

8  
29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

CORRELACION ENTRE LA MICROESTRUCTURA  
Y LA CORROSION EN ACERO GALVANIZADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A I

HUGO JIMENEZ FLORES



México, D. F.

1993

TESIS CON  
FALLA LE CR.GEN



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 está 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.

## RESUMEN

En el presente trabajo se ha estudiado la posible correlación entre la microestructura y la corrosión para el acero galvanizado por inmersión en caliente y para el acero electrogalvanizado.

Los resultados obtenidos muestran que mediante la técnica de medición del potencial de corrosión contra el tiempo se pudo determinar fácilmente cuando el recubrimiento ya no protege en su totalidad al acero contra el medio corrosivo y comprobando mediante un análisis metalográfico para observar las condiciones en que se encuentra su microestructura antes y después de ser corroida la muestra.

Se encontro que el acero galvanizado por inmersión en caliente es de mala calidad porque carece de la última capa del recubrimiento llamada  $\text{eta}(\eta)$  y su recubrimiento no es homogéneo.

## ABSTRACT

This work shows the correlation between corrosion and microstructure for the hot dip galvanized steel and electrogalvanizing steel.

The results gotten prove as the time against corrosion potential measure technique.

We can determine easily when the coating not protection steel of corrosive medium and checking with metalographics analysis for loock the conditions in that found its microstructure before and after of be corrosive the especimen.

There found that the hot dip galvanized steel had a bad quality because it haven't the last layer called ETAC $\eta$ ) and the coating didn't get homogeneous.

## INDICE.

I. INTRODUCCION .....	1
-----------------------	---

II. MARCO TEORICO .....	7
-------------------------	---

Galvanizado. ....	7
-------------------	---

Principales métodos de aplicación de recubrimientos de zinc. ....	8
--	---

Galvanizado por inmersión en caliente. ....	8
---	---

Los efectos de los elementos en el galvanizado. ....	9
--	---

Tipos de estructuras obtenidas por el galvanizado por inmersión en caliente. ....	11
--	----

Las estructuras del recubrimiento y el espesor dependen de : .....	13
---	----

Representación del diagrama de fases de Fe-Zn. ....	14
---	----

Galvanizado en línea continua. ....	17
-------------------------------------	----

Electro galvanizado. ....	19
---------------------------	----

**III. DESARROLLO EXPERIMENTAL: METODOLOGIA .....23**

Pruebas de caracterización. .... 23

Masa del recubrimiento. .... 23

Espesor del recubrimiento. .... 25

Ensayo Preece. .... 25

Variación del potencial de corrosión con el tiempo..... 27

Medidas de polarización. .... 29

Metalografía para el acero galvanizado por inmersión en  
caliente y para el acero electrogalvanizado. .... 31

Análisis del acero galvanizado por inmersión en caliente  
en el microscopio electrónico de barrido(M.E.BD). .... 31

**IV RESULTADOS EXPERIMENTALES..... 32**

Caracterización para acero galvanizado por inmersión  
en caliente. .... 32

Masa del recubrimiento. .... 32

Espesor del recubrimiento. .... 34

Ensayo Preece. .... 34

Caracterización para acero electrogalvanizado. .... 35

Masa del recubrimiento. ....	35
Espesor del recubrimiento. ....	36
Ensayo Preece. ....	37
Variación del potencial de corrosión con el tiempo para el acero galvanizado por inmersión en caliente. ....	37
Variación del potencial de corrosión con el tiempo para el acero electrogalvanizado. ....	42
Medidas de polarización para acero galvanizado por inmersión en caliente y electrogalvanizado. ....	45
Metalografía de los aceros galvanizado por inmersión en caliente y electrogalvanizado. ....	49
Análisis del acero galvanizado por inmersión en caliente en el M.E.B para la pieza de llegada(nueva). ....	60
Micrografías del acero galvanizado por inmersión en caliente tomadas en el M.E.B. ....	64
Análisis del acero galvanizado por inmersión en caliente en el M.E.B para la pieza corroída. ....	68
Micrografías del acero galvanizado por inmersión en caliente tomadas en el M.E.B. ....	75
Tabla del análisis de composición del acero galvanizado por inmersión en caliente en el M.E.B. ....	83

V. DISCUSION DE RESULTADOS. .... 84

VI. CONCLUSIONES. .... 92

BIBLIOGRAFIA. .... 94



## OBJETIVOS.

Los objetivos de este trabajo son:

1.- poder establecer la posible relación existente entre la microestructura y la corrosión en el acero galvanizado.

2.- Por la técnica de medición de la variación del potencial de corrosión con el tiempo, poder determinar cuando el recubrimiento ya no protege en su totalidad a nuestro acero base del medio corrosivo.

3.- Por una técnica metalográfica poder comprobar en que estado se encuentra antes y después de la corrosión nuestra muestra. Así como su composición.

## CAPITULO I.

### INTRODUCCION.

El Zn es un metal muy usado particularmente cuando éste está en forma de una pequeña capa sobre la superficie del acero sirviendo como protección ante la corrosión, resistente a las condiciones atmosféricas.

Este metal es uno de los menos caros y sumamente utilizados. Mas de un millón de toneladas de Zn son usados en los Estados Unidos anualmente y aproximadamente 1 tonelada es utilizada en recubrimientos para el acero. La mayoría de esta es utilizada para electrogalvanizado.

Aproximadamente 10 millones de toneladas de acero son recubiertas en los Estados Unidos anualmente donde una gran cantidad de este es utilizado en la industria automotriz (paneles, chasis, defensas, etc.).

La eficiencia del Zn en la protección galvanica del acero depende del medio al que se exponga y del espesor del recubrimiento.

Con esto podemos darnos cuenta de la importancia del galvanizado en la prevención contra la corrosión y de la importancia de analizar cuidadosamente estos diferentes tipos de recubrimientos

El procedimiento de galvanizado por inmersión en caliente tiene una gran importancia económica, lo cual puede deducirse de los datos presentados en la fig.1 (consumos mundiales de zinc en el galvanizado).

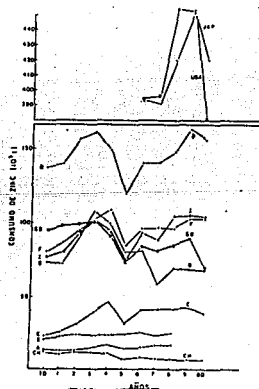


Fig. 1 (2) Consumos mundiales de zinc

en el galvanizado  
 Donde:  
 JAP=JAPON.  
 USA=ESTADOS UNIDOS.  
 D=DINAMARCA.  
 I=ITALIA.  
 GB=INGLATERRA.  
 F=FRANCIA.  
 B=BRASIL.  
 E=ESPAÑA.  
 S=SUECIA.  
 A=ALEMANIA.  
 CH=CHINA.

### CARACTERISTICAS ELECTROQUIMICAS DEL ZINC.

El zinc es un elemento activo dentro de la serie electroquímica donde su potencial estandar es de  $E^{\circ} = -0.77 \text{ v(ESH)}$  y el del Fe es de  $E = -0.44 \text{ v(ESH)}$ , se trata de un material anódico respecto al hidrógeno pero catódico respecto al zinc.

En estas condiciones podría pensarse que el zinc no constituyera un material adecuado para proteger mediante un recubrimiento al hierro ya que al ser un metal menos noble su tendencia a disolverse es mayor. Esto sería termodinámicamente hablando, pero esto es diferente dado que no se toma en cuenta los aspectos cinéticos.

Como consecuencia de la disolución anódica del zinc, se forman productos de corrosión que son adherentes y compactos y que al depositarse sobre el zinc ofrecen una resistencia a la difusión de los iones y una resistencia ohmica que retrasa la velocidad de disolución del zinc llevandola a valores inferiores a la del

hierro, por lo tanto un recubrimiento anódico como el zinc es una protección para el hierro.

Si se produjera una picadura o ruptura en el recubrimiento que dejara aparentemente sin protección al hierro, se formaría una pila Fe-electrolito-Zn en la que el zinc actuaría como ánodo.

Los productos actuarían entonces como barrera protegiendo la zona cática. Como se muestra a continuación en la fig. 2.

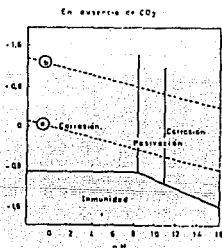


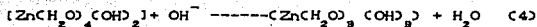
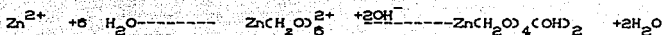
Fig. 2 Dominios teóricos de corrosión.

Inmunidad y pasivación del zinc a 25°C en  
solución acuosa (Pourbaix). (2).

Las reacciones mediante las cuales tienen lugar el ataque del zinc.(2). son:



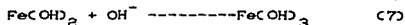
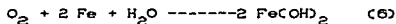
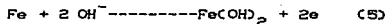
El zinc se hidrata y produce el hidroxizincato.



Produce cincatos solubles.

También se produce  $\text{Zn}(\text{OH})_2 \cdot \text{ZnCl}_2$  hidroxiclورو de zinc.

Las reacciones para el fierro.



HIDROXIDO FERROSO

HIDROXIDO FERRICO

El uso del acero galvanizado en México es muy amplio.

Recientemente el laboratorio de corrosión de la Facultad de Química de la U.N.A.M. ha estado asesorando a compañías como: CONDUMEX Y LA C.F.E. por problemas en el control de calidad del recubrimiento en el galvanizado por inmersión en caliente.

## CAPITULO II.

### MARCO TEORICO.

#### GALVANIZADO.

\*Es un proceso por medio del cual los aceros son recubiertos por una capa de Zn.

\* Es un proceso primario por el cual el Zn es aplicado al acero. Esto fué descubierto por 2 diferentes ingenieros franceses aproximadamente al mismo tiempo (1840), desde entonces su uso se ha ido incrementando.

\* Galvanizado es un proceso donde se limpia el acero de toda impureza superficial y entonces es sumergido en un baño de Zn fundido.

El zinc fundido al solidificarse forma con el acero diferentes capas de aleaciones esto dependiendo de la técnica del recubrimiento utilizada.



**PRINCIPALES METODOS DE APLICACION DE RECUBRIMIENTOS DE ZINC.**

(1,2,3,4,5)

- 1.-Galvanizado por inmersión en caliente.
- 2.- Galvanizado en línea continua.
- 3.- Electro galvanizado.
- 4.- Sherardizado.
- 5.-Zinc Plating.
- 6.- Zincado por proyección.
- 7.-Recubrimientos ricos en zinc.

1.-GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE.-Este es uno de los principales métodos usados para el recubrimiento de acero donde se puede aplicar el zinc a partes muy diferentes de acero, desde extraordinariamente pequeñas como tuercas, pernos, hasta la fabricación de largas piezas como pequeñas; tanques, recipientes, torres de transmisión, contracarriles, cables submarinos, etc.

Una gran cantidad de acero se galvaniza para protegerlo contra la corrosión. El galvanizado por inmersión en caliente forma aleaciones con el acero, lo cual proporciona una máxima adhesión entre los metales.

Como en todo proceso de recubrimiento, la superficie de el metal base será limpiada, con esto asegurandose satisfactoriamente la continuidad del recubrimiento.

El galvanizado por inmersión en caliente requiere que la superficie sea limpiada particularmente en la entrada del baño.

La excesiva contaminación de la superficie con algun material no debe de ser tolerada y debe de ser removida con removedor ácido, limpiador alcalino siendo un tratamiento anterior a la introducción al baño.

En el caso de operaciones continuas que incluye un recocido u otro tratamiento térmico para conservar la limpieza en la lámina debe estar bajo la protección del horno, preferentemente una atmosfera reductora.

Los efectos de los elementos en el galvanizado son: (4)

**Plomo.** - En ciertos porcentajes es necesario para la producción de un terminado de lentejuelas o floreado en la superficie del galvanizado. En cantidades de exceso estara en solubilidad con el zinc alrededor del 1%, éste exceso asegura la base del recubrimiento o la escoria que se forma durante éste.

**Antimonio.** - En pequeñas cantidades éste ayuda a producir una disminución en el hojelado o floreado.

**Estaño.** - En adiciones del 0.3% al 1.5% fué utilizado para producir un floreado escarchado en los recubrimientos de

galvanizado convencionales.

**Aluminio.** - En adiciones desde 0.1 hasta 0.25% incrementan la adherencia del recubrimiento del galvanizado. La adición no debe ser usada junto con alguno de los flux de cloruro ( $ZnCl_2 \cdot 3NHCl$ ) en la superficie del baño de zinc fundido. El aluminio es rápidamente removido del baño por el flux como  $AlCl_3$ , el cual es altamente volátil a temperaturas del galvanizado.

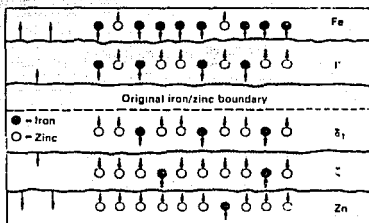
Una pequeña cantidad de fierro está siempre presente en el baño del galvanizado por inmersión en caliente.

El exceso disminuye gradualmente el límite de solubilidad y se va hacia el fondo del recipiente del baño como escoria, una aleación de Fe-Zn conteniendo de 3 a 7% de fierro.

**Silicio.** - Generalmente va contenido en el acero, pero si éste está en el baño no afecta el recubrimiento del baño, solo mejora las propiedades del recubrimiento.

El baño del galvanizado se efectúa en el rango de 450 a 470°C.

Cuando el acero es sumergido en el baño del galvanizado los átomos de zinc inician inmediatamente a difundir internamente dentro de las rejillas del fierro y los átomos de fierro se mueven externamente. Debido a la diferencia en los puntos de fusión la movilidad de los átomos de zinc es más grande que la de los átomos de fierro. Una serie de capas de aleación se muestra en la siguiente figura.



Representación de la difusión de hierro y zinc a través de las capas de aleación. (5)

TIPOS DE ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN EL GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE. (5)

De las tres fases de interés, gama ( $\gamma$ ) contiene 72-79% de Zinc, está a su vez está formada por tres compuestos  $FeZn_2$  con 83.1% de zinc,  $Fe_3Zn_{10}$  con 79.6% de zinc y  $FeZn_5$  con 77.9% de zinc. La capa gama ( $\gamma$ ) cristaliza en el sistema cúbico, está es siempre delgada.

La capa delta ( $\delta$ ) contiene 87-93% de zinc compuesta de  $FeZn_{10}$  con 89.2% de zinc y  $FeZn_{10}$  con 92.1% de zinc. Está cristaliza en el sistema hexagonal, está capa se subdivide en una zona formada por

granos finos coherentes cerca de ( $\gamma$ ) y de una zona con granos columnares perpendiculares a la superficie del acero.

La capa zeta( $\zeta$ ) con 94% de zinc, cristalizando en el sistema monoclinico, está compuesta de granos columnares.

La capa eta( $\eta$ ) con un 100% de zinc, cristaliza en el sistema hexagonal, con un .003% máximo de hierro permitido.

En la siguiente micrografía se muestran las diferentes capas en el recubrimiento.

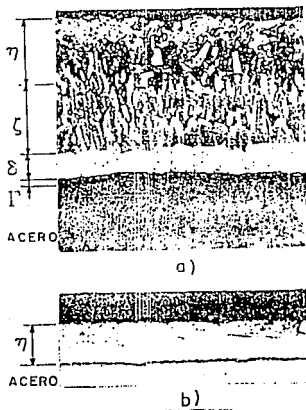


Fig. 3 Micrografías del recubrimiento del galvanizado. a) discontinuo; b) continuo. (2).

Marco Teórico.

Capa	Aleación	NFe	P. fus. °C	Estructura Micro Cristalina	Dureza cas.	Característi- cas.
Eta(η)	Zinc	.03	419	Hexagonal	70-72	Blando, dúctil
Zeta(ζ)	FeZn <sub>19</sub>	5-6.3	580	Monoclinica	175-185	Frágil.
Delta(δ)	FeZn <sub>7</sub>	7-11	590-670	Hexagonal	240-300	Dúctil.
Gamma(γ)	Fe <sub>9</sub> Zn <sub>10</sub>	20-27	670-780	Cúbica	.....	frágil.
Acero	Fe	.....	1510	Cúbica	150-175	.....

Fig. 4 Propiedades de la capa de aleación del acero galvanizado por inmersión en caliente. (3).

Las estructuras del recubrimiento de zinc y el espesor dependen de : (2)

- 1.- La composición del acero y del baño.
- 2.-Temperatura.
- 3.-Tiempo en el baño.
- 4.- Tersura de la superficie.

Y otros factores los cuales estan bajo el control del proceso de galvanizado.

Así el recubrimiento tiende a ser depositado en superficies rugosas o bordes de grano del acero.El espesor total de las

capas de aleaciones tienden a ser ligeramente poco gruesas en las esquinas y en áreas similares como en los huecos.

El espesor del recubrimiento puede ser controlado por el prolongado tiempo en el baño y la velocidad con la cual es retirado.

Cuando se requiere que el recubrimiento sea delgado, el Zn es mecánicamente quitado desde la superficie.

#### REPRESENTACION DEL DIAGRAMA DE FASES Fe-Zn. (2) y (4)

Para un mayor entendimiento de las características del recubrimiento de galvanizado por inmersión en caliente es necesario recurrir al diagrama de equilibrio de fases.

El diagrama que se presenta en la figura no es el real este fue obtenido por Hansen(2) quien realizó una serie de trabajos experimentales de difusión en estado de pares en estado sólido, a pesar de que el diagrama real es algo mas complicado este diagrama propuesto fue comprobado mediante un análisis térmico diferencial

donde se obtuvieron explicaciones satisfactorias de las características metalúrgicas de los recubrimientos por galvanizado cuya consecuencia son las capas del recubrimiento que se mostrarán anteriormente en la fotomicrografía.

Otro diagrama fué desarrollado por J. Schram en 1938 siendo éste más completo, dado que en el anterior falta el fragmento correspondiente a la fase  $\epsilon$ ( $\gamma$ ).

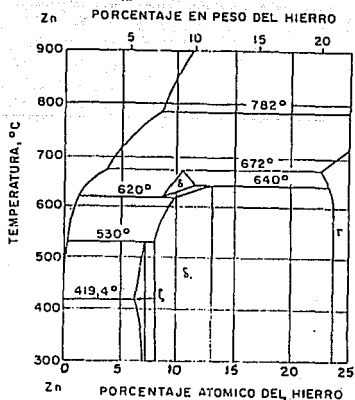


Fig. 5 Diagrama de equilibrio del Fe-Zn. Comprobado por el análisis Térmico Diferencial. (2).





Fig. 6 Micrografía de la capa de aleación en acero galvanizado por inmersión en caliente a 500X. (8)

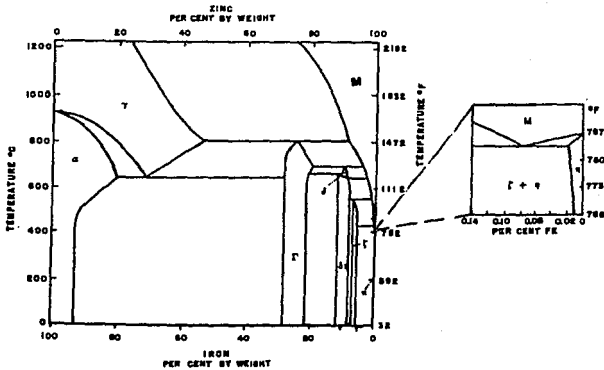


Fig. Constitución del diagrama Fe-Zn planteado por J. Schramm. (4).

Una desventaja del galvanizado por inmersión en caliente es la posibilidad de que la estructura de acero se deforme debido al calor del baño del galvanizado .

**GALVANIZADO EN LINEA CONTINUA**(4.2.3.4.5). -Es un proceso de galvanizado por inmersión en caliente desarrollado en 1930, mediante el cual rollos de lámina de acero podrían ser continuamente sumergidos. Una pequeña cantidad de aluminio del orden de 0.1% a 0.2% es adicionada en el baño de zinc, lo cual proporciona un recubrimiento esencialmente sin aleaciones de Fe-Zn.

Por lo general toda la lámina galvanizada por inmersión en caliente utilizada en la fabricación de construcciones es producida por el método de inmersión en línea continua. Aproximadamente 6.5 millones de toneladas de acero al año son recubiertas por éste proceso.

El peso del recubrimiento por éste proceso varía desde  $839.15 \text{ g/m}^2$  hasta  $152.57 \text{ g/m}^2$  ( $2.75 \text{ onz. de Zn /ft}^2$  hasta  $0.5 \text{ onz. Zn/ft}^2$ ).

En el caso de láminas galvanizadas,  $810 \text{ g/m}^2$  referida a ambos lados de la placa. Esto es igual a  $305 \text{ g/m}^2$  por cada superficie.

Como se puede observar en la siguiente micrografía. El pequeño recubrimiento obtenido por un galvanizado en continuo. Este recubrimiento está formado de una capa de  $Fe_2Al_5$  cubierta con una capa de zinc.

El espesor total del recubrimiento es usualmente de  $25\mu m$ . este recubrimiento es considerado más flexible y capaz de soportar una gran deformación.

El espesor del recubrimiento es también controlado por rodillos de acero.

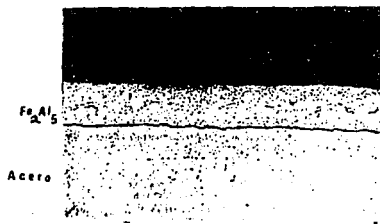


Fig.7 Fotomicrografía del acero galvanizado en continuo. (1).

La introducción de este tipo de materiales en el mercado, fué un gran éxito y la demanda se incremento a un ritmo muy elevado.

3. - Electro galvanizado, z, s. -Es esencialmente un proceso electrolítico donde el baño se efectua por debajo de los 65°C. Este proceso da como resultado una delgada capa de recubrimiento de zinc puro el cuál tiene excelente adherencia. Este recubrimiento es pulido o terso, libre de bordes.

El recubrimiento en el rollo o en la lámina generalmente tiene un peso del recubrimiento de aproximadamente 18.308 g/m<sup>2</sup> a 61.02 g/m<sup>2</sup> (0.06 a 0.2 onzas/ft<sup>2</sup>).

Esto es un espesor de 0.0127mm a 0.004318 mm (0.0005 a 0.00017 pulgadas) en cada lado de la lámina.

El electrolito usado es basicamente una solución de sulfato de zinc o cloruro de zinc, otras sales le son adicionadas para mejorar la conductividad. Los ánodos son de alta pureza de aproximadamente 99.99% de zinc y el voltaje aplicado es de 12 volts con una densidad de corriente desde 1300 a 2700 A/m<sup>2</sup>.

El depósito es retirado mecanicamente, enjuagado y es pasado atraves de un baño de ácido fosfórico para que tenga una delgada película de fosfato de zinc la cual forma una buena base para pintar u otro acabado. Después del tratamiento de ácido fosfórico

es enjuagado y es sumergido en una solución diluida de ácido crómico la cual pasiva la superficie del zinc y proporciona una mayor protección durante el subsecuente manejo y almacenamiento. Para algunas aplicaciones el ácido fosfórico es omitido y solo el ácido crómico es utilizado.

El electrogalvanizado puede ser fácilmente preparado para recibir un recubrimiento orgánico. Muchos recubrimientos orgánicos tienen buena adhesión a la capa de zinc

El electrogalvanizado es el más continuo y es aplicado a láminas, alambres, conductores eléctricos y etc.

4.-Sherardizado. - Este recubrimiento es obtenido por difusión en la fase sólida donde las piezas de acero se colocan en un tambor rotatorio con polvo de zinc y se lleva a una temperatura de 320 a 380°C. Manteniendo estas piezas en movimiento durante varias horas se forman las mismas capas de aleación que por inmersión en caliente, pero a diferencia de la anterior no existe la capa exterior de zinc. Este proceso es para partes pequeñas (tubos, conductos, tuercas, pernos). Este proceso fué comunmente utilizado a principios de siglo

5. - Zinc Plating. -Este proceso es similar al de electrogalvanizado, pero a diferencia éste no es un proceso continuo si no que es intermitente. El espesor de zinc también puede ser controlado por el proceso y por el tiempo del baño.

Este es un método efectivo de aplicación de zinc para pequeños objetos.

El recubrimiento es de un color gris opaco y tiene un terminado mate, siendo éste recubrimiento de zinc puro de una composición uniforme. Siendo éste adherente por medio del enlace metal-metal y éste no forma aleación.

6. - Zincado por proyección (rociado de zinc). -Es un proceso donde el zinc es fundido en el revolver del atomizador y es atomizado y proyectado sobre la superficie del acero.

El acero es usualmente limpiado con polvo soplado. El atomizado de zinc es aplicado tan pronto como es posible, después la superficie tiene que ser preparada en orden para la oxidación-reducción del acero, esto asegura un efectivo enlace metal-metal. El enlace puede ser afectado por la oxidación y por la temperatura del acero en el tiempo de aplicación del atomizado.

7.-Recubrimientos ricos en zinc. -Las superficies metálicas del acero se recubren utilizando pinturas que contengan suficiente polvo de zinc para dar lugar a una película suficientemente protectora.

## CAPITULO III.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL :

#### METODOLOGIA.

##### PRUEBAS DE CARACTERIZACION:

Se efectuaron las siguientes pruebas de caracterización para el acero galvanizado por inmersión en caliente.

Está muestra de acero galvanizado por inmersión en caliente fué proporcionada por la Cia. Panamericana de Tubos y Galvanización.

S. A. de C. V.

##### Masa del recubrimiento.-

En este experimento se cuantifico el zinc existente en la masa del recubrimiento de el galvanizado por unidad de área del acero y



se expresa en  $(\text{gr}/\text{m}^2)$ .

Esta prueba estuvo basada en la norma ASTM A90-69. La cual consistió en:

Las 3 probetas fueron desengrasadas con tricloroetileno, después alcohol y se secaron totalmente.

Las probetas fueron pesadas, después fueron sumergidas en una solución de ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) y cloruro de antimonio ( $\text{SbCl}_3$ ) y mantenidas aquí hasta que ceso el desprendimiento de hidrógeno y solamente tuvieron lugar unas burbujas. Aproximadamente estas probetas estuvieron sumergidas entre 15 y 30 segundos.

Se lavaron las probetas bajo un chorro de agua, se tallaron con un cepillo y se secaron totalmente.

Se Pesaron de nuevo las probetas y se utilizo la fórmula siguiente.

$$C = (W_1 - W_2) / A * K$$
 Para obtener el peso del recubrimiento en  $(\text{gr}/\text{m}^2)$ .

**Espesor del recubrimiento.**

Para conocer el espesor del recubrimiento se utilizo el valor de el peso del recubrimiento y basandose en la tabla A1(conversión de el peso del recubrimiento de zinc a espesor del recubrimiento) de la norma mencionada anteriormente. Se obtuvo el valor del espesor.

**Ensayo Preece.**

Este ensayo se baso en la norma (ASTM A239-73.). Este se utilizo para determinar la porción más delgada del recubrimiento o la porosidad de éste .

Esta prueba consistio en una disolución oxidante del zinc por los iones de cobre obtenidos de una solución de sulfato de cobre ,estos iones fueron sustituyendo en la capa al depósito de zinc

El procedimiento fué el siguiente:

\*Se desengraso la probeta con acetona o cloroformo. después se lavo con agua y se seco totalmente.

\* Se sumergio en una solución de hidroxido de cobre  $\text{Cu(OH)}_2$  y óxido de cobre( $\text{CuO}$ ) durante un minuto.

\* Se seco la probeta y después del minuto transcurrido se enjuago y tallo con un capillo o fibra y se volvió a sumergir subsecuente- mente hasta que el depósito de zinc fué sustituido totalmen- te por el depósito de cobre y al lavar y tallar la probeta no se retiro el depósito de la superficie del acero.

El resultado de esta prueba fué el número total de inmersio- nes.

Si la sustitución del depósito de zinc por el de cobre es rápida se entenderá que la capa del recubrimiento está muy poro- sa y si este es prolongado el recubrimiento será compacto

#### PARA ACERO ELECTROGALVANIZADO.

Las pruebas de caracterización fueron idénticas que en las de el acero galvanizado por inmersión en caliente.

Esta muestra es comercial.

VARIACION DEL POTENCIAL DE CORROSION CON EL TIEMPO.

PARA EL ACERO POR INMERSION EN CALIENTE Y EL ACERO ACERO ELECTROGALVANIZADO.

Se cortaron los electrodos a  $2 \text{ cm}^2$  para el acero galvanizado por inmersión en caliente y  $1 \text{ cm}^2$  para el electrogalvanizado.

Se montaron en resina Epoxi Araldit PY-6010, como se muestra en la figura (8 ). Se desengrasaron con tricloroetileno, en seguida se enjuagaron con acetona y agua destilada, y se secaron totalmente.



ELECTRODO DE TRABAJO

- 1.-ACERO GALVANIZADO 2cm<sup>2</sup>.
- 2.- RESINA ACRILICA EPOXI AISLANTE
- 3.- CABLE DE COBRE.
- 4.- TUBO DE VIDRIO.

figura 8 Electrodo de trabajo.

Se tomaron tres probetas y se sumergieron en un medio corrosivo de  $\text{NaCl}$  0.5M determinandose la variación del potencial de corrosión con el tiempo. Estas mediciones se efectuaron diariamente con ayuda de un multímetro digital y un electrodo de referencia de calomel saturado hasta que se obtuvo el potencial de corrosión de  $-900\text{mv}$  el cual pertenece al acero.

en la figura se muestra el sistema de trabajo para estas mediciones.

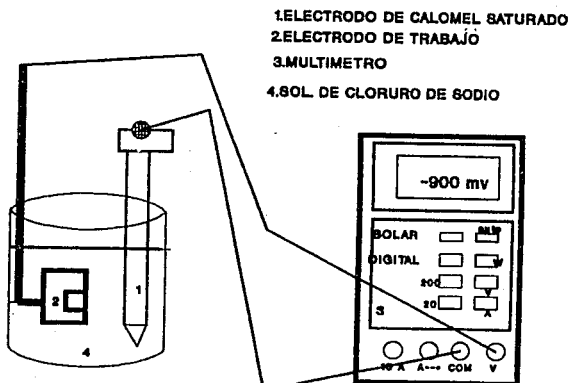


Fig. 9 Sistema de trabajo para las mediciones de potencial de corrosión contra tiempo.

### MEDIDAS DE POLARIZACION.

Se utilizó una celda de vidrio de 5 bocas, de un litro.

Las mediciones fueron hechas barriendo potenciales anódicos con un potenciostato (EGG Parc modelo 278). El potenciostato estaba conectado através de una interfase (IEEE 488) a una computadora APPLE II e. La cual mediante un software adecuado controlaba el experimento.

Se realizó un barrido de potencial desde -1100mv hasta 200mv con referencia al electrodo de referencia de calomel saturado (ESC)

Se utilizaron tres electrodos; uno de acero galvanizado el de trabajo, el segundo de calomel saturado y el tercero de grafito como contraelectrodo. Estos fueron sumergidos en una solución de NaClO.5 M como se muestra en la figura.

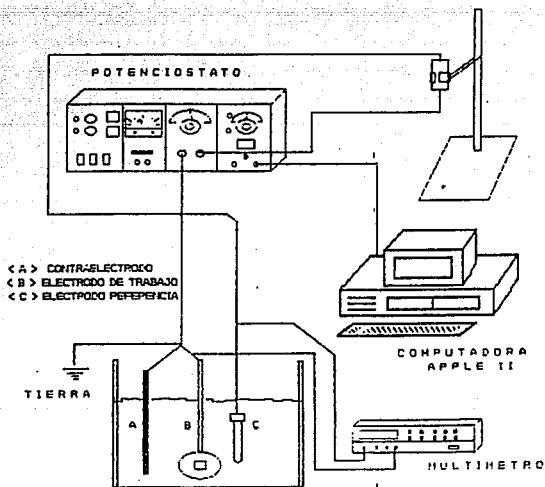


Fig. 10 Sistema de medición para curvas de polarización.

También en lugar de la computadora se utilizó el generador de barrido Vimar GB-06, y un graficador, donde en estos se ajustaron las condiciones de trabajo.

**Metalografía para el acero galvanizado por inmersión en caliente y acero electrogalvanizado.**

A un electrodo de trabajo de acero galvanizado por inmersión en caliente y electrogalvanizado se le hizo un corte transversal, se desbastó, se lijó desde lija 240 hasta lija 600, se pulió hasta espejo, se le hizo un ataque con nital 4% y  $\text{CrO}_3$  mas  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  para poder observar las diferentes capas del recubrimiento, a 50,100, y 400 aumentos y se compararon con las de la bibliografía.

**ANALISIS DEL ACERO GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE EN EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.**

Se prepararon las muestras de  $1\text{mm} \times 3\text{mm}$  y con una altura de  $0.5\text{mm}$ , previamente pulidas a espejo.

Se hizo un análisis de la microestructura del recubrimiento y composición del acero galvanizado por inmersión en caliente por medio de un microscopio electrónico de barrido (SEM-EDAX):

- a) Cuando la pieza es nueva.
- b) Cuando ésta ha estado en un medio corrosivo ( $\text{NaCl}$ ) un determinado tiempo y haya sufrido un cambio apreciable en el potencial de corrosión.



## CAPITULO IV.

### RESULTADOS EXPERIMENTALES.

#### RESULTADOS.

La parte experimental se dividió en las siguientes secciones.

#### CARACTERIZACION:

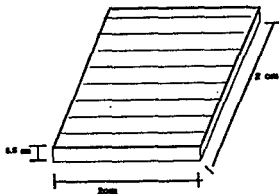
\*Para acero por inmersión en caliente:

#### MASA DEL RECUBRIMIENTO.

Esta fué obtenida siguiendo la norma ASTM A90-69.

Donde el área total del recubrimiento es  $A_T$ .

LAMINA DE ACERO GALVANIZADO



Resultados Experimentales.

$$A_T = 2(2 \times 2) + 2(2 \times 0.5) = \underline{10 \text{ cm}^2} \quad \text{Área total del recubrimiento.}$$

$$\text{Haciendo una conversión } 10 \text{ cm} \times (10 \text{ mm} / 1 \text{ cm})^2 = \underline{1000 \text{ mm}^2}$$

$$W_1 = 16.6321 \text{ g} \quad \text{peso antes de realizar la prueba.}$$

$$W_2 = 15.4696 \text{ g} \quad \text{peso después de la prueba.}$$

Utilizando la fórmula de la norma.

$$C = \frac{(W_1 - W_2) \times K}{A_T} = \frac{(16.6321 - 15.4696) \text{ g} \times 1 \text{ E} + 6 \frac{\text{m}^2}{\text{mm}^2}}{1000 \text{ mm}^2} =$$

Por tanto :

$$\underline{C = 1162.5 \text{ g/m}^2} \quad \text{masa del recubrimiento total de la placa del acero galvanizado por inmersión en caliente.}$$

$$\text{ó } \underline{C = 0.11625 \text{ g/cm}^2}.$$

ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

Con base a la norma A90-89 y en su tabla A1 el espesor puede ser inferido como:

Si para  $130 \mu\text{m}$  el peso del recubrimiento es de  $915.5 \text{ g/m}^2$ .

Por lo tanto  $130 \mu\text{m} \text{-----} 915.5 \text{ g/m}^2$

$X \text{-----} 1162.5 \text{ g/m}^2$

$X = 165.07 \mu\text{m}$  Espesor del recubrimiento del  
acero galvanizado por inmersión  
caliente.

ENSAYO PREECE (NORMA ASTM A239-73).

El depósito de zinc fué sustituido totalmente por el del  
cobre a las 35 inmersiones.

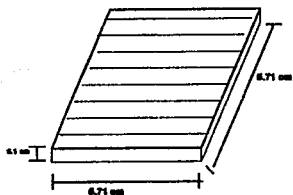
CARACTERIZACION:

•Para acero electrolgalvanizado:

MASA DEL RECUBRIMIENTO.

Donde el área total del recubrimiento es  $A_T$ .

LAMINA DE ACERO ELECTROGALVANIZADO



$$A_T = (87.15 \text{ mm})^2 \times 2 = 6532.245 \text{ mm}^2.$$

$w_1 = 14.7010 \text{ g}$  peso antes de realizar la prueba.

$w_2 = 14.072 \text{ g}$  peso después de la prueba.

Utilizando la fórmula de la norma.

$$C = \frac{W_1 - W_2}{A_T} * K = \frac{(14.7010 - 14.072) \text{ g}}{6532.245 \text{ mm}^2} * 1E+6 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}^2} = \underline{96.2303 \text{ g/m}^2}$$

C = 0.00962303 g/cm<sup>2</sup>. Masa del recubrimiento del acero electrogalvanizado.

#### ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

Con base a la norma el espesor puede ser inferido dentro del rango de 22 - 11 μm.

$$\text{Por lo tanto } m = \frac{22 - 11}{152.6 - 76.3} = \underline{0.1441.}$$

Suponiendo variación lineal del peso del recubrimiento contra el espesor en ese intervalo.

$$Y = mx = 0.1441 * 96.2303 = \underline{13.8667 \text{ } \mu\text{m}}. \text{ Espesor del recubrimiento del acero galvanizado por inmersión en caliente}$$

## ENSAYO PREECE.

El depósito de zinc fué sustituido totalmente por el del cobre a las 13 inmersiones.

## MEDIDAS DE POTENCIAL DE CORROSION CON EL TIEMPO.

\*Para el acero galvanizado por inmersión en caliente.

MUESTRA	t(DIAS)	Ecorr(mv)	
1,2,3	0	-1005	
"	1	-1004	
"	2	-1004	
"	3	- 992	
"	4	-1005	
"	7	- 992	
"	8	- 992	
"	9	- 992	
"	10	-0991	
"	11	- 992	
"	14	- 976	$E_{corr}$ de la capa zeta( $\zeta$ ).
"	15	- 989	

Resultados Experimentales.

"	16	- 991
"	17	-1000
"	18	-1006
1,2,3	21	-1006
"	22	-1005
"	23	-1004
"	24	-1003
"	25	-1003
"	28	-1002
"	29	-1006
"	30	-1003
"	31	-1007
"	32	-1001
"	35	-1000
"	36	-1000
"	37	-1000
"	38	-1001
"	39	-1002
"	42	-1000
"	43	-1000.3
"	44	-1000.3
"	45	-1001
"	46	-1000
"	49	-1004.6
"	50	-1005.6
"	51	-1005.3

Resultados Resultados.

"	52	-1004.6	
"	53	-1004.3	
"	55	-1003	
"	57	-1004	
"	58	-1003.6	
"	59	-1003.3	
"	62	- 995	
"	63	- 991	
"	64	- 990	
"	65	- 993	
"	66	- 987.8	E <sub>corr.</sub> de la capa delta( $\delta$ ) de granos columnares.
"	69	- 990	
"	70	- 992	
"	71	- 987	
"	72	- 979	
"	73	- 960	E <sub>corr.</sub> de la capa delta( $\delta$ ) de granos finos coherentes.
"	76	- 963.6	
"	77	- 962.3	
"	79	- 963.6	
"	80	- 951	
"	83	- 951	E <sub>corr.</sub> de la capa gama( $\gamma$ ).
"	84	- 962	
"	85	- 964	
"	86	- 950	
"	87	- 953	
"	90	- 949	
"	91	- 900	E <sub>corr.</sub> de el acero.



**Resultados Experimentales.**

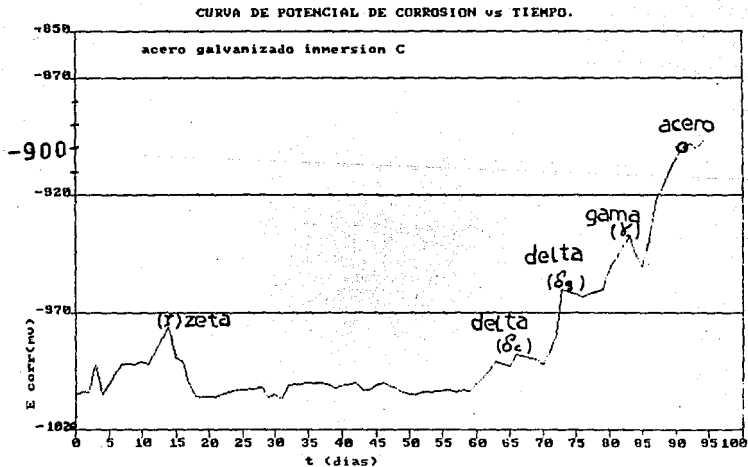
---

"	92	- 898
"	93	- 898
"	94	- 897.5

## Resultados Experimentales

Gráfica 1 Medidas de potencial de corrosión con el tiempo para el acero galvanizado por inmersión en caliente.

Donde observamos los distintos picos que presenta, estos corresponden a las diferentes potenciales de corrosión para cada capa del recubrimiento.



## MEDIDAS DE POTENCIAL DE CORROSION CON EL TIEMPO.

\*Para aceroelectro galvanizado.

MUESTRA	t(DIAS)	Ecorr(mv)
1,2,3.	0	-1051
"	1	-1036
"	2	-1039
"	3	-1033
"	4	-1031
"	5	-1030
"	8	-1025
"	9	-1027
"	10	-1018
"	11	-1017
"	12	-1018
"	15	-1018
"	16	-1019
"	17	-1016
"	18	-1007
"	19	-1016
"	22	-1001.6
"	23	-1001.2
"	24	- 986
"	25	- 980

Resultados Experimentales.

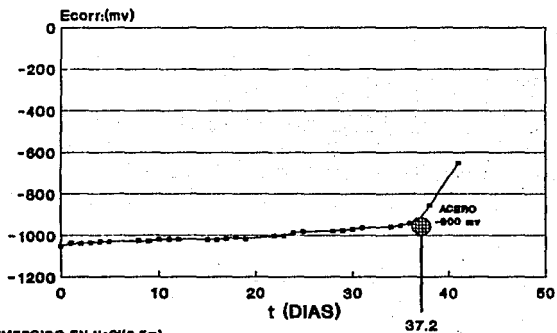
---

"	28	- 978
"	29	- 974
"	30	- 969
"	31	- 962
<hr/>		
"	34	- 958
"	35	- 951
"	36	- 941
"	37	- 933
"	38	- 854
<hr/>		
"	41	- 852

---

Gráfica 2 Medidas de potencial de corrosión con el tiempo,  
para acero electrogalvanizado.

## CURVA DE $E_{corr}$ . VS TIEMPO. ACERO ELECTRO-GALVANIZADO.



SUMERGIDO EN NaCl(0.5m).

MEDIDAS DE POLARIZACION.

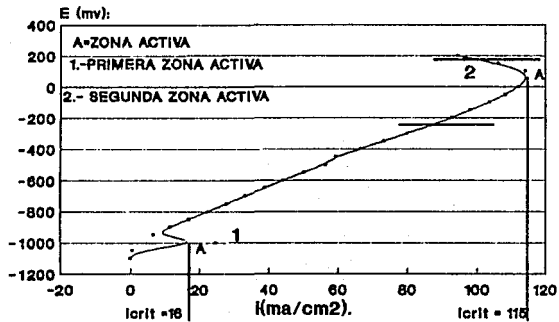
Las curvas de polarización obtenidas para el acero galvanizado por inmersión en caliente y electrogalvanizado.

Estas curvas son de  $E(\text{mv})$  vs  $i(\text{ma}/\text{cm}^2)$ .

Se observo durante estas pruebas que se formaba una película gelatinosa, la cual era mayor para el acero galvanizado por inmersión en caliente.

Gráfica 9

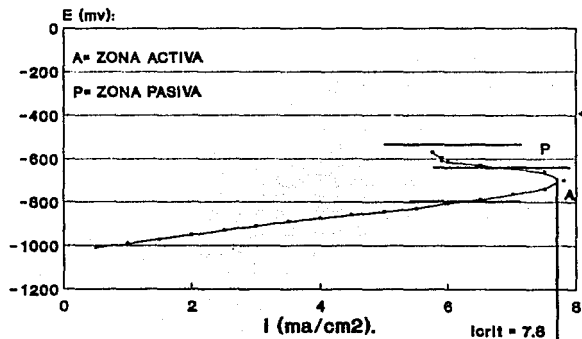
## CURVA DE POLARIZACION ACERO GALVANIZADO INM. CALIENTE.



SUMERGIDO EN NaCl(0.5M).

Gráfica 4.

## CURVA DE POLARIZACION ACERO ELCTROGALVANIZADO

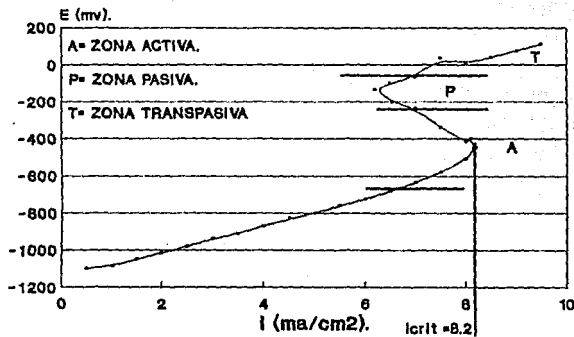


SUMERGIDO EN NaCl(0.5M)



Gráfica 5 .

## CURVA DE POLARIZACION. ACERO ELECTROGALVANIZADO



SUMERGIDO EN NaCl(0.5M).

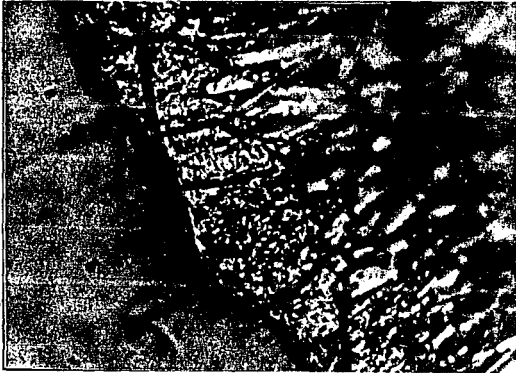
**METALOGRAFIA DE LOS ACEROS GALVANIZADO POR INMERSION EN  
CALIENTE Y ELECTROGALVANIZADO.**

A continuación se presentan las micrografías obtenidas de la metalografía hechas al acero galvanizado por inmersión en caliente y al acero electrogalvanizado.

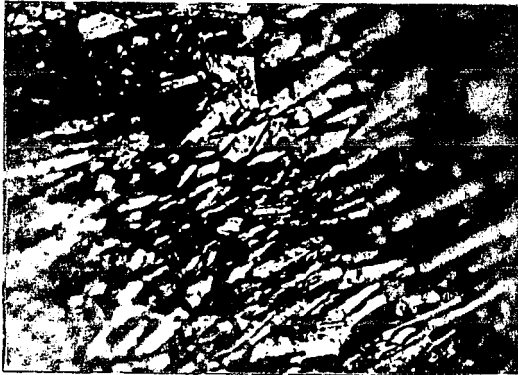
Estas micrografías fueron tomadas a 50, 100, 400 X aumentos respectivamente.

Para el acero galvanizado por inmersión en caliente se tomaron las diferentes microestructuras del recubrimiento como del acero mismo.

Pieza nueva(llegada).



1) Acero galvanizado por inmersión en caliente. En esta se observan dos capas del recubrimiento. la primera es la capa gamma( $\gamma$ ) siendo esta muy delgada y la segunda es la capa delta( $\delta$ ) formada por granos finos coherentes cerca de  $\gamma$ . Esta fue tomada a 400X.



(2) Acero galvanizado por inmersión en caliente. En esta se observa parte de la capa delta(δ) estando formada por granos columnares perpendiculares al acero. Esta fue tomada a 400X

Piiza nueva(llegada).



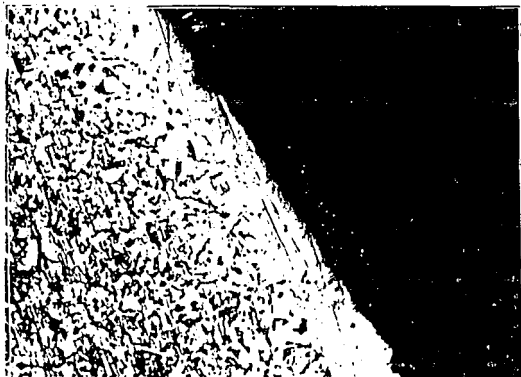
(3) Acero galvanizado por inmersión en caliente. En esta se puede observar la tercera capa zeta( $\zeta$ ) formada por granos columnares más gruesos que en la capa  $\delta$ , también perpendiculares al acero. Esta fue tomada a 400X.

Pieza nueva(llegada).



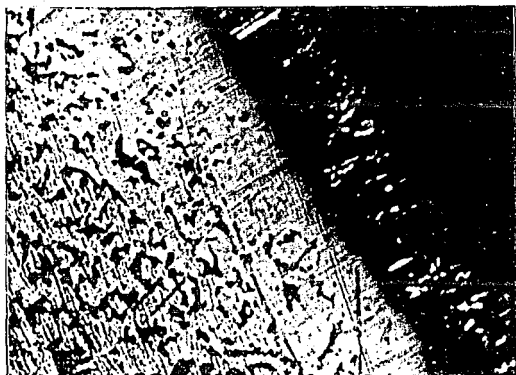
(4) Acero galvanizado por inmersión en caliente. Se observa también parte de la capa zeta( $\zeta$ ) formada de granos columnares un poco más pequeños, también perpendiculares al acero. Está fué tomada a 400X.

Pieza nueva(llegada).



(5) Acero galvanizado por inmersión en caliente. Se observan todas las capas del recubrimiento excepto la capa  $\epsilon$ ( $\eta$ ), también se observa parte del acero teniendo éste una matriz ferrítica y algo de hojuelas de perlita. Está fué tomada a 50X.

Pieza nueva (llegada).



(6) Acero galvanizado por inmersión en caliente. Se observa con mayor definición las capas del recubrimiento y parte del acero excepto la capa  $\epsilon$ ( $\eta$ ). Está fué tomada a 100X.

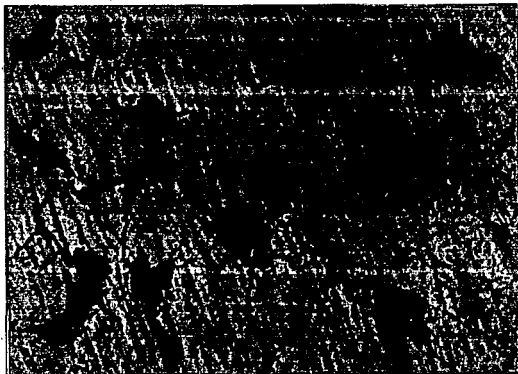


Pieza nueva (llegada).



(7) Acero galvanizado por inmersión en caliente. Se observa todo el recubrimiento y parte del acero excepto la capa esta , a diferencia de la anterior está se desplazo a la derecha y se encontro una discontinuidad en la base del acero,teniendose un mayor espesor. Está fué tomada a 100X.

Pieza nueva(llegada).



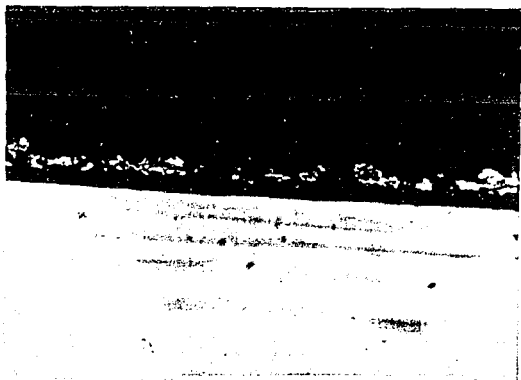
(B) Acero galvanizado por inmersión en caliente. Se observa únicamente el acero, aquí se puede observar con mayor claridad que efectivamente su matriz es ferrítica y con hojuelas de perlita. Está fué tomada a 400X.

Pieza nueva (llegada).



(9) Acero electrolgalvanizado. Se observa la delgada capa del recubrimiento de zinc puro. Esta fue tomada a 400X.

Pieza nueva (llegada).



(10) Acero electrolgalvanizado. Se observa el recubrimiento pero se observa que éste es un poco más delgado que el anterior. Está fué tomada a 400X.

**ANALISIS DEL ACERO GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE EN EL  
MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.**

**PIEZA DE LLEGADA(NUEVA).**

Para simplificar los resultados obtenidos de los análisis de composición, solo se pondrán los parámetros de interés y el espectro de cada uno obtenidos por un software EG& Ortec System 5000 Standardless ZAF Analysis AUTOZAP vers. 3.18.

**\* Primera capa gama .**

(pieza nueva).

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 28000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 322.33 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	10.61	12.20.
Zn	89.39	87.80.

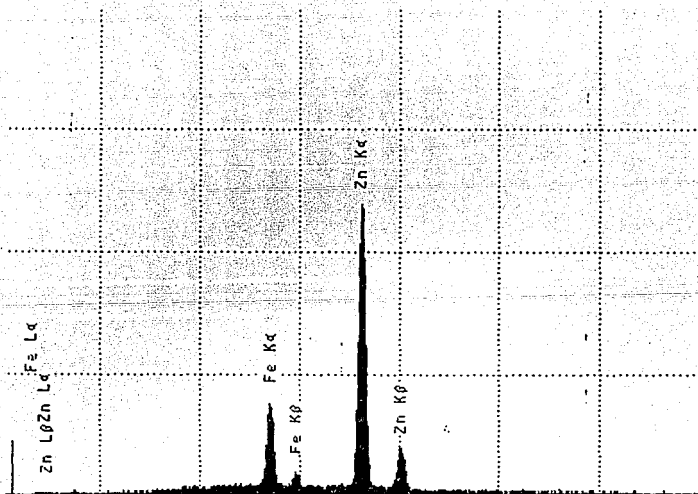


Fig. espectro de la primera capa gama.

Resultados Experimentales.

\* Segunda capa delta.

(pieza nueva)

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 22000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 157.83 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	6.60	7.63.
Zn	93.40	92.37.

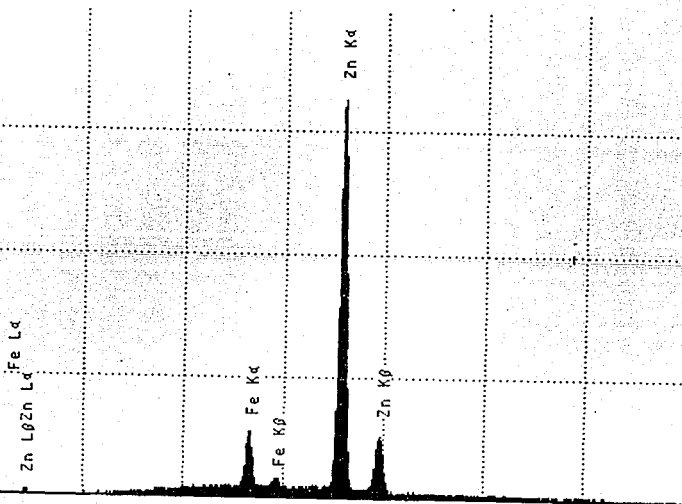


Fig espectro de la segunda capa delta.

Resultados Experimentales.

\* Tercera capa zeta.

(pieza nueva)

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 22000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 153.94 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	3.30	3.84.
Zn	96.7	96.16.

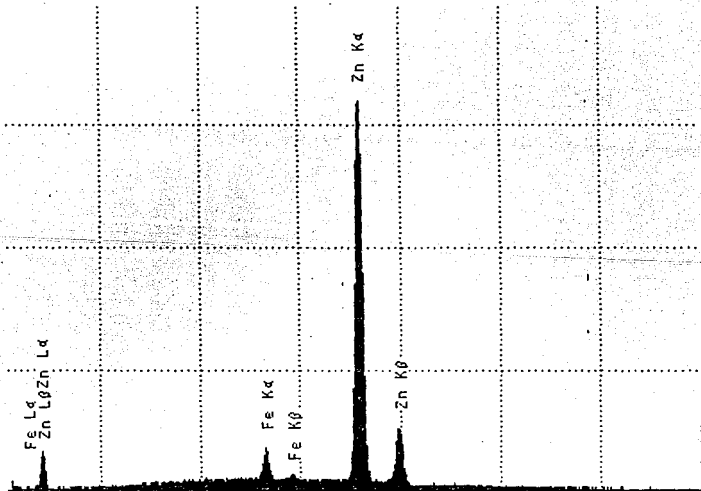


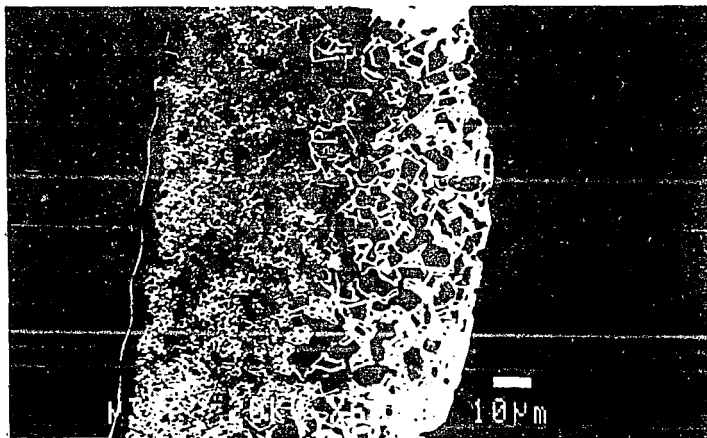
Fig espectro de la tercera capa zeta..



Resultados Experimentales.

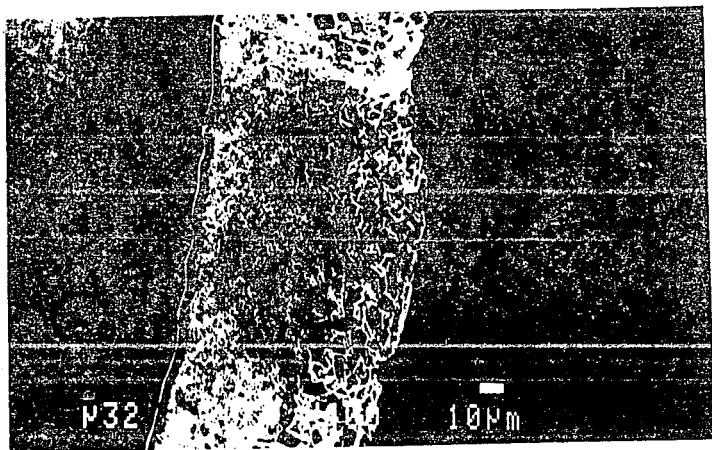
Micrografías del acero galvanizado por inmersión en caliente obtenida en el microscopio electrónico de barrido.

para la muestra de llegada(nueva).



11) Micrografía a 600X Y 20KV. En está se observan las capas de aleación del recubrimiento, excepto la capa eta( $\eta$ ). La capa gama es delgada, la capa delta está formada por granos finos coherentes y la capa zeta por granos columnares gruesos no alargados.

Pieza nueva (llegada).



12) Micrografía a 400X y 20 KV. En esta se observan menos definidas las capas del recubrimiento debido a que se tomo a un menor aumento. También observandose la ausencia de la capa Et(η). Siendo la misma forma de granos que en la anterior.

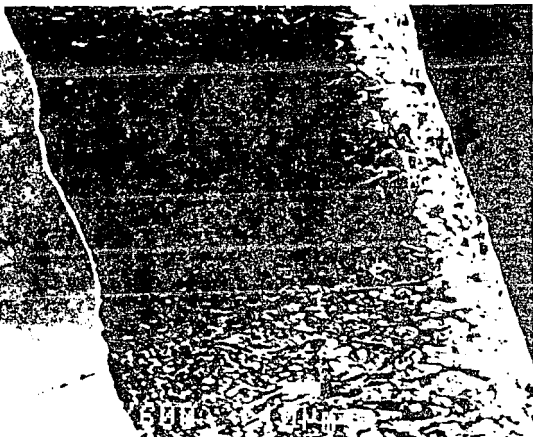
Resultados Experimentales.

Pieza nueva (llegada).



18) Micrografía a 600X y 20 kv. En esta se observan las diferentes capas del recubrimiento más definidas que en las anteriores, excepto la capa (stat?). Siendo la misma forma de granos.

Pieza nueva (llegada).



14) Micrografía a 600X y 20 kv. En esta se observan las capas del recubrimiento perfectamente, excepto la  $\gamma$ , este recubrimiento muestra una microestructura diferente a los anteriores. Aquí la capa  $\gamma$  es delgada, la capa  $\delta$  tiene las dos formas de granos finos coherentes y columnares, la capa  $\zeta$  con sus granos columnares alargados. Siendo esta micrografía la que tiene el recubrimiento más homogéneo que las anteriores.

ANÁLISIS DEL ACERO GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE EN EL  
MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.

PIEZA CORROIDA.

Para simplificar los resultados obtenidos de los análisis de composición, solo se pondrán los parámetros de interés y el espectro de cada uno obtenidos por un software EG& Ortec System 5000 Standardless ZAF Analysis AUTOZAP vers. 3.10.

\* Primera capa gama .

Análisis puntual.

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 33000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 152.41 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	4.87	5.66.
Zn	95.13	94.34.

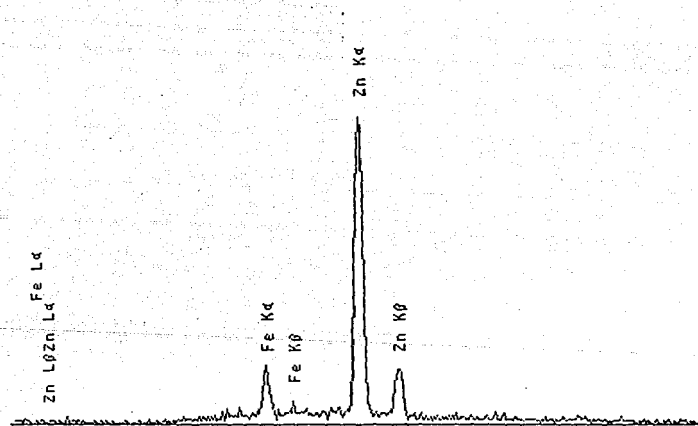


Fig. espectro de la primera capa gama. (pieza corroída). Análisis puntual.

Resultados Experimentales.

\* Primera capa gama .

Análisis lineal. (pieza corroída).

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 33000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 218.85 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	4.30	5.00.
Zn	95.70	95.00.

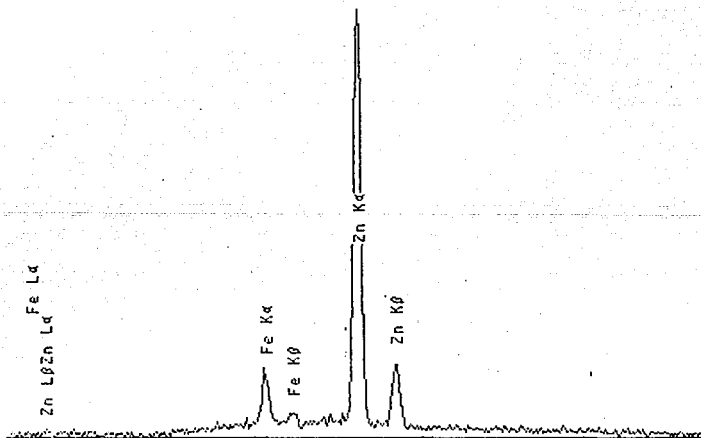


Fig. espectro de la primera capa gama. (pieza corroída). Análisis lineal.

Resultados Experimentales.

\* Segunda capa delta.

Análisis lineal. (pieza corroída).

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 33000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 560.21 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	4.79	5.56.
Zn	95.21	94.44.

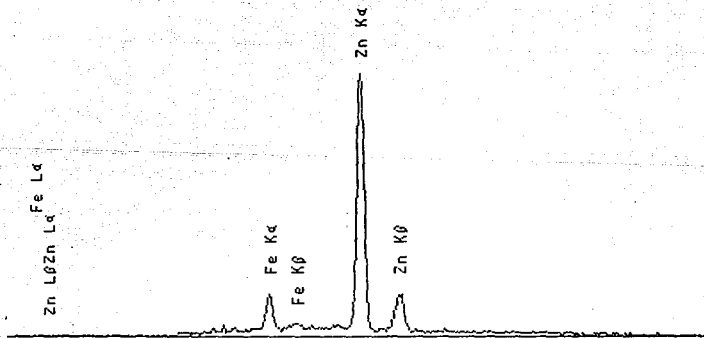


Fig. espectro de la segunda capa delta (pieza corroída). Análisis lineal.



## Resultados Experimentales.

\* Tercera capa zeta.

Análisis puntual. (pieza corroída).

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 33000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 301.31 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	4.64	5.39.
Zn	95.36	94.61.

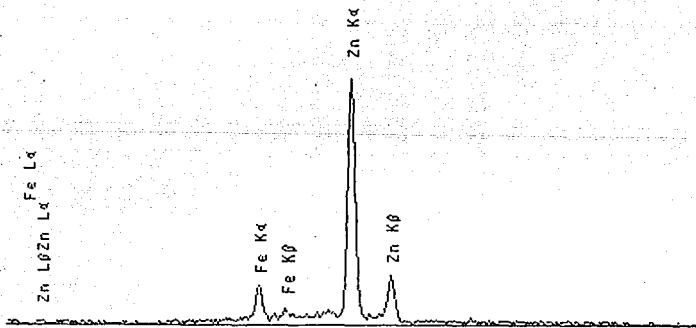


Fig. espectro de la tercera capa zeta (pieza corroída). Análisis puntual.

Resultados Experimentales.

\* Tercera capa zeta.

Análisis lineal. (pieza corroída).

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 33000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 195.03 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	4.48	5.20.
Zn	95.52	94.80.

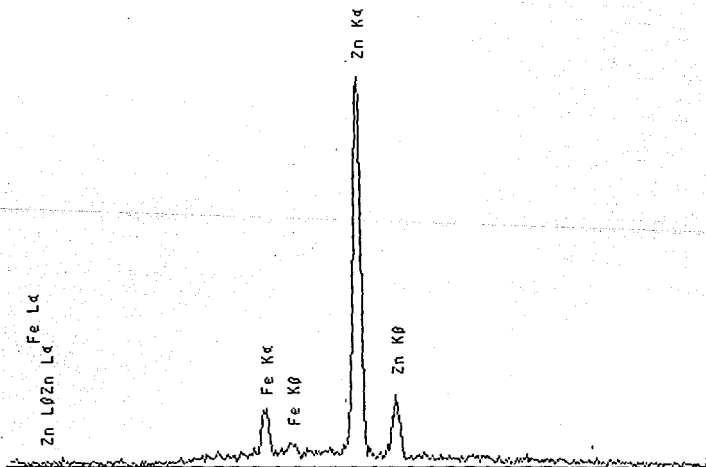


Fig. espectro de la tercera capa zeta (pieza corroída). Análisis lineal.

Resultados Experimentales.

\* Tercera capa zeta, último fragmento.

Análisis lineal. (pieza corroída).

Voltaje de aceleración: 20KV.

Corriente emitida: 33000.000 nAmps.

Tiempo de exposición: 215.76 segundos.

Elemento	% en peso	% atómico.
Fe	0.72	0.64.
Zn	99.28	99.16.

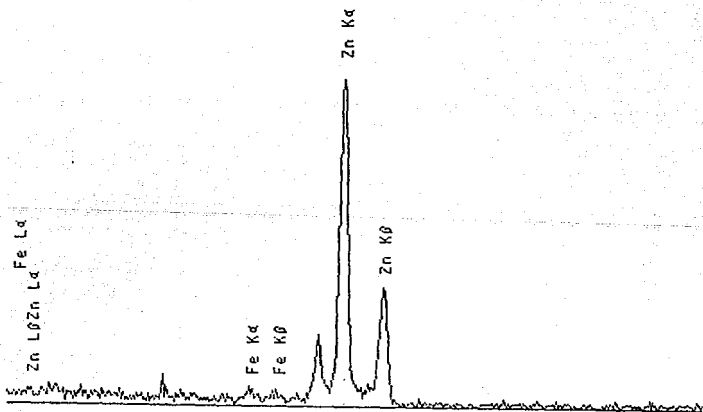
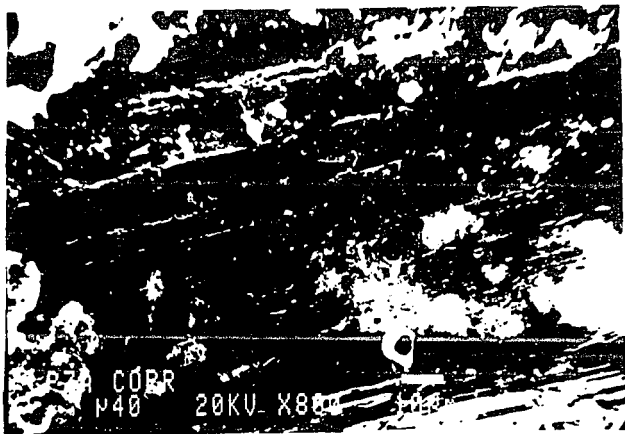


Fig. espectro de la tercera capa zeta. Último fragmento (pieza corroída). Análisis puntual.

Resultados Experimentales.

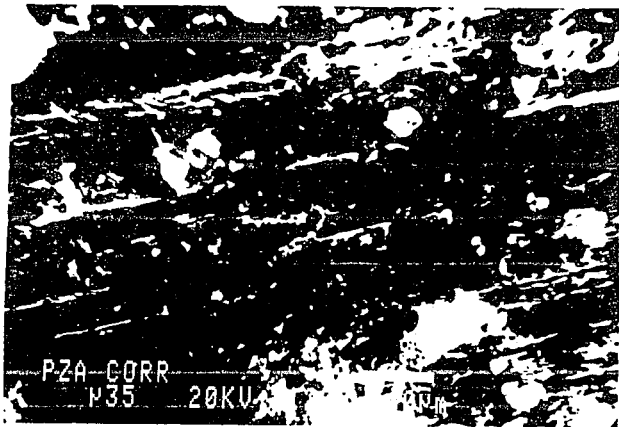
Micrografías del acero galvanizado por inmersión en caliente. Tomadas en el microscopio electrónico de barrido.

Pieza corroída.



Micrografía # 15. a 800X y 20 KV. En está se observo a baja amplificación la capa zeta( $\zeta$ ) observandose las picaduras y producto de corrosión a lo largo de está. Con un potencial de corrosión de -976mv a los 14 días.

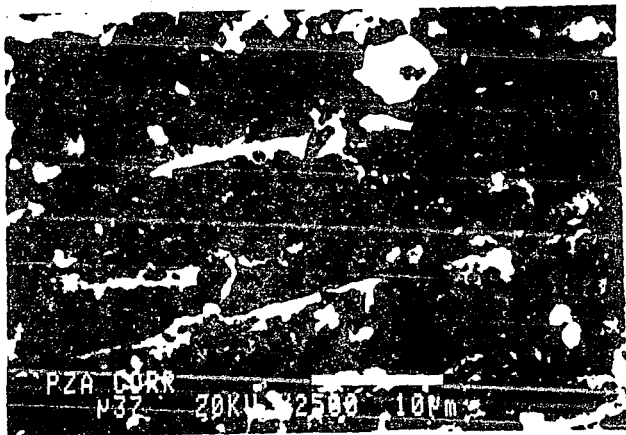
Pieza corroída.



Micrografía # 16. a 1200X y 20 kv. En esta se observa la capa zeta ( $\zeta$ ) donde la corrosión causo muchas picaduras, grietas y productos de corrosión sobre la superficie de la capa.

Con un potencial de corrosión de -976 mv a los 14 días.

Pieza corroida.



Micrografía # 17. a 2500X y 20 KV. En esta se observa también la capa zeta(ζ) pero a una mayor amplificación para distinguir con mayor claridad las picaduras, grietas y productos de corrosión, causados por la corrosión.

Con un potencial de corrosión de  $-976\text{mv}$  a los 14 días.

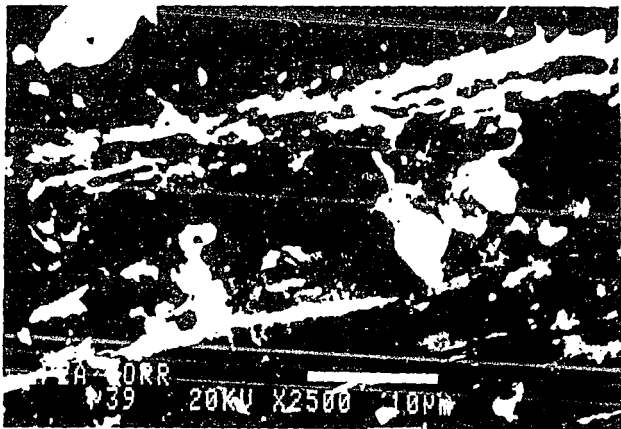
Pieza corroída.



Micrografía # 18. a 1000X y 20 KV. En está se observa una parte de la capa del recubrimiento zeta( ) tomada abajo de la anterior pegada a la capa delta ,mostrando picaduras, grietas y con más producto de corrosión.

Con un potencial de corrosión de -976 mv a los 14 días.

Pieza corroída.



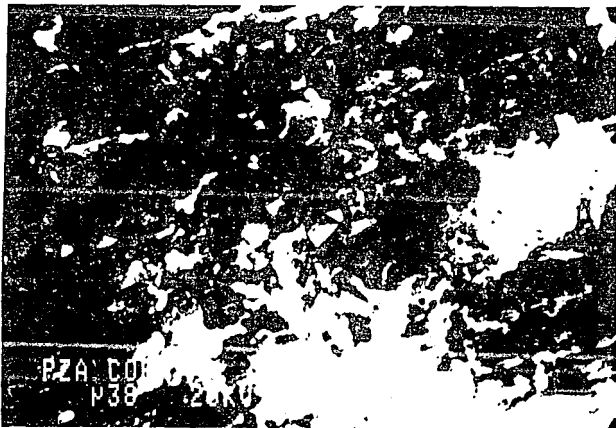
Micrografía # 39 a 2500X y 20 KV. Esta pertenece a la capa delta

(δ) que estaba formada por los granos columnares. En esta zona observamos que la corrosión es más pronunciada que en las anteriores ya que los huecos son mucho más profundos, la superficie está más corroída y con bastante producto de corrosión.

Con un potencial de corrosión de -987 mv a los 63 días.

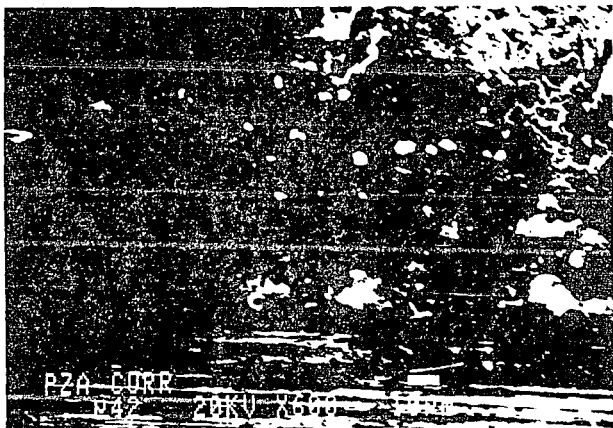


Pieza corroida.



Micrografía # 20. a 2500X y 20 KV. Está pertenece a la zona formada por los granos finos coherentes de la capa delta(δ). En está se observa que la superficie está también corroida pero no como la zona columnar, pero si con más producto de corrosión. Con un potencial de corrosión de -960 mv a los 78 días.

Pieza corroída.



Micrografia # 21. a 600X y 20 KV. En está observamos a baja amplificación la capa gamma( $\gamma$ ) y el acero donde, estos no están tan corroídos como las capas anteriores.

Con un potencial de corrosión de  $-95\text{mV}$  a los 83 días para la capa y de  $-900\text{mV}$  a los 94 días para el acero.

Pieza corroída.



Micrografía # 22. a 800X y 20 KV. En está a mayor amplificación la capa gama(?) y el acero donde aparecen productos de corrosión, alguna que otra picadura y donde el acero sufrió poco daño. Con un potencial de corrosión de -951mv a los 89 días para la capa gama y de -900 mv a los 91 días para el acero.

Resultados Experimentales.

Tabla de comparación de resultados del análisis de composición para el acero galvanizado por inmersión en caliente en el microscopio electrónico de barrido.

**TABLA DE ANALISIS DE COMPOSICION  
 DEL  
 ACERO GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE  
 EN EL MICROSCOPIO ELECTRONICO DE BARRIDO.**

PIEZA NUEVA.				PIEZA CORROIDA			
CAPA	%Zn	%Fe	TIPO DE BARRIDO	CAPA	%Zn	%Fe	TIPO DE BARRIDO
GAMA	89.99	10.61	LINEAL	GAMA	95.13	4.87	PUNTUAL
DELTA	93.40	6.60	LINEAL	GAMA	95.70	4.30	LINEAL
ZETA	96.70	3.30	LINEAL	DELTA	95.21	4.79	LINEAL
				ZETA	95.36	4.64	PUNTUAL
				ZETA	95.52	4.48	LINEAL
				ZETA ULTIMO	99.28	0.72	PUNTUAL
				FRAGMENTO			

## CAPITULO V

### DISCUSION DE RESULTADOS.

Pruebas de caracterización para el acero galvanizado por inmersión en caliente y para el acero electrogalvanizado.

#### \* MASA DEL RECUBRIMIENTO.

De los resultados obtenidos para ambos aceros la masa del recubrimiento es mucho mayor para el acero galvanizado por inmersión en caliente siendo está de  $1102.5 \text{ g/m}^2$  contra  $96.23 \text{ g/m}^2$  para el acero electrogalvanizado, teniendo el primero una masa de recubrimiento 12 veces mayor que el segundo, por lo que el acero galvanizado por inmersión en caliente nos proporciona una mayor protección contra el medio corrosivo.

#### \* ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

El espesor del recubrimiento es de  $185.86 \mu\text{m}$  para el acero galvanizado por inmersión en caliente, siendo éste mucho mayor en comparación al del acero electrogalvanizado con  $13.86 \mu\text{m}$ .

\* ENSAYO PREECE.

Para el acero galvanizado por inmersión en caliente hubo la necesidad de llevar acabo 35 inmersiones para sustituir totalmente el recubrimiento por el depósito de cobre. Mientras que para el acero electrogalvanizado se necesitaron solamente 13 inmersiones.

Con este resultado podemos decir que el recubrimiento del acero galvanizado por inmersión en caliente es mucho más difícil de sustituir debido a las diferentes capas de aleación que éste presenta.

MEDIDAS DE LA VARIACION DEL POTENCIAL CORROSION CON EL TIEMPO.

Por esta técnica experimental se confirmo que el acero galvanizado por inmersión en caliente presenta más resistencia a la corrosión. Al tener un mayor espesor y presentar en éste diferentes capas de aleación las cuales se reflejan en el comportamiento del potencial de corrosión que presenta muchas discontinuidades en comparación con el acero electrogalvanizado. Cuya tendencia es a ir desplazando el potencial hacia valores anódicos, pero de una manera continua, como se puede comprobar en las correspondientes gráficas 1 y 2.

Discusión de resultados.

También se pudo determinar el potencial de corrosión de las diferentes capas de aleación del recubrimiento del acero galvanizado por inmersión en caliente, donde cada pico corresponde a una de las capas de aleación del recubrimiento, como se muestra en la siguiente tabla.

Capa	Ecorr.(mv)	días.
Acero	-900	91
Gama	-951	83
Delta(granular)	-980	73
Delta(columnar)	-987.8	66
Zeta	-976	14

Donde se determino que la capa gama presenta el potencial más anódico seguida de la capa delta en su zona de granos granulres finos, delta columnar y zeta. está última fué la que menor resistencia a la corrosión presento ya que solo tardo 14 días, mientras que la delta tardo 66 días.

**MEDIDAS DE POLARIZACION.**

**\* PARA EL ACERO GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE.**

- Para la primera curva de polarización obtenida se puede observar

que se presentan dos zonas activas. En la primera zona se registro una corriente critica de  $16 \text{ ma/cm}^2$  con un potencial de  $-1000 \text{ mv}$ , pero debido a que se forma una película gelatinosa porosa está al romperse da origen a la segunda zona activa donde la corriente critica es de  $115 \text{ ma/cm}^2$  a un potencial de  $50 \text{ mv}$ , como se puede comprobar en la gráfica #3.

**\* PARA EL ACERO ELECTROGALVANIZADO.**

- En la primera curva se encontro una zona activa que va desde  $-800$  hasta  $-610 \text{ mv}$ , donde su máxima densidad de corriente critica es de  $7.8 \text{ ma/cm}^2$  y a un potencial de  $-700 \text{ mv}$ .

La zona pasiva registrada en la gráfica es muy pequeña de  $-610 \text{ mv}$  hasta  $-570 \text{ mv}$ , como se puede comprobar en la gráfica # 4.

- La segunda curva está mucho mejor definida que la anterior. Está presenta una zona activa desde  $-650$  hasta  $-250 \text{ mv}$  localizandose la máxima densidad de corriente critica en  $8.2 \text{ ma/cm}^2$  y a un



potencial de -450 mv.

En seguida una zona pasiva desde -250 hasta -50 mv. está zona muestra algunas discontinuidades debidas a que se forma una película gelatinosa porosa de hidroxicloriguro que se rompía por momentos, debido a los cloruros que son despasivadores..

Después la zona transpasiva. desde -50 hasta 110 mv. como se puede comprobar en la gráfica # 5. De la gráfica 4 y 5 se obtuvo lo siguiente:

Tipo de galvanizado	$i_{crit}(ma/cm^2)$ .
Inmersión en caliente	16
Electro galvanizado	7.8, 8.2

Como se puede notar en la tabla. se necesita una densidad de corriente critica mayor para el acero galvanizado por inmersión en caliente. esto es debido a las capas de aleación que presenta en el recubrimiento proporcionandole una mayor resistencia a la corrosión. que en el caso del acero electro galvanizado.

#### METALOGRAFIA PARA EL ACERO GALVANIZADO POR INMERSION EN CALIENTE Y PARA EL ACERO ELECTRO GALVANIZADO.

De acuerdo a lo observado en las micrografias de el acero galvanizado por inmersión en caliente para las microestructuras de la

muestra de llegada o nueva, donde el recubrimiento carece de la última capa  $\text{Eta}(\eta)$ , así como de que éste no es homogéneo, como se puede comprobar en las micrografías # 6 y la # 7.

En lo referente al acero electrogalvanizado se constató que el recubrimiento solo presenta la capa pura de zinc, pero que también éste no es homogéneo dado que en la micrografía # 9 se observa un mayor espesor que en la # 10.

Análisis del acero galvanizado por inmersión en caliente en el microscopio electrónico de barrido para la pieza de llegada (NUEVA) y para la pieza corroída.

#### PIEZA DE LLEGADA O NUEVA.

De éste análisis efectuado para la pieza nueva se comprobó la falta de la capa  $\text{Eta}(\eta)$  y de que su recubrimiento no es homogéneo, al hacerse la comparación de las micrografías 11, 12, 13 con la micrografía 14 donde los granos de las diferentes capas varían en tamaño y forma, siendo que las cuatro muestras son de la misma placa.

discusión de resultados.

En lo que se refiere a las composiciones obtenidas:

Capa	Comp. teorica		Comp. experimental.	
	%Fe	% Zn	%Fe	% Zn.
Gama( $\gamma$ )	28-21	72-79	10.61	89.3
Delta( $\delta$ )	13-7	83-93	6.60	93.40
Zeta( $\zeta$ )	6	94	3.30	96.70

Se puede notar que las composiciones obtenidas experimentalmente comparadas con las teoricas son aproximadas.

PIEZA CORROIDA.

Para las 3 capas del recubrimiento, la corrosión no permitio ya distinguir los diferentes tipos de granos que teniamos cuando la pieza era nueva.

La capa que presento más ataque por parte del medio corrosivo fué la capa Delta( $\delta$ ) en su zona de granos columnares como se muestra en la micrografía # 19, donde estos granos ya desaparecieron, con un potencial de corrosión de -987 mv obtenido de la gráfica # 1. Como podemos apreciar para cada capa del recubrimiento y a su correspondiente potencial de corrosion ya no se observa la estructura de ninguna de estas, como se puede comprobar en las micrografías de la # 15 a la # 22.

#### Discusión de resultados.

---

En lo que se refiere a la composición obtenida no se puede explicar con claridad el porque la composición es aproximadamente uniforme, excepto en el último fragmento del recubrimiento, donde la composición de fierro es casi cero, pero si se puede decir que esto se debe a mecanismos de difusión del fierro, zinc y agentes oxidantes en las diferentes capas.

En los resultados de la tabla del análisis de composición para la pieza nueva y corroida, comprobamos está uniformidad de composición en la pieza corroida y la composición antes de ser corroida.

## CAPITULO VI .

### CONCLUSIONES .

De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1.- Por la técnica experimental de medición del potencial de corrosión con el tiempo se comprobó que esta nos determina cuando el recubrimiento del galvanizado dejó de cumplir su función de proteger en su totalidad al acero contra el medio corrosivo; Así como de la mayor resistencia a la corrosión del acero galvanizado por inmersión en caliente en comparación con el acero electrogalvanizado.

2.- También por esta técnica se pudo determinar el potencial de corrosión de cada capa del recubrimiento del acero galvanizado por inmersión en caliente.

3.- Se pudo comprobar por la técnica metalográfica y por el análisis de composición y microestructura en el microscopio electrónico de barrido las condiciones de la microestructura y composición antes y después de la corrosión en el acero galvanizado por inmersión en caliente; Así como las condiciones de las microes-

## Conclusiones.

---

ructuras después de ser corroidas para cada una de las capas del recubrimiento a su correspondiente potencial de corrosión.

4.- Se comprueba que efectivamente existe relación entre la microestructura y la corrosión en el acero galvanizado.

## BIBLIOGRAFIA.

### 1) Corrosion prevention by protective coating

Charles Murger.

Nace Publication.

U.S.A., 1984.

Pag. 129-272.

### 2) Gonzalez Fernandez J.A.

Teoría y practica de la lucha contra la corrosión y protección.

Del Centro Nacional De Investigaciones Metalurgicas.

Madrid España(1984).

Pag. 509-547.

### 3)\* Metals Handbook vol.1 10Th. Properties and selection irons, steel and high performance alloys.

Precoated Steel Sheet.

R:W: Leonars, uss corporation, division of usx corporation.

U.S.A., 1990.

Pag. 212-225.

### 4) The Making, shaping and treating of steel.

Unit states steel.

Edited by Harol E. Mc Gannon.

Ninth edition.

U.S.A. . 1971.

Pag. 1032-1041.

5) Zinc and its alloys.

S.W.K. Morgan.

Industrial metals series.

Macdonald and Evans.

U.S.A. . 1977.

Pag. 130-146.

6) ASTM A-90-69.

Standard test methods for weight of coating on zinc coated  
(galvanized) iron or steel articles.

Pag. 1-5.

7) ASTM A239-73.

Standard test method for locating the thinnest spot in a  
zinc(galvanized) coating on iron or steel articles by the Preece  
test(copper sulfate dip).

U.S.A. . 1983.

Pag. 32-34.

8) Metals Handbook ASM.

Vol. 7 Atlas of microstructures of industrial alloys.

8<sup>th</sup> edition.

U.S.A. . 1973.

Pag. 12. 335. 340-342.



9) Metals Handbook ASM.

Vol. 8 Phases diagrams of binary alloys system.

8<sup>th</sup> Edition.

U.S.A. , 1973.

Pag. 308.