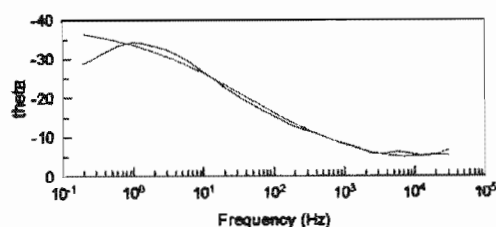
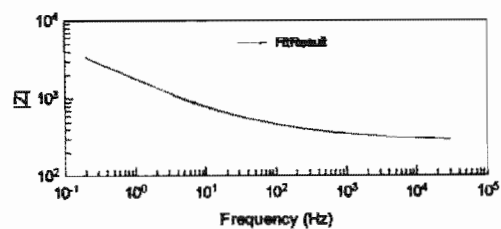
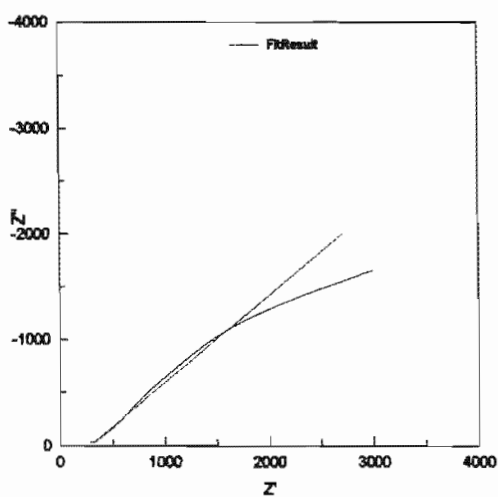
#### Prueba de Resistencia en la Cámara de Niebla Salina

- **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)

#### Ensayo 1

Lámina No. 16, Tiempo de exposición 330 horas

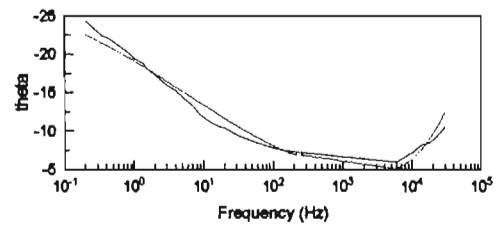
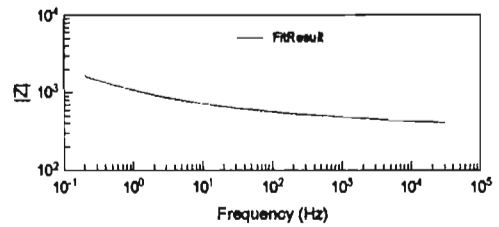
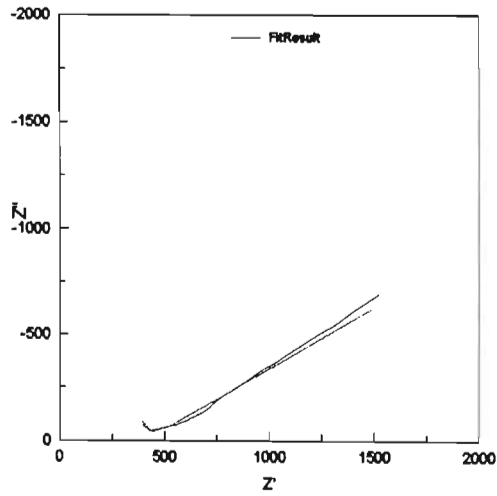
Potencial de Corrosión -619.57 mV **ecs**



## Ensayo 2

Lámina No. 17, Tiempo de exposición 500 horas

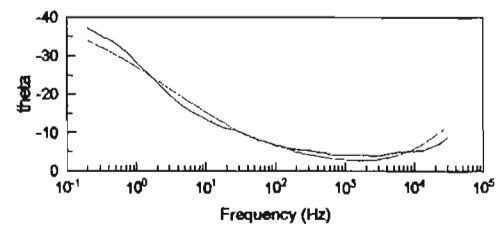
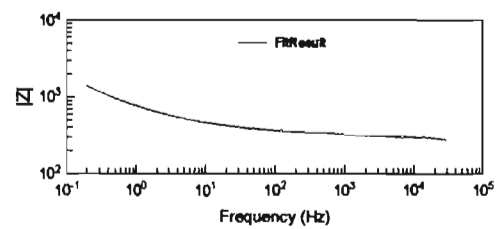
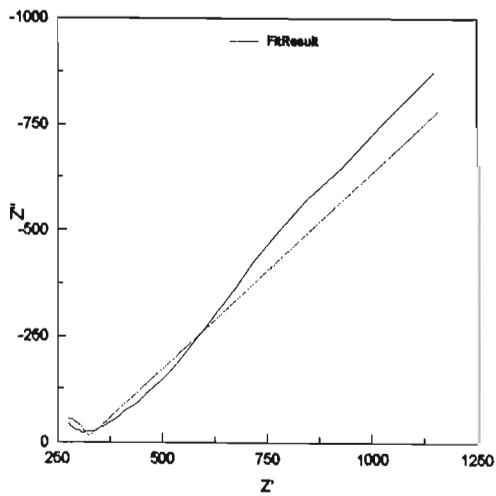
Potencial de Corrosión  $-435.8 \text{ mV ecs}$



## Ensayo 3

Lámina No. 18, Tiempo de exposición 750 horas

Potencial de Corrosión  $-625.65 \text{ mV ecs}$

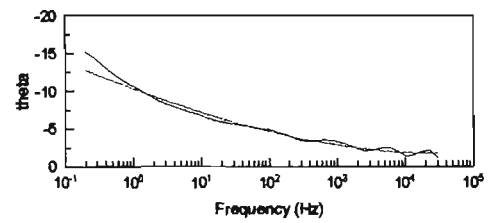
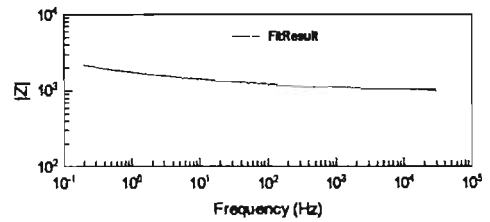
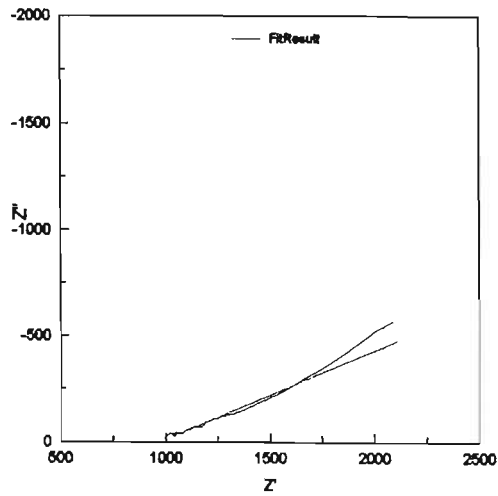




### Ensayo 4

Lámina No. 19, Tiempo de exposición 1000 horas

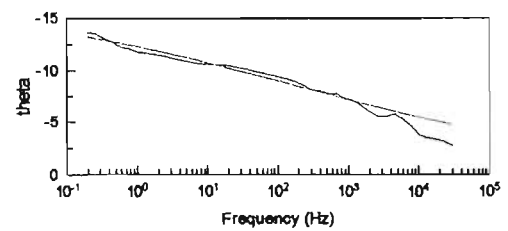
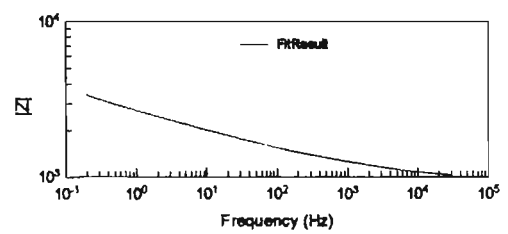
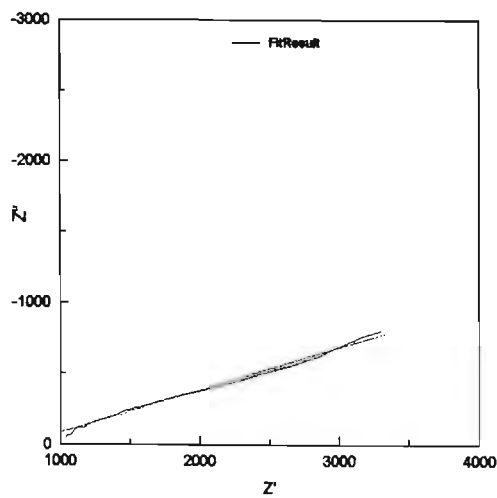
Potencial de Corrosión -496.91 mV ecs



### Ensayo 5

Lámina No. 20, Tiempo de exposición 1150 horas

Potencial de Corrosión -578.51 mV ecs



---

---

## 4.3 Prueba de Resistencia en Esfuerzo de Suelos

### 4.3.1 Análisis de los resultados

En relación a los puntos 3.7 y 3.7.3, los tubos protegidos exteriormente con los recubrimientos y sistemas anticorrosivos que estuvieron expuestos al esfuerzo en suelos, fueron evaluados al término de la prueba bajo las mismas condiciones que se describieron para cámara salina. Comparando ambas pruebas sobre los productos aplicados en láminas y tubos, en donde además se realizaron diferentes daños que llegaron hasta el sustrato metálico y se expusieron en dos medios agresivos, se consideró obtener los mismos parámetros de evaluación.

Al término de la prueba (35 y 44 días), los tubos recubiertos con los productos A, B, C y D, se dejaron recuperar durante dos horas a temperatura ambiente; transcurrido el tiempo fueron evaluados con los procedimientos indicados en los métodos ASTM;<sup>[26, 27, 29]</sup> los recubrimientos para considerar un desempeño aceptable no deben presentar sobre la superficie expuesta ampollamiento,<sup>[26]</sup> descascamiento,<sup>[27]</sup> ni pérdida de adherencia.<sup>[29]</sup>

**A continuación se presentan los resultados de Espesor Promedio de Película Seca, el daño realizado a cada recubrimiento y la temperatura a que fue expuesto.**

<p>➤ <b>A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina</b></p> <p>Temperatura del fluido circulante: 23 ± 2 °C</p>	
Tubo (1 A)	Sin daño sobre el recubrimiento; EPPS = 20.3 mils (516 µm)
Tubo (2 A)	Con daño en cruz sobre el recubrimiento; EPPS = 17.0 mils (432 µm)
Tubo (3 A)	Con daño puntual sobre el recubrimiento; EPPS = 29.8 mils (757 µm)

<p>➤ <b>B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)</b></p> <p>Temperatura del fluido circulante 83 ± 2 °C</p>	
Tubo (1 B)	Sin daño sobre el recubrimiento; EPPS = 22.3 mils (566 µm)
Tubo (2 B)	Con daño en cruz sobre el recubrimiento; EPPS = 29.9 mils (759 µm)
Tubo (3 B)	Con daño puntual sobre el recubrimiento; EPPS = 26.8 mils (681 µm)

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano**

Temperatura del fluido circulante: 23 ± 2 °C

Tubo (1 C)	Sin daño sobre el recubrimiento; EPPS = 18.6 mils (472 µm)
Tubo (2 C)	Con daño en cruz sobre el recubrimiento; EPPS = 19.0 mils (483 µm)
Tubo (3 C)	Con daño puntual sobre el recubrimiento; EPPS = 17.0 mils (432 µm)

➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)**

Temperatura del fluido circulante 83 ± 2 °C

Tubo (1 D)	Sin daño sobre el recubrimiento; EPPS = 19.5 mils (495 µm)
Tubo (2 D)	Con daño en cruz sobre el recubrimiento; EPPS = 19.6 mils (498 µm)
Tubo (3 D)	Con daño puntual sobre el recubrimiento; EPPS = 16.3 mils (414 µm)

#### 4.3.2 Evaluación visual

Los tubos protegidos exteriormente con los recubrimientos **A y C**, y los sistemas **B y D**, no presentaron corrosión sobre la superficie expuesta; los daños practicados se sellaron con el suelo por efecto de los ciclos de humedad y temperatura.

#### 4.3.3 Ampollamiento

Los recubrimientos y sistemas **A, B, C y D**, no mostraron ampollamiento sobre la superficie expuesta al esfuerzo en suelos.

#### 4.3.4 Descascaramiento

Los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva **A, B, C y D**, no mostraron sobre la superficie expuesta descascaramiento, el método de evaluación aplicado fue ASTM D 772 - 00.

---

---

### 4.3.5 Adherencia

Las muestras **A** y **C**, presentan buena adherencia al sustrato metálico, el resultado obtenido en cada una de ellas corresponde a la clasificación **4B**.

Los sistemas de protección anticorrosiva **B** y **D**, por donde circuló el fluido a temperatura de  $83 \pm 2$  °C, presentaron también resultados satisfactorios de evaluación en la prueba antes descrita. El recubrimiento inorgánico de zinc proporciona excelente protección anticorrosiva y protección catódica al sustrato metálico.

El inorgánico de zinc al ser aplicado sobre superficies metálicas representa un galvanizado en frío; resiste ciclos de temperatura continuas de hasta 90 °C e intermitentes de 120 °C, aplicado de 2 a 3 milésimas de pulgada (50.8 y 76.2  $\mu\text{m}$ ) y mínimo de 60% de humedad relativa en su aplicación. Por lo tanto los tubos recubiertos con este producto, no presentaron fallas al estar expuestos a ciclos de humedad, secado y alta temperatura.

## 4.4 Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

### 4.4.1 Análisis de los resultados

En la sección **3.7.3**, con los espectros de las pruebas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, se determinaron las simulaciones correspondientes con el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto por Kending y colaboradores.<sup>[1]</sup>

Figura No. IV.1, muestra el circuito eléctrico, así como también cada una de sus variables.

- **A.-** Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.

Tubo (**1 A**) Sin daño sobre el recubrimiento.

Los espectros de impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 2, 5, 14, 33 y 35 días de exposición presentaron severa dispersión de todos sus puntos, por lo que no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes.

El recubrimiento **A** no presentó fallas visuales de aplicación, al correr la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica el recubrimiento aisló la interfase metal recubrimiento en el medio en que estuvo expuesto.

El recubrimiento **A** protege el sustrato metálico contra la corrosión e impide el paso de las especies agresivas; sus propiedades son de baja permeabilidad y presenta buena adherencia (**4B**), el espesor promedio de película seca fue de 20.3 mils (516  $\mu\text{m}$ ).

---

---

Los ciclos de prueba a que fue expuesto este recubrimiento fueron la saturación de humedad del suelo, secado del mismo y el efecto del fluido circulante; este medio se considera agresivo para cualquier recubrimiento.

**Tubo (2 A)** Con daño en cruz sobre el recubrimiento.

A los 2 días de prueba en el diagrama de Nyquist se observa una constante de tiempo (página 79), en este mismo diagrama el semicírculo no intercepta el eje de  $Z'$  impedancia real, por lo que no puede definirse claramente el valor de su diámetro, en este caso se encontró que el valor de  $R_{tc}$  es de 57,149 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) (página 73), el valor de la capacitancia es de  $6.45 \times 10^{-7}$  ( $\text{F}/\text{cm}^2$ ). Lo anterior indica que a los 2 días de prueba el daño ha sido sellado con el suelo por efecto de los ciclos de humedad y secado, (ver Tabla No. IV-9).

A los 5 y 14 días aparece en el diagrama la parte final de un primer semicírculo en alta frecuencia, primera constante de tiempo, que se debe a la resistencia del recubrimiento, el aumento en el valor de  $R_{po}$  se refleja en la aparición del primer semicírculo en el diagrama de Nyquist. Anteriormente no se apreciaba ya que el daño practicado en la pintura resulta en un desplazamiento del primer semicírculo a muy altas frecuencias, fuera del intervalo de muestreo. El segundo semicírculo no está bien definido, se obtienen valores muy altos de impedancia del sistema, que aumentan de  $10^{+6}$  a  $10^{+8}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ); lo anterior indica que el recubrimiento sigue protegiendo al metal (ver Tabla No. IV-9 página 73 y diagrama de EIE en la página 80).

Por otra parte, la combinación de ciclos de humedad y secado en la tierra o arcilla forma óxidos, probablemente el óxido férrico  $2\text{Fe}_2\text{O}_3$  que se forma sobre el daño en cruz provoca una costra de productos de corrosión, estos óxidos llegan a ser protectores en determinado tiempo (sellan y protegen el daño), lo anterior se comprueba con el incremento de los resultados de  $R_{po}$  de 252,220 a 360,090 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) del día 5 al día 14, de acuerdo con este último resultado se dice entonces que hay más óxido férrico interfacial. Asimismo, cuando aumenta el valor de  $R_{po}$  hasta 360,090 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) el valor de la simulación respecto a la capacitancia asociada es del orden exponencial de  $10^{-11}$  ( $\text{F}/\text{cm}^2$ ); este valor se considera normal para un recubrimiento protector y que además absorbe poca agua.

Para abatir el valor de la impedancia el daño debería ser más grande, de esta manera se podría asociar el fenómeno de transferencia de carga sobre el electrolito desnudo y la constante de tiempo asociada al recubrimiento se desplazaría hacia altas frecuencias.

**Tubo (3 A)** Con daño puntual sobre el recubrimiento.

Los diagramas correspondientes a los 2, 5 y 14 días de exposición muestran dos constantes de tiempo bien definidas: la primera constante está relacionada con la resistencia del recubrimiento, sus valores van desde 3,750 hasta  $2.45 \times 10^{+7}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ).

---

---

Realizando la evaluación se dice entonces que la velocidad de corrosión es baja; la interpretación indica que los productos de corrosión que se forman en el daño puntual por efecto de la humedad en el suelo, sellan el daño formando una capa de óxido férrico y que ésta protege en determinado tiempo el metal (páginas 81 y 82).

Respecto al segundo semicírculo a los 2 y 5 días, se presentan valores de  $R_{tc}$  de 12,838 y  $3.1939 \times 10^{+7}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), mientras que a 14 días no se define bien el semicírculo y el valor de  $R_{tc}$  es de  $1.863 \times 10^{+8}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ).

De acuerdo con el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto, se observa que la capacitancia disminuye de  $10^{-8}$  a  $10^{-12}$  (F/cm<sup>2</sup>); resultados razonables para un recubrimiento protector. Por otra parte, se indica que el flujo de electrones hacia el daño es precisamente a través del capacitor, ya que éste presenta menor resistencia al flujo de los mismos (ver Tabla No. IV-10 página 74 y diagramas de EIE páginas 81 y 82).

Se dice entonces que el recubrimiento es protector e impide el paso del medio agresivo hacia el metal.

- **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).**

**Tubo (1 B)** Sin daño sobre el recubrimiento.

Los espectros de impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 2, 5, 14, 33 y 35 días de exposición presentaron severa dispersión de todos sus puntos, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes.

El sistema **B** no presentó fallas visuales de aplicación; por lo tanto, al correr la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica el recubrimiento aisló la interfase metal recubrimiento en el medio que estuvo expuesto.

El sistema **B** tiene aplicado un primario inorgánico de zinc, el zinc aplicado en las condiciones descritas en este trabajo proporciona al acero un galvanizado, tiene baja permeabilidad y además es un excelente protector del metal en medios como la humedad y alta temperatura, presenta buena adherencia al acero y se aplica entre 2 y 3 mils (50.8 y 76  $\mu\text{m}$ ). El sistema aplicado primario más acabado ofrece mayor protección mecánica y resiste altas temperaturas continuas e intermitentes.

**Tubo (2 B)** Con daño en cruz sobre el recubrimiento.

Los espectros de impedancia de las pruebas a 2, 14, 33 y 35 días de exposición presentaron severa dispersión de todos sus puntos, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes; únicamente se obtuvieron sus potenciales de corrosión.

---

---

El sistema **B** no presentó fallas visuales de aplicación; por lo que al correr la prueba de EIE el recubrimiento de zinc aisló la interfase metal recubrimiento en el medio agresivo.

El único diagrama que se obtuvo fue a los 5 días. En el diagrama se observa lo siguiente: una constante de tiempo, la resistencia a la transferencia de carga es  $8.0208 \times 10^{+6} (\Omega \times \text{cm}^2)$ , valor exponencial demasiado grande e indica que el zinc se está sacrificando en el medio agresivo y al disolverse forma probablemente una película protectora de  $\text{ZnOZnCl}_2$  (oxicloruro de zinc) sobre el daño. La capacitancia del recubrimiento es de  $1.026 \times 10^{-11} (\text{F}/\text{cm}^2)$  y la resistencia  $R_{po}$  de  $348,770 (\Omega \times \text{cm}^2)$ , estos dos valores indican que el sistema anticorrosivo protege al acero (ver Tabla No. IV-11 página 74 y diagrama de EIE en la página 83).

Tubo (3 B) Con daño puntual sobre el recubrimiento.

Los diagramas presentan una constante de tiempo a los 2, 5 y 14 días de prueba; la variable  $R_{tc}$  se incrementa significativamente desde 4282 a los 2 días hasta  $1.4103 \times 10^{+7} (\Omega \times \text{cm}^2)$  a los 14 días, mientras que la capacitancia  $C_{rec}$  disminuye  $10^{-8}$  a  $10^{-12} (\text{F}/\text{cm}^2)$  en el mismo intervalo de tiempo, ambos valores corresponden a la protección del acero con el sistema de recubrimientos. El daño que tiene el recubrimiento hasta el metal, se sella con la tierra por efecto de los ciclos de humedad y alta temperatura. El sistema anticorrosivo impide el paso de humedad hacia el acero y la velocidad de corrosión disminuye significativamente (ver Tabla No. IV-12 página 75 y diagrama de EIE en las páginas 84 y 85).

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.**

Tubo (1 C) Sin daño sobre el recubrimiento.

No se determinaron los espectros de las pruebas de EIE a los 9, 30, 37 y 44 días de exposición al esfuerzo en suelos, presentaron severa dispersión de puntos y no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes.

El recubrimiento **C** no presentó fallas visuales de aplicación aunque es poco más poroso comparativamente respecto a los otros tres. Este recubrimiento al no presentar fallas sobre la superficie se opone al paso del flujo de electrones hacia el acero en un medio agresivo, lo cual quiere decir que forma una barrera protectora hacia el metal.

Las condiciones de prueba a que fue expuesto este recubrimiento fueron las mismas a que se expuso el recubrimiento **A** y la temperatura del fluido circulante de  $23 \pm 2 ^\circ\text{C}$ .

Tubo (2 C) Con daño en cruz sobre el recubrimiento.

A los 9, 30, 37 y 44 días de prueba se observa en el diagrama la parte final de un primer semicírculo, el semicírculo describe la primera constante de tiempo asociada al

---

---

recubrimiento, mientras que a bajas frecuencias se registran los valores de  $5.1 \times 10^{+5}$  (9 días) hasta  $4.2 \times 10^{+5}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) (44 días), es decir, se observa el aumento de la resistencia del recubrimiento, el sello de los defectos y la protección contra la corrosión del acero.

El segundo semicírculo corresponde a la difusión de especies del sistema, la formación de la doble capa y la protección del acero desnudo.

El semicírculo en altas frecuencias (9 días) representa el valor de  $5.0 \times 10^{+5}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) mientras que a los (44 días) no se define su resultado, lo cual indica que la impedancia del sistema se abate, asociada con valores demasiado pequeños de capacitancia  $10^{-11}$  (F/cm<sup>2</sup>) e incremento de resultados de  $R_{tc}$  de  $10^{+6}$  hasta  $10^{+20}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) (ver Tabla No. IV-13 página 75 y diagramas de EIE páginas 86, 87 y 88).

Los conceptos descritos corresponden a las características de un recubrimiento protector y además evita el paso de la humedad hacia el acero, protegiendo la interfase metal recubrimiento

**Tubo (3 C)** Con daño puntual sobre el recubrimiento.

A los 9, 30, 37 y 44 días de prueba se observa en el diagrama la parte final de un primer semicírculo, el semicírculo describe la primera constante de tiempo, la cual se abate desde  $2.4 \times 10^{+6}$  hasta  $1.0 \times 10^{+6}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) al final de la prueba. El abatimiento de la impedancia se debe a que el daño provocado sobre el recubrimiento al inicio de la prueba permite el paso de las especies agresivas hacia el metal donde se efectúan las reacciones de óxido-reducción; conforme transcurre el tiempo el daño puntual se sella formando una costra, esta costra es probablemente de óxido férrico e impide la formación de otros productos de corrosión y protege al metal temporalmente.

El segundo semicírculo corresponde a la difusión de especies del sistema, la transferencia de los iones del medio hacia el metal formando el óxido férrico; como se puede observar en los diagramas a los 9 días el valor de  $R_{tc}$  es de  $8.17 \times 10^{+6}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) mientras que a los 44 días la impedancia nuevamente se abatió y no se observa el resultado de la misma.

Los conceptos antes descritos se confirman con el resultado de capacitancia que permanece constante  $C_{rec} 10^{-11}$  (F/cm<sup>2</sup>) y el resultado de  $R_{tc}$  aumenta de  $10^{+6}$  a  $10^{+7}$  ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), ambos resultados son propios de un recubrimiento protector que evita el paso de la humedad hacia el acero, así como también en la interfase metal recubrimiento (ver Tabla No. IV-14 página 76 y diagramas de EIE páginas 88, 89 y 90).



- **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).

No fue posible analizar los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 9, 30, 37 y 44 días de exposición, mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos.

Es importante señalar que los recubrimientos **A, B, C y D** se encuentra aplicados en los ductos enterrados en las instalaciones de PEMEX, operando en condiciones similares a las de este trabajo; por lo antes expuesto se sugirió evaluar estos productos y así observar su desempeño en las pruebas objeto de este trabajo (ver Tablas Nos. IV-15, IV-16, IV-17 y IV-18 página 76, 77 y 78).

**TABLA No. IV-9**

**Resultados de la prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica**

- **A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina**

Tubo (2 A) Con daño en cruz sobre el recubrimiento				
Tiempo de exposición	2 días	5 días	14 días	33 días
<b>Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO<sub>4</sub> Saturado</b>	<b>-875.72</b>	<b>-778.76</b>	<b>-853.77</b>	<b>-647.09</b>
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	159	148830	261880	
<b>C<sub>rec</sub> (F/cm<sup>2</sup>)</b>	6.451x10 <sup>-7</sup>	2.952x10 <sup>-11</sup>	4.330x10 <sup>-11</sup>	
<b>R<sub>po</sub> (Ωx cm<sup>2</sup>)</b>	41.77	252220	360090	
<b>C<sub>corr</sub> – T (F/cm<sup>2</sup>)</b>	1.632x10 <sup>-4</sup>	3.241x10 <sup>-7</sup>	1.297x10 <sup>-7</sup>	
<b>C<sub>corr</sub> – P (Adimensional)</b>	0.74821	0.52425	0.6888	
<b>R<sub>tc</sub> (Ω x cm<sup>2</sup>)</b>	57149	9.276x10 <sup>+6</sup>	2.094x10 <sup>+8</sup>	
Los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 33 y 35 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos. Tampoco se determinó el potencial de corrosión a los 35 días.				

**TABLA No. IV-10**

Tubo (3 A) Con daño puntual sobre el recubrimiento			
Tiempo de exposición	2 días	5 días	14 días
Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO <sub>4</sub> Saturado	-852.35	-756.45	-797.02
R <sub>s</sub> (Ω)	121.1	406920	579630
C <sub>rec</sub> (F/cm <sup>2</sup> )	1.9648x10 <sup>-8</sup>	6.131x10 <sup>-12</sup>	6.829x10 <sup>-12</sup>
R <sub>po</sub> (Ωx cm <sup>2</sup> )	2742	1.171x10 <sup>+7</sup>	1.9537x10 <sup>+7</sup>
C <sub>corr - T</sub> (F/cm <sup>2</sup> )	1.0595x10 <sup>-5</sup>	8.705x10 <sup>-9</sup>	4.2191x10 <sup>-8</sup>
C <sub>corr - P</sub> (Adimensional)	0.72209	0.74564	0.31795
R <sub>tc</sub> (Ω x cm <sup>2</sup> )	12838	3.1939x10 <sup>+7</sup>	1.863x10 <sup>+8</sup>
Los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 33 y 35 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos; tampoco se determinaron sus potenciales de corrosión.			

**TABLA No. IV-11**

- **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

Tubo (2 B) Con daño en cruz sobre el recubrimiento				
Tiempo de exposición	2 días	5 días	14 días	33 días
Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO <sub>4</sub> Saturado	-806.00	-867.55	-650.54	-445.07
Valores de la simulación a los 5 días de exposición al esfuerzo de suelos				
R <sub>s</sub> (Ω)	10899			
C <sub>rec</sub> (F/cm <sup>2</sup> )	1.026x10 <sup>-11</sup>			
R <sub>po</sub> (Ωx cm <sup>2</sup> )	348770			
C <sub>corr - T</sub> (F/cm <sup>2</sup> )	5.8335x10 <sup>-8</sup>			
C <sub>corr - P</sub> (Adimensional)	0.42255			
R <sub>tc</sub> (Ω x cm <sup>2</sup> )	8.0208x10 <sup>+6</sup>			
Los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 2, 14, 33 y 35 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos. Tampoco se determinó el potencial de corrosión a los 35 días.				

**TABLA No. IV-12**

Tubo (3 B) Con daño puntual sobre el recubrimiento			
Tiempo de exposición	2 días	5 días	14 días
<b>Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO<sub>4</sub> Saturado</b>	-815.74	-631.74	-646.28
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	20.22	54603	73932
<b>C<sub>rec</sub> (F/cm<sup>2</sup>)</b>	2.7164x10 <sup>-8</sup>	1.028x10 <sup>-11</sup>	9.335x10 <sup>-12</sup>
<b>R<sub>po</sub> (Ωx cm<sup>2</sup>)</b>	475.2	0.45844	117600
<b>C<sub>corr</sub> - T (F/cm<sup>2</sup>)</b>	1.7987x10 <sup>-6</sup>	1.501x10 <sup>-9</sup>	9.844x10 <sup>-10</sup>
<b>C<sub>corr</sub> - P (Adimensional)</b>	0.58289	0.47403	0.50828
<b>R<sub>tc</sub> (Ω x cm<sup>2</sup>)</b>	4282	1.3947x10 <sup>+7</sup>	1.4103x10 <sup>+7</sup>

Los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 33 y 35 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos; tampoco se determinaron sus potenciales de corrosión.

**TABLA No. IV-13**

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano**

Tubo (2 C) Con daño en cruz sobre el recubrimiento				
Tiempo de exposición	9 días	30 días	37 días	44 días
<b>Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO<sub>4</sub> Saturado</b>	-744.56	-705.75	-699.68	-702.29
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	298470	275050	261470	255990
<b>C<sub>rec</sub> (F/cm<sup>2</sup>)</b>	5.818x10 <sup>-11</sup>	8.618x10 <sup>-11</sup>	7.654x10 <sup>-11</sup>	1.463x10 <sup>-10</sup>
<b>R<sub>po</sub> (Ωx cm<sup>2</sup>)</b>	228260	145320	187100	106080
<b>C<sub>corr</sub> - T (F/cm<sup>2</sup>)</b>	2.785x10 <sup>-7</sup>	1.773x10 <sup>-6</sup>	1.671x10 <sup>-6</sup>	2.749x10 <sup>-6</sup>
<b>C<sub>corr</sub> - P (Adimensional)</b>	0.66414	0.37373	0.22051	0.27968
<b>R<sub>tc</sub> (Ω x cm<sup>2</sup>)</b>	1.8383x10 <sup>+6</sup>	2.804x10 <sup>+16</sup>	1.729x10 <sup>+20</sup>	1.729x10 <sup>+20</sup>

**TABLA No. IV-14**

Tubo (3 C) Con daño puntual sobre el recubrimiento				
Tiempo de exposición	9 días	30 días	37 días	44 días
<b>Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO<sub>4</sub> Saturado</b>	<b>-722.53</b>	<b>-738.64</b>	<b>-732.45</b>	<b>-726.49</b>
<b>R<sub>s</sub> (Ω)</b>	202570	284250	315240	291160
<b>C<sub>rec</sub> (F/cm<sup>2</sup>)</b>	1.187x10 <sup>-11</sup>	1.541x10 <sup>-11</sup>	2.266x10 <sup>-11</sup>	3.697x10 <sup>-11</sup>
<b>R<sub>po</sub> (Ωx cm<sup>2</sup>)</b>	1.628x10 <sup>+6</sup>	1.7505E <sup>+6</sup>	1.0376x10 <sup>+6</sup>	498870
<b>C<sub>corr-T</sub> (F/cm<sup>2</sup>)</b>	8.853x10 <sup>-8</sup>	4.646x10 <sup>-8</sup>	1.222x10 <sup>-7</sup>	1.546x10 <sup>-7</sup>
<b>C<sub>corr-P</sub> (Adimensional)</b>	0.4561	0.64384	0.54495	0.47444
<b>R<sub>tc</sub> (Ω x cm<sup>2</sup>)</b>	8.1714x10 <sup>+6</sup>	1.1806x10 <sup>+7</sup>	9.8849x10 <sup>+6</sup>	1.109x10 <sup>+7</sup>

**TABLA No. IV-15**

- **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)**

Tubo (2 D) Con daño en cruz sobre el recubrimiento				
Tiempo de exposición	9 días	30 días	37 días	44 días
<b>Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO<sub>4</sub> Saturado</b>	<b>-279.41</b>	<b>-209.03</b>	<b>-155.67</b>	<b>-141.99</b>
Los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 9, 30, 37 y 44 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos.				

**TABLA No. IV-16**

<b>Tubo (3 D) Con daño puntual sobre el recubrimiento</b>				
<b>Tiempo de exposición</b>	<b>9 días</b>	<b>30 días</b>	<b>37 días</b>	<b>44 días</b>
<b>Potencial de Corrosión E (mV) vs Cu/CuSO<sub>4</sub> Saturado</b>	<b>-537.27</b>	<b>-357.76</b>	<b>-351.17</b>	<b>-285.25</b>

Los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 9, 30, 37 y 44 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos.

**TABLA No. IV-17**

- **A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina**

**Tubo (1 A) Sin daño sobre el recubrimiento**

- **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

**Tubo (1 B) Sin daño sobre el recubrimiento**

Respecto al recubrimiento **A** y el Sistema **B**, los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 2, 5, 14, 33 y 35 días de exposición, no fue posible analizarlos mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, debido a que presentaron severa dispersión de puntos. Asimismo, tampoco se determinaron los potenciales de corrosión.

---

---

**TABLA No. IV-18**

➤ **C.-** Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano

Tubo (1 C) Sin daño sobre el recubrimiento
--

➤ **D.- Sistema** de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)

Tubo (1 D) Sin daño sobre el recubrimiento
--

Por otra parte, los espectros de Impedancia correspondientes a las pruebas realizadas a los 9, 30, 37 y 44 días de exposición para el recubrimiento **C** y el Sistema **D**; no se analizaron mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, presentaron severa dispersión de puntos; tampoco se determinaron sus potenciales de corrosión.

## 4.4.1 Análisis de los Resultados

### Diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

#### Prueba de Resistencia al Esfuerzo en Suelos

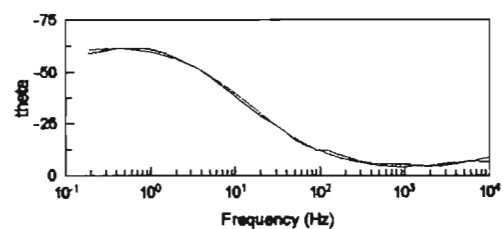
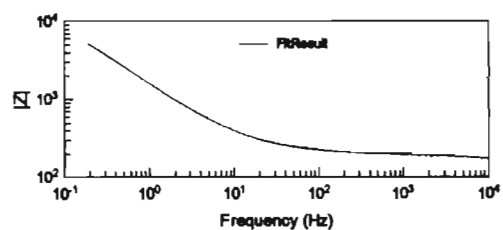
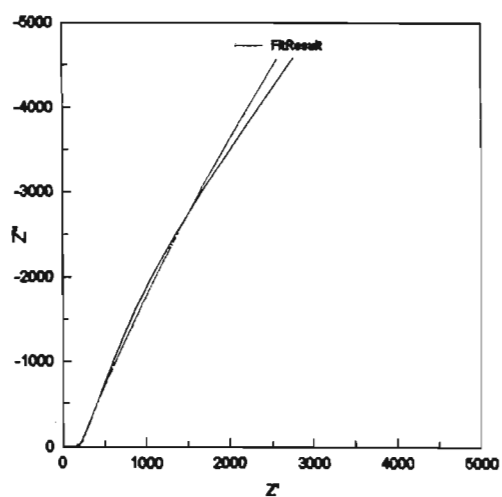
➤ **A.-** Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.

Temperatura interior de los tubos:  $23 \pm 2$  °C

Tubo (2 A) Con daño en cruz

Ensayo 1, Tiempo de exposición 2 días

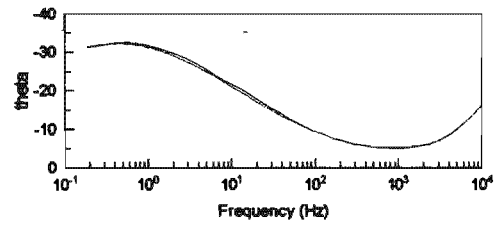
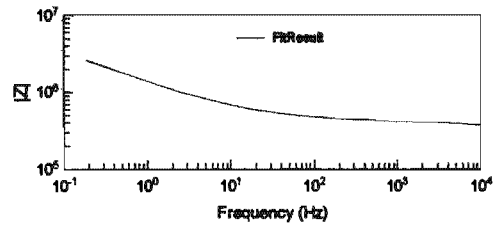
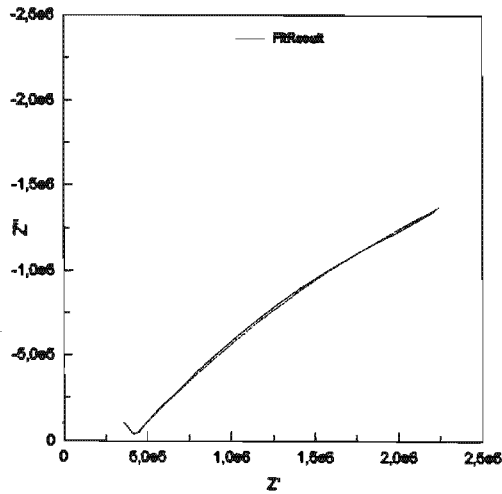
Potencial de Corrosión -875.72 mV **ecs**



**Tubo (2 A) Con daño en cruz**

**Ensayo 2, Tiempo de exposición 5 días**

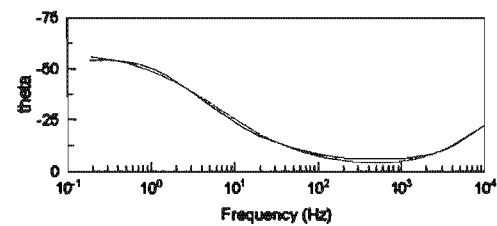
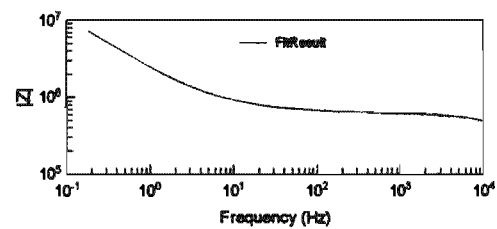
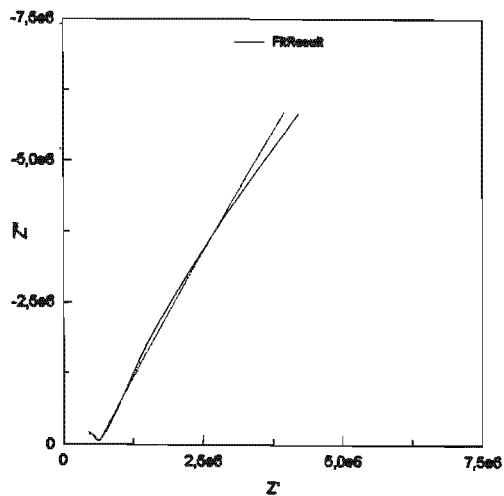
**Potencial de Corrosión -778.76 mV ecs**



**Tubo (2 A) Con daño en cruz**

**Ensayo 3, Tiempo de exposición 14 días**

**Potencial de Corrosión -853.77 mV ecs**

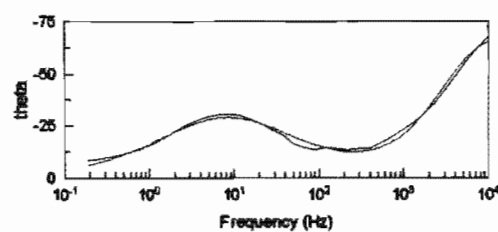
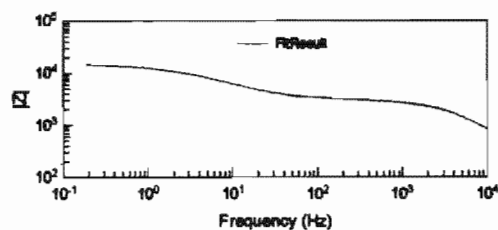
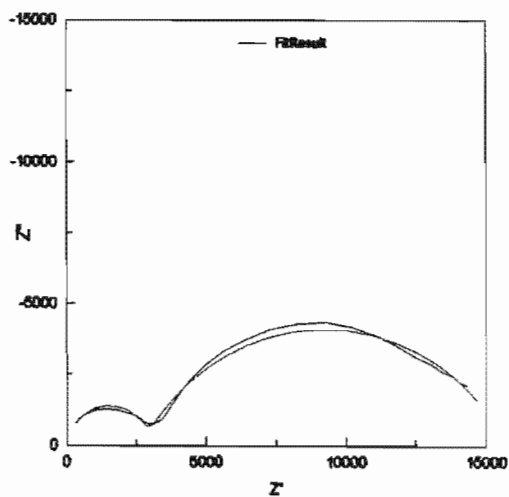




**Tubo (3 A) Con daño puntual**

**Ensayo 1, Tiempo de exposición 2 días**

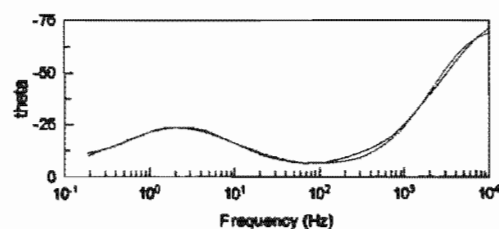
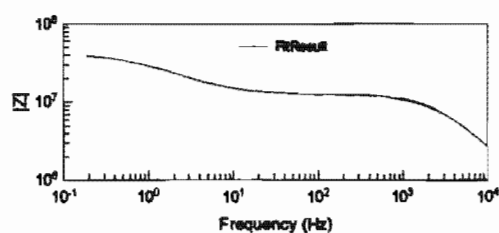
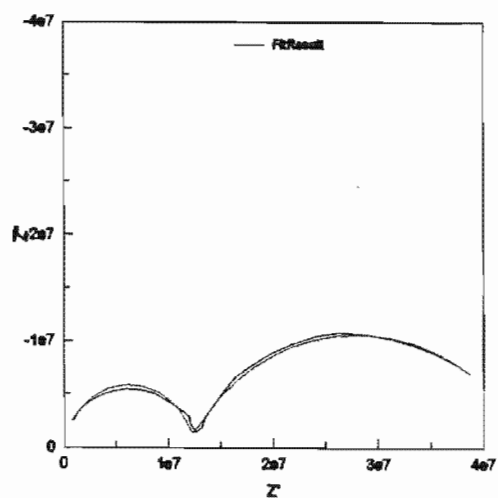
**Potencial de Corrosión -852.35 mV ecs**



**Tubo (3 A) Con daño puntual**

**Ensayo 2, Tiempo de exposición 5 días**

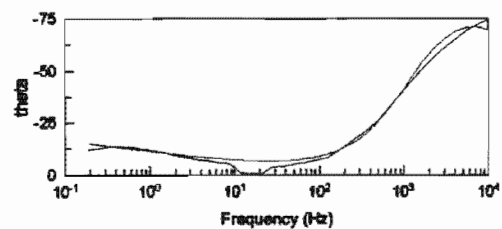
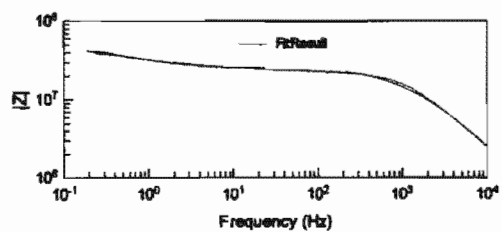
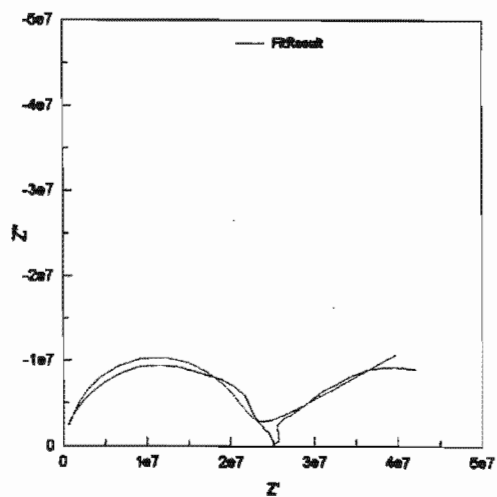
**Potencial de Corrosión -756.45 mV ecs**



**Tubo (3 A) Con daño puntual**

**Ensayo 3, Tiempo de exposición 14 días**

**Potencial de Corrosión -797.02 mV ecs**



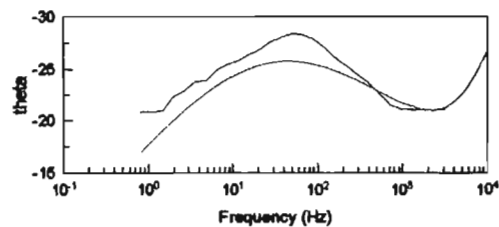
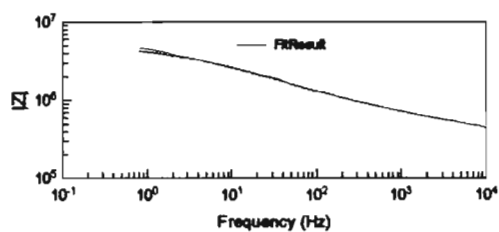
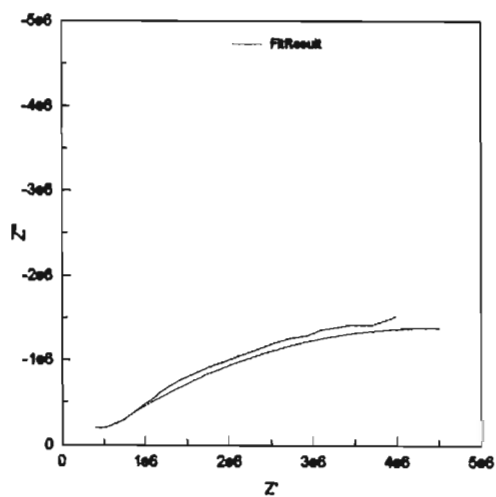
➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

Temperatura interior de los tubos:  $83 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

Tubo (2 B) Con daño en cruz

Ensayo 2, Tiempo de exposición 5 días

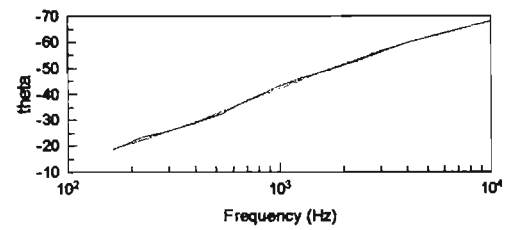
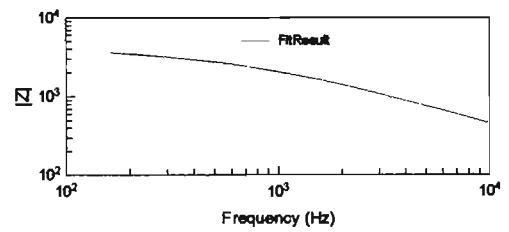
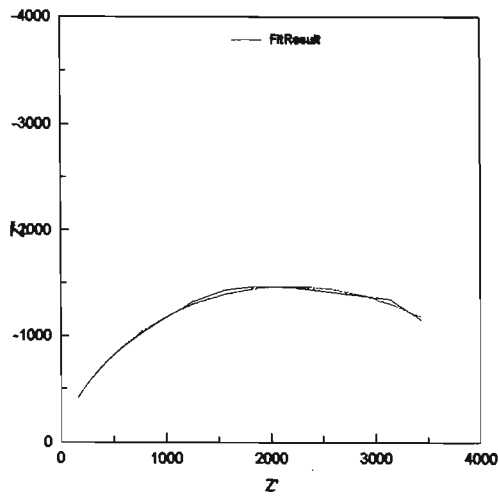
Potencial de Corrosión  $-867.55 \text{ mV ecs}$



**Tubo (3 B) Con daño puntual**

**Ensayo 1, Tiempo de exposición 2 días**

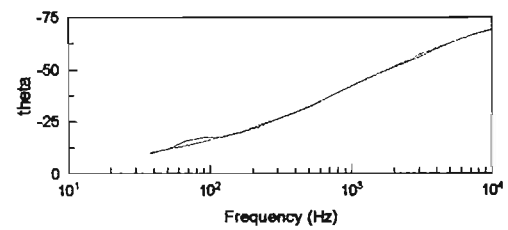
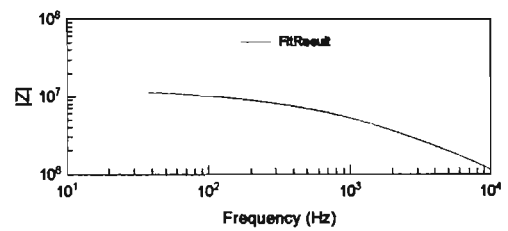
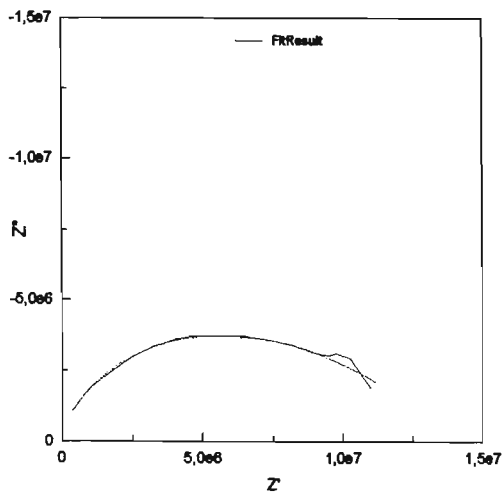
**Potencial de Corrosión  $-815.74$  mV ecs**



**Tubo (3 B) Con daño puntual**

**Ensayo 2, Tiempo de exposición 5 días**

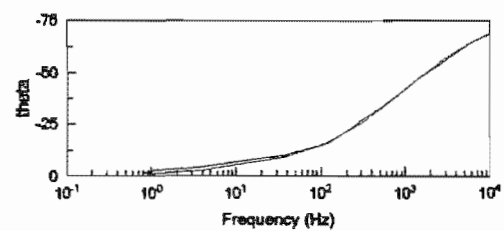
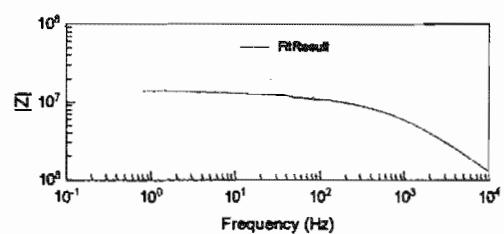
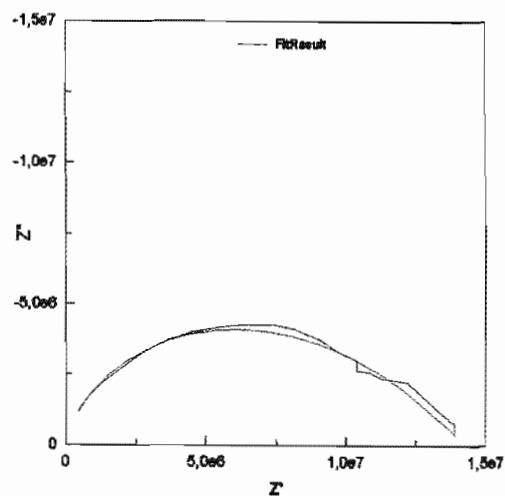
**Potencial de Corrosión  $-631.74$  mV ecs**



Tubo (3 B) Con daño puntual

Ensayo 3, Tiempo de exposición 14 días

Potencial de Corrosión  $-646.28$  mV ecs



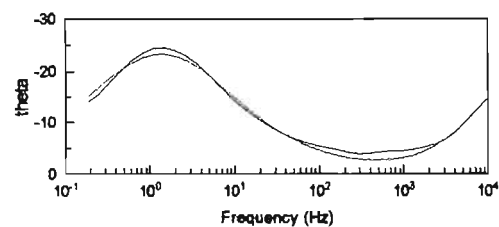
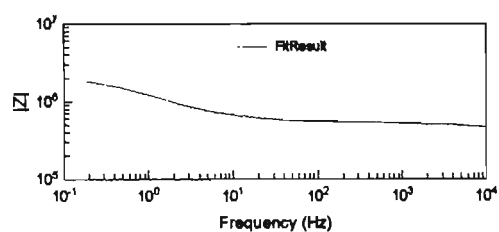
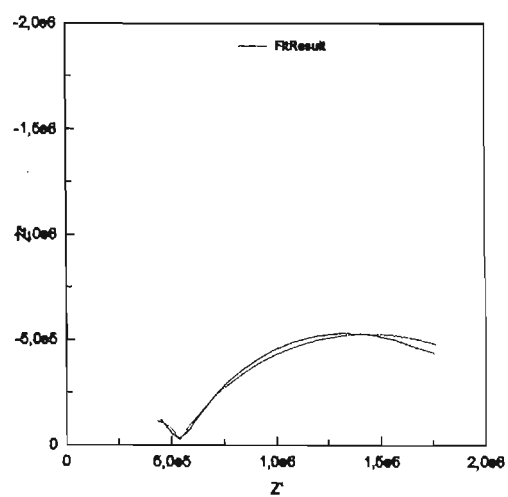
➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.**

Temperatura interior de los tubos:  $23 \pm 2$  °C

Tubo (2 C) Con daño en cruz

Ensayo 1, Tiempo de exposición 9 días

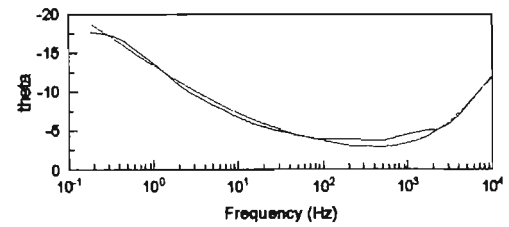
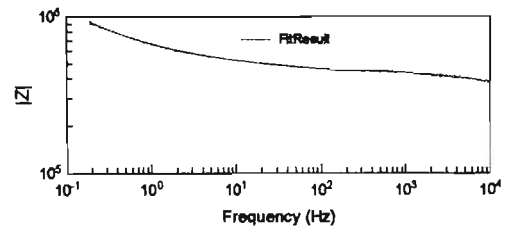
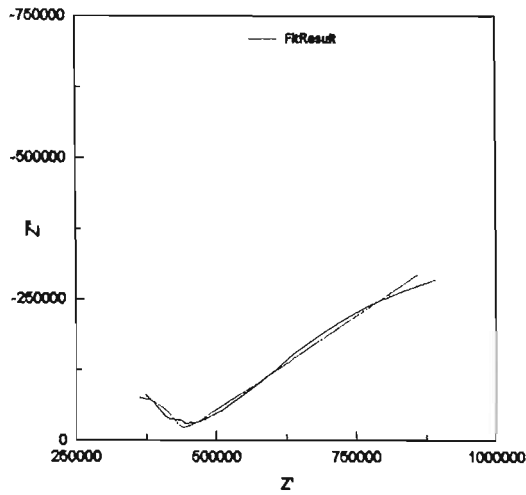
Potencial de Corrosión -744.56 mV **ecs**



Tubo (2 C) Con daño en cruz

Ensayo 2, Tiempo de exposición 30 días

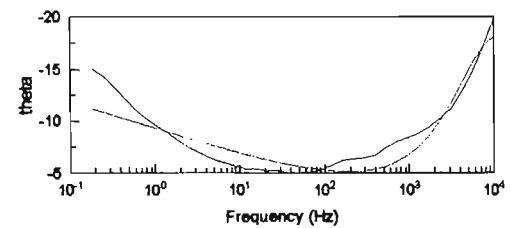
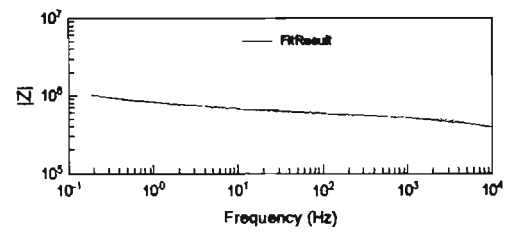
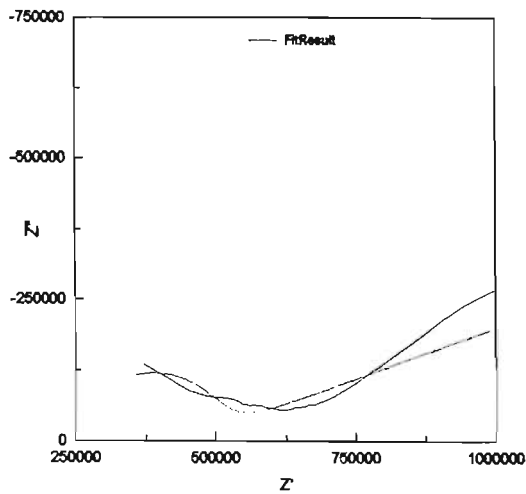
Potencial de Corrosión -705.75 mV **ecs**



Tubo (2 C) Con daño en cruz

Ensayo 3, Tiempo de exposición 37 días

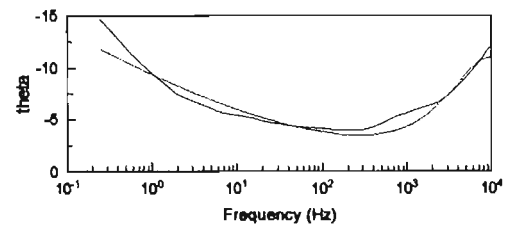
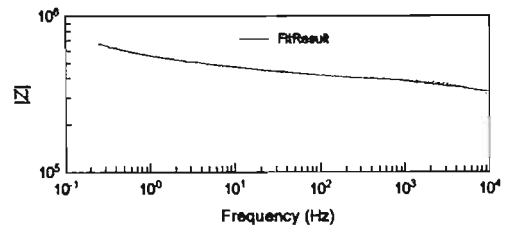
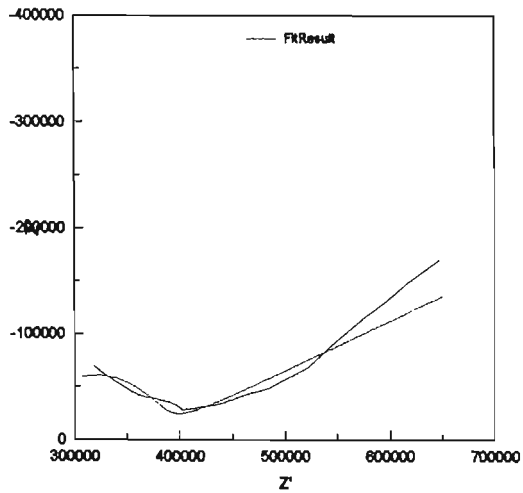
Potencial de Corrosión -699.68 mV **ecs**



**Tubo (2 C) Con daño en cruz**

**Ensayo 4, Tiempo de exposición 44 días**

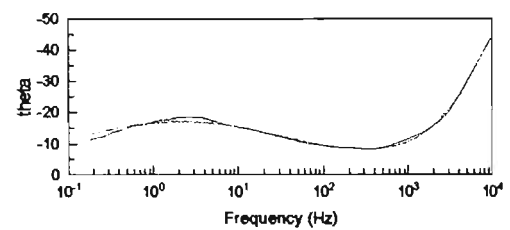
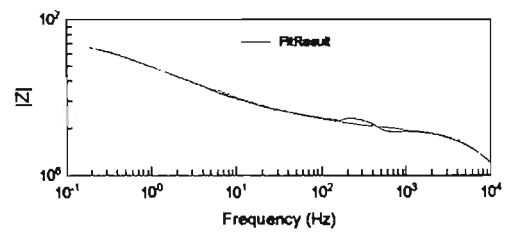
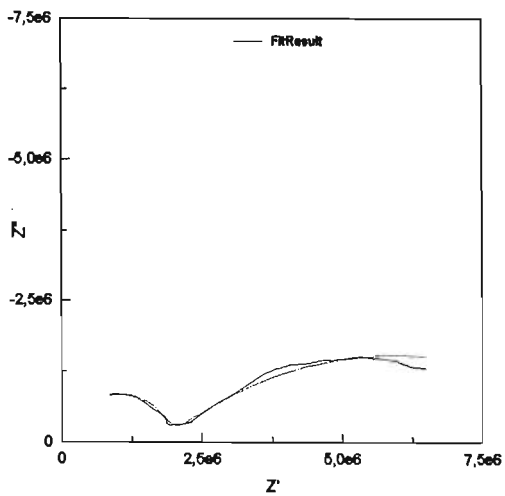
**Potencial de Corrosión -702.29 mV ecs**



**Tubo (3 C) Con daño puntual**

**Ensayo 1, Tiempo de exposición 9 días**

**Potencial de Corrosión -722.53 mV ecs**

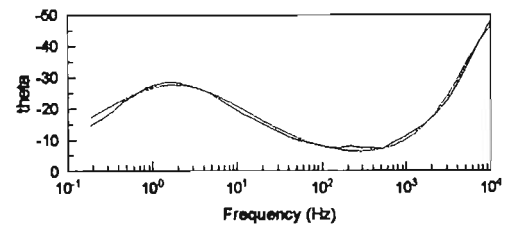
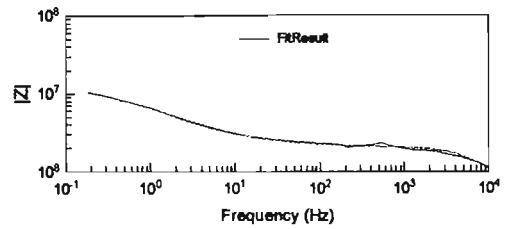
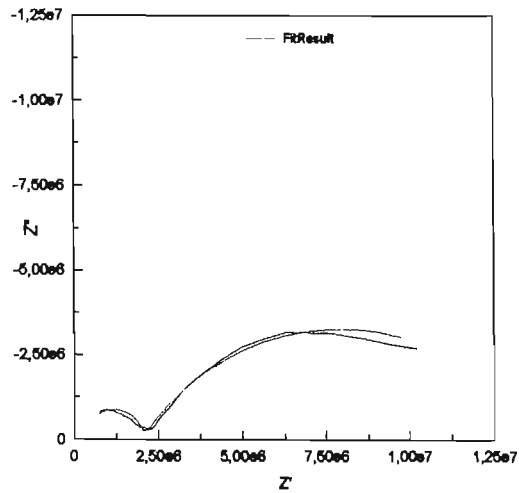




**Tubo (3 C) Con daño puntual**

**Ensayo 2, Tiempo de exposición 30 días**

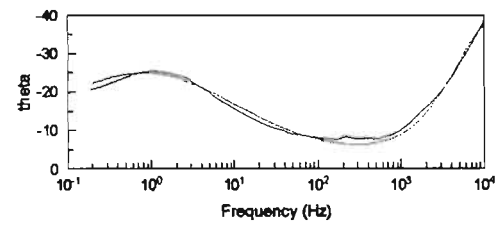
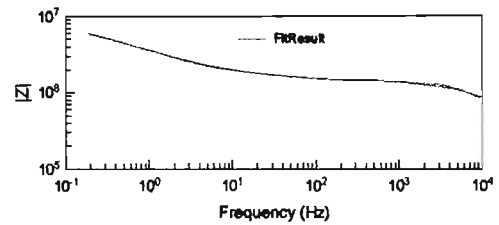
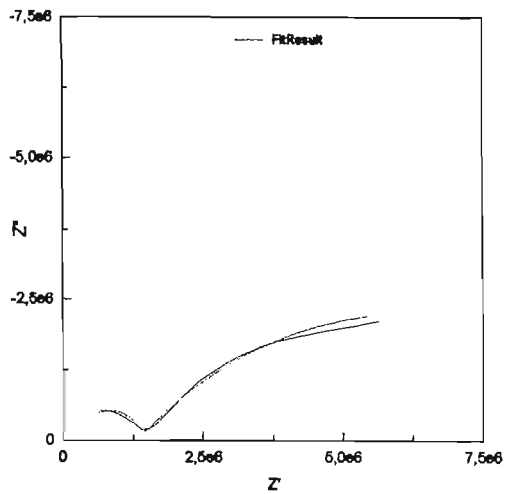
**Potencial de Corrosión -738.64 mV ecs**



**Tubo (3 C) Con daño puntual**

**Ensayo 3, Tiempo de exposición 37 días**

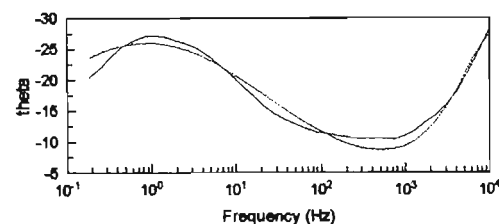
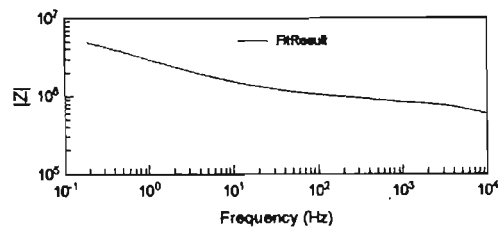
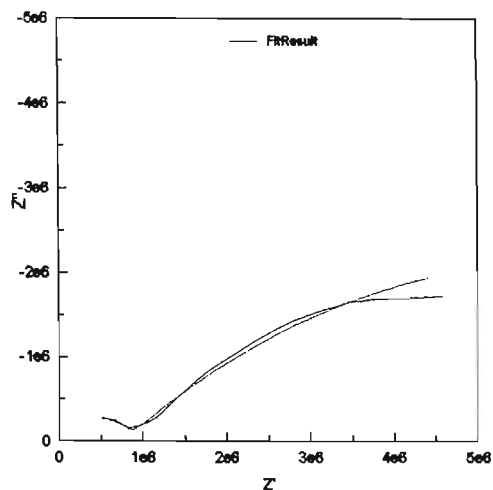
**Potencial de Corrosión -732.45 mV ecs**



Tubo (3 C) Con daño puntual

Ensayo 4, Tiempo de exposición 44 días

Potencial de Corrosión -726.49 mV ecs



➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)**

Temperatura interior de los tubos:  $83 \pm 2$  °C

Tubo (1 D) Sin daño sobre el recubrimiento

Tubo (2 D) Con daño en cruz

Tubo (3 D) Con daño puntual

Para el caso específico del **Sistema D**, los espectros de Impedancia obtenidos y analizados mediante Circuitos Eléctricos Equivalentes, no fue posible simularlos debido a que presentaron severa dispersión de puntos.

---

---

## **4.5 Características del Suelo**

Los tubos expuestos en la prueba a temperatura de  $23 \pm 2$  °C, se cubrieron con el suelo tipo arcilloso, mientras que en los otros donde se trabajó a temperatura de  $83 \pm 2$  °C, fue tipo arena, ambos con las siguientes propiedades:

### **4.5.1 Ensayo de pH**

#### **4.5.1.1 Procedimiento**

Se pesaron 10 gr de muestra (molida y tamizada), se colocaron en un vaso de precipitados, se adicionaron 50 ml de agua destilada; con una varilla de vidrio se agitó durante 20 minutos para eliminar el oxígeno y se determinó el valor de pH con el Potenciómetro Thermo Orion Modelo 330.

#### **4.5.1.2 Resultados**

Suelo tipo arcilla    pH = 8.46

Suelo tipo arena    pH = 7.11

### **4.5.2 Ensayo de Resistividad Eléctrica**

La resistividad eléctrica se determinó con la celda MCM Miller Soil Box, con la ayuda del equipo Nilsson Soil Resistance Meter Model 400 para efectuar las lecturas de acuerdo con lo especificado en el método ASTM G – 57 – 95a (Reapproved 2001).<sup>[37]</sup>

#### **4.5.2.1 Procedimiento**

La celda Soil Box se cubrió con cada una de las muestras a ensayar previamente trituradas y tamizadas, se enrasó con una espátula y se adicionó lentamente agua de la llave hasta saturación, lo anterior para simular las mismas condiciones en la prueba de resistencia al esfuerzo de suelos; el arreglo que tiene la celda Soil Box es de cuatro electrodos dos externos y dos internos; estos cuatro electrodos se conectaron en el mismo orden al equipo Nilsson y con el se obtuvieron las lecturas correspondientes.

#### **4.5.2.2 Método de Evaluación: ASTM G – 57 – 95a (Reapproved 2001).<sup>[37]</sup>**

---

---

### 4.5.2.3 Resultados

✓ Suelo tipo arcilla

Resistividad = 1,200  $\Omega$  – cm Suelo saturado

Resistividad = 290,000  $\Omega$  – cm Suelo húmedo

✓ Suelo tipo arena

Resistividad = 5,100  $\Omega$  – cm Suelo saturado

Resistividad = 14,000  $\Omega$  – cm Suelo húmedo

✓ Agua común (de la llave)

Resistividad = 1,300  $\Omega$  – cm

La prueba de suelo húmedo se realizó adicionando aproximadamente 10% de agua.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede hacer el siguiente comentario: un suelo arcilloso con 5% de humedad, puede presentar una resistividad de 10,000  $\Omega$  – m, en cambio, con un 20% de humedad, la resistividad disminuye hasta 100  $\Omega$  – m.<sup>[36]</sup>

## 4.6 Análisis de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint).<sup>[1]</sup>

### 4.6.1 Análisis de los resultados

### 4.6.2 Adherencia

Los recubrimientos **A**, **B**, **C** y **D** no presentaron delaminación del sustrato, los resultados de adherencia fueron clasificación **5B**, respecto al método ASTM D – 3359 - 02.

### 4.6.3 Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

### 4.6.4 Análisis de los resultados

Referente al punto 3.8, 3.8.3.5 y 3.8.3.6, con los espectros de las pruebas de impedancia electroquímica, se determinaron las simulaciones correspondientes con el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto por M. Kending y colaboradores.<sup>[1]</sup>

Cabe aclarar que en este caso particular los diagramas obtenidos de las pruebas de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint)<sup>[1]</sup>, no se pudieron ajustar de acuerdo con el Circuito Eléctrico Equivalente propuesto por los autores (Figura No. IV.1), por lo que fue necesario modificarlo y proponer el siguiente.

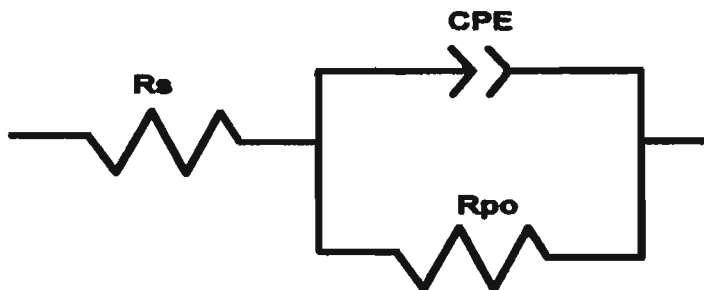


Figura No. IV.2

Circuito Eléctrico Equivalente (simplificado) empleado en los datos de análisis de EIE para un acero con recubrimiento expuesto a la corrosión

Donde:

- $R_s$  = Resistencia de la solución ( $\Omega$ )
- CPE = Elemento de fase constante ( $F/cm^2$ )
- $R_{po}$  = Resistencia del poro ( $\Omega \times cm^2$ )

En las Tablas Nos. IV-19 y IV-20 (páginas 97 y 98) se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de Impedancia; en las (páginas 99 a 107) se muestran los diagramas correspondientes.

➤ A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.

Lámina A daño en cruz,  $T_{inicial}$  y  $T_{final}$

En los diagramas (páginas 99 y 100), se observa una constante de tiempo, los valores de capacitancia de estas constantes de tiempo son muy altos para ser considerados los del recubrimiento, que por lo general se encontrarían del orden de  $10^{-9}$  ( $F/cm^2$ ), los determinados en este análisis son de  $10^{-4}$  ( $F/cm^2$ ) por lo que deben ser de la doble capa. Los valores de la resistencia  $R_{po}$  son 2,700 y 2,550 ( $\Omega \times cm^2$ ), indican una alta velocidad de corrosión, es decir como si estuviera el metal desnudo, en efecto así ocurre ya que el daño se considera grande (dos líneas perpendiculares de 10 x 10 mm); no hay delaminación del recubrimiento, probablemente se debe a los altos espesores, los valores del potencial de corrosión se encuentran en el rango propio de metal desnudo con pequeña variación, no se presentó ninguna otra falla sobre el recubrimiento.

---

---

#### Lámina B daño puntual, $T_{inicial}$ y $T_{final}$

En los diagramas correspondientes (páginas 100 y 101), se observa una constante de tiempo, los valores de capacitancia de estas constantes de tiempo disminuyeron respecto al daño en cruz de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  (F/cm<sup>2</sup>) pero siguen siendo altos para ser considerados los del recubrimiento aún cuando el daño es pequeño, estos valores están asociados con la doble capa. La impedancia presenta ligero abatimiento; se observan los valores de  $R_{po}$  de 4,300 y 4,240 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), no hay delaminación, los valores de potencial de corrosión son de -790.1 y -743.6 mVecs intervalo propio de metal desnudo, al término de la prueba no se presentó ninguna otra falla sobre el recubrimiento aplicado.

- **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina).**

#### Lámina C daño en cruz, $T_{inicial}$ y $T_{final}$

En los diagramas (página 102), se observa una constante de tiempo, los valores de impedancia se abaten y corresponden a 1,150 y 1,850 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) resultados muy bajos para ser del sistema de protección anticorrosiva. Estos valores implican altas velocidades de corrosión, que en este caso corresponden al zinc que se sacrifica protegiendo al acero. Los potenciales de corrosión son -1,012.5 y -945.7 mVecs y se deben a la presencia del zinc, en el caso del acero desnudo los resultados de potencial de corrosión son menores; los valores de capacitancia de las constantes de tiempo son del orden de  $10^{-4}$  (F/cm<sup>2</sup>), estos resultados se asocian con la doble capa. No se observa delaminación macroscópica, aunque la pudiera haber microscópicamente, en este caso quizás se debe al primario de zinc y a los altos espesores. No hubo ninguna otra falla sobre el sistema de recubrimiento.

#### Lámina D daño puntual, $T_{inicial}$ y $T_{final}$

En el primer diagrama (página 103), a  $T_{inicial}$  se observa una constante de tiempo y el valor de  $R_{po}$  es de 3,050 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), nuevamente la impedancia del sistema se abate, en el segundo diagrama se tiene que  $R_{po}$  aumenta hasta 30,000 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), quizás se debe a la difusión de especies, los valores de capacitancia de estas constantes de tiempo permanecen en el orden de  $10^{-4}$  (F/cm<sup>2</sup>) y se refieren a la doble capa aún cuando el daño es pequeño, no hay delaminación, los valores de potencial de corrosión son -1,002.2 y -930.2 mVecs, no se presentó ninguna otra falla sobre el recubrimiento.

- **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.**

#### Lámina E daño en cruz, $T_{inicial}$ y $T_{final}$

---

---

En los diagramas (página 104), se observa una constante de tiempo, los valores de capacitancia de estas constantes de tiempo son del orden de  $10^{-4}$  (F/cm<sup>2</sup>), valores altos para ser considerados los del recubrimiento, por lo que deben estar asociados con la doble capa. Los valores de  $R_{po}$  son constantes 2,450 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) e indican una alta velocidad de corrosión; la capacitancia y  $R_{po}$  están íntimamente relacionadas, ambas propiedades dependen del área reactiva metálica y ésta puede verse modificada por la reacción de reducción del oxígeno durante la polarización catódica, la reducción del oxígeno forma alcalinidad localmente y puede producir hidróxidos de hierro o llegar a precipitar algunos carbonatos, pero no hay delaminación del recubrimiento.

Lámina F daño puntual,  $T_{inicial}$  y  $T_{final}$

Se observa una constante de tiempo (página 105), aún cuando el daño es pequeño los valores de capacitancia son de  $10^{-4}$  (F/cm<sup>2</sup>), se asocian a la doble capa, los potenciales de corrosión se mantienen en el rango del acero desnudo; la  $R_{po}$  es alta, la velocidad de corrosión es menor en el área reactiva y también resulta menor en el cambio de la doble capa, los valores de  $R_{po}$  son de 15,000 y 4,500 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ) lo que supone que la impedancia aumenta aún cuando el daño es pequeño y éste se sella temporalmente con los productos de corrosión que se forman durante el tiempo que se dejó polarizando catódicamente.

- **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).**

Lámina G daño en cruz,  $T_{inicial}$  y  $T_{final}$

Para evaluar este sistema y obtener los diagramas correspondientes, el Circuito Eléctrico Equivalente que se aplicó fue el de la Figura No. IV.1 propuesto por Kending y colaboradores.<sup>[1]</sup>

$T_{inicial}$

En el diagrama (página 106), se presentan dos constantes de tiempo, la primera constante está relacionada con la resistencia del recubrimiento, mientras que la segunda con la resistencia a la transferencia de carga, se observa que la velocidad de corrosión es baja; cabe señalar que hay un recubrimiento primario de zinc, además el daño que se está evaluando es grande (dos líneas perpendiculares de 10 x 10 mm); durante el tiempo que se dejó polarizando la muestra, los productos de corrosión que se formaron encima de los cortes sellaron superficialmente dicho daño quizás con oxiclورو de zinc; el valor de la capacitancia aumenta de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  (F/cm<sup>2</sup>) valores que se asocian con el proceso de doble capa, estos resultados indican que el recubrimiento tiene baja permeabilidad y el metal se protege.

---

---

$T_{final}$

Se observa una constante de tiempo a diferencia del tiempo inicial donde hay dos constantes, el valor de capacitancia es de  $10^{-3}$  (F/cm<sup>2</sup>) sigue siendo valor muy bajo para decir que se trata del sistema de recubrimientos, los resultados son del orden de  $10^{-7}$  (F/cm<sup>2</sup>), por lo que el valor de  $10^{-3}$  (F/cm<sup>2</sup>) se asocia a la doble capa, los potenciales de corrosión son más negativos que los del acero desnudo -1,042.9 y -1,038.7 mVecs, se observa la presencia del zinc, el valor de  $R_{tc}$  es bajo 300 y 560 e indican alta velocidad de corrosión.

Lámina H daño puntual,  $T_{inicial}$  y  $T_{final}$

En ambos casos se observa una sola constante de tiempo (página 107), la impedancia se abate de 1,275 a 4,250 ( $\Omega \times \text{cm}^2$ ), el zinc se sacrifica protegiendo al acero, el daño es pequeño y se cubre con los óxidos protectores que se forman durante la polarización; la capacitancia permanece  $10^{-5}$  (F/cm<sup>2</sup>) valor propio asociado con la doble capa; los potenciales de corrosión son de -1,050 y -831.8 mVecs respectivamente.

Durante el desarrollo de la prueba de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint),<sup>[1]</sup> no fue posible determinar los parámetros de "Water Up Take", así como tampoco el de "Time To Failure (TTF)", debido a que los espesores de los recubrimientos y sistemas son altos, estos productos entre sus propiedades son de baja permeabilidad, no retienen la humedad y mucho menos el agua.



**TABLA No. IV-19**

**Resultados de la Prueba de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica**

**Análisis de REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint)**

➤ **A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina**

Lámina	Tipo de daño	EPPS (mils)	Tiempo de exposición	Potencial (mV)
A	Cruz 10 x 10 mm	16.9 (429 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-756.1
A	Cruz 10 x 10 mm	16.9 (429 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-734.0
B	Punto 1.0 mm $\Phi$	11.5 (292 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-790.1
B	Punto 1.0 mm $\Phi$	11.5 (292 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-743.6

➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

Lámina	Tipo de daño	EPPS (mils)	Tiempo de exposición	Potencial (mV)
C	Cruz 10 x 10 mm	16.5 (419 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-1012.5
C	Cruz 10 x 10 mm	16.5 (419 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-945.7
D	Punto 1.0 mm $\Phi$	14.8 (376 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-1002.2
D	Punto 1.0 mm $\Phi$	14.8 (376 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-930.2

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano**

Lámina	Tipo de daño	EPPS (mils) ( $\mu\text{m}$ )	Tiempo de exposición	Potencial (mV)
E	Cruz 10 x 10 mm	49.1 (1248 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-740.8
E	Cruz 10 x 10 mm	49.1 (1248 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-783.1
F	Punto 1.0 mm $\Phi$	45.1 (1145 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-723.2
F	Punto 1.0 mm $\Phi$	45.1 (1145 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-739.6

➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)**

Lámina	Tipo de daño	EPPS (mils)	Tiempo de exposición	Potencial (mV)
G	Cruz 10 x 10 mm	17.6 (447 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-1042.9
G	Cruz 10 x 10 mm	17.6 (447 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-1038.7
H	Punto 1.0 mm $\Phi$	17.3 (439 $\mu\text{m}$ )	T <sub>inicial</sub> = 0 hr	-1050.6
H	Punto 1.0 mm $\Phi$	17.3 (439 $\mu\text{m}$ )	T <sub>final</sub> = 24 hr	-831.8

**TABLA No. IV-20**

➤ **A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina**

	Lámina A daño en cruz $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina A daño en cruz $T_{final} = 24$ hr	Lámina B daño puntual $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina B daño puntual $T_{final} = 24$ hr
$R_s$ ( $\Omega$ )	15.87	18	93	100
$C_{corr} - T$ ( $F/cm^2$ )	$2.8203 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4}$	$2.9056 \times 10^{-5}$	$6.5113 \times 10^{-5}$
$C_{corr} - P$ ( $F/cm^2$ )	0.76268	0.82565	0.755	0.75
$R_{po}$ ( $\Omega \times cm^2$ )	2,700	2,550	4,300	4,250

➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

	Lámina C daño en cruz $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina C daño en cruz $T_{final} = 24$ hr	Lámina D daño puntual $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina D daño puntual $T_{final} = 24$ hr
$R_s$ ( $\Omega$ )	30	30	180	130
$C_{corr} - T$ ( $F/cm^2$ )	$1.87 \times 10^{-4}$	$3.1329 \times 10^{-4}$	$8.3128 \times 10^{-4}$	$1.2344 \times 10^{-4}$
$C_{corr} - P$ ( $F/cm^2$ )	0.7	0.7	0.75	0.48
$R_{po}$ ( $\Omega \times cm^2$ )	1,150	1,850	3,050	30,000

➤ **C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano**

	Lámina E daño en cruz $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina E daño en cruz $T_{final} = 24$ hr	Lámina F daño puntual $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina F daño puntual $T_{final} = 24$ hr
$R_s$ ( $\Omega$ )	29	32	380	570
$C_{corr} - T$ ( $F/cm^2$ )	$3.6939 \times 10^{-4}$	$4.3449 \times 10^{-4}$	$2.2645 \times 10^{-4}$	$1.0544 \times 10^{-4}$
$C_{corr} - P$ ( $F/cm^2$ )	0.865	0.9	0.355	0.855
$R_{po}$ ( $\Omega \times cm^2$ )	2,450	2,450	15,000	4,500

➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano)**

	Lámina G daño en cruz $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina G daño en cruz $T_{final} = 24$ hr	Lámina H daño puntual $T_{inicial} = 0$ hr	Lámina H daño puntual $T_{final} = 24$ hr
$R_s$ ( $\Omega$ )	17.61	15.6	$R_s = 127.1$	$R_s = 126.5$
$C_{rec}$ ( $F/cm^2$ )	0.005	0.125	$C_{corr} - T = 3.2 \times 10^{-5}$	$C_{corr} - T = 1.3 \times 10^{-5}$
$R_{po}$ ( $\Omega \times cm^2$ )	550	550	$C_{corr} - P = 0.85$	$C_{corr} - P = 0.835$
$C_{corr} - T$ ( $F/cm^2$ )	$5.0994 \times 10^{-4}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$R_{po} = 1,275$	$R_{po} = 4,250$
$C_{corr} - P$ ( $F/cm^2$ )	0.6	0.6		
$R_{tc}$ ( $\Omega \times cm^2$ )	300	560		

---

---

## 4.6.4 Análisis de los Resultados

### Diagramas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

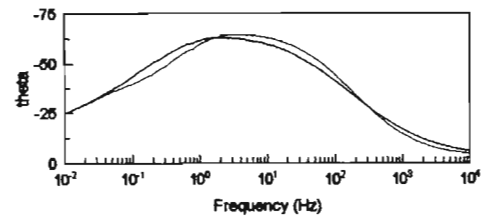
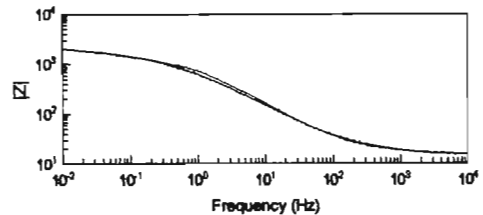
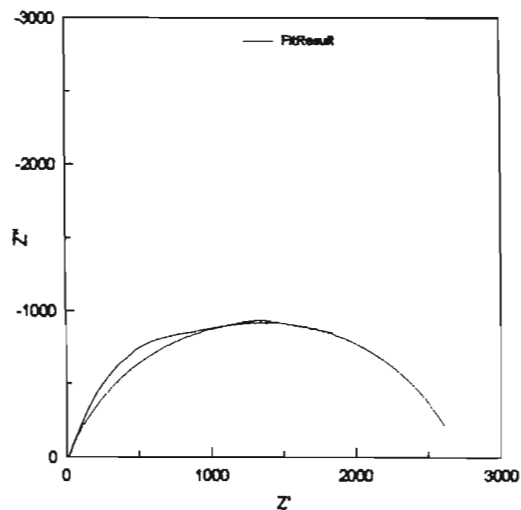
#### Prueba REAP (Rapid Electrochemical Assessment of Paint)

➤ A.- Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina.

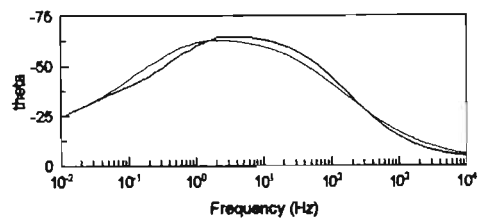
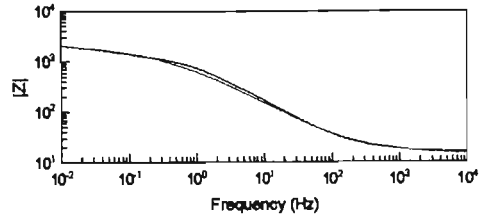
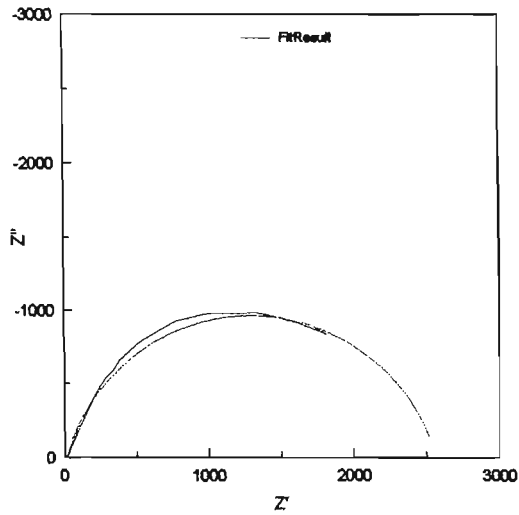
Ensayo 1;  $T_{\text{inicial}} = 0$  hrs

Lámina (A) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2$  °C

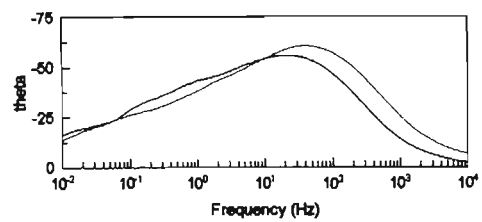
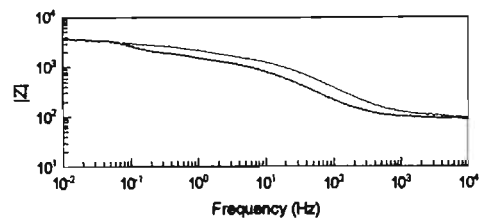
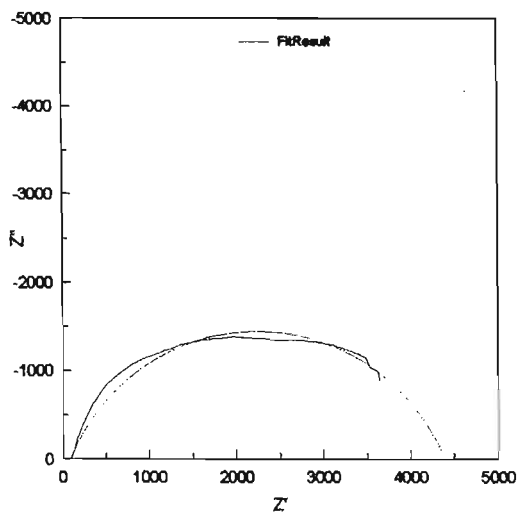
Potencial de Corrosión  $-756.1$  mV ecs



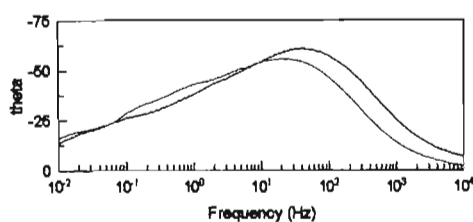
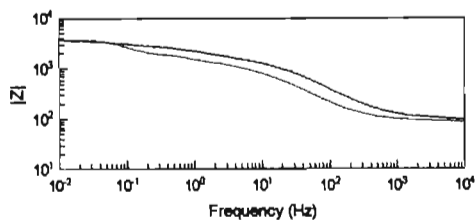
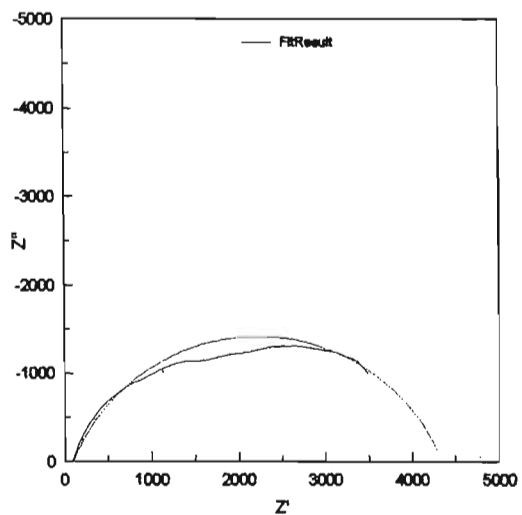
Ensayo 2;  $T_{\text{final}} = 24 \text{ hrs}$   
Lámina (A) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$   
Potencial de Corrosión  $-734.0 \text{ mV ecs}$



Ensayo 3;  $T_{\text{inicial}} = 0 \text{ hrs}$   
Lámina (B) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$   
Potencial de Corrosión  $-790.1 \text{ mV ecs}$



Ensayo 4;  $T_{\text{final}} = 24$  hrs  
Lámina (B) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
Potencial de Corrosión  $-743.6$  mV ecs

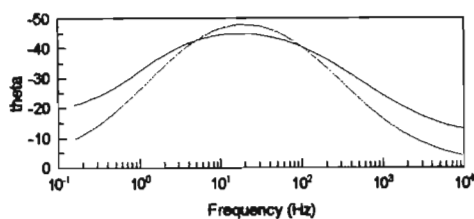
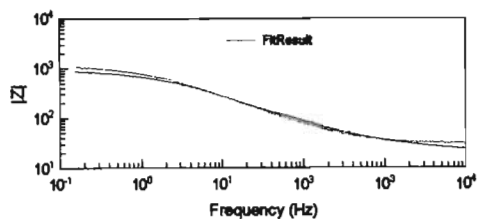
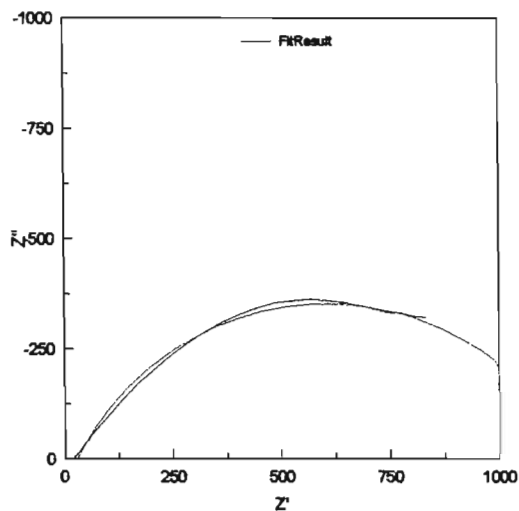


➤ **B.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Alquitrán de Hulla Epoxi Amina)**

Ensayo 1;  $T_{\text{inicial}} = 0$  hrs

Lámina (C) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2$  °C

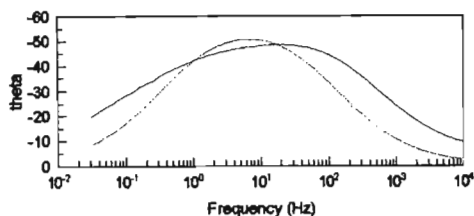
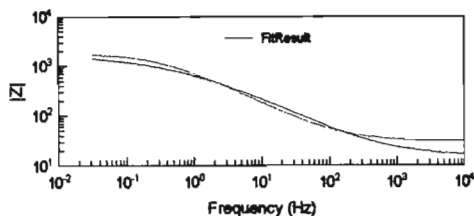
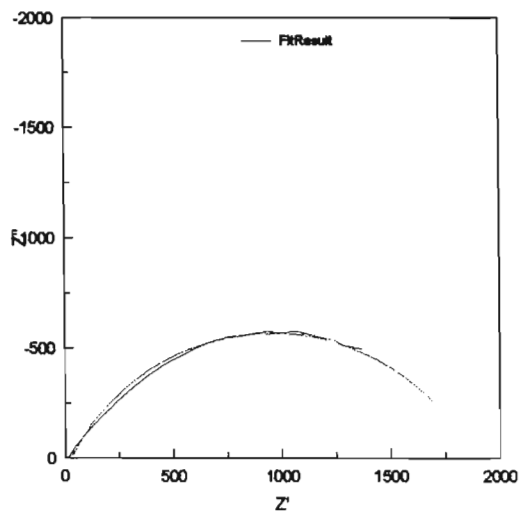
Potencial de Corrosión  $-1012.5$  mV ecs



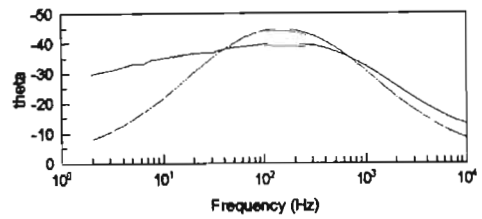
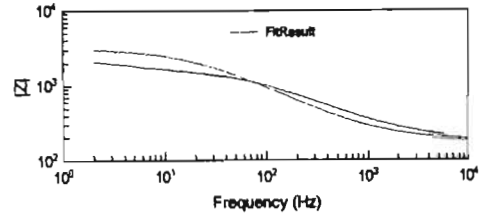
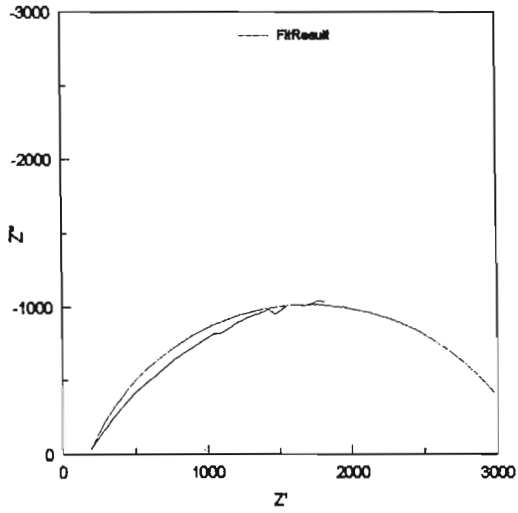
Ensayo 2;  $T_{\text{final}} = 24$  hrs

Lámina (C) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2$  °C

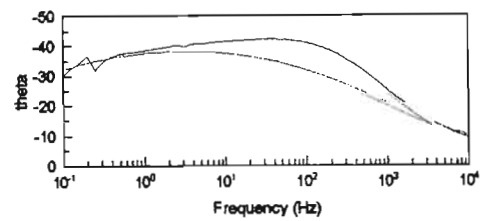
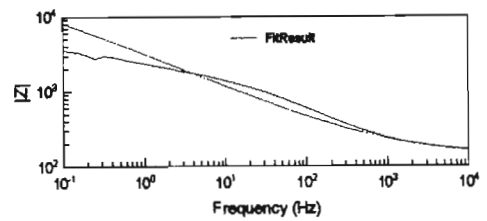
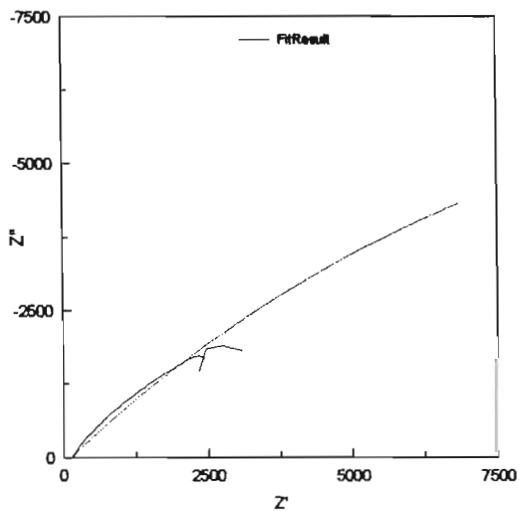
Potencial de Corrosión  $-945.7$  mV ecs



Ensayo 3;  $T_{\text{inicial}} = 0$  hrs  
 Lámina (D) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
 Potencial de Corrosión  $-1002.2$  mV ecs



Ensayo 4;  $T_{\text{final}} = 24$  hrs  
 Lámina (D) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
 Potencial de Corrosión  $-930.2$  mV ecs

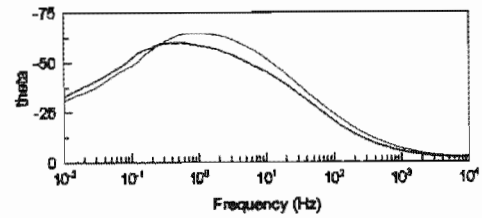
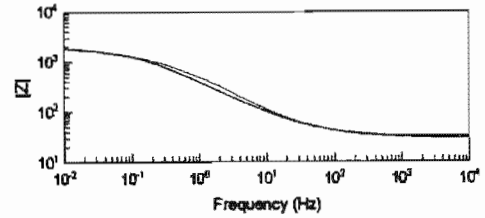
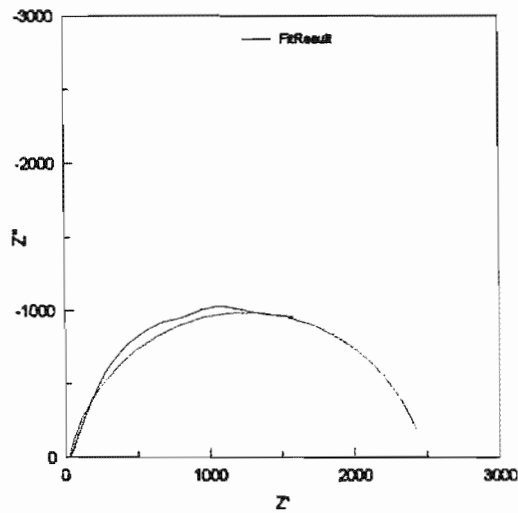


➤ C.- Recubrimiento Anticorrosivo Elastómero de Uretano.

Ensayo 1;  $T_{\text{inicial}} = 0$  hrs

Lámina (E) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2$  °C

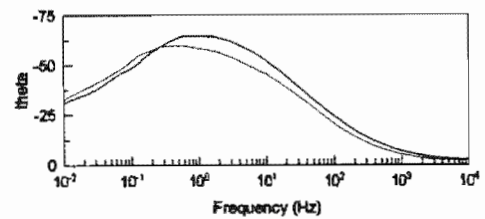
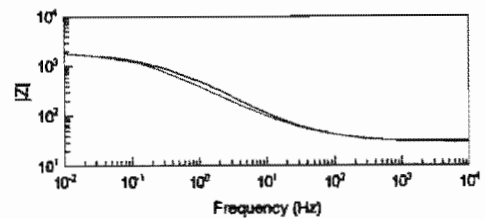
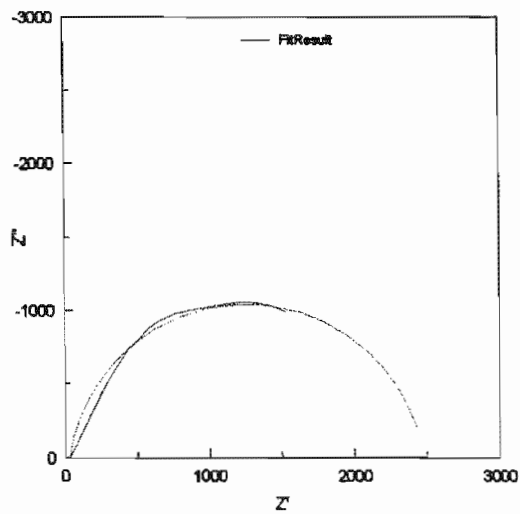
Potencial de Corrosión  $-740.8$  mV ecs



Ensayo 2;  $T_{\text{final}} = 24$  hrs

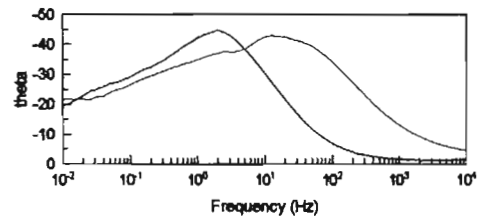
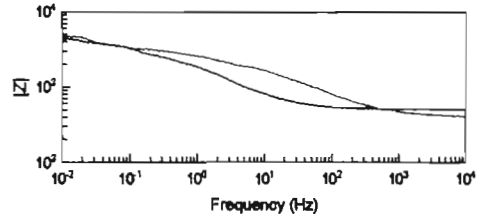
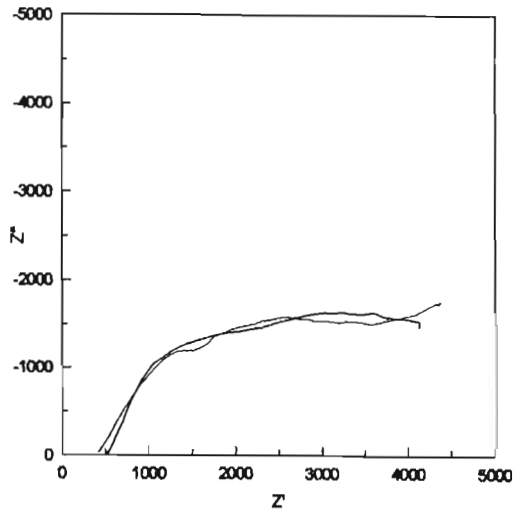
Lámina (E) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2$  °C

Potencial de Corrosión  $-783.1$  mV ecs

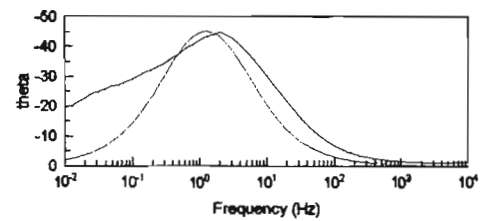
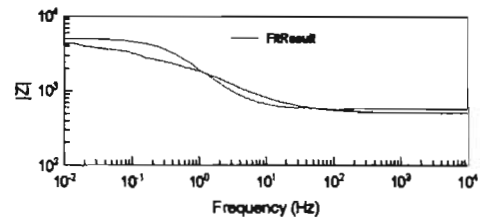
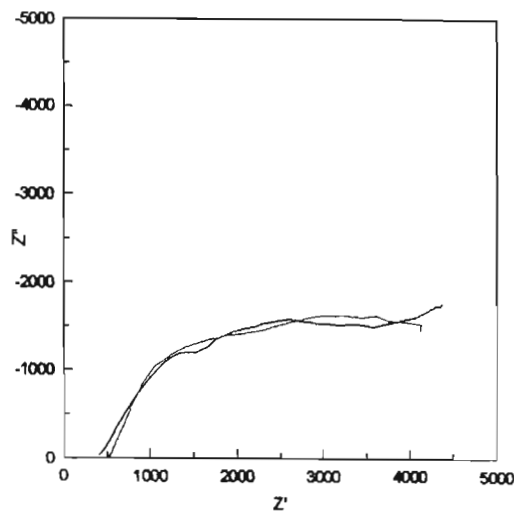




Ensayo 3;  $T_{\text{inicial}} = 0$  hrs  
 Lámina (F) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
 Potencial de Corrosión  $-723.2$  mV ecs



Ensayo 4;  $T_{\text{final}} = 24$  hrs  
 Lámina (F) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
 Potencial de Corrosión  $-739.6$  mV ecs

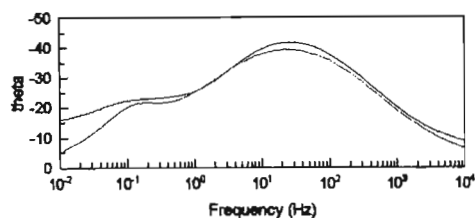
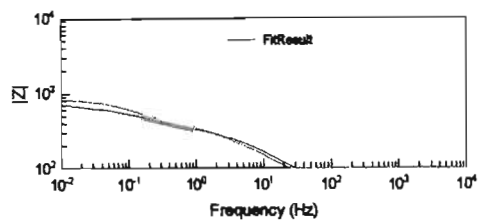
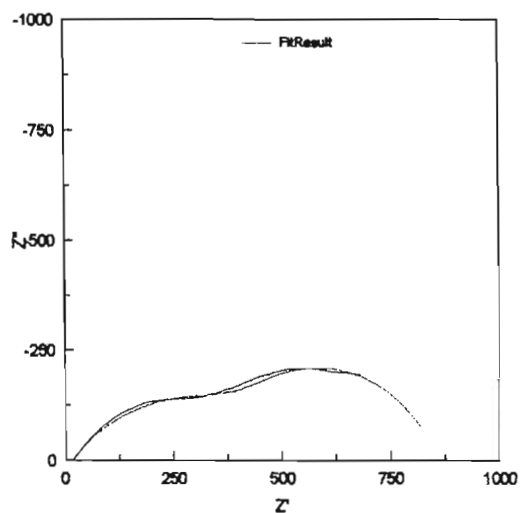


➤ **D.- Sistema de Recubrimientos Anticorrosivo; Primario (Inorgánico de Zinc) + Acabado (Elastómero de Uretano).**

Ensayo 1;  $T_{\text{inicial}} = 0 \text{ hrs}$

Lámina (G) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

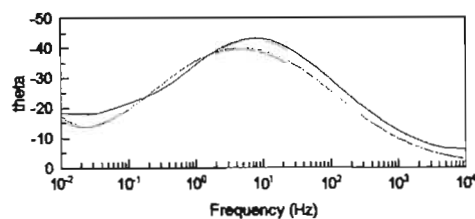
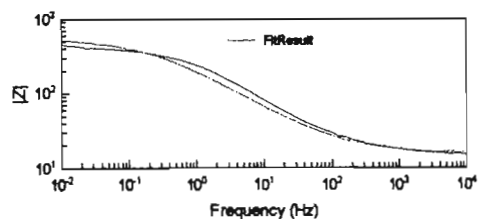
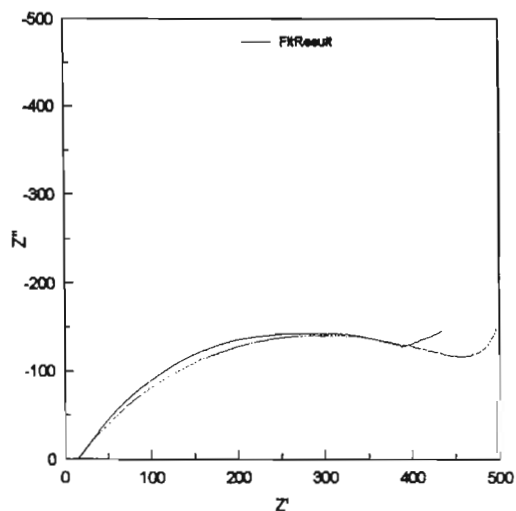
Potencial de Corrosión  $-1042.9 \text{ mV ecs}$



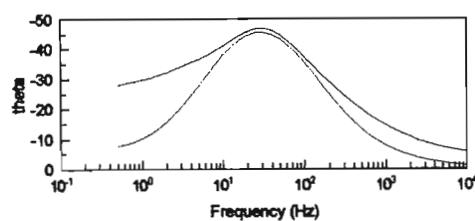
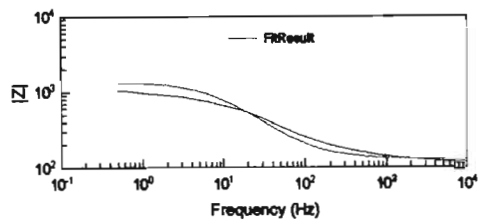
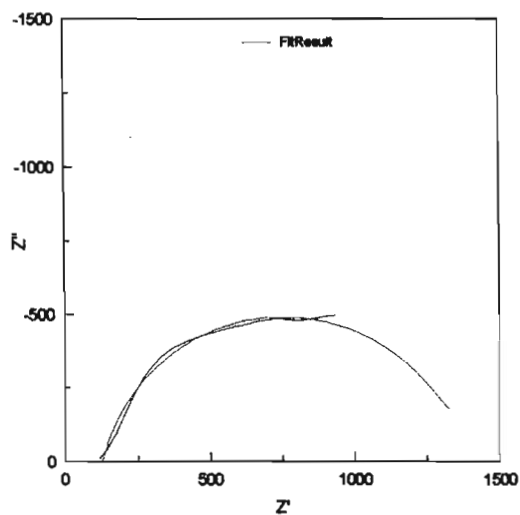
Ensayo 2;  $T_{\text{final}} = 24 \text{ hrs}$

Lámina (G) Con daño en cruz; Temperatura  $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

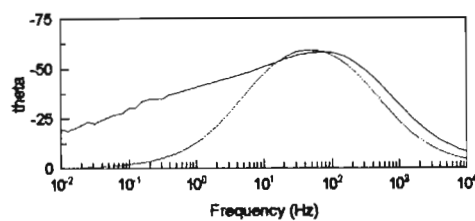
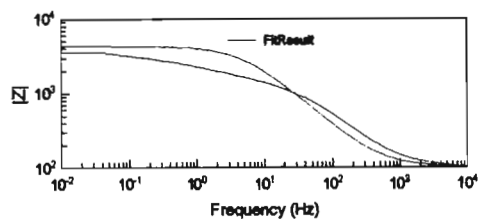
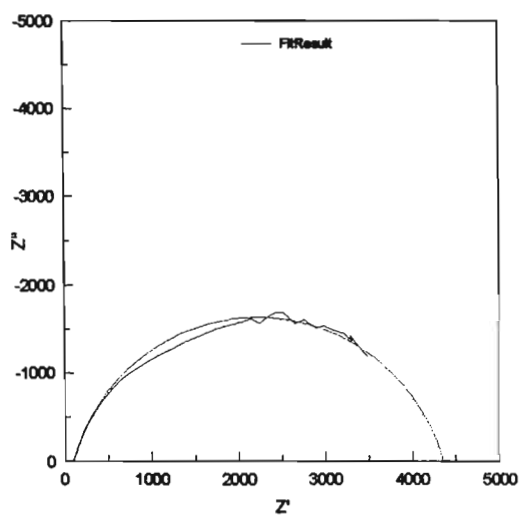
Potencial de Corrosión  $-1038.7 \text{ mV ecs}$



Ensayo 3;  $T_{\text{inicial}} = 0$  hrs  
Lámina (H) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
Potencial de Corrosión  $-1050.6$  mV ecs



Ensayo 4;  $T_{\text{final}} = 24$  hrs  
Lámina (H) Con daño puntual; Temperatura  $23 \pm 2$  °C  
Potencial de Corrosión  $-831.8$  mV ecs



---

---

## CONCLUSIONES

1. Los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva identificados en el presente trabajo con las letras **A, B, C y D**, aplicados sobre láminas y tubos de acero, que fueron expuestos en las pruebas de resistencia a la niebla salina y esfuerzo en suelos, presentaron comportamiento satisfactorio al término de las mismas. Este comportamiento se debió principalmente a que antes de su aplicación se consideraron los siguientes factores: preparación de superficie, perfil de anclaje, espesores de película húmeda entre capas y espesor total de película seca. Por lo tanto se espera un alto desempeño en campo bajo las condiciones de humedad y temperatura.
2. En la evaluación de resistencia a la niebla salina, el recubrimiento Elastómero de Uretano presentó clasificación 3B en la prueba de adherencia, este recubrimiento tiene un espesor promedio de película seca de 41.4 mils (1052  $\mu\text{m}$ ); el producto se considera de alta permeabilidad, no se recomienda exponerlo bajo condiciones agresivas de humedad y temperatura. Para que tenga un alto desempeño y se pueda someter bajo las condiciones antes descritas se debe aplicar con el primario de zinc. Si se aplica como sistema, el espesor de película seca disminuye 17.0 mils (432  $\mu\text{m}$ ) en promedio, el consumo del elastómero es menor y el desempeño en campo se incrementa significativamente.
3. La temperatura es otro factor que influye en la evaluación de recubrimientos mediante el empleo de técnicas electroquímicas, sobre el recubrimiento de los tubos enterrados que previamente se les había realizado un daño, no se obtuvo respuesta durante el tiempo de exposición, los daños se sellaron con el suelo por efecto de la humedad y temperatura, aunado a que el primario de zinc es un recubrimiento protector y resiste altas temperaturas.
4. Los dos tipos de suelo donde se enterraron los tubos protegidos con los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva, no se consideran del tipo agresivo respecto a los recubrimientos, presentan baja resistividad y son ligeramente alcalinos.
5. En el desarrollo de la Técnica de REAP, no se determinaron los parámetros de absorción de agua y el momento en el que probablemente presentarían alguna falla el recubrimiento; los recubrimientos y sistemas anticorrosivos presentaron baja permeabilidad, por lo tanto no absorbieron agua, tampoco presentaron ninguna otra falla, esto último se debe a que los materiales evaluados se aplicaron con altos espesores de película seca.
6. Los artículos que proponen el desarrollo de la técnica de REAP para evaluar de una manera rápida el comportamiento de recubrimientos anticorrosivos, proponen espesores de película seca de 0.5 mils (12.7  $\mu\text{m}$ ) y hasta 3.0 mils (76.2

---

---

$\mu\text{m}$ ), no mencionan el efecto de la temperatura, las pruebas se realizan a temperatura ambiente. En este trabajo los espesores de película seca son mucho mayores, por lo que no hay delaminación y se trabajó con temperatura de hasta 83 °C.

7. Los recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva que se evaluaron en este trabajo, sí se pueden aplicar en ductos enterrados, se espera un alto desempeño de los mismos y soportan las condiciones de humedad y temperatura.
8. Las técnicas de Espectroscopía de Impedancia Electroquímica serán capaces de proveer información sobre la degradación de los recubrimientos empleados en líneas enterradas y bajo condiciones de polarización.
9. Un excelente recubrimiento puede fallar si en su aplicación no se consideran los factores descritos en el punto 1, por otra parte un recubrimiento regular puede presentar un alto desempeño si en su aplicación se consideran los mismos factores.

---

---

## REFERENCIAS

- 1.- Kending M., Jeanjaquet S., Brown R. and Thomas F., Rapid Electrochemical Assessment of Paint. *Journal of Coatings Technology*, Vol. 68, No. 863, p. 39-47, Dic. 1996.
- 2.- Mansfeld F., Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) as a New Tool for Investigating Methods of Corrosion Protection. *Electrochimica Acta*, Vol 35, No. 10, p. 1533 – 1544, 1990.
- 3.- Deflorian F., Fredizzi L., Bonora P. L., Determination of the Reactive Area of Organic Coated Metals Using the Break-Point Method. *Corrosion Science*, Vol. 50 No. 2, p. 113-119, February 1994.
- 4.- Titz J., Wagner G. H., *Et Al*, Characterization of Organic Coatings on Metal Substrates by Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Corrosion Science*, Vol. 46, No. 3, p. 221-229, march 1990.
- 5.- Hladky K., Callow L. M., Dawson J. L., Corrosion Rates from Impedance Measurements: An Introduction. *Br. Corros. J.*, 1980, Vol. 15, No.1, p. 20-25.
- 6.- Walter G. W., A Critical Review of the Protection of Metals by Paints. *Corrosion Science* Vol. 26, No. 1, p. 27-38, 1986.
- 7.- Kending M., Scully J., Basic Aspects of Electrochemical Impedance Application for the Life Prediction of Organic Coatings on Metals. *Corrosion Science*, Vol. 46, No.1, p. 22-29, January 1990.
- 8.- Tsai CH., Mansfeld F., Determination of Coating Deterioration with EIS: Part II. Development of a Method for Field Testing of Protective Coatings. *Corrosion Science*, Vol. 49, No. 9, p. 726-737, sept., 1993.
- 9.- Walter G. W., A Review of Impedance Plot Methods Used for Corrosion Performance Analysis of Paint Metals. *Corrosion Science*, Vol. 26, No. 9, p. 681-703, 1986.
- 10.- Hirayama R., Haruyama S., Electrochemical Impedance for Degraded Coated Steel Having Pores. *Corrosion*, Vol. 47, No. 12, p. 952-958, december 1991.
- 11.- Blanco Matas A, Villegas CH. L., *Tecnología de Pinturas y Recubrimientos Orgánicos*. Editorial Química, S. A., 1ª Edición, p. 11-33 y 164-173, México, 1966.
- 12.- *Curso de Control de Corrosión, Principios y Métodos del Control de Corrosión*, Amercoat Mexicana, S. A. de C. V., p. 1-62, México, 1995.

---

---

13.- Especificaciones para la Aplicación e Inspección de Recubrimientos para Protección Anticorrosiva. PEMEX, PEP, 1ª Edición, Enero de 1999, actualizada en Junio de 1999, México.

14.- Especificación SSPC, Joint Surface Preparation Standard NACE No. 1/SSPC-SP 5, White Metal Blast Cleaning. USA, reaffirmed, 1999.

15.- Norma de Referencia NRF-026-PEMEX-2001, Protección con Recubrimientos Anticorrosivos para Tuberías Enterradas y/o Sumergidas. Petróleos Mexicanos, México, Dic. 2001.

16.- Svensk Standard SIS 05 59 00-1967, Swedish Standards Institutions, Swedish Standard SIS 05 59 00-1967. Reaffirmed and Reprinted 1976.

17.- Curso Internacional de Corrosión. Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Capacitación y Desarrollo Profesional, División de Corrosión, p. 138-201, México, Mayo 1986.

18.- Malerva C. N., Estudio del Deterioro por Corrosión Atmosférica de los Sistemas Metal/Recubrimiento Utilizados en Plataformas Marinas. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Veracruz, p. 1-37, México, Mayo 1999.

19.- Norma 4.411.01, Recubrimientos para protección Anticorrosiva. PEMEX, 2ª Edición, México, 1990

20.- Especificaciones SSPC, SSPC-SP1, Surface Preparation Specification No. 1, Solvent Clearing. USA, Sept., 2000.

SSPC-SP2, Surface Preparation Specification No. 2, Hand Tool Clearing. USA, 2000.

SSPC-SP3, Surface Preparation Specification No. 3 Power Tool Clearing. USA, 2000.

21.- ASTM, Standard Practice B – 117 – 03; Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. USA, 2003.

22.- Norma 2.132.01, Sistemas de Protección Anticorrosiva a Base de Recubrimientos. PEMEX, 4ª Edición, México, 1981.

23.- Norma 3.132.01, Preparación de Superficies Aplicación e Inspección de Recubrimientos para Protección Anticorrosiva. PEMEX, 4ª Edición, México 1982.

24.- Mansfeld F., Don't Be Afraid of Electrochemical Techniques – But Use With Care. Corrosion Science, Vol. 44, No. 12, p. 856-868, december 1988.

25.- Norma 5.132.01 Recubrimientos para Protección Anticorrosiva Muestreo y Pruebas. PEMEX, 4ª Edición, México, 1981.

26.- ASTM, Standard Test Method D – 714 - 02, Evaluating Degree of Blistering of Paints. USA, 2002.

- 
- 
- 27.- ASTM, Standard Test Method D – 772 - 86 (Reapproved 2000), Evaluating Degree of Flaking (Scaling) of Exterior Paints. USA, 2000.
- 28.- Kaene D. J., Good Painting Practice, Steel Structures Painting Manual Vol. 1, Steel Structures Painting Council, First Printing SSPC, January 1994, Pittsburgh USA.
- 29.- ASTM, Standard Test Method D – 3359 - 02, Measuring Adhesion By Tape Test. USA, 2002.
- 30.- Revista con Mantenimiento Productivo. CIMAV, UAEM, IIE, año 3 Núm. 15, p. 7-10, México, Junio/ Julio 2002.
- 31.- Lara Z. C., Curso Selección e Inspección de Recubrimientos. UNAM, p. 5- 35, México, 15–19 Abril 1996.
- 32.- ASTM, Standard Test Method D – 4417 - 93 (Reapproved 1999), Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel. USA, 1993.
- 33.- ASTM, Standard Practice G – 106 - 89 (Reapproved 1999), Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements. USA, 1989.
- 34.- Cottis R., Turgoose S., Electrochemical Impedance and Noise. NACE International, p. 9-49, USA 1999.
- 35.- Armstrong R.D., Wright D., Polymer Protective Coatings-The Distinction Between Coating Porosity and the Wetted Metal Area. Electrochemica Acta, Vol 38, No. 14, p. 1799-1801, 1993.
- 36.- Ávila M. J., Genescá Li. J., Más Allá de la Herrumbre II, La lucha contra la corrosión. Editorial SEP, FCE, CONACYT, La ciencia para todos, 2ª Edición, México 1997
- 37.- ASTM, Standard Test Method G – 57 - 95 a (Reapproved 2001), Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner four Electrode Method. USA, 1995.
- 38.- Mischczyk A., Darowicki K., Accelerated Ageing of Organic Coating System by Thermal Treatment. Corrosion Science 43, p. 1337-1343, 2001.
- 39.- Fontana M. G., Corrosion Engineering. Mc. Graw-Hill, Inc., Third Edition, USA, 1986.
- 40.- Scully J. R., Silverman D. C., Kending M. W., Electrochemical Impedance: Analysis and Interpretation. ASTM Publication, USA 1993.
- 41.- Jones D. A., Principles and Prevention of Corrosion. Prentice Hall, USA, 1996.



---

42.- ACS Symposium Series, Organic Coatings for Corrosion Control. Gordon P. Bierwagen, Editor, USA, 1998.

43.- Payer, J. H., Boyd, W. K., Dippold, D.G., and Fisher, W. H., NBS-Batelle Cost of Corrosion Study (\$70 billions!). Materials Performance, p. 18-53, jun-nov. 1980.

44.- Programa en Ciencia e Ingeniería de la Corrosión. Instituto Mexicano del Petróleo, Subdirección de Exploración y Producción, p. 1-17, México, julio de 1999.

45.- Duval, S., Camberling, F., Glotin M., Keddani, M., Ropital, F., and Takenouti, H., Protective Behavior of Organic Coating in H<sub>2</sub>S Containing Medium by EIS Measurements: Effect of Operating Temperature. 7<sup>th</sup> International Symposium on Electrochemical Methods in Corrosion Research, EMCR2000, paper No. 065, p. 1-11, m

---

---

***APÉNDICE***

---

---

## *APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS*

### **Recubrimiento Inorgánico de Zinc.**

#### **Características:**

Tipo: Inorgánico de zinc autocurante base solvente.

Adecuado para aplicarse sobre el acero previa limpieza de la superficie a metal blanco.

Proporciona protección catódica a la superficie de acero, así como también excelente protección contra la corrosión.

#### **Usos Principales:**

Estructuras de acero, tanques de almacenamiento, tuberías, ductos, plataformas marinas y puentes.

Resiste salpicaduras y derrames de productos derivados del petróleo, como: solventes orgánicos, alcoholes, agua cruda, agua de mar, entre otros. No es afectado por la luz ultravioleta.

#### **Instrucciones de Aplicación.**

Preparación de la superficie de acero: metal blanco de acuerdo con la especificación SSPC-SP-5, perfil de anclaje promedio de 1.0 a 1.5 mils (25.4 a 38  $\mu\text{m}$ ).

#### **Equipo requerido para la aplicación.**

- Olla de presión con agitador mecánico.
- Reguladores y manómetros separados para control de aire y fluido.
- Suministro de aire con un compresor capaz de producir 0.56 m<sup>3</sup> (20 pcm) a una presión de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi) en la pistola. Debe utilizarse un filtro de humedad en la línea de aire entre el compresor y la olla de presión.
- Equipo estándar de aspersion convencional con aguja y tobera de 70 milésimas para inorgánico de zinc.

#### **Procedimiento de aplicación.**

- Mezclar totalmente el polvo y el líquido; incorpore lentamente el polvo en el líquido con agitación permanente (use un agitador mecánico), no lo haga en orden inverso, continúe agitando hasta que el polvo esté bien disperso y la mezcla tenga una consistencia homogénea.
- Agítese antes y durante la aplicación.
- Pase el material mezclado por un tamiz de malla 30 para remover el material que no haya dispersado y así prevenir el taponamiento del equipo.
- La vida útil es limitada y se reduce por las altas temperaturas.

- 
- 
- Mantenga una agitación lenta del material, durante la aplicación, para mantener la mezcla homogénea. Evite la agitación rápida ya que de esta forma puede elevarse la temperatura del material y acorta la vida útil.
  - Permita que el producto seque en un mínimo de 4 hrs a 21 °C y evite el contacto con el agua hasta que esté seco al tacto.
  - Cuando el recubrimiento este seco para manejo, medir el espesor de película seca con un medidor de espesores de tipo no destructivo. El espesor normal recomendado puede variar entre 2 y 3 milésimas.

## **Métodos de Atomización**

En la aplicación de recubrimientos a escala industrial, se usan dos tipos de equipos: convencional (atomización con aire) y airless (presión hidráulica)

Atomización convencional.- el componente primario es la pistola de atomización y es donde se mezclan el aire y el material. Esta diseñada de tal manera que el flujo puede ser dirigido fácilmente hacia la superficie a recubrir.

## **Acabados**

La superficie del recubrimiento Inorgánico de Zinc Autocurante deberá estar limpia y seca libre de cualquier contaminante antes de aplicar el recubrimiento de acabado.

En el presente trabajo se aplicaron los acabados: Recubrimiento Anticorrosivo Alquitrán de Hulla Epoxi Amina AM 78 HB y el Elastómero de Uretano RE 06/00. Ambos productos tienen alto contenido de sólidos en volumen (>75%), por lo que su aplicación requiere de equipo especial (airless).

Estos mismos productos de acabados se aplicaron sin primario. Es importante señalar que los fabricantes lo recomiendan como primario y acabado, únicamente que el espesor debe ser mayor comparándolo con recubrimiento primario.

La preparación de la superficie de acero debe ser a metal blanco, el perfil de anclaje promedio es de 2.0 a 3.0 milésimas de pulgada.

## **Procedimiento de aplicación.**

- Mezclar lentamente la proporción de los dos componentes, incorpore el catalizador (endurecedor) en la resina base con agitación constante, no lo haga en orden inverso, continúe agitando hasta que los dos componentes estén dispersos y la mezcla tenga una consistencia homogénea.
- Dejar reposar por unos minutos para que se efectúe la reacción de polimerización.

- 
- 
- Pase el material mezclado por un tamiz de malla 30 para remover el material que no haya dispersado y así prevenir el taponamiento del equipo.
  - La vida útil es limitada y se reduce por las altas temperaturas.
  - Permita que el producto seque en un mínimo de 24 hrs a 21 °C.
  - Cuando el recubrimiento este seco para manejo, medir el espesor de película seca con un medidor de espesores de tipo no destructivo.

### **Aspersión hidráulica (airless)**

Con este equipo, no hay aire usado para la atomización, el abanico de la pistola es formado simplemente forzando el material bajo alta presión, a través de un pequeño orificio.

La ventaja sobresaliente de este tipo de equipo, es la ausencia de sobre aspersión, por lo tanto se pueden hacer aplicaciones más tersas especialmente en las esquinas y hendeduras y la pérdida de material es insignificante.

El promedio de ahorro fluctúa de un 30 a un 70% dependiendo del tipo de material que se aplique y de otros factores.

Es importante que se selecciones la tobera mas apropiada para aplicar un recubrimiento en particular. El otro ajuste es en la presión aplicada al fluido. Una bomba accionada con aire comprimido con una relación de 28 a 1, es la que más comúnmente se usa para suministrar la presión al material, de este modo si la presión de entrada del aire suministrado a la bomba es de 100 lb, la presión resultante del material en la pistola, será de 2800 lb. Así como la tobera, la presión también puede ser regulada para la aplicación de diversos materiales.