

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

ESTUDIO DE PARAMETROS DE GALVANIZACION EN CALIENTE

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de

INGENIERO MECANICO

Presentada por

NAPOLEON CABRERA TORRES

Guayaquil-Ecuador

1984

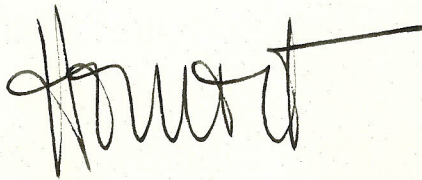
AGRADECIMIENTO

A ING. IGNACIO WIESNER F.,
E ING. HOMERO ORTIZ ARÍZAGA,
POR LA VALIOSA AYUDA Y DIREC-
CION BRINDADAS EN LA REALI-
ZACIÓN DE ESTE TRABAJO.

DEDICATORIA

A MIS PADRES ABDON CABRERA CH.,
Y ROSARIO TORRES DE CABRERA, POR
SU CONSTANTE APOYO EN MI VIDA
ESTUDIANTIL.

A MIS HERMANOS: MELANIA, ABDON Y
DIEGO.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Homero Ortiz A.", with a long horizontal stroke extending to the right.

.....
ING. HOMERO ORTIZ A.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTOS EN ESTA TESIS, ME CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE; Y, EL PATRIMONIO INTELECTUAL DE LA MISMA A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).


.....
NAPOLEON CABRERA TORRES

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto realizar un estudio de los parámetros involucrados en la galvanización en caliente, utilizando el acero estructural SAE 1010 ampliamente usado en nuestro país para la fabricación de objetos galvanizados.

Con el presente estudio se pretende obtener parámetros óptimos que aseguren que el espesor del recubrimiento se ajuste a las normas del INEN. Se estudiará la adherencia del recubrimiento enfocando la atención al espesor de la capa aleada tomando en cuenta su frágil naturaleza.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE ABREVIATURAS	XII
INTRODUCCION	14
CAPITULO I	
FUNDAMENTO TEORICO	16
1.1 Galvanización en Caliente	16
1.2 Materiales aptos para galvanizar	19
1.3 Factores que influyen en la calidad del recu- brimiento	19
1.3.1 Con relación al material	20
1.3.1.1 Aleantes del material a galvanizar	20
1.3.1.2 Efecto de la microestructura y grado de rugosidad del material	22
1.3.2 Con relación al baño	23
1.3.2.1 Elementos del baño	24
1.3.2.2 Temperatura del baño	27

VIII

	<u>Pág.</u>
1.3.2.3 Tiempo de Inmersión.	28
1.3.2.4 Velocidad de Extracción.	29
1.3.2.5 Enfriamiento.	30
 CAPITULO II	
TRABAJO EXPERIMENTAL.	32
2.1 Plan General de Trabajo.	32
2.2 Descripción del equipo experimental.	33
2.3 Material utilizado.	44
2.4 Composición del baño.	46
2.5 Resultados Experimentales.	46
2.5.1 Espesor de aleación Zn-Fe versus tiempo de Inmersión a diferentes temperaturas.	46
2.5.1.1 Sin enfriamiento.	46
2.5.1.2 Con enfriamiento.	49
2.6 Control Físico y Metalográfico	49
2.6.1 Metalografía.	49
2.6.2 Adherencia.	49
2.6.3 Aspecto Superficial	52
 CAPITULO III	
DISCUSION DE RESULTADOS.	56
Conclusiones y Recomendaciones	67
Bibliografía.	70

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>PÁG.</u>
1.1	Fotomicrografía del corte transversal de un recubrimiento galvanizado.	18
2.1	Horno Eléctrico de Sales	35
2.2	Crisol de Grafito.	36
2.3	Control Automático de temperatura marca HONEYWELL.	37
2.4	Equipo de Extracción	38
2.5	Máquina cortadora.	39
2.6	Mesas de Pulido Manual	40
2.7	Máquina Pulidora.	41
2.8	Microscopio Optico OLYMPUS, Modelo 202827.	42
2.9	Estereoscopio marca WILD	43
2.10	Microestructura del acero SAE 1010	45
2.11	Espesor de capa aleada versus tiempo de inmersión. Sin enfriamiento.	50
2.12	Espesor de capa aleada versus tiempo de inmersión. Con enfriamiento.	51
2.13	Influencia de la temperatura y del tiempo en el espesor y estructura del recubrimiento para	

	<u>Pág.</u>
las probetas enfriadas en el agua.	53
3.1 Acero SAE 1010. Galvanizado a 440 °C durante 90 seg. enfriado en agua.	58
3.2 Acero SAE 1010. Galvanizado a 440 °C durante 120 seg. enfriado en agua	59
3.3 Acero de baja reactividad. Galvanizado a 460 °C durante 180 seg, enfriado en aire. Espesor del recubrimiento 70 micras.	60
3.4 Acero SAE 1010. Galvanizado a 460 °C durante 180 seg, enfriado en aire. Espesor del recubri- miento 148 micras.	61
3.5 Falla de adherencia por doblado.	64
3.6 Aspecto superficial brillante cuarteado. Galva- nizado en el rango de 430 a 440 °C.	65
3.7 Aspecto superficial de la anterior figura vista de un ángulo de perfil.	66

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>PÁG.</u>
I	Espesor total del recubrimiento.	47
II	Espesor de Capa Aleada.	48
III	Ensayos de Adherencia por Doblado.	54
IV	Aspecto superficial de las probetas.	55

INDICE DE ABREVIATURAS

AISI	American Iron and Steel Institute
τ	Tao
δ	Delta
ζ	Zeta
η	Eta
gr	Gramo
m	Metro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
min	Minuto
μ	Micra
s	Segundo
°C	Grados Celsius
E	Espesor del Recubrimiento
P	Peso del recubrimiento (gr/m ²)
B	Brillante
BC	Brillante con recubrimiento cuarteado
BM	Brillante con zonas mates
M	Mate
C	Carbón
Mn	Manganeso

Si Silicio

S Azufre

P Fósforo

Zn Zinc

Fe Hierro

INTRODUCCION

La galvanización en caliente ocupa un lugar de preferencia como método de protección a largo plazo del acero. Teniendo en cuenta la gran producción de acero, se aprecia claramente la importancia de este procedimiento anticorrosivo.

Si bien es cierto que la pintura continúa siendo el sistema de protección más económico, si sólo se tiene en cuenta el costo inicial, no es menos cierto que el costo de mantenimiento de las estructuras pintadas suele ser más elevado, debido fundamentalmente a la incidencia de la abundante mano de obra.

En nuestro país, la galvanización en caliente ocupa un lugar principal en la protección de hierro y acero, y en la actualidad tiene vital importancia en la fabricación de herrajes para tendidos de líneas de transmisión de energía eléctrica y telefónica. Sin embargo, los parámetros involucrados en este proceso y la forma cómo influyen no son conocidos a cabalidad y ésto principalmente por los pequeños industriales que se dedican a esta actividad y que constituyen un gran porcentaje de galvanizadores en el país. Esta

es la razón que motivó la realización de la presente investigación.

El objetivo de este estudio es el de optimizar los parámetros involucrados en la galvanización en caliente para el acero SAE 1010, el cual es ampliamente utilizado en la construcción de herrajes y otros objetos a galvanizar, esto se lo hace con el fin de que los espesores del recubrimiento se ajusten a la norma del INEN. Se estudiará la adherencia del recubrimiento enfocando la atención al espesor de la capa aleada considerando su naturaleza frágil.

CAPITULO I

FUNDAMENTO TEORICO

1.1 GALVANIZACIÓN EN CALIENTE

Es un procedimiento mediante el cual se obtienen recubrimientos de zinc sobre hierro o acero por la inmersión de éstos en un baño de zinc fundido. A esta operación se la conoce también como galvanización por inmersión y galvanización al fuego.

El galvanizado es un proceso físico-químico que logra una verdadera unión entre el hierro base y el zinc, consiguiendo de este modo que el material férreo adquiera propiedades superficiales equivalentes a la del zinc, lo que conjuga una mejor resistencia frente a determinados medios corrosivos con las características mecánicas del material base.

Al analizar una sección transversal de una superficie galvanizada, se encuentra tres zonas bien diferenciadas en orden ascendente hasta la superficie del recu-

brimiento: metal base, capa de aleación y zinc puro.

La capa de aleación está subdividida en varias subcapas, las cuales de acuerdo a su estructura se las denomina: Tao (τ), Delta (δ), Zeta (ζ) y Eta (η). (Fig. 1.1).

"La aleación de hierro-zinc es relativamente frágil, por consiguiente, en el caso de algunas aplicaciones y especialmente en la del alambre, se adoptan ciertas medidas para restringir el espesor de estas capas" (6).

La protección del hierro contra la oxidación mediante el galvanizado, se consigue por la conjunción de dos factores: el aislamiento del hierro mediante la película de zinc y la protección galvánica a expensas de la misma.

La condición de servicio en que deberá estar la pieza galvanizada determina el espesor a obtenerse. Los factores económicos y estéticos son los términos complementarios a tener en cuenta, pues un recubrimiento muy grueso, además del consiguiente consumo de zinc, presenta frecuentemente un color superficial gris mate por la difusión de los compuestos intermedios hacia la superficie.

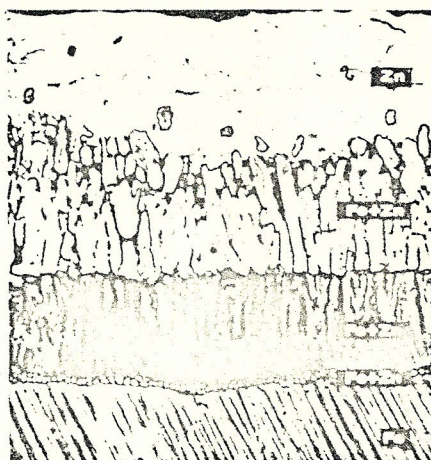


Fig. 1.1.- Fotomicrografía del corte transversal de un recubrimiento galvanizado.*

En el lenguaje corriente, el espesor de la capa se expresa como peso de zinc por unidad de superficie del metal base, existiendo una correlación entre este valor y el espesor de la capa dada por la siguiente expresión:

$$E = P/7.14$$

Donde: P = Peso del recubrimiento (gr/m^2)

E = Espesor del recubrimiento (micrones)

* Tomado del Libro La Galvanización en Caliente, Ed. 1976, pág. 10, Miguel y Molera, Cedel, Barcelona.

Las normas ecuatorianas recomiendan un espesor de recubrimiento de 80 micras que equivalen a un peso aproximado de 500 gr/m^2 .

1.2 MATERIALES APTOS PARA GALVANIZAR

Como materiales aptos para galvanizar se puede considerar a la mayor parte de los aceros que se emplean en construcción mecánica. Normalmente se trata de aceros suaves y poco aleados. Los aceros inoxidable y los muy aleados presentan dificultades para su galvanización, pero raramente la requieren. (5).

La fundición es factible de galvanizar, sin embargo, es necesario hacer una adecuada preparación superficial (5).

1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL RECUBRIMIENTO

Los factores que influyen en la calidad del recubrimiento, es decir, su aspecto superficial, espesor y adherencia son: el material a galvanizar y el baño de galvanización.

1.3.1 CON RELACION AL MATERIAL

Los factores que influyen en la calidad del recubrimiento con relación al material son:

- Aleantes del material a galvanizar
- Efecto de la microestructura y grado de rugosidad del material.

1.3.1.1 Aleantes del Material a Galvanizar

Como regla general se observa un aumento de la velocidad de ataque del zinc sobre el hierro con el aumento de los cinco elementos comunes en los aceros al carbono: carbono, silicio, fósforo, azufre y nitrógeno (5).

Cuando el contenido de carbono en el acero llega hasta el 0.2%, virtualmente no tiene ningún efecto en las características del recubrimiento cuando se usan temperaturas normales de galvanización. Sobre el 0.2% de carbono, se produce un incremento gradual en la reacción con el zinc. A partir del 0.4% de carbono, la reacción se acele-

ra rápidamente. Es necesario aclarar que la forma cómo el carbono está presente en el acero, juega un papel importante en la reacción con el zinc (1).

El silicio es el elemento que ejerce el más fuerte efecto en la reacción hierro-zinc que cualquier otro elemento. Este elemento produce recubrimientos de espesores elevados con predominio de la capa de aleación. En porcentajes inferiores al 0.02% muestra muy poco efecto; al aumentar el porcentaje, la reacción hierro-zinc se incrementa rápidamente hasta aproximadamente el 0.09%, punto en el cual la reacción se invierte a la misma razón, esto sólo hasta cuando se alcance el 0.25% de Si donde se inicia nuevamente el incremento de la reacción hierro-zinc. Debido a que un recubrimiento galvanizado bien balanceado es a menudo producido en el acero con un contenido de silicio entre 0.15 a 0.25%, se suele asumir que cualquier contenido de silicio hasta 0.25% producirá recubrimientos normales. Sin em-

bargo, en los alrededores del 0.09% se generan recubrimientos de espesores elevados con predominio de la capa de aleación, lo que produce recubrimientos de apariencia gris mate (1, 7, 8).

El azufre y fósforo están normalmente presentes en el hierro y acero en pequeñas cantidades que no tienen efecto significativo en la reacción hierro-zinc. El fósforo aumenta el espesor del depósito con contenidos mayores de 0.05%, pero no lo altera hasta este valor. Un porcentaje elevado de azufre produce un ataque excesivo en la operación del decapado y ocasiona una superficie muy rugosa. Como consecuencia, el recubrimiento no es uniforme y la ductilidad se ve muy disminuida (5).

1.3.1.2 Efecto de la Microestructura y Grado de Rugosidad del Material.

La microestructura del acero influye en su reactividad frente al zinc. La micro-

estructura perlítica tiene mayor reactividad que la ferrítica. La reactividad de la martensita, es inferior a las dos microestructuras anteriores.

La naturaleza de la superficie del metal base desempeña un papel importante en la determinación del carácter y sobre todo, del aspecto del recubrimiento del zinc. Con el objeto de lograr recubrimientos de buena calidad es esencial asegurar la máxima uniformidad y limpieza posible de la superficie del metal base.

1.3.2 CON RELACION AL BAÑO

Los factores que influyen en la calidad del galvanizado con relación al baño son:

- Elementos del baño
- Temperatura del baño
- Tiempo de inmersión
- Velocidad de extracción
- Enfriamiento

1.3.2.1 Elementos del Baño

Cuando están presentes algunos metales en el baño de zinc, éstos pueden afectar tanto la velocidad de aleación con el hierro, como el caracter del recubrimiento así producido.

El cadmio y el hierro están normalmente presentes en el baño como contaminantes, los cuales no son intencionalmente añadidos al baño como elementos aleantes. El *aluminio, estaño y antimonio* son los principales elementos aleantes para el baño (1). El plomo lo incorporan los propios lingotes de zinc, el cual varía según la pureza del zinc utilizado. La ausencia del plomo dificulta el galvanizado por variar la tensión superficial del zinc fundido. Se emplean baños con contenidos en plomo superiores al 0.5% (5).

El aluminio, en concentraciones tan bajas como 0.02% da fluidez al baño e incrementa el brillo de la capa galvanizada, re -

trasando la reacción del hierro-zinc, por lo que la capa de aleación es reducida. La adición de 0.05 a 0.25% de aluminio se emplea extensamente en el proceso de inmersión de objetos de forma irregular y en el galvanizado de chapas que se van a deformar posteriormente (6).

Con el objeto de mejorar el aspecto de la superficie, suele ser costumbre añadir estaño al baño de zinc. El estaño da lugar a la formación de un floreado color blanco. Aunque el empleo del estaño puede alcanzar proporciones hasta del 3%, por regla general dicha proporción no puede pasar del 1% ya que puede afectar la resistencia a la corrosión bajo ciertas condiciones de exposición (5).

El antimonio tiene el mismo efecto que el estaño en la formación del floreado, pero en cantidades sobre el 0.1%, puede fragilizar la capa galvanizada. La presencia del antimonio causa que la capa pierda brillo y desarrolle un tinte amarillento;

el brillo puede ser restaurado por la adición de pequeñas cantidades de aluminio, alrededor del 0.3% (1).

La presencia del cadmio en el baño del zinc en cantidades superiores al 0.05% produce recubrimientos de características inferiores en el doblado (6). Es por este efecto que en la galvanización en caliente la pureza o calidad del zinc es tomada muy en cuenta como un factor que influye en las características del recubrimiento; por tal motivo, para galvanizar alambres o chapas que serán sometidas a deformación, se emplea zinc de alta pureza (99.99%).

La presencia de hierro en el baño es debida a la disolución de las superficies a recubrir. La solubilidad máxima del hierro a 450 °C es del 0.018%, el resto se elimina en forma de matas las cuales son compuestos formados de una parte de hierro con 24 partes de zinc, es decir, las pérdidas de zinc debidas al hierro disuel-

to son cuantiosas. Las matas que se depositan en el fondo, deben ser extraídas periódicamente ya que su acumulación produce inconvenientes en el acabado superficial.

1.3.2.2 Temperatura del Baño

El rango usualmente empleado en galvanización es de 443 a 465 °C. A temperaturas mayores de 485 °C, la razón de disolución del hierro y acero es extremadamente rápida y los efectos de esas temperaturas en las piezas de trabajo como en el tanque de galvanización son generalmente dañinos.

Un incremento en la temperatura del zinc produce los siguientes efectos:

- La fluidez del zinc fundido es favorecida, de tal manera que permite un escurrido mejor de zinc desde la parte galvanizada.
- Se acelera la formación de óxidos sobre

la superficie del zinc fundido. Esta capa de óxido influye en la apariencia del galvanizado, y ésta es mayor en objetos de sección transversal delgada y de gran superficie.

- Dependiendo de la composición química del hierro o acero, la temperatura del baño puede tener serios efectos metalúrgicos sobre el recubrimiento galvanizado. La temperatura a la cual la capa de aleación hierro-zinc es formada, afecta la cantidad relativa de las fases hierro-zinc presentes y el espesor de la capa de aleación. Estos factores metalúrgicos afectan la ductilidad, adherencia y apariencia del recubrimiento.

1.3.2.3 Tiempo de Inmersión

En la galvanización en caliente del hierro y acero, el tiempo de inmersión está en el rango de 1 a 5 minutos. Este parámetro controla el espesor de la capa alea-

da en los recubrimientos, y su velocidad de crecimientos depende del intervalo de temperaturas a que se trabaje; así tenemos que en el rango de 430-490 °C, el aumento del tiempo de inmersión sólo consigue un crecimiento moderado de la capa aleada, siendo la reacción mayor en los primeros uno o dos minutos luego de que la pieza ha sido sumergida. En el intervalo de 490-530 °C, un aumento en el tiempo de inmersión, lleva consigo un crecimiento apreciable del espesor de la capa aleada. Por encima de los 530 °C la reacción vuelve a ser como en el rango de 430-490 °C.

Aunque el tiempo de inmersión depende de la facilidad de manipuleo de la pieza, debe ser establecido a base de ensayos para cada diseño de la parte que será revestida.

1.3.2.4 Velocidad de Extracción

La velocidad a la que se extraen las piezas del baño de zinc fundido, es el pará-

metro que controla el espesor de la capa de zinc puro, debido a que esta capa toma lugar en la interfase aire-zinc.

Al extraer la pieza a gran velocidad, el zinc no tiene tiempo de escurrir de tal forma que el espesor de la capa tiende a aumentar. Por el contrario, al extraer la pieza a bajas velocidades, el zinc tiene tiempo de escurrir reduciéndose de esta forma el espesor de la capa.

La velocidad de extracción varía con el tipo de proceso empleado. La velocidad óptima de extracción para la mayoría de los artículos está en los alrededores de 150 cm/min (1).

1.3.2.5 Enfriamiento

Después de que las piezas han sido extraídas del baño de zinc, y debido a que salen a una elevada temperatura, puede ocurrir que la capa de aleación siga creciendo e invadiendo la zona de zinc puro; esto es

debido a la difusión que ocurre. Por este motivo, las piezas suelen colocarse separadamente para permitir un libre flujo de aire, y en ocasiones, si las piezas son de gran masa, es necesario emplea enfriamiento forzado con aire o agua (1).

CAPITULO II

TRABAJO EXPERIMENTAL

2.1 PLAN GENERAL DE TRABAJO

Se prepararon 60 probetas de 30 mm x 60 mm x 2.5 mm., las mismas que se galvanizaron variando los parámetros de temperatura, tiempo de inmersión y medio de enfriamiento. La velocidad de extracción se la mantuvo constante, a razón de 120 cm/min. Se escogieron cinco temperaturas: 430, 440, 450, 460, 470 °C, con tiempo de inmersión de 30, 60, 90, 120, 150, 180 s.

Se galvanizaron doce probetas para cada temperatura; seis enfriadas al aire libre y seis enfriadas en agua.

Para el análisis de resultados, a cada probeta se la cortó en su longitud de tal forma que, la parte de 10 mm x 60 mm se la utilizó para el análisis metalográfico, y la restante de 20 mm x 60 mm, para la determinación de la adherencia por doblado.

El ensayo de doblado se lo efectuó hasta dejar las dos alas paralelas a tope o a una distancia de una o varias veces el espesor de la propia probeta. Se considera que es mala la adherencia del recubrimiento, cuando sobre la zona curvada se produce su levantamiento al frotarlo con el dedo.

El examen del aspecto superficial se lo realizó por inspección visual.

2.2 DESCRIPCION DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

El equipo usado en el presente trabajo experimental es el siguiente:

- a.- Horno de Sales.- Horno eléctrico marca LINDBERG, utilizado para fundir el zinc.
- b.- Crisol de Grafito.- De aproximadamente 70 puntos, el cual va en el interior del horno de sales y es aquí, donde se produce la fundición del zinc.
- c.- Control Automático de Temperatura.- Con precisión de $\pm 5^{\circ}\text{C}$, marca HONEYWELL.

d.- Equipo de Extracción. Para la extracción de las piezas galvanizadas se lo ha regulado a una velocidad de 120 cm/min.

e.- Máquina Cortadora.- De disco abrasivo de carburo de silicio. Se la emplea para el corte longitudinal de las probetas.

f.- Equipo para Pulido Metalográfico

f.1.- Mesas de Pulido manual.- Para pulido intermedio, con papeles de lija desde 200 hasta 600.

f.2.- Máquina Pulidora.- De disco rotatorio para abrasivos de granulometría de 15 a 0.3 micras. Esta se la utiliza para el pulido final.

g.- Microscopio Metalúrgico de Reflexión.- Marca OLYMPUS, modelo 202827. Empleado para el estudio de la variación de los espesores de la capa de galvanización.

h.- Estereoscopio.- Marca WILD, utilizado para observaciones superficiales del recubrimiento.

El equipo descrito puede ser apreciado en las siguientes figuras.

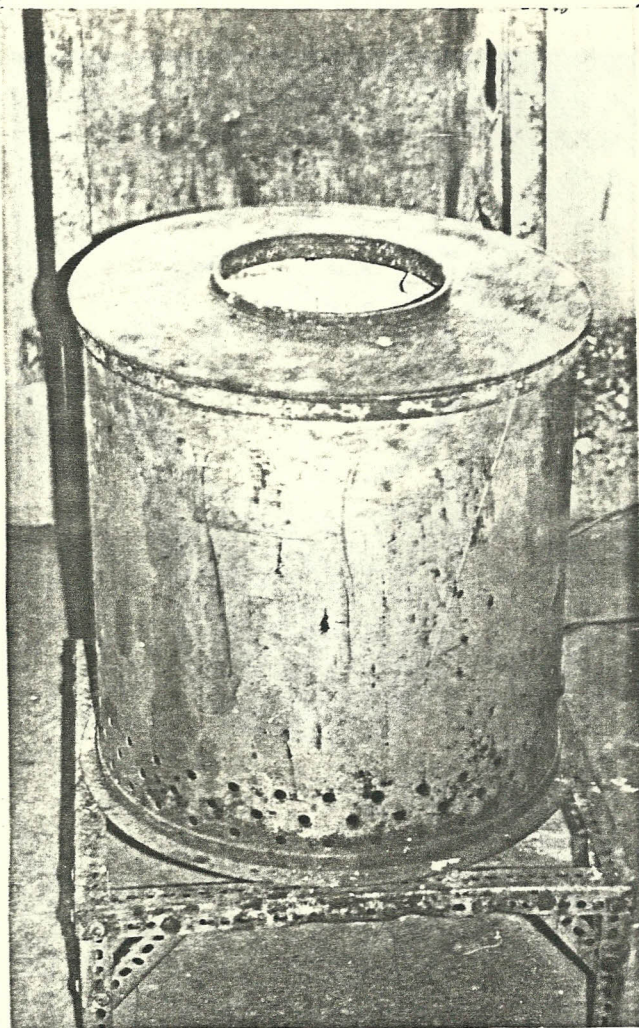


Fig. 2.1.- Horno Eléctrico de Sales

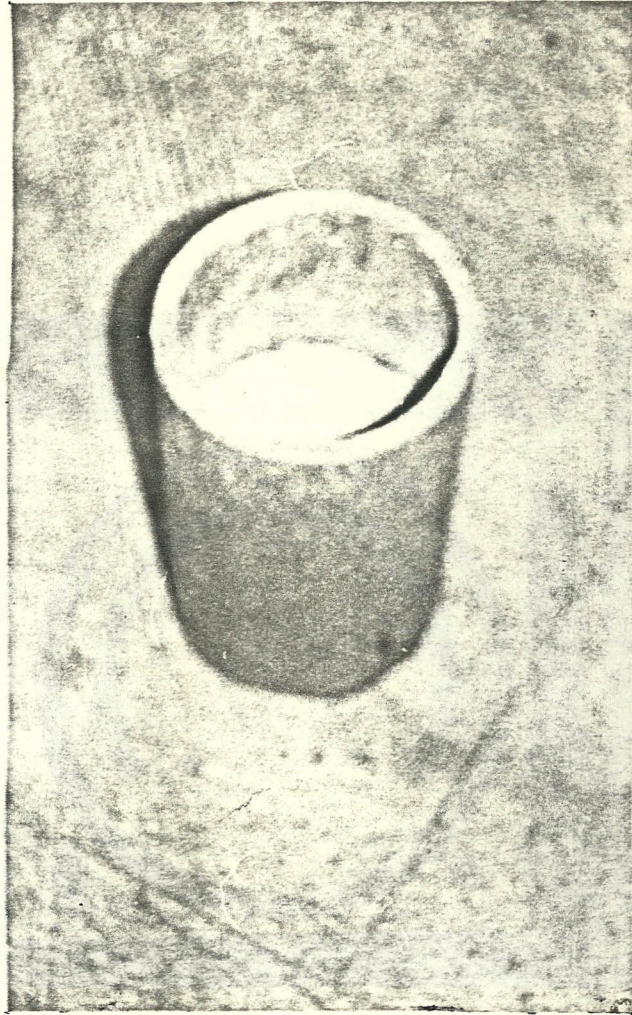


Fig. 2.2.- Crisol de Grafito

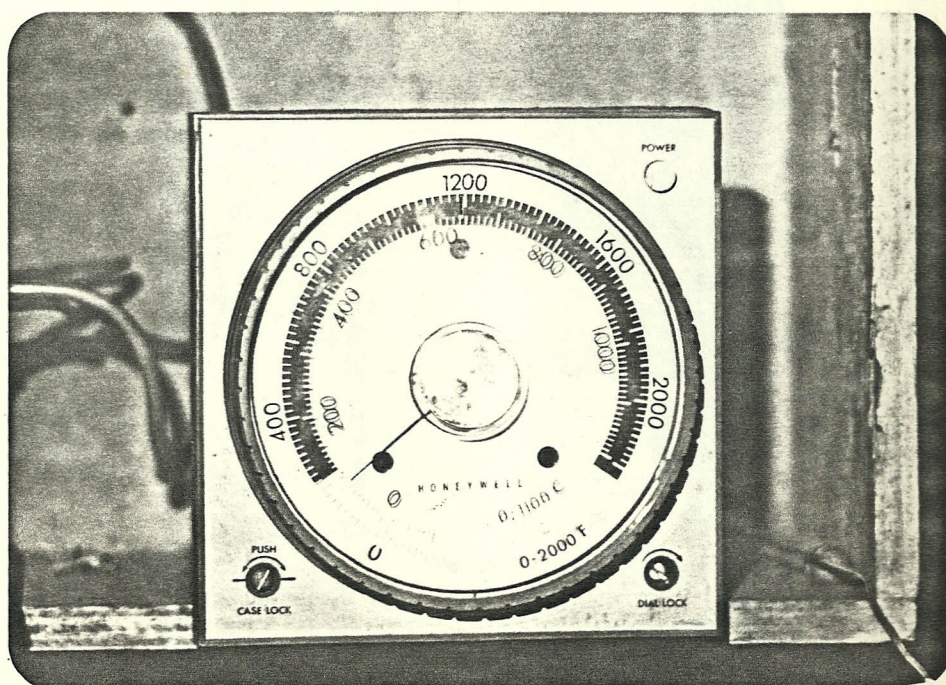


Fig. 2.3.- Control Automático de Temperatura.
Marca HONEYWELL.

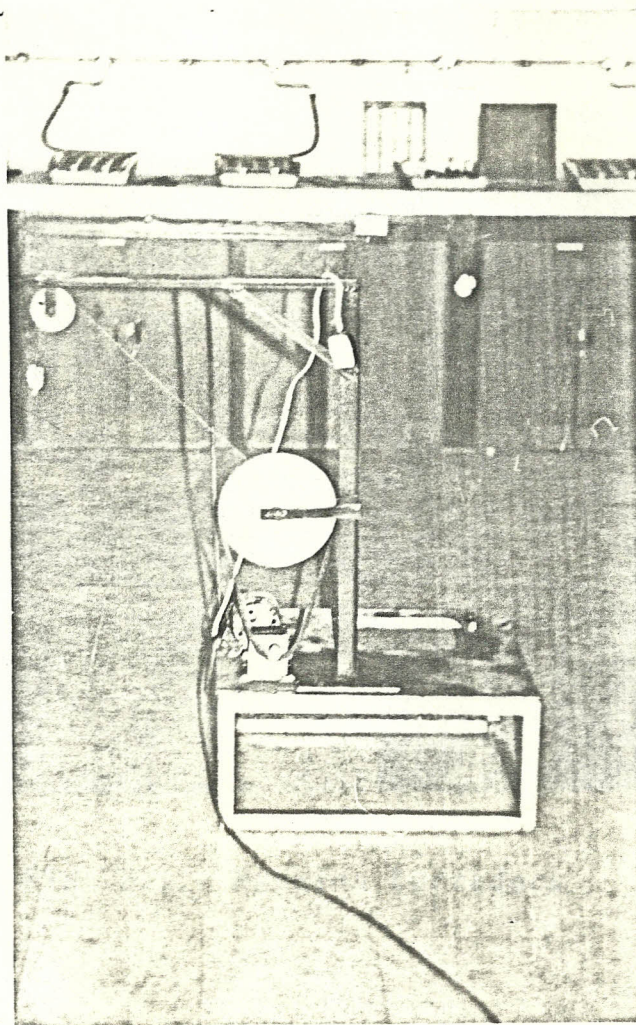


Fig. 2.4.- Equipo de Extracción

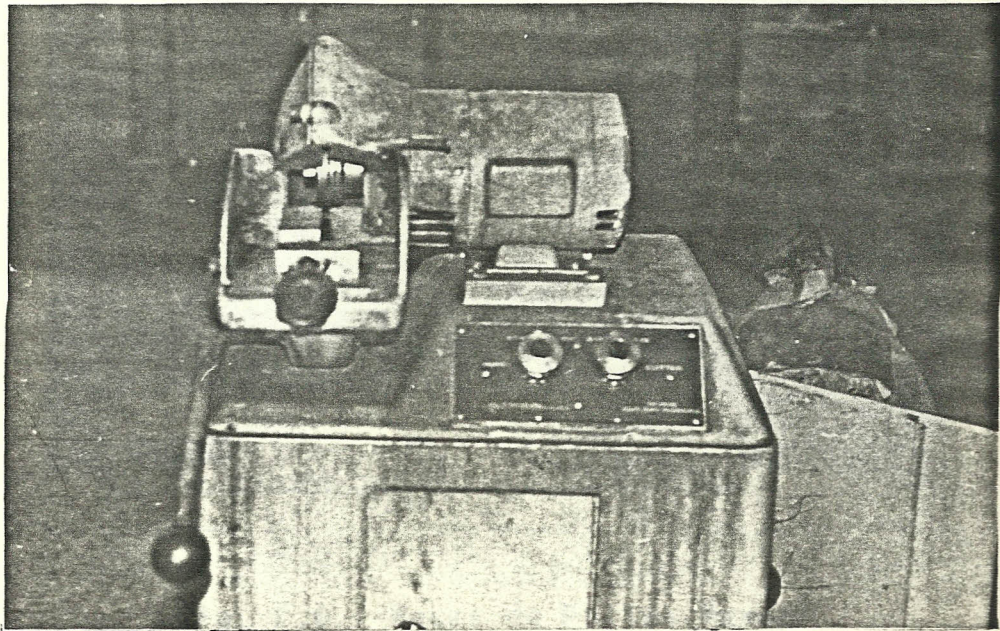


Fig. 2.5.- Máquina Cortadora

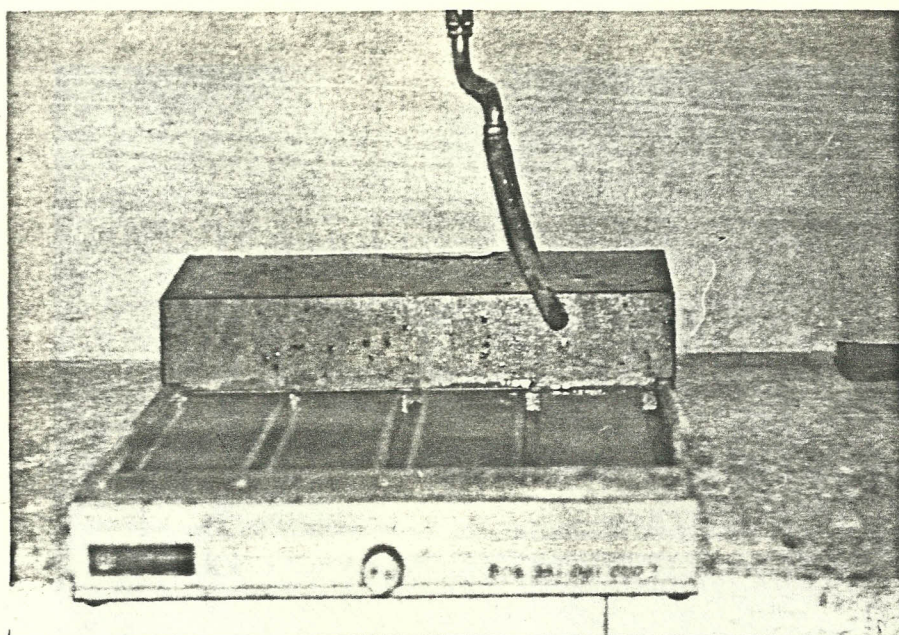


Fig. 2.6.- Mesas de Pulido Manual

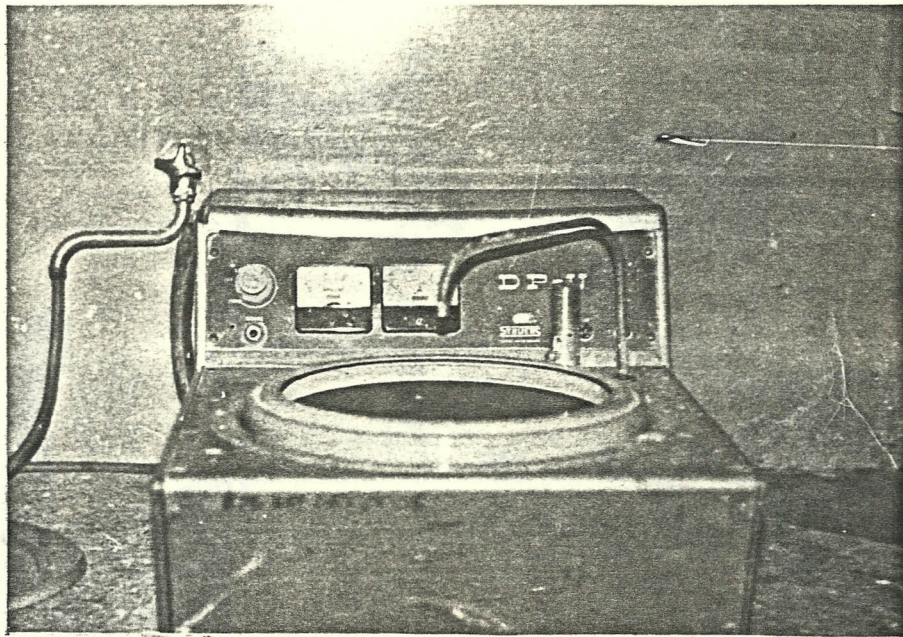


Fig. 2.7.- Máquina Pulidora

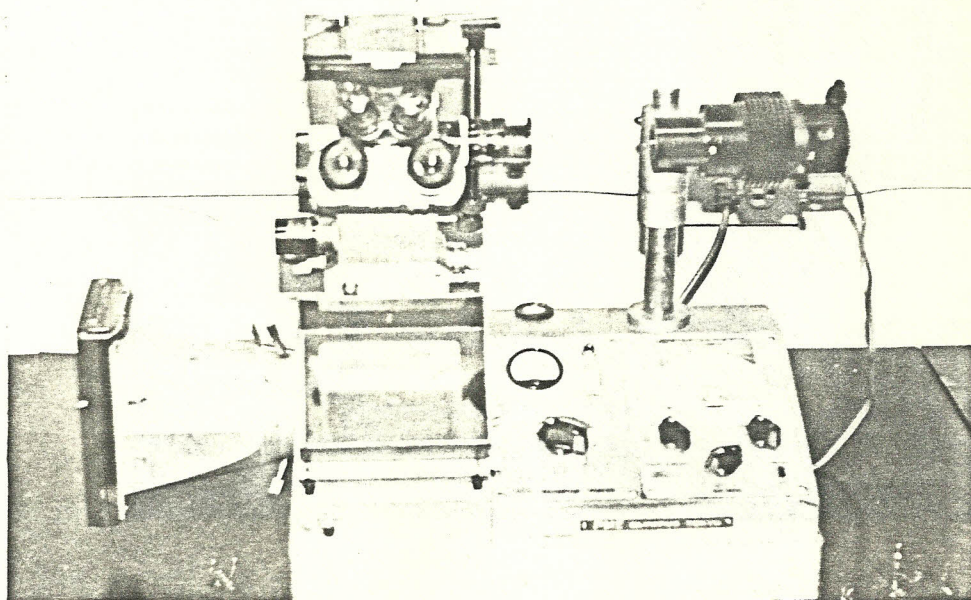


Fig. 2.8.- Microscopio Optico
Marca OLYMPUS.
Modelo 202827.

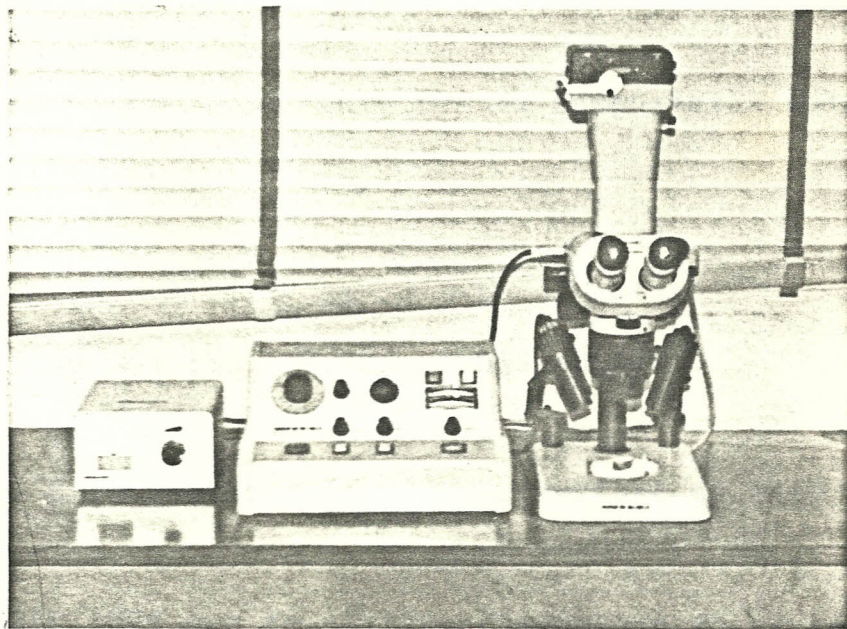


Fig. 2.9.- Estereoscopio Marca WILD

2.3 MATERIAL UTILIZADO

El material utilizado para la realización del presente trabajo experimental es el siguiente:

- Acero estructural SAE. 1010 con la composición química que se indica:

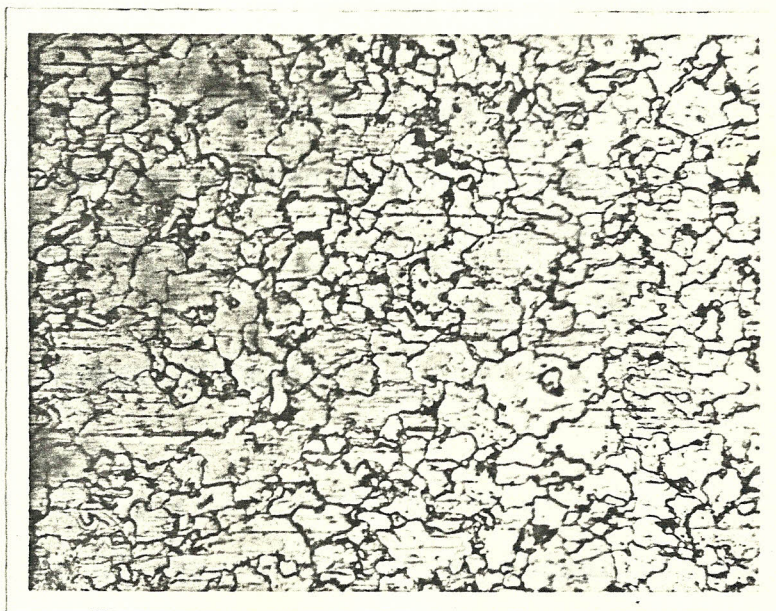
	C	Mn	Si	S	P
%	0.09	0.35	0.08	0.015	0.016

La Fig. 2.10 presenta la microestructura de este acero.

- Acero SAE 1006 que se utiliza comunmente en la construcción de planchas galvanizadas para techos de casa, con la siguiente composición química:

	C	Mn	Si	S	P
%	0.0625	0.2056	0.0056	0.0167	0.0162

- Zinc de 99.99% de pureza
- Agua con detergente (desengrasante).
- Acido Clorhídrico al 10% (decapante)



200 X

Nital 2%

Fig. 2.10.- Microestructura del Acero SAE 1010

- Solución de Cloruro de Amonio y Cloruro de Zinc (Fundente).

2.4 COMPOSICIÓN DEL BAÑO

Para trabajar en condiciones equivalentes a las prácticas comunmente en nuestro medio, el baño no se lo aleará con ningún metal.

2.5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las tablas I y II reúnen los resultados cuantitativos con relación al espesor total del recubrimiento y espesor de capa aleada.

2.5.1 ESPESOR DE ALEACION Zn-Fe VERSUS TIEMPO DE INMERSION A DIFERENTES TEMPERATURAS.

2.5.1.1 Sin Enfriamiento

En la Fig. 2.11 se encuentran graficados los resultados para el caso de las probetas enfriadas al aire luego de su galvanización.

		E S P E S O R		T O T A L (μ)		
s	°C	430	440	450	460	470
	30	35	37	42	56	55
	60	51	63	68	68	65
	90	73	76	74	89	87
	120	75	95	95	104	110
	150	80	110	122	124	
	180	85	115	137	159	

TABLA I.- ESPESOR TOTAL DEL RECUBRIMIENTO

ESPESOR DE CAPA ALEADA (μ)										
s	430		440		450		460		470	
	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA
30	18	18	30	25	40	32	47	37	50	41
60	35	32	37	40	45	45	65	63	66	46
90	48	42	71	71	50	72	83	69	88	72
120	74	57	82	82	89	80	100	100	110	87
150	80	70	84	115	122	115	108	119		
180	100	76	85	125	139	125	148	165		

TABLA II. - ESPESOR DE CAPA ALEADA

2.5.1.2 Con Enfriamiento

En la Fig. 2.12 se encuentran graficados los resultados para el caso de las probetas enfriadas mediante agua luego de su galvanización.

2.6 CONTROL FÍSICO Y METALGRÁFICO

El control de las características del recubrimiento se lo ha realizado mediante ensayos metalográficos y físicos:

2.6.1 METALOGRAFIA

La Fig. 2.13 muestra una serie de tomas micrográficas para probetas enfriadas en agua luego de su galvanizado, con tiempos de inmersión de 120, 150, 180 s.

2.6.2 ADHERENCIA

La Tabla III reúne los resultados de las pruebas de adherencia por doblado, cuya nomenclatura es la siguiente:

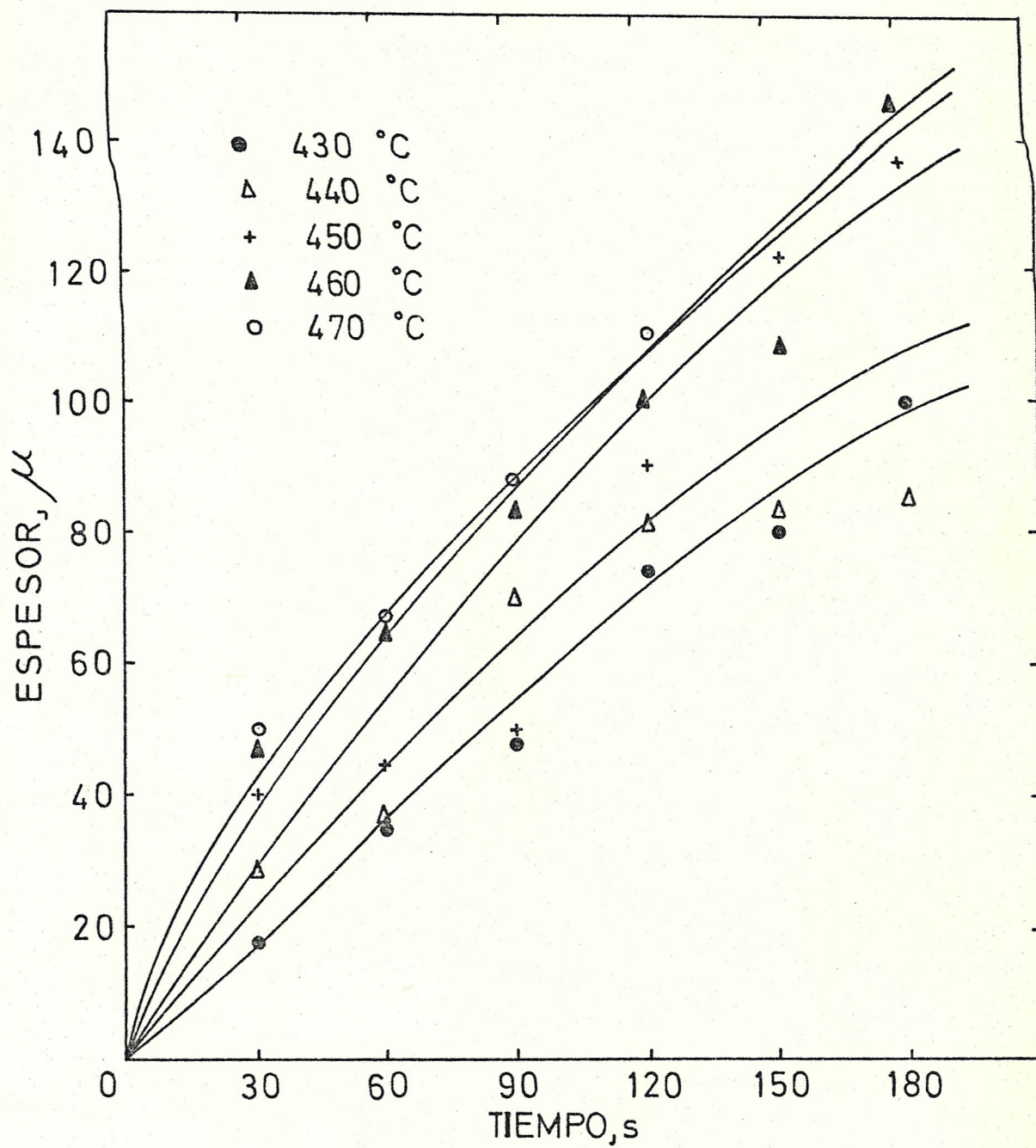


Fig. 2.11.- Espesor de capa aleada versus tiempo de inmersión.

Sin enfriamiento

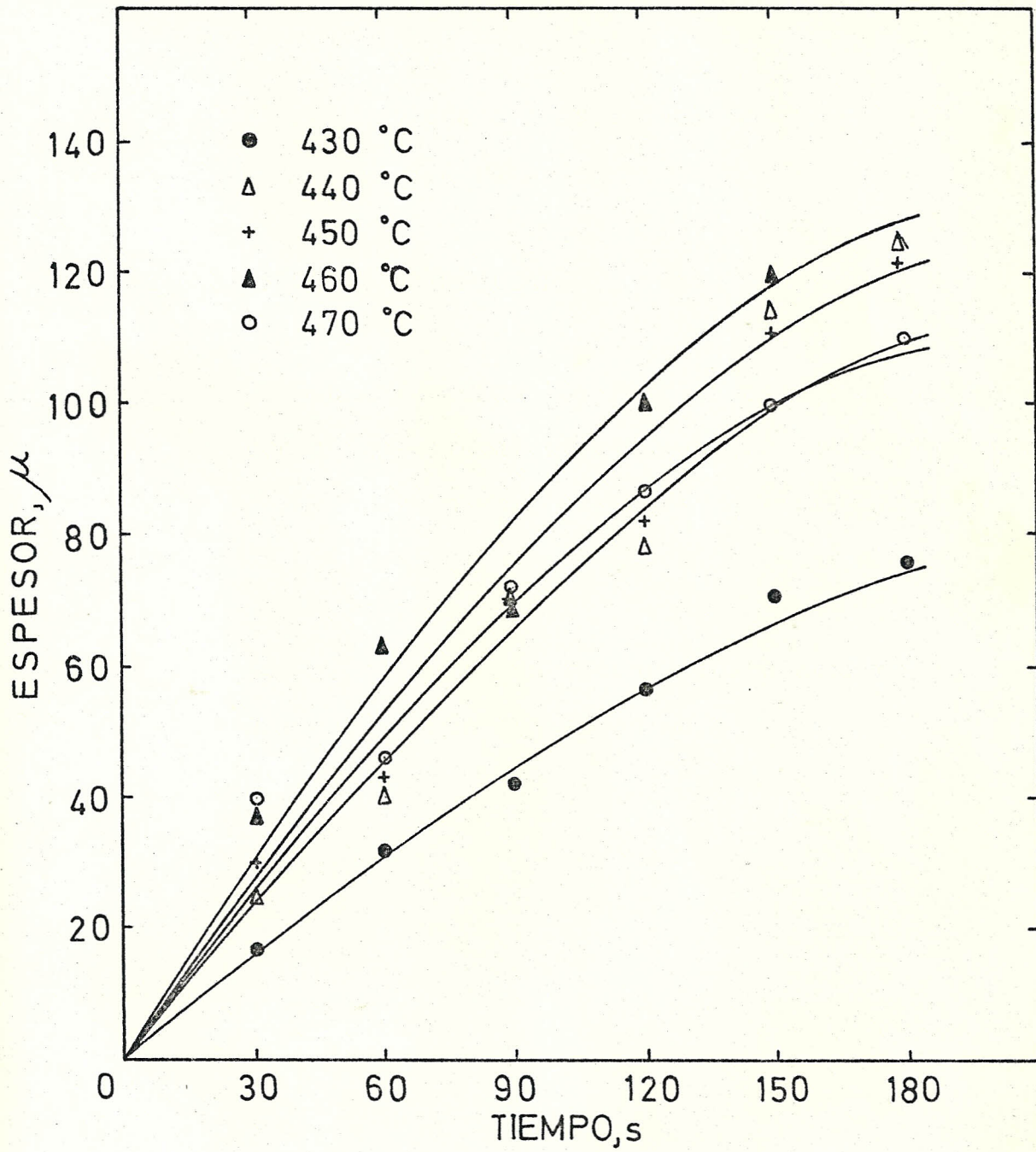


Fig. 2.12.- Espesor de capa aleada versus tiempo de inmersión.
Con enfriamiento.

- : No ocurre desprendimiento al doblar a tope
Tope: El desprendimiento ocurre cuando se dobla a tope
nE: Doblada a n espesores de probeta sin romper;
(n-1)E rompe.

2.6.3 ASPECTO SUPERFICIAL

La Tabla IV reúne los resultados obtenidos del aspecto superficial efectuados por inspección visual y cuya nomenclatura es la siguiente:

- B: Brillante
BC: Brillante con recubrimiento cuarteado
BM: Brillante con zonas mate
M: Mate

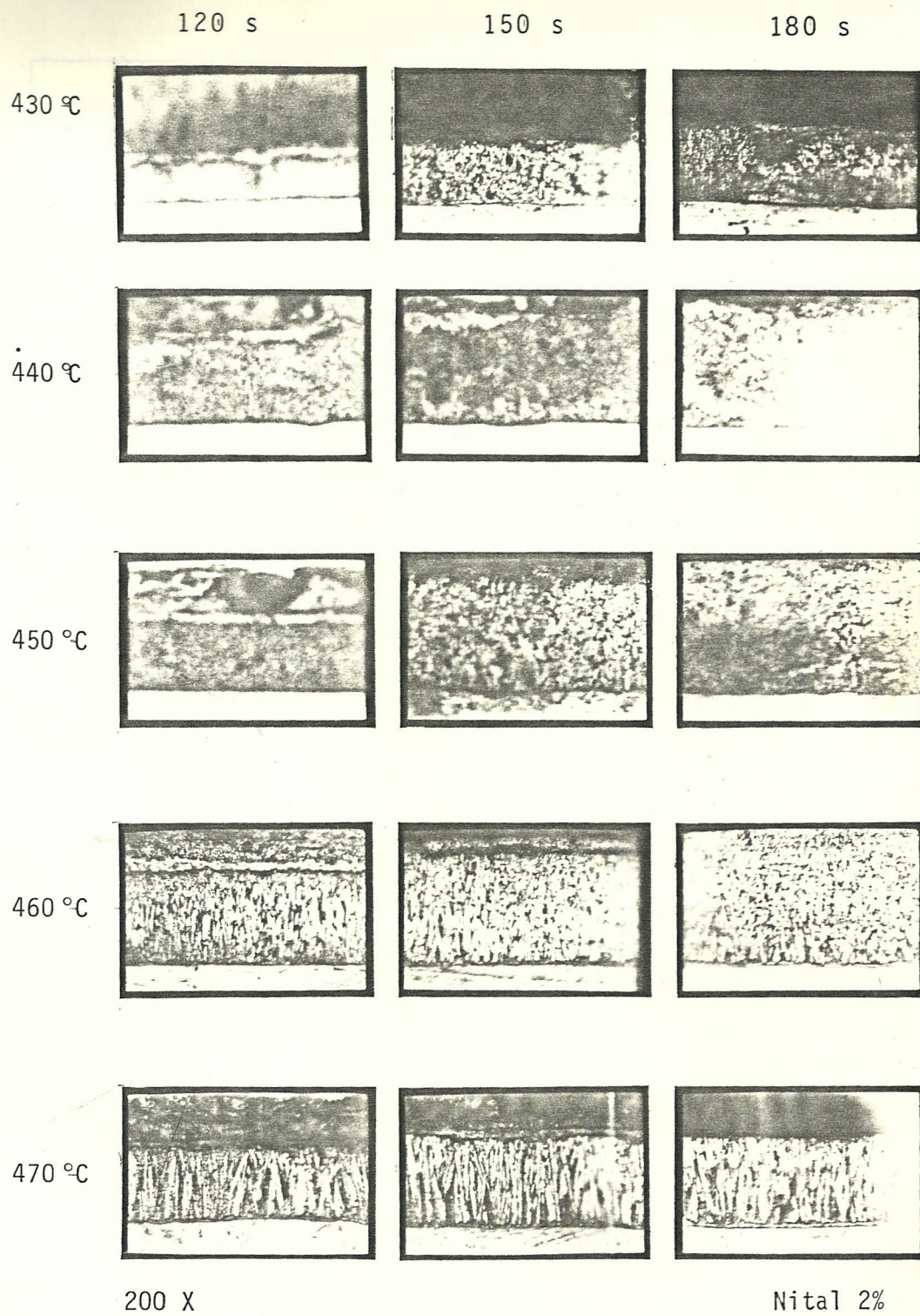


Fig. 2.13.- Influencia de la Temperatura y del tiempo en el espesor y estructura del recubrimiento para las probetas en - friadas en agua.

s °C	430		440		450		460		470	
	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA
30	--	--	--	--	--	--	Tope	--	Tope	--
60	--	--	--	--	Tope	--	Tope	Tope	2E	--
90	--	--	--	Tope	Tope	--	3E	Tope	3E	Tope
120	--	Tope	3E	2E	Tope	Tope	4E	Tope	3E	Tope
150	--	--	2E	3E	2E	Tope	4E	3E	4E	3E
180	Tope	Tope	2E	3E	Tope	3E	5E	3E	6E	5E

TABLA III.- ENSAYOS DE ADHERENCIA
POR DOBLADO

s °C	430		440		450		460		470	
	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA	AIRE	AGUA
30	BC	B	BC	B	BCM	B	BCM	B	M	B
60	BC	B	BC	B	BC	B	M	B	M	B
90	BC	B	BC	B	B	B	M	B	M	B
120	BC	B	BC	B	B	B	M	B	M	B
150	BC	B	BC	B	BM	BM	BCM	B	M	B
180	BC	B	BC	B	BM	BM	M	B	M	B

TABLA IV.- ASPECTO SUPERFICIAL DE LAS PROBETAS

CAPITULO III

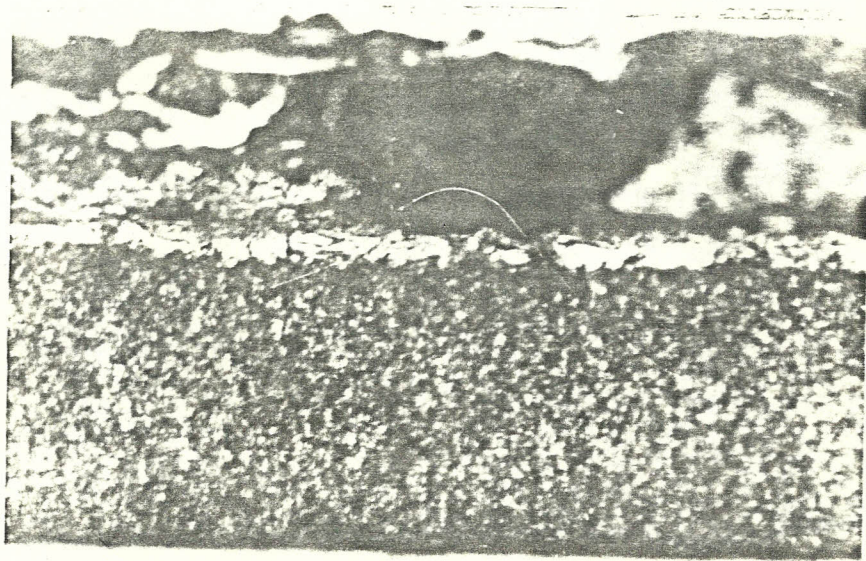
DISCUSION DE RESULTADOS

- **ESPESOR TOTAL DEL RECUBRIMIENTO.**- La Tabla I reúne los resultados de los espesores totales del recubrimiento. Se puede analizar que, a medida que, la temperatura aumenta, el tiempo de inmersión necesario para obtener los espesores de recubrimiento recomendados por la norma, disminuyen. A 430 °C se necesitan 180 s de inmersión; entre 430 °C a 460 °C el tiempo requerido está entre 90 y 120 s; a temperaturas entre 450 a 480 °C, el tiempo de inmersión se encuentra entre los 60 y 90 s.
- **ESPESOR DE LA CAPA ALEADA.**- En los gráficos de las figuras 2.11 y 2.12 y en la serie de micrografías de la Fig. 2.13, se puede observar el crecimiento de la capa de aleación en función del tiempo de inmersión para cinco temperaturas, con medios de enfriamiento en aire, como en agua. Las probetas que han sido enfriadas en el agua, presenten un espesor ligeramente menor que aquellas enfriadas en el aire, para parámetros equivalentes de galvanización. Esto está en concordancia con el hecho del posterior crecimiento de

la capa de aleación, si la pieza luego de galvanizarla es enfriada muy lentamente.

En general, se aprecia una alta reactividad de este acero frente al zinc, ya que, por un lado, el crecimiento de la capa de aleación es muy acelerado; por otro lado, la estructura de la capa aleada no corresponde al ordenamiento lógico de las subcapas α , δ , ζ , en un recubrimiento normal de galvanizado. Ver figuras 3.1 y 3.2.

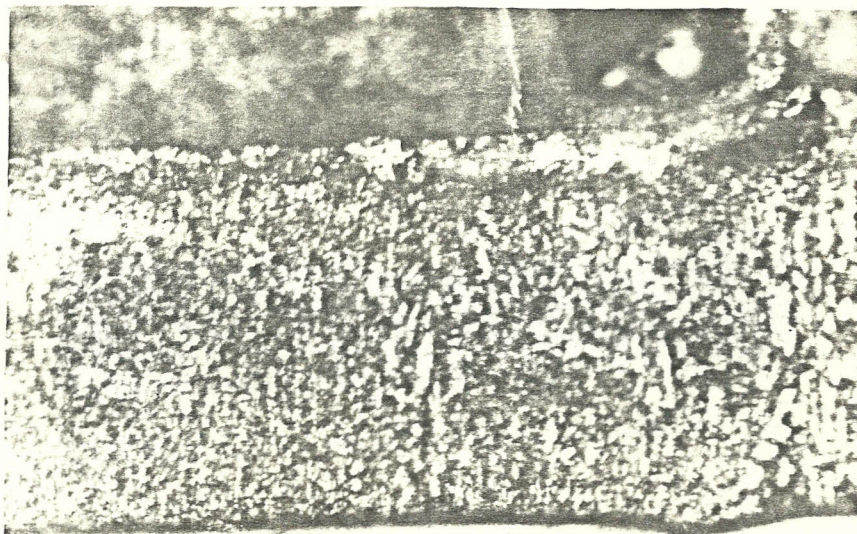
Las Figs. 3.3 y 3.4 presentan una comparación de la estructura de galvanizado de un acero de baja reactividad, empleado en nuestro país, en la fabricación de planchas galvanizadas para techos; y el acero bajo estudio, para parámetros equivalentes de galvanización. Se puede constatar, por tanto, la diferencia que existe en la microestructura como en el espesor de la capa aleada. Es necesario analizar que la diferencia de reactividades de estos dos aceros, proviene principalmente del contenido de silicio, ya que, el acero bajo estudio (SAE 1010 con 0.08% de Si) se encuentra en los alrededores del porcentaje de silicio, que lo hace reactivo (0.09%) y el acero de las planchas para techo se encuentra en un rango sumamente inferior a dicho punto (0.0056%).



200 x

Nital 2%

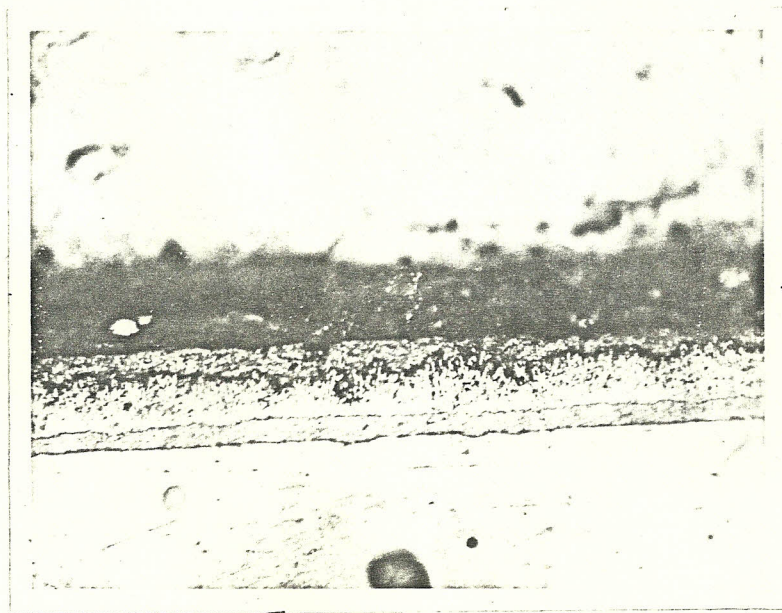
Fig. 3.1.- Acero SAE 1010 galvanizado a 440 °C durante 90 s., enfriado en agua.



200 X

Nital 2%

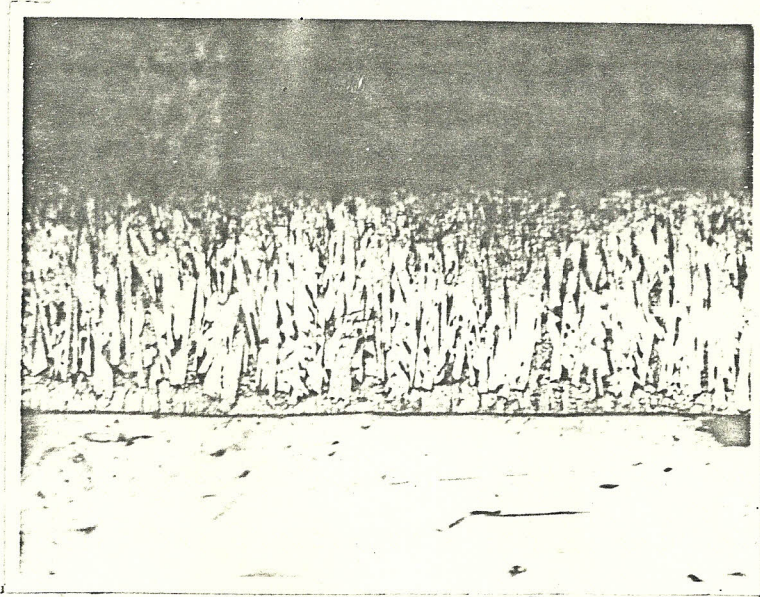
Fig. 3.2.- Acero SAE 1010 galvanizado a 440°C durante 120 s., enfriado en agua.



200 X

Nital 2%

Fig. 3.3.- Acero de baja reactividad. Galvanizado a 460°C durante 180 s., enfriado en aire. Espesor del recubrimiento: 70 micras



200 X

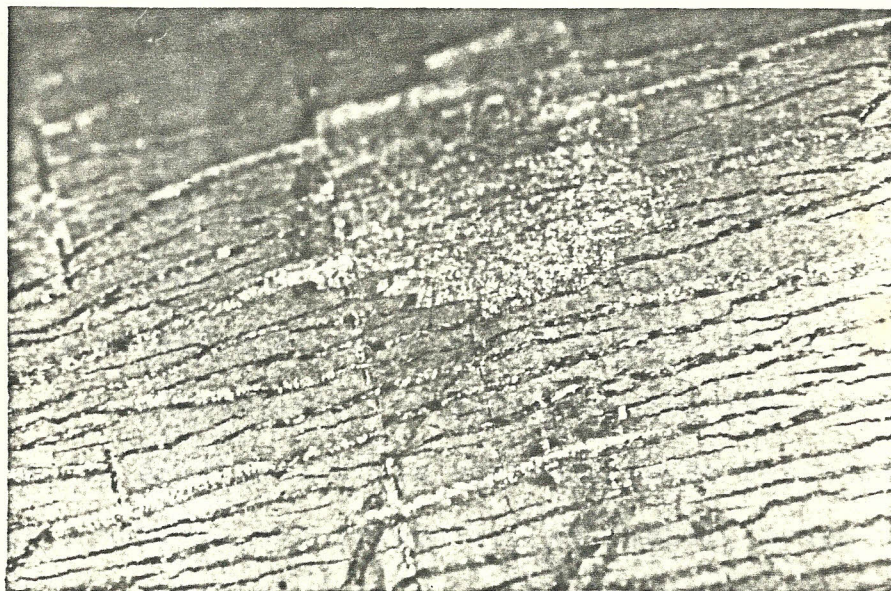
Nital 2%

Fig. 3.4.- Acero SAE 1010. Galvanizado a 460 °C durante 180 s, enfriado en aire. Espesor del recubrimiento: 148 micras.

- ADHERENCIA POR DOBLADO.- De la Tabla III se puede establecer que, la adherencia por doblado, es buena en el rango de temperaturas entre 430 a 450 °C para ambos medios de enfriamiento. Para el rango de temperatura desde los 460 °C a 470 °C, la adherencia tiende a deteriorarse especialmente entre los tiempos de inmersión de 90 a 180 s para probetas enfriadas en aire, y tiempos de inmersión de 150 a 180 s para probetas enfriadas en agua. Estableciéndose por lo tanto que la adherencia para las probetas enfriadas en agua es mayor que aquellas enfriadas en el aire.

Se puede observar que, la falla por adherencia no necesariamente se relaciona directamente con el espesor de la capa aleada, como lo demuestran las probetas correspondientes a 450 °C enfriadas en aire y agua a 180 s; 460 °C enfriadas en aire y agua a 120-150-180 s (Ver Tablas II y III). Esto induce a pensar que, la adherencia del recubrimiento tiene relación con la estructura de la capa aleada. La Fig. 3.4 corresponde a un recubrimiento con este tipo de falla, presenta ciertos fisuramientos en la subcapa delta, los cuales comienzan a partir de la capa zeta.

La Fig. 3.5 muestra la falla por adherencia en una probeta a la que se le ha sometido al ensayo de doblado.



24 X

Fig.3.5.- Falla de Adherencia por Doblado

- ASPECTO SUPERFICIAL.- Todas las probetas enfriadas en agua tienen un aspecto brillante. Las probetas enfriadas en aire presentan diferentes aspectos superficiales de acuerdo a los parámetros de galvanización; así, aquellas que corresponden al rango desde los 430 °C a 440 °C , su aspecto superficial es brillante pero cuarteado, como se puede observar en las Figs. 3.6 y 3.7. Al entrar a la temperatura de los 450 °C , el aspecto superficial tiende a mejorar y es así que, en el rango de 90 a 120 s el aspecto es liso y brillante. A partir de los 150 s el tono cambia, de brillante a una combinación de aspectos brillantes y mates o sea irregular; en cambio, a los 460 °C tiende a tomar la coloración mate, y ésta continúa hasta los 470 °C.

El aspecto superficial de la capa galvanizada está relacionada con la difusión post-inmersión del hierro en la capa de zinc puro. Es así que, para las probetas enfriadas en el aire, la difusión se sucede con más intensidad a altas temperaturas que a bajas. Esta es la razón de la coloración mate de las probetas galvanizadas a alta temperatura. Para las probetas enfriadas en el agua, la difusión se ha eliminado casi totalmente, al extraer rápidamente su calor almacenado, de ahí la coloración brillante de estas probetas.



24 X

Sin Ataque

Fig. 3.6.- Aspecto Superficial brillante cuarteado. Galvanizado en el rango de 430-440 °C



24 X

Sin Ataque

Fig. 3.7.- Aspecto Superficial de la
Fig. 3.6 vista de un ángulo
de perfil.

CONCLUSIONES

- 1.- Se ha encontrado que el Acero SAE 1010 ampliamente utilizado en la producción nacional de herrajes, es altamente reactivo para el galvanizado, lo que promueve la obtención de un espesor de galvanización adecuado en poco tiempo de inmersión; en contraparte se tiene el problema de la disminución de la adherencia, al sobrepasar ciertos límites de temperatura y tiempo de inmersión.
- 2.- Los mejores resultados de galvanizado, cuando las probetas son enfriadas en el aire, se los encuentra en el rango entre los 440 °C a 460 °C para tiempos de inmersión comprendidos entre los 90 a 120 s. Sin embargo, cuando las probetas son enfriadas en agua, se encuentra buenos resultados a intervalos de temperaturas de 460 °C a 470 °C, en un rango de inmersión entre los 60 s y 90 s.
- 3.- La falla por adherencia no necesariamente se relaciona directamente con el espesor de la capa aleada, sino que parece tener relación con su microestructura.

4.- Los mejores aspectos superficiales se obtienen cuando las probetas han sido enfriadas en agua después de la inmersión.

RECOMENDACIONES

- 1.- Es necesario que el fabricante de artículos galvanizados se provea del material adecuado para galvanización, especialmente cuando se trate de aplicaciones que van a sufrir deformación subsecuente al galvanizado.
- 2.- Para trabajar a temperaturas comprendidas en el rango de 460 °C a 470 °C con un enfriamiento en agua posterior al galvanizado, es necesario hacer un análisis económico, ya que si por un lado los tiempos de inmersión disminuyen, por otro lado se tiene un gasto mayor de energía.
- 3.- Al galvanizar el Acero SAE 1010, es importante tener un sistema de control de temperatura de una precisión ± 10 °C que garantice trabajar con los parámetros recomendados en este trabajo.
- 4.- Continuar con el estudio de la falla por adherencia enfocándolo desde el punto de vista de un análisis microestructural, sería muy recomendable.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- A.S.M., "Heat Treating Cleaning and Finishing" (American Society for Metals, Ohio, 1972), pp. 500-502.
- 2.- A.S.M., "Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels" (American Society for Metals, Ohio, 1979), pp. 198.
- 3.- A.S.M., "Atlas of Microstructures of Industrial Alloys" (American Society of Metals, Ohio, 1973).
- 4.- C.W. WEGST, "Stahlschlüssel" (Western Germany, Druck, 1980), p. 142.
- 5.- J.R. MIGUEL y P. MOLERA, "La Galvanización en Caliente", (Barcelona, Cedel, 1976), pp 14-19.
- 6.- R.M.BURNS y W.W. BRADLEY, "Recubrimientos Protectores de los Metales ", Interciencias, 1964. pp. 119-122.
- 7.- U. HEUBNER y F.NILMEN, "Galvanizing of Silicon-Containing Steels" (París, Intergalva, 1979), p. 9.

- 8.- VASQUEZ y J. SISTIAGA, "Galvanización de Aceros con bajo contenido de silicio. Reactividad y estructura del recubrimiento", (Madrid, Revista de Metalurgia CENIM, Vols. 14, N-º 6, 1978), p. 346.