

32



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA PARA LOGRAR EL
ZINALQUIZADO DEL ACERO AL CARBONO Y
EVALUACIÓN DEL RECUBRIMIENTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

GERMÁN FERNÁNDEZ GARCÍA

JOSÉ ANTONIO GONZÁLEZ ESPINOSA

ASESOR: M. en I. JAVIER CERVANTES CABELLO



MÉXICO, D.F.,

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis padres, Julia y Francisco, con mi inmensa cariño y gratitud porque con su ejemplo y generosidad me han guiado brindándome su apoyo incondicional.

Al Maestro Javier Cervantes que con su apoyo y conocimientos guió por buen camino este trabajo de tesis.

A mis compañeros y amigos de la Facultad de Ingeniería por su invaluable amistad

A mis amigos y amigas en quienes he encontrado apoyo y ayuda en los momentos más difíciles de mi carrera y mi vida.

A todas aquellas personas que con su actitud contribuyeron a impulsarme para lograr esta meta tan importante de mi vida.

Germán Fernández García

A mis padres, especialmente a mi madre, sin su apoyo no estaría donde estoy.

Al Maestro Javier Cervantes quien guió exitosa y pacientemente este proyecto.

A Mayra por su aliento.

Y por supuesto, a la Universidad Nacional, forjadora de mi espíritu.

José Antonio González Espinosa.

Al Doctor Arturo Barba por su apoyo, consejos y ayuda al desarrollar la presente tesis.

Al Doctor Gabriel Torres por su apoyo en conocimientos y material para el trabajo de investigación.

A todos aquellas personas de la Facultad de Ingeniería que directa o indirectamente participaron con nosotros para la buena realización de la investigación

Germán y José Antonio.

I. INDICE.

I.	OBJETIVOS	I
II.	INTRODUCCIÓN	II
III.	PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN	V
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACERO AL CARBONO		
1.1	GENERALIDADES DEL ACERO AL CARBONO	2
1.2	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS AL CARBONO (DEL 1006 AL 1035).	8
1.3	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO	10
1.4	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO	11
1.5	CAMPOS DE APLICACIÓN DEL ACERO	12
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ZINALCO		
2.1	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ZINALCO	16
2.2	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ZINALCO	18
2.3	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO	20
2.4	RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ZINALCO	22
2.5	PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN USADOS POR EL ZINALCO	24
2.6	CAMPOS DE APLICACIÓN DEL ZINALCO	25
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES PARA LOGRAR RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES		
3.1	INTRODUCCIÓN	29
3.2	TIPOS DE RECUBRIMIENTOS	31
3.3	GALVANIZADO EN CALIENTE	37
3.4	METODOLOGÍA GENERAL PARA GALVANIZADO	41
3.5	EQUIPO PARA GALVANIZADO	46
3.6	POST TRATAMIENTO	48
3.7	DIFUSIÓN	51
CAPÍTULO 4. MECANISMOS DE LA CORROSIÓN Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN		
4.1	INTRODUCCIÓN. EFECTO DE ALGUNAS ALEACIONES EN EL MATERIAL A GALVANIZAR	59
4.2	DIAGRAMAS DE FASE DE LAS ALEACIONES PRESENTES EN EL ZINALQUIZADO	78

CAPÍTULO 5.	DESARROLLO EXPERIMENTAL EN LA PRODUCCIÓN DEL ZINALQUIZADO	
5.1	ACTIVIDAD EXPERIMENTAL INTRODUCCIÓN	85
5.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL	85
5.3	EXPERIMENTACIÓN PREVIA	88
5.4	PRODUCCIÓN DEL MATERIAL	94
CAPÍTULO 6.	OBTENCIÓN DE RESULTADOS	
6.1	OBTENCIÓN DE RESULTADOS	98
CAPÍTULO 7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	
7.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS. INTRODUCCIÓN	127
7.2	OBTENCIÓN DEL MATERIAL RECUBIERTO	127
7.3	ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA	128
IV.	CONCLUSIONES	
8.1	CONCLUSIONES RELATIVAS A LA OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.	139
8.2	PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DEL RECUBRIMIENTO	140
8.3	CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS OBSERVACIONES REALIZADAS EN EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO	140
8.4	RECOMENDACIONES A FUTUROS TRABAJOS CON ESTE RECUBRIMIENTO	141
V.	BIBLIOGRAFÍA	
9.1	LIBROS	144
9.2	TESIS	133
9.3	PUBLICACIONES	134

OBJETIVOS

- El presente trabajo consta de dos objetivos fundamentales, siendo el primero de ellos lograr la unión del zinc con el acero como material base por medio de inmersión en baño caliente.
- El segundo objetivo consiste en establecer la metodología del proceso y los parámetros óptimos para lograr la unión adecuada.

INTRODUCCIÓN.

Desde la antigüedad, el hombre a hecho uso de los metales para resolver muchas de sus necesidades materiales, inicialmente en su forma pura y después en forma de aleación. Este último tal vez de manera accidental en un principio, pero posteriormente la búsqueda sistemática de nuevos metales y aleaciones así como de procedimientos más eficaces para trabajar y utilizar los ya conocidos, dio origen a la metalurgia.

Casi ningún metal en su forma pura reúne características apropiadas para sus aplicaciones industriales. El aluminio por ejemplo es muy blando y el zinc es sumamente frágil debido a su cristalización en forma de granos hexagonales muy gruesos. Sin embargo, los metales al combinarse forman las aleaciones, las cuales sometidas a diferentes tratamientos termomecánicos, adquieren propiedades físicas que permiten transformarlas mediante diversos procesos en una gran variedad de productos.

Hoy la búsqueda de nuevos materiales no radica en la exploración de yacimientos o de metales desconocidos, sino en la obtención de materiales por medio de la combinación de propiedades de los ya conocidos, es decir, de las aleaciones.

Aún se desconocen las características de muchos materiales. Por eso cuando se descubren propiedades de alguno de ellos es muy posible que desplacen con suma facilidad del mercado a los más usuales. Por ejemplo, cuando apareció el aluminio, los países productores de cobre, como Chile, fueron gravemente afectados, pues el aluminio resultó ser mejor como cable de alta tensión. La fibra óptica desplaza rápidamente al cobre como alambre conductor de señales. Otro caso es el de los plásticos, empleados en una gran cantidad de industrias de distinta índole, como la automotriz, electrónica, eléctrica, plomería, etc. De esta manera, la fuente de producción de un país que sirve para ganar divisas y emplear a una buena parte de su población se ve de pronto inutilizada por la irrupción de otros materiales más efectivos y menos costosos.

En México este problema presenta rasgos particulares ya que se hace uso de un gran volumen de materiales de importación y se descuidan las reservas de metales con que se cuenta en buen volumen y calidad, tal es el caso del cobre y el zinc, que están perdiendo terreno en sus aplicaciones a nivel mundial. La mayor parte de la producción nacional de zinc se exporta como mineral o concentrados, sin mucho beneficio para el país. De las 200,000 toneladas anuales de zinc que producimos, por lo menos hacia 1989, alrededor de la mitad se vendían como metal crudo, a un precio relativamente bajo.

Hasta 1986, la caída en el precio mundial de zinc fue constante. En este año Japón empezó a utilizarlo en el galvanizado de las carrocerías para automóviles. Entonces la demanda subió, pero el uso para el cual era destinado no varió. El 50 o el 60% del zinc en el mundo sigue utilizándose para proteger al acero de la corrosión.

En México el zinc a estado durante mucho tiempo subutilizado. Así, con la idea de mejorar su aplicaciones, se inició la investigación del material para tratar de introducirlo en otros campos.

Por otra parte, México no posee Bauxita, mineral del que se extrae el aluminio; y la electricidad necesaria en el proceso de obtención del metal, no es barata ni abundante. Así, la mayor parte del aluminio que utilizamos es importado.

Como sabemos, la industria de la construcción consume el 70 % del aluminio. Esta dependencia es significativa y peligrosa. El problema, no es que nos enfrentemos a una escasez mundial de aluminio, sino que debido a su precio no podamos pagar los incrementos anuales provocados por su demanda.

México acostumbra vender su materia prima y comprarla procesada en lugar de aprovechar sus recursos naturales y producir a partir de estos sus propios productos terminados.

En nuestro país hay grandes yacimientos de bismuto, arsénico, selenio, cadmio, zinc, y muchos más, entre los más importantes.

Con respecto del zinc se ha trabajado en el desarrollo de aleaciones con el objeto de ampliar el campo de aplicación para este metal, del cual México es un importante productor a nivel mundial, y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. Los resultados de las investigaciones realizadas con este material condujeron al desarrollo de la aleación zinalco la cual, puede tener diversas aplicaciones dada su posibilidad de ser transformada tanto por procesos de fundición como procesos de deformación plástica, permitiendo así que esta aleación pueda tener varias aplicaciones entre las que se pueden contar las siguientes:

- Perfiles arquitectónicos para intemperie.
- Perfiles para ventanería.
- Fabricación de piezas automotrices.
- Componentes para torres eléctricas de transmisión.
- *Productos laminados para la industria de la construcción.*
- Elementos para cerrajería
- Transporte colectivo.

Este material presenta características similares a las del aluminio con respecto a su capacidad de pasivarse por medio de un óxido que se presenta en su superficie y que evita su corrosión, esto es debido a que dos de sus materiales componentes tienen esta característica, el aluminio y el zinc. Por lo cual en este trabajo se busca encontrar la metodología para lograr el recubrimiento del acero, propenso a la corrosión, con el zinalco.

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La aleación zinalco, es una combinación de zinc, aluminio y cobre, la cual surgió como un producto de estudios básicos realizados sobre las propiedades del zinc y cobre. Se llamó zinalco porque es una palabra compuesta por las primeras letras de los metales que lo componen: zinc, aluminio y cobre

Los estudios sobre este material se iniciaron en el año de 1973, en el Instituto de Investigación de Materiales, con el objeto de contribuir al desarrollo de aleaciones en las que se emplearon insumos nacionales, como son el zinc y el cobre, en virtud de que se presentaban señales de debilitamiento en cuanto a su uso, por efecto de la sustitución por aluminio y plástico en todo el mundo.

Desde sus inicios y hasta la fecha el zinalco ha experimentado un gran avance en cuanto a las propiedades mecánicas y físicas, que se presentan, entre las cuales se puede enunciar las siguientes (Tabla III.1) .

Temperatura de fusión	421-481°C
Densidad	5.4 g/c.c
Módulo de elasticidad	110-130 GPa
Conductividad eléctrica	37%
Conductividad térmica	37%
Coefficiente de expansión térmica	25 micrómetros/mm K
Color	Blanco grisáceo
Tabla III.1 Propiedades del Zinalco	

Otra de sus propiedades es la de formar un óxido en su superficie el cual logra que el material se pasive y por lo tanto evita que se corroa, por lo cual se plantea la presente investigación para lograr utilizar al acero como material base y el zinalco como

recubrimiento para evitar que el acero se corroa y por lo tanto se vuelva inutilizable con su consabido ahorro.

JUSTIFICACIÓN.

Es por las razones anteriormente expuestas que se pretende generar o realizar un recubrimiento en el acero, que presente solidez de adhesión, que incluso permita ser deformado en conjunto con el acero, y que evite la corrosión en el material base.

El recubrimiento que se logre permitirá que el acero pueda ser utilizado en campos muchos más amplios, y adicionalmente, el zinalco tenga una mayor aceptación tanto en el ámbito industrial como comercial, con lo cual se logrará un beneficio importante en la utilización de un recurso natural que existe en México como lo es el zinc, del cual México cuenta con grandes excedentes ya que, de las 270,000 toneladas que produce anualmente solo se utilizan 70,000 y las restantes se venden a la mitad del precio con respecto del aluminio.

HIPÓTESIS.

Basados en el hecho de que se pretende realizar un recubrimiento superficial en el acero que presente buena adhesión y que mejore su capacidad de soportar medios corrosivos, y con base al estudio previo sobre el problema que se aborda, se propone que dicho recubrimiento sea realizado con el proceso de inmersión en baño caliente, ya que esta técnica de recubrimiento ha permitido la unión de materiales que por otros métodos es más difícil de conseguir.

Un punto importante que debe considerarse para lograr la perfecta unión de dos o más materiales en el estado sólido y líquido es que los metales deben de ser fácilmente difundibles uno en el otro.

POSIBILIDAD DE LOGRAR EL RECUBRIMIENTO.

El recubrimiento metálico puede ser logrado por distintos procesos de fundición, sin embargo el método mas sencillo y el más empleado es el de inmersión en baño caliente. En el cual un material sólido se introduce en otro material líquido, logrando una difusión entre estos dos. La prioridad para lograr la unión de los dos materiales es la excesiva limpieza en el material sólido para proveer superficies totalmente libres de contaminantes. Cuando el material limpio es sumergido en el líquido se obtiene una unión satisfactoria ya que si hubiera impurezas estas no permitirían la difusión adecuada y llevando esto a un fenómeno de corrosión del material base. Subsecuente un tratamiento térmico es necesario para inducir la difusión entre los materiales y proveer el cambio de estructuras de fundición presentes debido a la inmersión en el metal líquido, logrando así un material compuesto formado por los dos materiales que son unidos fuertemente mediante el mecanismo de difusión en estado líquido.

Bajo el estudio previo y detallado del proceso de revestimiento por inmersión en baño caliente se propone la adopción de esta técnica para producir el material compuesto acero-zinalco. La explicación detallada de este proceso se presentará en el contenido de la tesis dada la importancia de las etapas en la obtención de una unión adecuada de los materiales.

Partiendo del hecho que se pretende desarrollar la tecnología para obtener un material compuesto por inmersión acero-zinalco se realizará el estudio general de ambos materiales, con la finalidad de determinar en que medida las propiedades de cada uno pudieran influir en la obtención del material compuesto. Así mismo se estudiarán los elementos correspondientes al proceso de inmersión en baño caliente, ya que este método es el que se empleará en la generación del material compuesto acero-zinalco. El proceso de inmersión, así como la investigación correspondiente al aluminio y al zinalco se anexan en los primeros capítulos del trabajo.

CAPÍTULO 1:
CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ACERO AL
CARBONO

1.1 ACERO AL CARBONO. GENERALIDADES.

Esencialmente, la fabricación del acero es un proceso de oxidación que rebaja los contenidos de carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre de una mezcla de arrabio y chatarra de acero. En 1856, con el proceso Kelly-Bessemer se inauguró prácticamente una industria al conseguir fabricar acero en cantidades comerciales. El tonelaje de acero producido en 1908 con el proceso en solera abierta superó al producido con el proceso Bessemer y en 1960 acaparaba más del 90% de la producción total. Actualmente, la mayoría de nuestros aceros comerciales se producen en hornos de oxígeno de diversos tipos y en hornos eléctricos, que reciben el nombre genérico de convertidores.

Proceso Bessemer.

En este proceso se aprovecha el hecho de que el aire, al atravesar el arrabio, origina reacciones exotérmicas con las que el metal se afina para dar acero. El carbono se oxida dando CO y CO₂, que son gases. La acción del aire forma, además, grandes cantidades de óxidos de hierro, que luego reaccionan formando óxidos de silicio y manganeso, llevando a éstos a la escoria. En este proceso, empero, las reacciones no afectan a los contenidos de fósforo y azufre y estos elementos, un tanto indeseables, permanecen en el metal.

En cada hornada de 15 minutos podían elaborarse unas 25 toneladas, pero el control químico del producto se conseguía difícilmente. Además en el metal se introducían buenas cantidades de nitrógeno cuando el aire atravesaba la masa fundida.

Proceso de solera abierta.

Este proceso, llamado también proceso Martín-Siemens, apareció comercialmente hacia 1870 y tiene lugar esencialmente en un receptáculo, más ancho que profundo, con revestimiento refractario y cuyas dimensiones son de 5 a 11 metros de diámetro por unos 60 centímetros de alto. El proceso en este sistema consiste en fundir de 150 a 250 toneladas de material de buena calidad, elevar su temperatura y tratarlo hasta conseguir un producto de la composición química deseada. Estos convertidores son de naturaleza regenerativa, en los que el aire caliente y el combustible gaseoso penetran por un extremo de la solera, pasan por encima de la carga de arrabio, chatarra de acero y caliza y los gases remanentes terminan calentando un colector de calor instalado en el otro extremo del horno. Invertiendo el flujo, los recuperadores ceden el calor que han almacenado al viento entrante que prosigue la eliminación de manganeso, fósforo, silicio y azufre del baño.

Un ciclo completo de fusión y afinado dura unas 7 a 10 horas, con la toma de muestras periódicas y adiciones al baño. Este es un proceso de control sencillo, en el que se obtiene un producto de calidad constante y bajos contenidos de fósforo y azufre y de gran flexibilidad, para el que pueden emplearse cargas compuestas de chatarra hasta un ochenta por ciento. Con los últimos perfeccionamientos se han logrado acelerar este proceso, unas veces proyectando oxígeno por encima de la superficie de la masa fundida, y otras veces introduciéndolo directamente en el baño mediante un conducto refrigerado por agua, proceso que recibe el nombre de inyección por el fondo.

Inyección de oxígeno directa.

Este proceso, conocido también como proceso LD apareció en 1952, con la intención de aprovechar la disponibilidad de grandes cantidades de oxígeno puro. En el mismo se emplea un convertidor abierto con revestimiento refractario básico, de gran tamaño y forma cilíndrica, que se carga con 200 a 400 toneladas de chatarra de acero y arrabio fundido. Luego vuelve a enderezarse el convertidor y en su interior se vierten caliza y fundente calcinados a través de una tolva. Seguidamente se hace descender hasta dos metros en el seno del baño una lanza de oxígeno, de unos 18 metros de longitud y 25 cm de diámetro, con la que se proyecta oxígeno a presión considerable, con un caudal que supera la tonelada por minuto, proyecta la escoria hacia los lados y reacciona violentamente con el hierro al descubierto para formar óxido de este metal. Parte de éste reacciona con el fundente para formar escoria básica, mientras que el resto se mezcla en el baño, por turbulencia, y oxida las impurezas. En el tratamiento con oxígeno se invierten entre 15 y 20 minutos de los 40 a 45 necesarios para el ciclo completo. Antes de sangrar se toman muestras para análisis y se efectúan los ajustes precisos para alcanzar las composiciones buscadas.

Respecto a los de solera abierta, los convertidores de inyección directa de oxígeno presentan una capacidad de producción diez veces superior. Las inversiones y gastos de funcionamiento son menores, con tal que se disponga de metal líquido en cantidad suficiente. Otros factores a favor de estos convertidores respecto a los de solera abierta son la mejor calidad de los lingotes, menores consumos de energía y un control ambiental más sencillo. El inconveniente más importante de este proceso es que requiere cargas de poco contenido en chatarra (del 30 al 35 por ciento) y baños de gran volumen. Además, dependiendo únicamente de unos pocos convertidores, un período improductivo prolongado puede afectar gravemente a una planta entera.

Los esfuerzos de investigación actuales se encaminan fundamentalmente a aumentar la cantidad de chatarra en la carga y mejorar el rendimiento energético del proceso. La energía necesaria para producir una tonelada de acero a partir de chatarra es sólo el 26% de la que se gasta en producir la misma cantidad a partir de menas. Además, la contaminación del aire y el agua y las escombreras se reducen todas en más del 75 %. También existe la inyección por el fondo.

Aceración en convertidor eléctrico.

Actualmente, en los convertidores eléctricos se produce un tonelaje sustancial de acero. En tiempos, estos convertidores se asociaban a la producción de pequeñas cantidades de materiales especiales, tales como aceros para herramientas, aceros inoxidable, aceros para matricería y aceros para aviación, pero hoy en día se emplean profusamente para los casos en que se desean cantidades menores y contenidos de aleadores elevados, o cuando su aptitud para admitir 100 por ciento de chatarra supone una ventaja determinante

Hay un tipo de convertidor en el que se hace saltar un arco eléctrico entre los electrodos y el metal en fusión. Normalmente se emplean tres electrodos en combinación con una fuente de alimentación eléctrica trifásica. El calor necesario para el proceso lo proporcionan las corrientes eléctricas de gran amperaje que atraviesan el mismo metal. Para controlar la composición química del producto se emplean diversos baños de escoria.

Los inconvenientes más importantes del convertidor eléctrico residen en su bajo rendimiento energético una vez finalizada la fusión y la contaminación del baño con gases indeseables durante el proceso.

Normas.

Sin duda el grupo más importante de aceros aleados, desde el punto de vista industrial, es el designado mediante el sistema de identificación AISI. Este, en el que se clasifican los aceros de acuerdo con su composición, fue iniciado por la Society of Automotive Engineers (SAE) al objeto de normalizar en parte los aceros usados por la industria automovilística. Posteriormente fue adoptado y ampliado por el American Iron and Steel Institute (AISI) y se ha convertido en el sistema generalmente admitido en Norteamérica. En dicho sistema, los aceros ordinarios y los de baja aleación se identifican con números de cuatro cifras, la primera de las cuales indica cuáles son los aleadores principales. Estas dos primeras cifras se agrupan arbitrariamente en la tabla 1.1 (págs. 6 y 7). Las dos últimas cifras indican el contenido aproximado de carbono en centésimas por ciento.

Números y dígitos	Tipo de acero y contenido nominal de aleación, %.
ACEROS AL CARBONO	
10XX	Acero simple (Mn 1.00 máx.)
11XX	Resulfurado
12XX	Resulfurado y refosforizado
15XX	Acero simple (rango máx de Mn: 1.00-1.65)
ACEROS AL MANGANESO	
13XX	Mn 1.75
ACEROS AL NIQUEL	
23XX	Ni 3.50
25XX	Ni 5.00
ACEROS AL NIQUEL-CROMO	
31XX	Ni 1.25, Cr 0.65 y 0.80
32XX	Ni 1.75; Cr 1.07
33XX	Ni 3.50, Cr 1.50 y 1.57
34XX	Ni 3.00, Cr 0.77
ACEROS AL MOLIBDENO	
40XX	Mo 0.20 y 0.25
44XX	Mo 0.40 y 0.52
ACEROS AL CROMO-MOLIBDENO	
41XX	Cr 0.50; 0.80 y 0.95; Mo 0.12, 0.20, 0.25 y 0.30
ACEROS AL NIQUEL-CROMO-MOLIBDENO	
43XX	Ni 1.82, Cr 0.50 y 0.80; Mo 0.25

Capítulo 1. Características generales del acero al carbono

43 B VXX	Ni 1.82, Cr 0.50; Mo 0.12 y 0.25; V 0.03 mín
47XX	Ni 1.05; Cr 0.45; Mo 0.20 y 0.35
81XX	Ni 0.30, Cr 0.40; Mo 0.12
86XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.20
87XX	Ni 0.55, Cr 0.50; Mo 0.25
88XX	Ni 0.55; Cr 0.50; Mo 0.35
93XX	Ni 3.25; Cr 1.20; Mo 0.12
94XX	Ni 0.45; Cr 0.40; Mo 0.12
97XX	Ni 0.55, Cr 0.20; Mo 0.20
98XX	Ni 1.00, Cr 0.80; Mo 0.25
ACERO AL NIQUEL MOLIBDENO	
46XX	Ni 0.85 y 1.82; Mo 0.20 y 0.25
48XX	Ni 3.50; Mo 0.25
ACEROS AL CROMO	
50XX	Cr 0.27, 0.40, 0.50 y 0.65
51XX	Cr 0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 y 1.05
ACEROS AL CROMO (PARA COJINETES)	
50XXX	Cr 0.50; C 1.00 mín.
51XXX	Cr 1.02; C 1.00 mín.
52XXX	Cr 1.45; C 1.00 mín.
ACEROS AL CROMO-VANADIO	
61XX	Cr 0.60, 0.80 y 0.95, V 0.10 y 0.15 mín
ACEROS AL CROMO-TUNGSTENO	
72XX	W 1.75; Cr 0.75
ACEROS AL MANGANESO-SILICON	
92XX	Si 1.40 y 2.00; Mn 0.65, 0.82 y 0.85; Cr 0 y 0.65
ACEROS DE BAJA ALEACIÓN DE ALTA RESISTENCIA	
9XX	Varios grados SAE
ACEROS AL BORO	
XXBXX	La B denota el acero al Boro
ACEROS APLOMADOS	
XXLXX	La L denota el acero aplomado
(a) las XX en los dos últimos dígitos de estas designaciones indican el contenido de carbón (en céntimos de porciento) que está contenido en el acero.	
Tabla 1.1 Sistema de designaciones SAE-AISI	

Puede emplearse un prefijo para denotar el proceso seguido en la obtención del acero:

A acero básico de hogar abierto
B Acero ácido de Bessemer
C Acero básico en horno BOF
D Acero ácido al carbono de hogar abierto
E Horno de arco eléctrico
H Normalizado
L Adición de plomo
X Permite variaciones entre los límites admisibles de Mn, S, Cr.
Cuadro 1.1. Prefijos de los procesos

1.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS AL CARBONO (DEL 1006 AL 1035, tabla 1.2).

Designación de grado AISI	Límites de composición química (análisis en olla), %			
	C	Mn	P	S
1006	0.08 máx.	0.25-0.40	0.04 máx.	0.05 máx.
1008	0.10 máx.	0.30-0.50	0.04 máx.	0.05 máx.
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04 máx.	0.05 máx.
1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.04 máx.	0.05 máx.
1018	0.15-0.20	0.60-0.90	0.04 máx.	0.05 máx.
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04 máx.	0.05 máx.
1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.04 máx.	0.05 máx.
1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.04 máx.	0.05 máx.
1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.04 máx.	0.05 máx.

Tabla 1.2 Composición química del acero al carbono AISI.

Donde C: carbono; Mn. Magnesio; P: fósforo y S: azufre.

Las láminas de acero también se clasifican por las normas ASTM de acuerdo a su acabado como se muestra en la tabla 1.3:

Producto	Espesor		Ancho	
	mm	in	mm	in
Lámina rolada en frío	0.35-2.0 ≥0.35	0.014-0.082 >0.014	>50-300 >300	>2-12 >12
Símbolo de especificación (No. ASTM)				
Unidades métricas			Unidades Inglesas	
A366M, A619M o A620M			A366, A619 o A620	
A366M, A619M o A620M			A366, A619 o A620	

Tabla 1.3 Clasificación por tamaño y características de la lámina rolada en frío

A continuación se muestran las características de la lámina de acero al carbono rolada en frío (tabla 1.4):

Calidad o templado	Número de especificación básico aplicable	Grado de asignación SAE-AISI	Terminado superficial			
			Rolado-templado;		Recocido;	
			Para partes expuestas		Para partes no expuestas	
			Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo
Calidad comercial	A366	1008-1012	Mate	E	Mate	U
			Brillo comercial	B		
			Brillante	L		
Calidad de estirado	A619	1006-1008	Mate	E	Mate	U
			Brillo comercial	B		
			Brillante	L		
Calidad de estirado, especialmente muerto	A620	1012-1018	Mate	E	Mate	U
			Brillo comercial	B		
			Brillante	L		

Tabla 1.4 Tabla de lámina de acero al carbono rolada en frío disponible

A continuación se muestra la tabla de selección y especificaciones de la condición de superficie para lámina de acero al carbono (tabla 1.5):

Símbolo de especificación	Descripción de la superficie	Descripción de la superficie aplicable
U	Terminado de superficie para uso común para partes automotrices sin exponer. Apariencia mate. Normalmente recocidas.	Lámina rolada en frío
E	Terminado de superficie para uso común para partes automotrices expuestas que requieren una buena superficie pintada. Libre de marcas de esfuerzo y estrias. Apariencia mate. Roladas y templadas.	Lámina rolada en frío
B	Lo mismo que la anterior, excepto que esta tiene apariencia de brillo comercial	Lámina rolada en frío
L	Lo mismo que la anterior excepto por la apariencia brillante.	Lámina rolada en frío

Tabla 1.5 Selección y especificaciones de la condición de superficie para lámina de acero al carbono.

1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ACERO .

A continuación se muestran las principales propiedades físicas de la lámina de acero al carbono 1018 (tabla 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9):

Grado SAE-AISI	Tratamiento o condición	Coeficiente promedio de expansión $\mu \cdot m / m \cdot K$, en °C						
		20-100	20-200	20-300	20-400	20-500	20-600	20-700
1018	Recocido	12.0	...	..	13.5	...	14.4	...

Tabla 1.6 Coeficientes de expansión térmica lineal para lámina de acero 1018.

Grado SAE-AISI	Tratamiento O Condición	Conductividad, $W / m K$, en $^{\circ} C$										
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	1000	1200
1018	Recocido	51.9	50.8	48.9	...	..	...	...	.	.	...	..

Tabla 1.7 Conductividades térmicas de la lámina de acero al carbón 1018.

Grado SAE-AISI	Tratamiento to Condición	Calor específico, $J / Kg K$, en $^{\circ} C$											
		50-100	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400	450-500	500-550	550-600	650-700	750-800	800-850
1018	Recocido	486	519	...	...	...	599	...	...	...	...	...	...

Tabla 1.8 Calores específicos de la lámina de acero al carbono 1018.

Grado SAE-AISI	Tratamiento o Condición	Resistividad, $\mu \cdot \Omega \cdot m$, a $^{\circ} C$											
		20	100	200	400	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
1018	Recocido	0.159	0.219	0.293	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabla 1.9 Resistividades eléctricas de la lámina de acero al carbón 1018.

1.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO (Tablas 1.10 y 1.11).

Clase o grado	Esfuerzo de cedencia, mínimo		Resistencia a la tensión mínimo		Elongación en 50mm (2 in), mínimo, %.
	MPa	ksi	MPa	Ksi	
A	170	25	290	42	26
B	205	30	310	45	24
C	230	33	330	48	22
D, tipo 1 y 2	275	40	360	52	20
E	550	80	565	82	...

Calidad estructural de láminas rociadas en frío en cortes o rollo (ASTM 611)

Tabla 1.10 requerimientos de tensión para láminas de acero al carbono rociadas en frío.

Tipo o calidad	Características especiales	Esfuerzo de cedencia		Esfuerzo de tensión		Elongación en 50 mm, %	Dureza, HRB	Índice de endurecimiento por deformación, n
		MPa	ksi	MPa	Ksi			
Comercial	Propiedades estándar	234	34	317	46	35	0.18	1.0
Acero estampado	Troquelado	207	30	310	45	42	0.22	1.2
Acero de estampado especial	Estampado profundo	172	25	296	43	42	0.22	1.6
Libre de intersticios	Estampado profundo extra	152	22	317	46	42	0.24	2.0
Esfuerzo medio	Formabilidad	414	60	483	70	25	0.20	1.2
Alto esfuerzo	Formabilidad moderada	689	100	724	100	10	...	...

Tabla 1.11 Propiedades mecánicas típicas para lámina de acero rolado en frío.

1.5 CAMPOS DE APLICACIÓN DEL ACERO.

La variedad de aplicaciones del acero para fines de ingeniería se debe al amplio intervalo de propiedades físicas que se puede obtener por cambios en el contenido de carbono y en el tratamiento térmico. Las aplicaciones del acero al carbono se dan en la Tabla 1.12.

Porcentaje C	Aplicaciones
0.05-0.10	Lámina, tira, tubos, clavos de alambre o puntas de París.
0.10-0.20	Remaches, tornillos, partes para cementarse o templarse superficialmente
0.20-0.35	Acero estructural, placa o palastro, piezas forjadas tales como eje de levas
0.35-0.45	Acero de maquinaria (árboles, ejes, vástagos de conexión, etc.)
0.45-0.55	Piezas grandes de forja (cigüeñales, engranajes para trabajo pesado, etc.)
0.60-0.70	Matrices para cabezas de pernos y para estampación; rieles, tornillos opresores o prisioneros.
0.70-0.80	Cuchillas para tijeras o cizallas, cortafíos o cinceles, martillos, picos, sierras de cinta.
0.80-0.90	Matrices y punzones de corte para preparar discos base, barrenas o perforadores para roca, cinceles de mano.
0.90-1.00	Resortes, escariadores, brochadoras, punzones pequeños y matrices o dados.
1.00-1.10	Resortes pequeños, herramientas para tornos, cepilladura, limadora y ranuradora o mortajadora.
1.10-1.20	Brocas salomónicas, machos de roscar pequeños, dados para cortar rosca o cojinetes de tarraja, cuchillería, herramientas pequeñas de torno.
1.20-1.30	Limas, asientas o jaulas para bolas, mandriles, hileras para estirado o trefilado, hojas para afeitar.
Tabla 1.12 Aplicaciones de los aceros al carbono.	

Aplicaciones del Acero 1018.

Además de los productos en forma general mencionados anteriormente se tienen los siguientes específicamente para el acero 1018:

a) Lámina de acero decapada:

- En la industria automotriz para partes no expuestas
- Flejes de alta resistencia.
- Para piezas con embutido severo en el uso industrial.

b) Lámina rollada en caliente sin decapar.

- Elaboración de tanques y contenedores.
- Tubería para diversos usos, alta y mediana resistencia.
- Acero de calidad estructural para aplicación automotriz, construcción, soportes ferroviarios, etc

c) Lámina rollada en frío.

- Partes expuestas y no expuestas para artículos de línea blanca.
- Perfiles y tubería.
- Tambores y envases.
- Insumos para mercados de galvanizadores.
- En la industria automotriz para partes expuestas y no expuestas.

CAPÍTULO 2:

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ZINALCO

2.1 ZINALCO. CARACTERÍSTICAS GENERALES.

En 1978 se inició en el Instituto de Investigaciones de Materiales (IIM) de la UNAM, un programa de investigación auspiciado por la OEA, sobre el zinc y sus aleaciones con el objeto de desarrollar nuevos campos de aplicación para este metal, del cual México es un productor a nivel mundial, y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio. Los resultados de las investigaciones condujeron al desarrollo de la aleación zinalco, la cual, además de tener aplicaciones en la rama de la fundición, también puede incursionar en el campo de la extrusión, en el de la forja y en el de la laminación, entre otros.

Para obtener el zinalco, el doctor Gabriel Torres Villaseñor y su grupo de trabajo del Departamento de Metalurgia y Cerámicos del mencionado Instituto, investigaron alrededor de ocho años.

Hoy, su aporte bien puede considerarse desde una doble perspectiva: la utilidad del material descubierto que, por sus propiedades y características, es apto para la fabricación de una amplia gama de productos, mediante procesos convencionales de transformación. Y la ventaja que representa para el país una aleación cuyo principal componente es el zinc, metal del que México, como ya se apuntó, es importante productor.

Esto permite que el zinalco resulte altamente competitivo, en comparación con aleaciones de cobre, aceros inoxidable y latones, según se explica en un informe del grupo Falmex-Galvotec, única empresa que decidió arriesgar su capital en un proyecto conjunto con la UNAM, encaminado a ensayar las aplicaciones del zinalco en la industria.

En 1984 el grupo Falmex-Galvotec inició el desarrollo industrial de esta nueva aleación ahora disponible por la industria.

En principio se eligió la composición del eutectoide zinc-aluminio cuyas propiedades permitían prever su aplicación en la industria de la construcción donde, antes que el peso, los factores importantes son la resistencia a la corrosión y la presentación.

Los científicos encontraron que, combinado con el aluminio, la densidad del zinc bajaba hasta hacerlo 35% más ligero que el hierro y el acero. Adicionalmente, las pruebas mostraron que el material desarrolla un óxido protector que impide su posterior oxidación. Este comportamiento, similar al que presentan las aleaciones de aluminio, asegura su utilización en diseños arquitectónicos expuestos a la intemperie, como ventanas y perfiles.

Por otro lado, la presencia del cobre en la aleación también tuvo sus efectos: las propiedades mecánicas de la aleación se ven sensiblemente mejoradas con la aleación de dicho elemento, ya que tanto su dureza como su esfuerzo de cedencia en compresión se ven mejorados.

El zinalco es básicamente la aleación eutectoide zinc-aluminio, modificada con cobre; conjuga la alta resistencia mecánica del acero estructural con la resistencia a la corrosión del aluminio. Es decir, incorpora en sí mismo las propiedades de los dos materiales más utilizados por la industria mundial.

Básicamente, el zinalco tiene una microestructura compuesta de dos fases; la fase alfa (a), es aluminio con menos del 1% del zinc disuelto y la fase beta (b), es zinc con menos del 0.5% de aluminio disuelto y en ambas fases hay una cierta cantidad de cobre, no bien determinada, que también se encuentra en solución. La forma geométrica que toman estas fases depende de la trayectoria seguida durante el enfriamiento a partir de una temperatura superior a 280°C pero inferior a 420°C, que es la región en donde el zinalco adquiere una estructura atómica idéntica a la del aluminio. Si se enfría rápidamente, la estructura resultante está formada por granos muy finos de fase alfa y beta, mientras que si se enfría lentamente las fases alfa y beta se arreglan en forma de láminas alternadas dando una estructura perlítica similar a la observada en los aceros.

En ambos casos los granos o las láminas son tan finos que sólo son observables con la ayuda de las técnicas de microscopía electrónica. Su ancho, o su diámetro, es menor a 3 micrómetros.

El zinalco viene a llenar un vacío existente entre los dos materiales con más aplicaciones industriales, el hierro y el aluminio. La densidad del zinalco es de 5.4 gr/cm^3 lo cual lo hace 31% más ligero que el acero (7.8 gr/cm^3); y aunque pesa el doble que el aluminio (2.7 gr/cm^3) su resistencia mecánica, semejante a la de un acero bajo en carbono, permite diseñar piezas tan ligeras como las del aluminio. Por otra parte, su resistencia a la corrosión es intermedia entre el aluminio y el zinc, lo cual lo coloca entre los materiales con buena resistencia a la corrosión. Un metal con estas propiedades puede incursionar en algunos de los campos de aplicaciones del acero, latón, bronce, zamak y aún en los del aluminio.

2.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ZINALCO.

Las principales propiedades físicas se muestran en la tabla 2.1. como podemos notar, la aleación tiene un intervalo de solidificación bastante amplio que va de 421°C a 481°C , lo que permite inyectar el material en los moldes en un estado semilíquido que produce una menor contracción durante la solidificación.

Concepto	Valor
Temperatura de fusión	421 a 481 °C
Densidad	5.4 gr/cm^3
Módulo elástico	110-130 GPa
Conductividad eléctrica	37 % del Cu.
Conductividad térmica	37 % del Cu.
Coefficiente de expansión térmica	25 micrómetros/mm K
Color	Blanco grisáceo

Tabla 2.1 Propiedades físicas del zinalco

El bajo punto de fusión de esta aleación, en comparación con el aluminio, latón, bronce o hierro de fundición, nos permite ahorros considerables de energía. La figura 2.1 nos da una idea del consumo de energía requerida para fundir el zinalco, el hierro, el bronce y el aluminio. Podemos notar que el zinalco requiere de 150 Wh/kg mientras que el mismo volumen de aluminio requiere cerca de 400 Wh/kg.

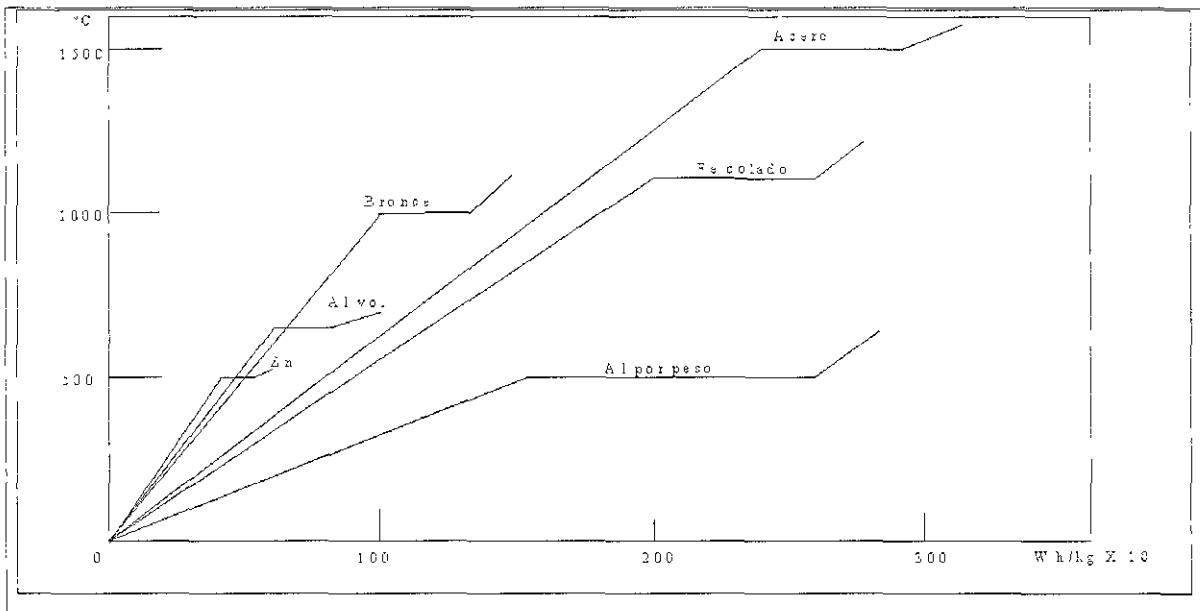


Figura 2.1 Cantidad de energía usada para fundir 1 kg de diferentes metales

El zinalco funde casi con el doble de rapidez del aluminio y tres veces más rápido que el bronce.

La densidad de la aleación la coloca en una posición intermedia entre el acero y el aluminio, comparativamente es 18% más ligera que el zamak (que es la aleación más conocida del zinc para fundición), 30% más ligera que el fierro de fundición y 40% más ligera que el latón y pesa el doble que el aluminio. Su coeficiente de expansión térmica, que reviste importancia en situaciones como ajustes de ventanas o fundiciones de precisión, es muy similar a la del aluminio.

2.3 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO.

Las propiedades del zinalco dependen de su microestructura, que es una mezcla de dos fases, una alfa rica en aluminio y otra beta rica en zinc. Esta estructura bifásica no desaparece con tratamientos térmicos, tan sólo cambia de geometría. Un enfriamiento lento desde 300°C nos produce una estructura perlítica similar a la del acero. El temple desde la misma temperatura nos produce una estructura de granos finos equiaxiales. Esta microestructura de dos fases tiene una energía de cohesión relativamente baja que provoca que el mecanismo de deformación sea por deslizamiento de una fase sobre otra, sin sufrir deformación plástica alguna de las fases.

Este mecanismo, que en los metales comunes se observa sólo cerca de su punto de fusión, es el mecanismo con el cual el zinalco se deforma a temperatura ambiente. Esto da como resultado una serie de fenómenos muy singulares, como el de no sufrir endurecimiento por deformación, efecto que es común en todos los metales. En esta forma las curvas de esfuerzo-deformación presentan un esfuerzo de cedencia muy indefinido.

La temperatura tiene un gran efecto sobre las propiedades mecánicas, ya que la fuerza de cohesión que une los granos del material, decae muy rápidamente con la temperatura, esto se traduce en una fuerte disminución del esfuerzo de tensión y al mismo tiempo en un impresionante aumento de la ductilidad. Este comportamiento limita sus aplicaciones a aquellas en las que la temperatura de trabajo no sobrepasa los 100°C.

Las diferentes microestructuras que se pueden inducir al zinalco proporcionan una gran gama de propiedades mecánicas, las cuales se han resumido en la tabla 2.2 (pág. 19), en la que aparecen los dos tipos de zinalco que actualmente están siendo comercializados por la Compañía Zinalco Extrusiones, S.A., perteneciente al grupo Falmex-Galvotec.

El zinalco II, tiene una resistencia mecánica superior al zinalco I (tabla 2.2) y no pierde sus propiedades mecánicas tan rápidamente con la temperatura pudiéndose extender su temperatura de trabajo hasta los 150°C. Esta variante de zinalco fue diseñada especialmente para usarse en fundición.

Zinalco I				
	Fundición en arena	Fundición por inyección	Extruido 270-300 °C	Laminado
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	270-290
Esfuerzo de cedencia (MPa)	280-300	290-310	280-320	300-310
Deformación máxima (%)	3-5	8-10	30-35	80-100
Dureza (R.B.)	50-55	60-65	40-55	25-30

Zinalco II		
	Fundición en arena	Fundición por inyección
Resistencia a la tensión (MPa)	350-390	400-420
Límite elástico (MPa)	260-270	340-370
Deformación máxima (%)	5-8	6-10
Dureza (R.B.)	65-80	55-70

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas del zinalco

El módulo elástico del zinalco, medido a partir de la pendiente de la curva esfuerzo-deformación está entre 110 y 130 GPa.

El mecanismo utilizado para aumentar la resistencia fue el de añadir elementos que se segreguen en las fronteras de grano como el silicio, el magnesio, o el calcio; con lo cual el deslizamiento de un grano sobre otro se verá impedido de ocurrir fácilmente produciendo endurecimiento en el material.

El material que resulta de la extrusión es el que mejores propiedades adquiere, ya que reúne alta resistencia (410 MPa) con alta ductilidad (40%) a temperatura ambiente y una dureza intermedia de 40 R.B. que le da una maquinabilidad semejante a la del duraluminio. La lámina es muy blanda y de muy alta ductilidad, con propiedades

superplásticas, es decir, se puede termoformar como si fuera plástico y al mismo tiempo puede adquirir altas durezas (55 R.B.), a través de tratamientos térmicos apropiados.

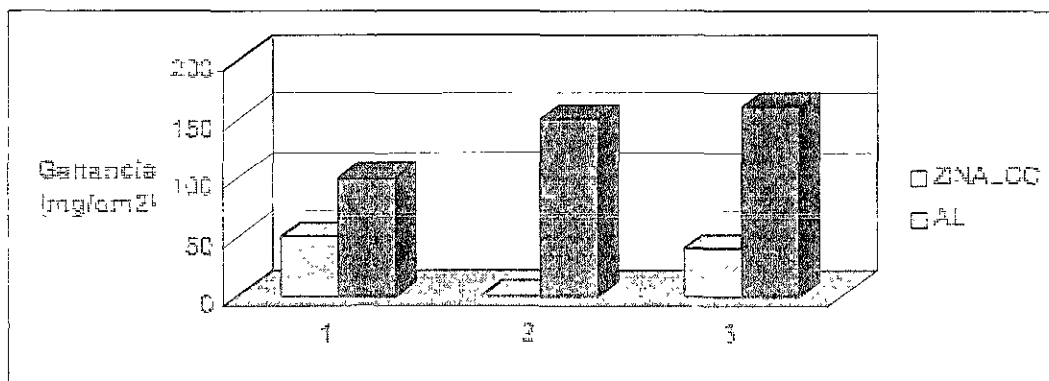
2.4 RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL ZINALCO.

La resistencia a la corrosión del zinalco es una de sus propiedades más atractivas ya que es superior a las que presentan los productos galvanizados, además de aceptar recubrimientos protectores por anodizado o inmersión en baños de cromatos. La aleación también puede ser pintada siempre y cuando la superficie esté perfectamente limpia.

Los electrodeósitos de cobre-níquel-cromo son otras posibilidades de dar acabados a esta aleación, con la ventaja de que la adherencia que tiene esta aleación a los electrodeósitos es superior a la que presenta el zinc puro o los plásticos.

Entre las propiedades más relevantes del zinalco es que con cualquiera de sus microestructuras tiende a formar una capa de óxido protector al someterlo al vapor de agua. El material deformado presenta una mayor ganancia en peso, posiblemente debido a que, la deformación produce levantamiento de los granos (relieve superficial); esto implica un aumento de la superficie efectiva reflejándose en una mayor cantidad de óxido protector formado.

La película protectora está formada principalmente de alúmina, es decir, el aluminio contenido en la aleación hace el papel de cromo en el acero inoxidable. La capa así formada alcanza un espesor de 1 mm, lo que es suficiente para mantener el brillo y color natural de la aleación, aunque esté expuesta a la atmósfera de la Ciudad de México.



- 1) Humedad 100%, temperatura 50°C, 1000 horas.
- 2) 100% de humedad + 100 ppm de SO₂.
- 3) ambiente salino.

Figura 2.2 Resultado de las pruebas de corrosión en diversos medios, para el Zinco y Al 380. En general, el Zinco se comporta mejor.

La figura 2.2 nos muestra el efecto de tres diferentes medios corrosivos sobre aluminio 380 y zinco. Los efectos son medidos a través de los cambios de peso que sufre una muestra con un área de un cuadrado de área. En todos los casos, el aluminio 380 sufrió un ataque mayor al presentado por el zinco. En el caso de presentarse SO₂ en el ambiente, a el zinco presenta una clara pasivación, mientras que el aluminio 380 sufre un severo ataque. Este resultado es particularmente importante cuando el material se enfrenta a medios tan severos como en las ciudades.

Experimentos detallados realizados en la Facultad de Química de la UNAM han demostrado que el zinco resiste mejor la corrosión que el aluminio en la Ciudad de México.

Las pruebas realizadas en cámara salina muestran que después de 10 horas de prueba el material pierde su brillantez y se torna grisáceo, a las 200 horas aparecen depósitos blancos localizados en ciertas zonas de la superficie. El cambio de color se debe a la formación de una película de óxidos protectores que protegen al material de una

corrosión progresiva. Al formarse esta capa se tiene la ganancia de peso en el material. Los depósitos blancos se originan en impurezas especialmente compuestas de hierro-aluminio.

El nivel de corrosión observado no es particularmente severo, en comparación por el sufrido por otros materiales comúnmente usados en aplicaciones ingenieriles.

2.5 PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN USADOS POR EL ZINALCO.

FUNDICIÓN.- Utilizado los procesos por molde de arena, molde permanente, por gravedad o por inyección a baja presión, sustituye al hierro gris, aluminio, bronce y latón.

INYECCIÓN.- El zinalco es el único material en el mercado que, contando con una resistencia similar a la del acero, se puede inyectar, permitiendo de esta manera la fabricación de piezas elaboradas en otros materiales, y elaborando pasos de transformación y ensamble.

EXTRUSIÓN.- No requiere de instalaciones especiales, pudiéndose utilizar los mismos equipos empleados para extruir aluminio, las barras y soleras constituyen un material inmejorable por su excelente maquinabilidad.

LAMINACIÓN.- La principal cualidad que presenta la lámina de zinalco es su resistencia a la corrosión, así como la posibilidad de deformarse utilizando la propiedad de ser superplástico.

2.6 CAMPOS DE APLICACIÓN DEL ZINALCO.

Las características físico-químicas del zinalco lo hacen apto para la fabricación de una amplia gama de productos mediante procesos convencionales de transformación.

El uso del zinalco representa una alternativa para la fabricación de piezas en las que tradicionalmente se ha utilizado zamak, aluminio, bronce, latón, hierro gris e incluso acero.

En la tabla 2.3 (pág. 24) se comparan características y propiedades del zinalco con otros materiales.

La introducción del zinalco al mercado no ha sido fácil. Se ha logrado hacer eficiente la producción del zinalco industrialmente. Y eso no solo incluye la producción del lingote. Deben resolverse los problemas que presenta durante los procesos de fundición, inyección y extrusión.

Algunos ejemplos de piezas producidas con zinalco son:

Las punteras negativas para el Sistema de Transporte Colectivo, como esas piezas friccionan contra los rieles su desgaste obliga a cambiarlas constantemente, antes se fabricaban con una aleación de cobre muy cara. La pieza de zinalco es 30% más económica y con ella se surte el 50% del consumo total. Así el Metro logra un ahorro anual cercano a los 400 000 pesos aproximadamente.

El Metro de Guadalajara sustituyó los boletos de cinta magnética con fichas de zinalco inyectadas a presión. Con el mismo proceso, Falmex fabricará 2000 válvulas de gas diarias para la empresa que controla el 40% del mercado de tanques. El precio es entre 20 y 30% debajo de costos internacionales.

Capítulo 2: Características generales del zinalco

Material	Zinalco I				Zinalco II		ZAMAK	Aluminio	Latón	Bronce	Hierro
Propiedad							5	380			Gris
Tipo de Moldeo	Fund: en arena	Fundi por inyec	Extru ido	Lami nado	Fundi en arena	Fundi: por inyec	Fundi: por inyec	Fund: por inyec	Fundi: en arena	Fundi: en arena	Fundi: en arena
Densidad (gr/cm ³)	5.4				5.4		6.7	2.74	8.5	8.88	7.4
Punto De fusión (°C)	421-481				421-481		380-386	540-586	925-940	762-428	1232
Coefficiente de expansión termica (1/K)	26				26		26.9	21.8	20	18.5	11.9
Conductividad térmica (W / m K)	126				126		132	96	90	47	0-
Conductividad electrica (% I A C S)	38				38		26	27	20	10	6
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	270-290	350-390	400-420	280-330	324	230	240	214
Esfuerzo de cedencia (MPa)	280-300	290-310	280-320	300-310	260-270	340-370	0	158	117	124	124
Deformacion máxima (%)	3-5	8-10	30-35	80-100	5-8	6-10	7	3.5	30	20	2
Dureza (Rb)	50-55	60-65	40-56	25-30	65-80	55-70	80-85	80-85	60	65	210
Resistencia al impacto (J)	2-3	2-3	7-8	8-9	2-3	2-3	50-60	2-3	15	15	54-88
Módulo de elasticidad (GPa)	110-130				110-130		Å	7i	90	80	172

Tabla 2.3 Comparación de características y propiedades del zinalco y diversos materiales

Toyota, el fabricante de automóviles más grande del mundo, está por concretar la posibilidad del uso del zinalco en la producción de piezas automotrices; se habló de rines de zinalco y, a largo plazo, quizás toda la carrocería de los automóviles.

La maquinabilidad del zinalco es excelente, esta propiedad le permite encontrar una gran variedad de aplicaciones, como la correspondiente a diseños para portamuestras de microscopio electrónico, en el cual juega también un papel importante su baja resistencia eléctrica. Los tornillos fabricados con esta aleación tendrán la propiedad de alta resistencia

a la corrosión y no formar par eléctrico ni con el aluminio ni con el acero, pudiéndose utilizar tanto en torres eléctricas como en el ensamble de ventanas.

La posibilidad de producir perfiles arquitectónicos con zinalco abre una nueva perspectiva a la arquitectura e ingeniería ya que estos perfiles tienen una alta resistencia mecánica y pueden ser soldados para la fabricación de naves para bodegas o nuevas formas de ventanas. La lámina en su estado normal podría aplicarse a la fabricación de muebles de cocina, con la ventaja de resistir la corrosión.

Sin duda, el nuevo material indujo mejores y más económicas tecnologías en la industria de la construcción, instalaciones eléctricas, cerrajería, arquitectura, transporte colectivo y autopartes.

En forma general mencionaremos algunas ventajas de esta nueva aleación:

- a) Requiere de baja energía para ser procesado, de hecho la extrusión, la forja y la fundición consumen menos energía que con cualquier otro metal de uso ingenieril.
- b) Alto grado de limpieza en su proceso al grado de no requerir equipo anticontaminante.
- c) Insuperable colabilidad, mejor aún que el aluminio y el cobre.
- d) Alta resistencia mecánica, comparable a la de un acero de bajo carbono.
- e) Menor costo que el bronce. Su alta resistencia mecánica permite diseñar piezas más delgadas que pueden abatir el precio del aluminio.
- f) Buena resistencia a la corrosión, comparable a la del aluminio.

Las áreas de aplicación de este material empiezan a crecer rápidamente reemplazando al hierro, bronce, aluminio y plástico.

CAPÍTULO 3:

ANTECEDENTES PARA LOGRAR RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES

3.1. RECUBRIMIENTOS METÁLICOS. INTRODUCCIÓN.

El aspecto predominante en la tecnología de recubrimientos metálicos es, sin lugar a dudas la vida esperada del material recubierto. Para elevar la optimación del sistema (entiéndase sistema como el metal protector, al metal a proteger y a los elementos que en su conjunto lograrán el recubrimiento) por recubrir es necesario tomar en cuenta; la composición del recubrimiento, su estructura, su porosidad y adhesividad, la temperatura de trabajo del sistema a recubrir, compatibilidad entre materiales (recubrimiento y material a recubrir), disponibilidad del material de recubrimiento y por supuesto, el costo que engendrará el proceso que se elija.

Los recubrimientos débiles o que pierden espesor pueden afectar las propiedades mecánicas del sustrato que pretenden proteger, a si mismo, la interdifusión puede adicionar o mermar los componentes de la aleación del material de sustrato, también las condiciones térmicas en el proceso de recubrimiento pueden ocasionar cambios microestructurales e introducir esfuerzos residuales. Todos los factores antes mencionados, por lo tanto, afectarán de forma muy probable, las propiedades del material que ha sido recubierto, éstos cambios pueden presentarse en las propiedades de dureza, ductilidad, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión etc., características que en la mayoría de los casos son de alta importancia por lo que se evidencia que la carencia de una o de varias de estas, ponen en peligro el desempeño adecuado del elemento que ha sido recubierto.

Las tablas 3.1 y 3.2 (páginas 29, 30 y 31) muestran como ejemplos, los requerimientos de algunos elementos a metalizar para un optimo servicio en algunas aplicaciones técnicas.

Componentes del sistema Criterio / propiedad	Recubrimiento Criterio / propiedad
Propiedades aerodinámicas.	Terminado suave de la superficie en el recubrimiento, conforme a la apariencia y precisión que se necesita.
Resistencia mecánica y estabilidad microestructural.	El recubrimiento ha de ser resistente a todos los tipos de esfuerzos (impacto, fatiga, fragilidad, fatiga térmica) a los que estará sometido el sistema.

Adhesión en sistema, enlace y estabilidad en la interfase.	El recubrimiento y el sustrato deben ser compatibles sin grandes diferencias en el coeficiente térmico o microestructural. La tasa de difusión en la interfase debe ser mínima a la temperatura de operación del sistema.
Resistencia superficial a la corrosión, la oxidación y corrosión en caliente.	El recubrimiento debe tener la reserva suficiente de todos sus constituyentes para ser viable de reformación, esto sin una deterioración marcada en la protección del sistema. El recubrimiento debe ser uniforme, tener adherencia y ser dúctil a bajas velocidades.
Tabla 3.1 Criterio general de propiedades de recubrimientos.	

Recubrimientos para turbinas de gas.	Recubrimientos para aplicaciones aeroespaciales.	Recubrimientos para reactores nucleares.
1. Adherencia; libre de fisuras y porosidades.	Las características de 1 a 8 de los recubrimientos para turbinas de gas son válidas.	Las características de 1 a 8 de los recubrimientos para turbinas de gas son válidas.
2. Estructura no columnar y defectos tolerantes.	9. Corrosión por calor no es amenaza. Los demás aspectos son aplicables.	9. Resistencia al daño por carbonizado e hidrogenado. Todos los aspectos anteriores son válidos, la corrosión por calor no se considera.
3. Microestructuralmente estable, precipitados fortalecidos sin quebraduras intermetálicas.	10. Como en la columna anterior.	10. Captura de neutrones lentos.
4. Compatibilidad en expansión térmica, resistencia a fatiga térmica.	11. Reparación en sitio difícil de implantar, así entonces valorar costo - efectividad de reparación.	11. Incrementar vida de combustible y prevención de incendio.
5. Reacción previsible e interdifusión en el sustrato controlable, detenible y manipulable a conveniencia.		12. Buena resistencia protectora al desprendimiento, en reactores principales.
6. El recubrimiento no debe afectar las propiedades mecánicas y estructurales del sustrato.		
7. Resistencia a la fatiga y al deslizamiento.		
8. Resistencia a la fractura quebradiza.		
9. Resistencia isotérmica y a la oxidación - cíclica, resistencia a		

la corrosión por calor, resistencia al impacto y erosión, resistencia a la corrosión intergranular.		
10. Resistencia al astillado por óxidos incrustados, sin productos por la reacción de fundición, sin vaporizar, tener efecto de barrera térmica.		
11. Reparable localmente, aplicable parcialmente a partes corroídas y costo adecuado.		

Tabla 3.2 Propiedades deseables en los recubrimientos y criterios de selección

3.2 TIPOS DE RECUBRIMIENTOS.

En el presente trabajo mencionaremos solamente los fenómenos generales que existen actualmente en la tecnología de recubrimientos metálicos que utilizan procesos de unión físico-químicos, pues existen también recubrimientos que utilizan otro tipo de materiales u otro mecanismo de unión como son; por reacción (pinturas), la plastificación superficial, la unión mecánica o chapado.

Debido a lo complejo y costoso de las técnicas existentes, en el presente trabajo se adoptará la técnica de metalizado por inmersión en caliente que consiste en fundir el material protector y sumergir la pieza a proteger, permitiendo que se forme una capa de material protector, dicha capa protectora está formada por varias fases, pero, sin lugar a dudas la más importante es la intermetálica, dicha fase es la que hará de unión entre el material base y el material protector.

A pesar de ser un método tradicional, sigue siendo un método con bastante aceptación por su baja complejidad puesto que no necesita de equipo sofisticado para su aplicación, su ventaja estriba sobre todo en el hecho de que los usos para los que están solicitados los elementos a recubrir, son usos que no requieren de controles tan estrictos en la composición superficial como lo sería el caso de una aplicación aeroespacial, así entonces, se hará hincapié en un procedimiento particular que se han desarrollado a partir del fenómeno de la difusión.

A continuación se enumeran los mecanismos generales, así como algunos ejemplos para dichos mecanismo para posteriormente desarrollar el mecanismo de difusión.

3.2.1 Clasificación de los recubrimientos.

a) Recubrimientos obtenidos por conversión.

Los recubrimientos obtenidos por conversión consisten en que los elementos de una superficie al reaccionar con la disolución que circunda a dicha superficie, formarán óxidos que pasivan la superficie metálica, es decir, se generan reacciones químicas en la superficie por la interacción de ésta y el ambiente circundante formándose compuestos que inhiben en cierto grado la reacción del material con el ambiente, en la naturaleza, dicha pasivación se da naturalmente en metales como el aluminio y el cromo, pues éstos al estar en contacto con el aire ambiente y por ende con el oxígeno, reaccionan, dicha reacción se da entre los átomos superficiales y el oxígeno que formarán óxidos de aluminio y óxidos de cromo respectivamente, los cuales son resistentes al ataque ambiental en mayor grado que el elemento sin reaccionar.

Algunos ejemplos de metalización por conversión los tenemos con:

- Anodizado.

El anodizado es la generación de una capa de oxido más o menos hidratada, que recubre la superficie del metal después de haber conectado al metal a recubrir al ánodo de una cuba electrolítica, dentro de la cual hay una solución iónica adecuada que agilizará la reacción y generación de la capa de óxidos.

- Pavonado.

El pavonado consiste en producir una capa de óxido ferroso-férrico que protege al hierro de forma más eficiente que cualquier otro tipo de óxido de hierro, dicho óxido se forma mediante la aplicación de un baño básico de sales oxidantes como lo sería una combinación de nitrato sódico y potásico fundidas en rangos de temperaturas de entre 260 y 425 °C, después de conservar el material inmerso durante algunos minutos se retira para templarse en agua.

b) Recubrimientos obtenidos por inmersión en caliente.

Esta técnica es la que utilizaremos en el método de baño fundido para lograr el recubrimiento del acero 1018 que es el que se escogió como material de prueba y al zinalco como material protector.

En este grupo se reúnen todos los procesos en los que el objeto a recubrir se introduce en un baño líquido, bien sea una solución acuosa, una mezcla de sales fundidas, o un metal fundido. El recubrimiento se forma por reacción e intercambio o por adherencia del metal fundido con el metal a recubrir, con la formación de una aleación como capa intermedia o de mejor adherencia.

Ejemplos:

- Deposición en baños de sales fundidas.

En un baño de sales fundidas se puede precipitar un metal por reacción de intercambio. Esta forma de trabajar tiene las ventajas de que, por la elevada temperatura, el precipitado se difunde en el metal base, y la de que pueden obtenerse capas más gruesas.

- Inmersión en baño de metal fundido.

Uno de los métodos más antiguos para proveer a un metal, sobre todo al hierro, de un recubrimiento protector contra la corrosión, es la inmersión en un baño de metal fundido, y que en general consiste en fundir el metal protector, sumergir la pieza a proteger durante un tiempo determinado, que es el que permitirá la formación de una aleación entre el metal protector y el metal a proteger.

Ejemplos:

+ Galvanizado en caliente.

La galvanización en caliente es un proceso mediante el que se obtienen recubrimientos de zinc, sobre hierro o acero, por inmersión en un baño de zinc fundido, a una temperatura aproximada de 450 °C. Para éste método se ahondará en la metodología y datos técnicos pues existe similitud en las variables de dicho proceso y las variables del proceso objeto del presente trabajo y que hemos denominado como zinalquizado en caliente.

+ Estañado.

La diferencia entre el galvanizado y el estañado estriba en el hecho de que el zinc actúa como ánodo frente al hierro y el estaño como cátodo ya que el potencial normal del hierro es más negativo que el del estaño, así mismo la temperatura de operación es de 300 °C.

c) Metalización.

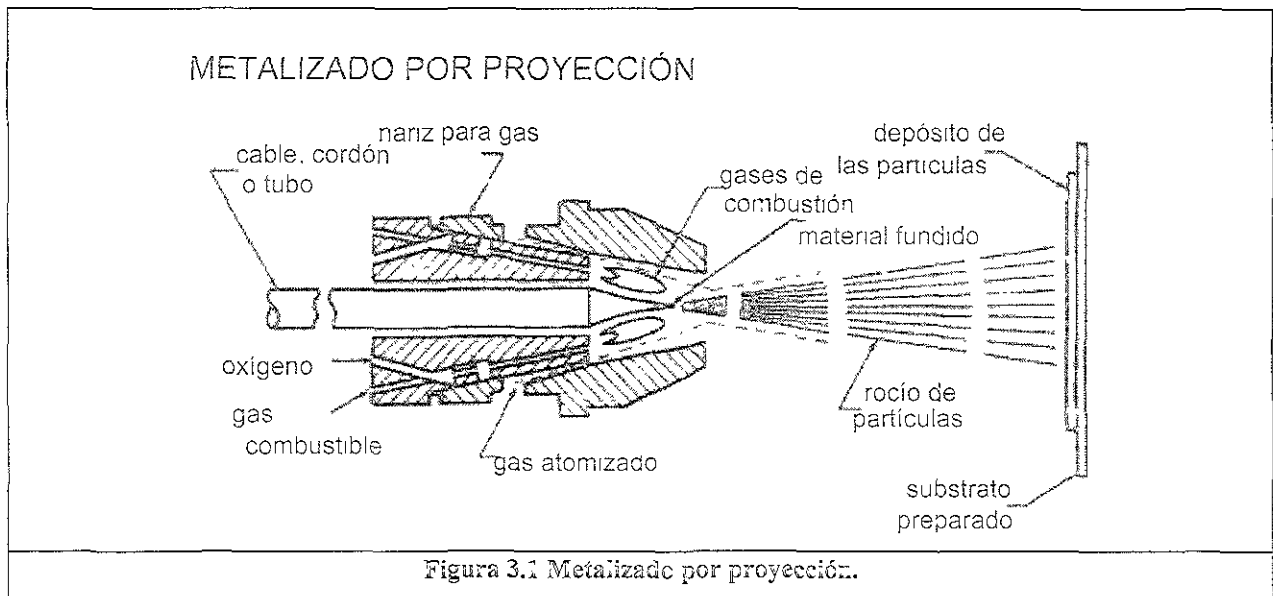
La metalización, en sentido amplio es la deposición de un metal en la superficie de cualquier material. En sentido estricto, la metalización abarca dos procedimientos distintos de deposición:

- a) La proyección de un metal en estado líquido, el cual solidifica en la superficie a proteger.
- b) La solidificación de una fase gaseosa también en la superficie a proteger.

Los procedimientos de la metalización, en sentido estricto, tienen de común que no afectan en absoluto la masa del metal sobre el que se aplican con la finalidad de mejorar las propiedades superficiales del sustrato.

- Proyección.

La metalización por proyección consiste en calentar un metal por encima de su punto de fusión y proyectarlo, con presión gaseosa, sobre un sustrato, al que llega finamente dividido. En la práctica la fusión y la proyección se realizan en un mismo aparato denominado pistola de metalización por proyección (figura 3.1).



- Deposición en vacío (fase gaseosa).

La metalización por deposición en vacío se caracteriza por depositar partículas de tamaño atómico, mientras que las partículas depositadas mediante proyección tienen más de 10 micras de diámetro.

d) Capas duras superficiales obtenidas en vacío por plasma.

Son aquellos tratamientos que permiten modificar el comportamiento de los materiales mediante la deposición de capas metálicas o la modificación de la composición y estructura de la zona superficial del material base, utilizando el bombardeo de partículas cargadas de un plasma sobre la superficie del propio material que se deposita. Recuérdese que el estado plasmático es el estado físico formado por partículas de materia eléctricamente cargadas (iones y electrones) que conservan la neutralidad eléctrica del conjunto, la ionización puede presentarse por descargas eléctricas a través de una atmósfera de gas, y una vez producida, las partículas pueden confinarse en una zona reducida del espacio a ser aceleradas contra otras porciones de materia, esto debido a la aplicación de campos eléctricos y magnéticos (tabla 3.3 y 3.4).

Tabla 3.3
Ejemplos de recubrimientos por revestido.

<p>Depósitos a escala atómica: Técnicas electrolíticas: Galvanoplastia. Desplazamiento químico. Técnicas al vacío: Evaporación al vacío. Depósito por irradiación iónica</p>
<p>Depositados por partículas: Técnicas térmicas: Spray de plasma. Técnicas por fusión: Metalizado por impacto.</p>
<p>Técnicas por transferencia de masa: Pintado. Galvanizado. Recubrimiento por soldadura. Recubrimiento por láser.</p>

Tabla 3.4
Ejemplos de recubrimientos por transformación.
Modificación superficial:

Conversión química: Conversión electrolítica. Anodizado.

Depósito por vapores químicos:

Técnicas por plasma.

Técnicas láser.

Enriquecimiento superficial:

Difusión de masa

Después de haber hecho referencia a algunos de los procesos para proteger a los materiales, estamos listos para continuar con la descripción del proceso que es de interés para el desarrollo del presente trabajo de tesis.

3.3 GALVANIZADO EN CALIENTE.

El galvanizado en baño caliente es un proceso por el cual, mediante un baño de zinc fundido o alguno de sus compuestos, se produce una capa protectora que actúe como barrera entre el material de base y el medio al que se expondrá dicho material, el zinc se deposita sobre la superficie del hierro o el producto de acero después de haberlo sumergido en el material fundido.

El baño usualmente genera varios tipos de capas, dichas capas se forman desde una zona interfacial entre el material protector y el material recubierto hasta una capa superficial de zinc prácticamente puro en la superficie del recubrimiento. La primer capa es un compuesto hierro-zinc, le siguen combinaciones, y finalmente, como se ha mencionado una fase compuesta prácticamente en su totalidad de zinc.

La compleja estructura de capas que se generan por el galvanizado, está completamente en función de la composición química del baño, de la composición química del propio material a recubrir así como de las propiedades físicas del material que se pretende proteger (rugosidad, dureza, etc.), sin embargo, para que el fenómeno de recubrimiento se logre es necesario considerar variables ajenas totalmente a los materiales, estas variables afectan aun más el proceso, que las mismas propiedades del material base y el material protector, del correcto



control de dichas variables depende la obtención de un buen recubrimiento, de un recubrimiento pobre o incluso puede no darse el recubrimiento, las variables a las que se hace referencia corrientemente se les llama suciedad y son de dos tipos: suciedades físicas y químicas, las primeras polvo, grasa, aceite, etc., y las segundas se refieren a los óxidos que se forman en la superficie del material

Aplicaciones.

Los baños de galvanizado son aplicados en hierro y en acero, su función consiste primordialmente en proteger de la corrosión ambiental al material recubierto.

Algunas aplicaciones importantes donde se recurre al galvanizado son:

- a) Acero estructural para plantas generadoras de energía, plantas petroquímicas, intercambiadores de calor, anillos refrigerantes, y torres de transmisión eléctrica.
- b) Miembros de puentes estructurales, alcantarillas, tuberías de acero corrugado.
- c) Reforzamiento de acero para torres de enfriamiento, concreto prefundido arquitectónico y puentes expuestos a cloruros.

En resumen, cualquier acero que esta o será expuesto a la atmósfera, al sol o la corrosión por agua, puede ser protegido mediante un galvanizado en caliente, además dicho método es estándar, efectivo y barato, en comparación con otros métodos de protección.

A pesar de ser un método antiguo no ha perdido la batalla frente a otros métodos más modernos, pues por las aptitudes antes mencionadas sigue siendo un método útil y de uso aun frecuente.

El galvanizado tiene una expectativa de vida larga en las áreas rurales donde el dióxido de sulfuro y otros contaminantes industriales son bajos. El galvanizado también da servicio satisfactorio en un medio marino. Aunque la expectativa de vida del galvanizado en industrias con condiciones ambientales severas no es tan largo como para ambientes poco agresivos, sigue

siendo un método de uso muy extendido pues no existe un método más efectivo y económico disponible.

Características metalúrgicas del baño.

Substratos de hierro y de acero.

En función de la composición química del hierro y del acero, aunada a la cantidad de ciertos elementos como el carbón y el silicón, se determinará la susceptibilidad de los metales ferrosos a ser galvanizados en baño caliente, dicha composición puede influir marcadamente en las propiedades del baño. Los aceros que contienen comúnmente menos de 0.25 % de carbón, menos que 0.05 % de fósforo, menos de 1.35 % de manganeso y menos de 0.05 % de silicón, individualmente o en combinación, son generalmente susceptibles para el galvanizado usando las técnicas convencionales.

Para evitar el quebrantamiento del hierro-zinc en capas en el baño de materiales de hierro, el hierro sustraído debe ser bajo en fósforo y silicio, preferentemente la composición debe contener alrededor del 0.01 % de fósforo y 0.12 % de silicio.

Efectos del proceso de galvanizado en substratos de materiales.

Resistencia a la tensión, dureza al impacto y formabilidad.

La resistencia a la tensión, resistencia a la cedencia, elongación y ruptura y reducción del área del rolado en caliente de aceros permanecen virtualmente inalterados después del galvanizado en baño caliente. En estructuras soldadas, el esfuerzo de la soldadura puede ser reducida en un 50 a 60 % esto como resultado del galvanizado en baño caliente.

La fragilización por hidrógeno.

El hidrógeno que pudo haber sido absorbido durante el lavado por baño de ácido es removido durante la inmersión del material en el zinc fundido, esto a causa de la temperatura a la cual se efectúa el proceso y que es cercana a los 460 °C, aunque, es necesario hacer pruebas al material después de un cierto uso de la solución ácida de limpieza.

Algunas veces puede presentarse fragilidad intercrystalina, pero esta se debe a la penetración de zinc en los límites intergranulares del acero esto debido a la concentración de esfuerzos inducidos por soldadura o endurecimiento del material por trabajo en frío.

El rompimiento intercrystalino se debe a la penetración de zinc en los límites intergranulares del acero y algunas veces puede ocurrir por la conexión con galvanizado en caliente, pero sólo algunos casos donde el esfuerzo es grande se induce el rompimiento intercrystalino en el acero por soldadura o por endurecimiento

Limpieza antes del galvanizado.

Las piezas de acero y de hierro a ser galvanizadas en baño caliente después de la fabricación deben estar libres de aceites, de grasa, de lubricantes y de otros contaminantes, antes del flujo de limpieza, (que en general es aire caliente) y de la inmersión en zinc fundido.

La inapropiada o impropia preparación de la superficie es la causa más frecuente de defectos en los galvanizados.

Desengrasado.

Es el método más común de limpieza en la aplicación del galvanizado en baño caliente y se usan para éste, los baños calientes de limpiadores alcalinos como el percloroetileno que será utilizado en el caso del zinalquizado.

Las soluciones limpiadoras alcalinas deben estar calientes en un rango de 65 a 82 °C (150 a 180 °F).

control de dichas variables depende la obtención de un buen recubrimiento, de un recubrimiento pobre o incluso puede no darse el recubrimiento, las variables a las que se hace referencia corrientemente se les llama suciedad y son de dos tipos: suciedades físicas y químicas, las primeras polvo, grasa, aceite, etc., y las segundas se refieren a los óxidos que se forman en la superficie del material

Aplicaciones.

Los baños de galvanizado son aplicados en hierro y en acero, su función consiste primordialmente en proteger de la corrosión ambiental al material recubierto.

Algunas aplicaciones importantes donde se recurre al galvanizado son:

- a) Acero estructural para plantas generadoras de energía, plantas petroquímicas, intercambiadores de calor, anillos refrigerantes, y torres de transmisión eléctrica.
- b) Miembros de puentes estructurales, alcantarillas, tuberías de acero corrugado.
- c) Reforzamiento de acero para torres de enfriamiento, concreto prefundido arquitectónico y puentes expuestos a cloruros.

En resumen, cualquier acero que esta o será expuesto a la atmósfera, al sol o la corrosión por agua, puede ser protegido mediante un galvanizado en caliente, además dicho método es estándar, efectivo y barato, en comparación con otros métodos de protección.

A pesar de ser un método antiguo no ha perdido la batalla frente a otros métodos más modernos, pues por las aptitudes antes mencionadas sigue siendo un método útil y de uso aun frecuente.

El galvanizado tiene una expectativa de vida larga en las áreas rurales donde el dióxido de sulfuro y otros contaminantes industriales son bajos. El galvanizado también da servicio satisfactorio en un medio marino. Aunque la expectativa de vida del galvanizado en industrias con condiciones ambientales severas no es tan largo como para ambientes poco agresivos, sigue

siendo un método de uso muy extendido pues no existe un método más efectivo y económico disponible.

Características metalúrgicas del baño.

Substratos de hierro y de acero.

En función de la composición química del hierro y del acero, aunada a la cantidad de ciertos elementos como el carbón y el silicón, se determinará la susceptibilidad de los metales ferrosos a ser galvanizados en baño caliente, dicha composición puede influir marcadamente en las propiedades del baño. Los aceros que contienen comúnmente menos de 0.25 % de carbón, menos que 0.05 % de fósforo, menos de 1.35 % de manganeso y menos de 0.05 % de silicón, individualmente o en combinación, son generalmente susceptibles para el galvanizado usando las técnicas convencionales.

Para evitar el quebrantamiento del hierro-zinc en capas en el baño de materiales de hierro, el hierro sustraído debe ser bajo en fósforo y silicio, preferentemente la composición debe contener alrededor del 0.01 % de fósforo y 0.12 % de silicio.

Efectos del proceso de galvanizado en substratos de materiales.

Resistencia a la tensión, dureza al impacto y formabilidad.

La resistencia a la tensión, resistencia a la cedencia, elongación y ruptura y reducción del área del rolado en caliente de aceros permanecen virtualmente inalterados después del galvanizado en baño caliente. En estructuras soldadas, el esfuerzo de la soldadura puede ser reducida en un 50 a 60 % esto como resultado del galvanizado en baño caliente.

La fragilización por hidrógeno.

El hidrógeno que pudo haber sido absorbido durante el lavado por baño de ácido es removido durante la inmersión del material en el zinc fundido, esto a causa de la temperatura a la cual se efectúa el proceso y que es cercana a los 460 °C, aunque, es necesario hacer pruebas al material después de un cierto uso de la solución ácida de limpieza.

Algunas veces puede presentarse fragilidad intercrystalina, pero esta se debe a la penetración de zinc en los límites intergranulares del acero esto debido a la concentración de esfuerzos inducidos por soldadura o endurecimiento del material por trabajo en frío.

El rompimiento intercrystalino se debe a la penetración de zinc en los límites intergranulares del acero y algunas veces puede ocurrir por la conexión con galvanizado en caliente, pero sólo algunos casos donde el esfuerzo es grande se induce el rompimiento intercrystalino en el acero por soldadura o por endurecimiento

Limpieza antes del galvanizado.

Las piezas de acero y de hierro a ser galvanizadas en baño caliente después de la fabricación deben estar libres de aceites, de grasa, de lubricantes y de otros contaminantes, antes del flujo de limpieza, (que en general es aire caliente) y de la inmersión en zinc fundido.

La inapropiada o impropia preparación de la superficie es la causa más frecuente de defectos en los galvanizados.

Desengrasado.

Es el método más común de limpieza en la aplicación del galvanizado en baño caliente y se usan para éste, los baños calientes de limpiadores alcalinos como el percloroetileno que será utilizado en el caso del zincado.

Las soluciones limpiadoras alcalinas deben estar calientes en un rango de 65 a 82 °C (150 a 180 °F).

Limpieza por ácido.

Las soluciones acuosas de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico son generalmente usadas para remover las partículas metálicas que pueden haberse adherido a la pieza por algún maquinado y que por lo general se oxidan primero que el resto de la pieza además se remueven los óxidos de las partes expuestas del acero antes del galvanizado.

Estas soluciones limpiadoras pueden ser de ácido sulfúrico de 3 al 10 % en peso, o ácido clorhídrico del 5 al 15 % en peso.

Para incrementar su efectividad, el ácido sulfúrico siempre es usado caliente en un rango de 60 a 79°C (140 a 175°F); el ácido clorhídrico usualmente es usado a temperaturas de 24 a 38°C (75 a 100°F), para evitar la evaporación excesiva.

Limpieza abrasiva.

Todos los ensambles de *hierro fundido*, *acero fundido* y *acero maquinado* deben ser limpiados por abrasivos lógicamente después de su ensamble y antes de ser recubiertos. Muchas otras partes pueden ser limpiadas de forma abrasiva para minimizar o eliminar algún recubrimiento anterior al proceso de galvanizado

3.4 Metodología general para galvanizado.

Actualmente, por inmersión se cuenta con dos métodos, a éstos, se les llama, galvanizado húmedo y galvanizado en seco.

Galvanizado húmedo.

El galvanizado húmedo involucra un baño de limpieza con ácido sulfúrico a alta temperatura en conjunto con una capa de desoxidante que flota en el zinc fundido, sin embargo *es necesario renovarla continuamente.*

Galvanizado en seco.

El galvanizado en seco se asocia a una limpieza con ácido clorhídrico pero sin desoxidante sobre la capa de zinc fundido.

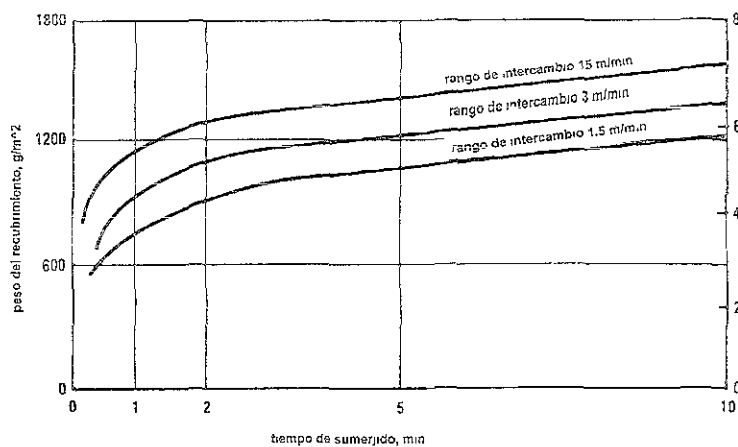
Requerimientos de la superficie a galvanizar.

Para retirar las impurezas que el desengrasado y la limpieza por ácido no pudieron remover, se utiliza, en el galvanizado húmedo una solución desoxidante que se adiciona a la capa superficial del zinc fundido, evidentemente esta solución soporta las condiciones de trabajo pues no debe perder sus propiedades químicas a la temperatura del proceso y para dicho fin se utiliza generalmente una solución de zinc amoníaco clórico, un método común para su preparación es mezclar amoníaco clórico (sal de amoníaco) y óxido de zinc, se recomienda una concentración de 5 a 10% de sal de amoníaco, de 1 a 2% de glicerina para evitar su pronta evaporación la cual además funciona como reactivador y el resto de óxido de zinc (las concentraciones son en volumen), esta solución trabaja a la temperatura de fusión del zinc, la que es de aproximadamente 455 °C.

Obtención de la capa protectora

Para obtener una capa uniforme de recubrimiento de espesor mínimo, se utilizan dos procedimientos, el primero utiliza una velocidad de centrifugado sobre la pieza recubierta, si ésta

lo permite, esto es, se retira la pieza, se aplica el centrifugado que retira el exceso de zinc, éste se deposita en las paredes del contenedor cayendo nuevamente hacia el zinc fundido y así reintegrarse nuevamente a la mezcla, y la otra forma es sacar a una cierta velocidad del baño de zinc a las piezas recubiertas, es decir, se va retirando la pieza del zinc fundido poco a poco, pues se sumerge sólo el tiempo para que se forme la capa de recubrimiento, observe la figura siguiente para su mejor comprensión, se puede decir que en base a una gran cantidad de procesos realizados mediante el método de inmersión - retiro, para un gran número de piezas una adecuada velocidad de retiro se comprende entre los 1.5 m/min (figura 3.2).



La temperatura fue 435°C (815°F)

Figura 3.2 Efecto del rango de intercambio en el peso

Enfriamiento.

En general, a causa del calor retenido por la pieza, se recomienda una buena circulación de aire en los lotes de piezas que se han inmerso anteriormente en zinc, así como una separación adecuada entre piezas, la cual depende de la complejidad geométrica de las mismas.

Galvanizado de aceros con alto contenido de silicio.

Las dificultades provocadas por la presencia de silicio en el hierro o en el acero a galvanizar, a provocado el surgimiento de algunos métodos alternos al galvanizado convencional,

que si bien no se alejan del ya descrito, necesitan algunas variantes para remediar dicho problema.

A temperaturas no mayores de 460°C la adición de 0.02 a 0.04 % de aluminio al zinc fundido, ha demostrado corregir en gran medida el problema causado a aceros con un porcentaje mayor al 0.05 % de silicio, se acostumbra también precalentar las piezas de tamaños relativamente grandes para favorecer la formación de la capa protectora.

En los años 70's se desarrollaron dos técnicas para recubrir los aceros con contenidos de silicio altos, el primero es un método patentado llamado polygalva y el segundo es galvanizando a temperaturas de 550°C en vez de los 450°C que se utilizan en el método convencional.

Proceso polygalva.

El proceso polygalva es en esencia una aleación de zinc, con cantidades controladas de aluminio, magnesio, estaño y plomo. El aluminio sirve para retardar la formación de la capa intermetálica, y los otros elementos ayudan a asegurar la continuidad del recubrimiento. Al igual que con el método convencional, la preparación de la superficie es de vital importancia para llegar a un producto óptimo y debe seguirse de la siguiente forma:

1. Desengrasado, limpieza alcalina de 80 a 90°C.
2. Enjuague, con agua en circulación.
3. Desoxidado, con ácido clorhídrico al 50% con inhibidor.
4. Enjuague, con agua en circulación.
5. Desoxidado, con ácido clorhídrico al 70% sin inhibidor (este paso es opcional).
6. El mantenimiento al equipo de pretratamiento es un factor muy importante.

Como se muestra en la figura siguiente (figura 3.3) el proceso polygalva recubre efectivamente aceros con contenidos de 0.05 a 0.20% de silicio.

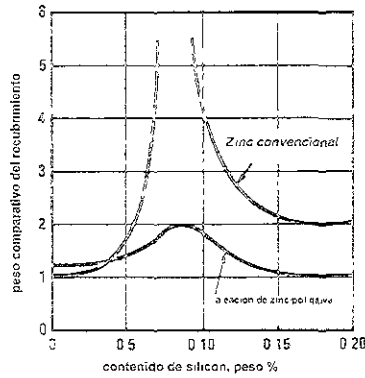


Figura 3.3 Gráficas de comparación del peso del recubrimiento como una función del contenido de silicio para los procesos de galvanizado convencional y polygalva.

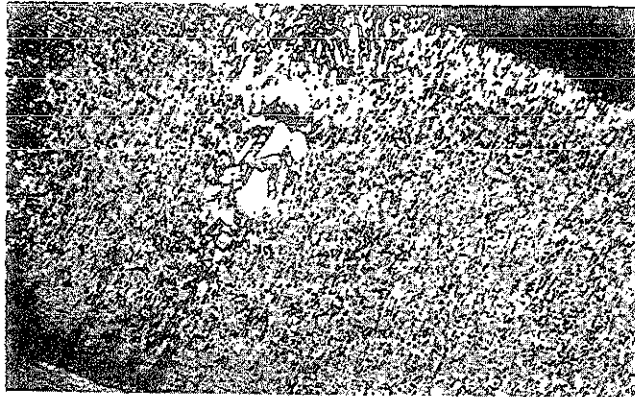


Figura 3.4 Micrografía de acero con 0.08% de silicio galvanizado por baño convencional.

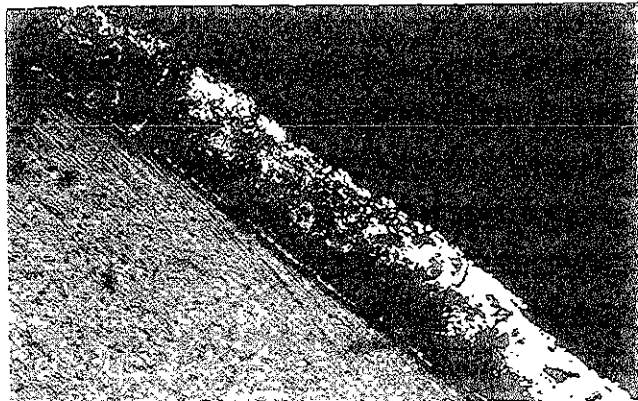


Figura 3.5 Micrografía de acero con 0.08% de Silicio galvanizado por el proceso polygalva.

Galvanizado a alta temperatura.

Se ha descubierto que, cuando se galvaniza a temperaturas próximas a los 550°C se cae en una relación entre tiempo de inmersión y peso de la capa de recubrimiento que es mucho menos sensible que la relación en el método convencional.

Duplicando el tiempo de inmersión de 4 a 8 min. la capa se incrementa un 30 % en peso. A causa de éste fenómeno se hace necesario cambiar el crisol de acero, por un crisol cerámico, pues de no hacerse el zinc reaccionará con el crisol de acero.

En el baño, la solubilidad del hierro se incrementa de 0.03 % en 450°C a 0.30 en los 550°C. Controlando el contenido de hierro, el peso del recubrimiento también puede controlarse incrementando el contenido de hierro de 0 a 0.30%, a 550°C el límite de solubilidad aumenta incrementando el peso del recubrimiento al doble. Conservando el contenido de hierro entre 0.10 y 0.20 % se produce una capa recubridora dentro de especificaciones sin ser excesivamente pesada.

3.5 EQUIPO PARA GALVANIZADO.

A causa de que el crisol de acero para el galvanizado es la pieza más importante del proceso, su selección debe realizarse mediante una evaluación exhaustiva de las variables más importantes como son, dimensiones, forma, espesor de pared, material, fuente de calor, y los requerimientos del equipo auxiliar (termopares, ventiladores para la corriente de aire, etc.).

Dimensión y forma.

Evidentemente son las piezas a galvanizar las que marcarán la pauta para la selección de éstos factores. El crisol debe ser lo suficientemente grande para permitir una eficiente retención de calor en el zinc puesto que, las piezas al ser sumergidas podrían provocar una solidificación del recubrimiento fundido, esto es que debe haber un cierto exceso de zinc fundido, de tal forma

que el retiro de calor por parte de la inmersión de las piezas no provoque un enfriamiento perjudicial al zinc fundido.

Se recomienda que el peso del zinc fundido sea de 15 a 20 veces superior al peso de las piezas a recubrir durante una hora, en muchos otros procesos la mezcla entre zinc y piezas a recubrir cumplen una relación de 40 a 1.

Espesor de pared.

Teóricamente este espesor debe estar en función de: a) la tasa de corrosión en el crisol por el zinc fundido, b) el esfuerzo hidrostático causado por el zinc fundido contra las paredes del crisol, c) la resistencia a la temperatura del proceso y d) el soporte que proporcionará el recubrimiento cerámico a las paredes exteriores del crisol, esto es la resistencia que proporcionarán las paredes externas de material refractario y que generalmente son tabiques.

A causa de la complejidad de las variables se ha optado por utilizar paredes de crisol de 20 a 50 mm, claro, en dependencia del refuerzo que proporciona la pared de tabiques refractarios.

Material del crisol.

Se utiliza un acero bajo en carbono y silicio para formar la placa del crisol que además debe ser revestido en las cejas para evitar transferencias de calor hacia la parte superior del crisol, por lo que se recomienda rodear la parte superior con tabique refractario a una altura de 150 a 180 mm sobre las pestañas.

Fuente de calor.

La fuente no se considera como un factor problemático, pues ésta puede ser por aceite o gas, por resistencia eléctrica o por inducción electromagnética, aunque debe cubrir los siguientes requerimientos.

1. Alta eficiencia.
2. Buena ajustabilidad y controlabilidad para mantener la temperatura.
3. Ser viable para mantener una temperatura mínima en las paredes exteriores del crisol, y finalmente,
4. Permitir un calentamiento uniforme.

La falla en alguno de estos requerimientos puede poner en peligro al crisol, y por ende al proceso.

Controles de temperatura.

Generalmente serán termocoples que permitan monitorear y regular la temperatura, estos se colocan dentro del zinc fundido.

3.6 POST TRATAMIENTO.

Almacenamiento húmedo con inhibidores de manchas.

Al estar expuesto el material recubierto a las condiciones atmosféricas en su almacenamiento (principalmente al bióxido de carbono) se forman óxidos de zinc e hidróxidos de zinc que emigran a carbonatos de zinc, formando manchas en la superficie del recubrimiento afectando sus características, para evitar dicho fenómeno, se restringe el bióxido de carbono en área de almacén, evitando así las manchas.

A causa de que el óxido de zinc y el hidróxido de zinc son altamente porosos y además tienen una fuerte adherencia en la superficie del recubrimiento, la protección contra el agua es fuertemente reducida, puesto que se combinan con el oxígeno contenido en esta para formar carbonatos de zinc, aunque dicho ataque no se considera de peligro, se recomienda una capa adicional de fosfato o una capa de pintura, en el caso de presentarse las manchas se suele recurrir para su eliminación a una limpieza con una solución de potasio al 5 % o dicromato potásico con una adición de ácido sulfúrico al 0.1 % en concentraciones volumétricas. Primero se aplica la capa se deja por 30 segundos aproximadamente, después se limpia a chorro de agua y se seca inmediatamente con una corriente de aire forzada.

Baño de galvanizado.

El baño que se aplicará al hierro es operado a una temperatura usualmente en un rango de 445 a 465°C (830 a 870°F).

A 480°C (900°F) y más arriba, la tasa de disolución del hierro y del acero en zinc es extremadamente rápida y el efecto de estas temperaturas en ambas piezas y en el tanque de galvanizado son generalmente perjudiciales. Normalmente un incremento en la temperatura del baño provoca:

- a) Incremento de la fluidez del zinc fundido,
- b) Aceleración de la formación de óxidos en la superficie del baño,
- c) Las partes duran más tiempo calientes por lo que el tiempo para que el recubrimiento solidifique aumenta, y
- d) Reduce el tiempo de inmersión.

Cada una de estas consideraciones tiene un efecto distinto y pueden ser usados para controlar el proceso de galvanizado.

En el galvanizado por baño en caliente de artículos fabricados y de ensamble anterior al baño, el grosor del recubrimiento es controlado por el tiempo de inmersión. Además, el tiempo está en dependencia de la facilidad de colocación de la pieza a sumergir. La duración de inmersión está usualmente en el rango de 1 a 5 min.

Las reacciones entre limpieza de acero bajo en silicio y zinc fundido procede rápidamente para el primero de los 2 minutos después de que las piezas a recubrir han sido inmersas, produciendo una capa que continua creciendo y decrece la tasa tanto como el tamaño de la pieza.

Por otra parte, los aceros que contienen silicio en cantidades mayores al 0.05 %, hará variar la capa de recubrimiento, aumentando literalmente el tiempo de inmersión.

Para asegurar una capa uniforme de espesor mínimo se recurre a una velocidad media de centrifugado que dependerá de la pieza, si es el caso de centrifugado y a una velocidad de inmersión controlada en conjunto con un retiro de la pieza con velocidad controlada para el segundo caso.

Dos velocidades son usualmente usadas permitiendo una inmersión rápida y un estiramiento lento. La tasa de estiramiento, que determina el espesor de la capa de zinc sin aleación y varía acorde al tipo de proceso que empezó a operar. La velocidad de salida óptima de casi todas las piezas es de 1.5 m/min (5 ft/min).

Con tasas rápidas de estiramiento, el exceso de zinc ocasiona corridas claras en la superficie hasta que solidifica y el resultado del baño puede ser amontonado y sin nivelación.

El exceso de zinc es retirado de las partes con exceso por medio de fuerzas centrífugas que hacen caer al zinc al crisol. Para promover la fluidez y reducir la oxidación, las partes deben ser rociadas con una pequeña cantidad de flujo antes de fabricar.

Enfriado.

Debido a la retención de calor en las piezas las reacciones de hierro-zinc pueden continuar ocurriendo después de que la capa de la superficie de zinc se ha enfriado. Este tipo de reacción de post-inmersión puede ocurrir si un enfriamiento es suavizado por el amontonamiento de las partes cercanas y por la capacidad de calentamiento de la parte. Algunas de estas capas de zinc pueden ser convertidas en aleaciones de hierro-zinc, así se decolora la superficie y se alteran sus propiedades.

Para evitar la refrigeración retrasada (enfriamiento lento) de las capas interfaciales del recubrimiento, las partes deben estar espaciadas después de la inmersión, esto con el fin de permitir la libre circulación de aire.

Las piezas de gran tamaño o partes fabricadas de acero sin silicio pueden requerir un forzamiento de enfriamiento, que se efectúa con aire o con agua.

3.7 DIFUSIÓN.

Este es un mecanismo que se presenta cuando hay una migración de átomos de un material a otro o una migración en el mismo material, dicho fenómeno, consiste en el intercambio, sustitución, y/o cambio de posición de los átomos por causa de sus diferentes estados internos de energía.

Estos estados energéticos promueven movimiento a los átomos, provocando un cambio en su posición dentro de la estructura cristalina, se sabe entonces que para que dicho fenómeno se presente es necesario que se den las dos siguientes condiciones: 1ro. debe haber un lugar adyacente vacante o lo suficientemente amplio para permitir el movimiento o implantación del átomo y 2do. el átomo debe tener la energía suficiente para poder romper el enlace con los átomos que lo circundan (hecho que genera una deformación a los latices durante el desplazamiento). Se sabe también que a mayor estado energético, mayor número de átomos migrantes, así entonces el hecho de elevar la temperatura en el material, generará una difusión mayor, además se ha concluido que los átomos difunden con el tiempo naturalmente a temperaturas ambientales, aunque evidentemente esto se realiza en periodos de tiempo mucho más prolongados.

Para describir el fenómeno se ha recurrido a numerosos y diferentes modelos, sin embargo, son dos los que han predominado para la difusión metálica: difusión por vacancia y difusión intersticial; enseguida se describen dichos modelos.

Difusión por vacancia.

Este modelo refiere el hecho de que los átomos van cambiando de lugar migrando hacia lugares que no están ocupados, se sabe que los metales por naturaleza, cuentan con una gran cantidad de lugares vacantes por lo que es posible deducir que dando tiempo a los materiales se puede desarrollar el fenómeno, aunque se hace evidente que de esta forma se llega en tiempos muy prolongados a un cambio en las posiciones de los átomos dentro del material, aunado a esto también se sabe que el número de vacancias se incrementa enormemente con una temperatura elevada lo que lleva así a una velocidad más alta en la difusión, así entonces una forma de hacer que algún elemento difunda rápidamente, es elevar la temperatura del sistema a recubrir.

Difusión intersticial.

Este modelo se basa en el hecho de que, al haber elementos en el material con diferentes radios atómicos, se presenta un desplazamiento del átomo de radio atómico menor a través de los intersticios que se presentan en el material hacia posiciones diferentes de la original en forma aleatoria, deteniéndose en lugares donde los átomos circundantes ya no les permiten seguir avanzando, por decirlo de alguna forma, dichos átomos se “estacionan”, esto es, quedan atrapados por una barrera de átomos que funciona como “dique” y que no permite que avancen más (figura 3.6).

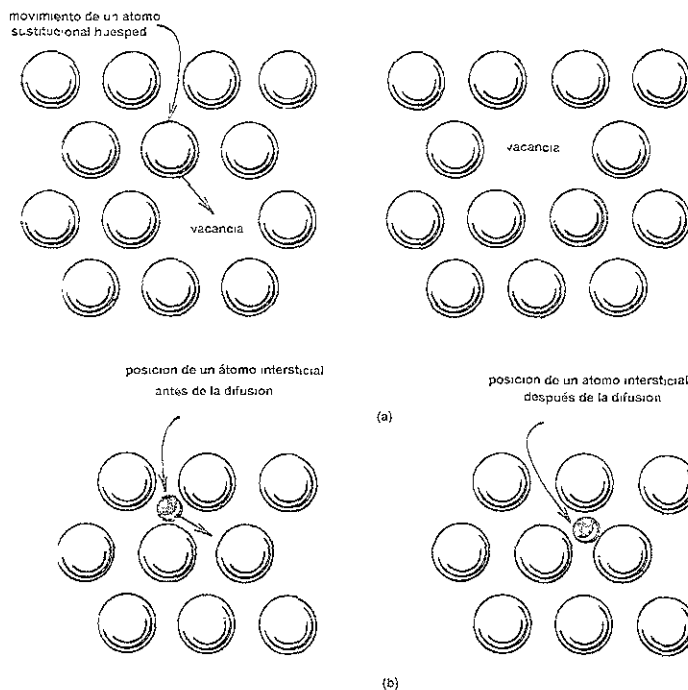


Figura 3.6 Representaciones esquemáticas de: (a) Difusión por vacancia y (b) Difusión intersticial

Para explicar el fenómeno de la difusión se ha llegado a las siguientes dos expresiones que se conocen como leyes de Fick.

Primera Ley de Fick (estado estacionario).

Debido a que el fenómeno de transporte de un elemento en otro está gobernado por el tiempo, es necesario saber a qué velocidad de flujo ocurre dicho proceso, o sea a qué velocidad ocurre la transferencia de masa, esta velocidad es expresada mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{M}{At}$$

Donde:

J, es el flujo de difusión ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, $\text{átomos}/\text{m}^2\text{s}$).

M, es la cantidad de masa que difunde a través y perpendicularmente por unidad de área (Kg).

A, es el área a través de la cual se da la difusión (m^2).

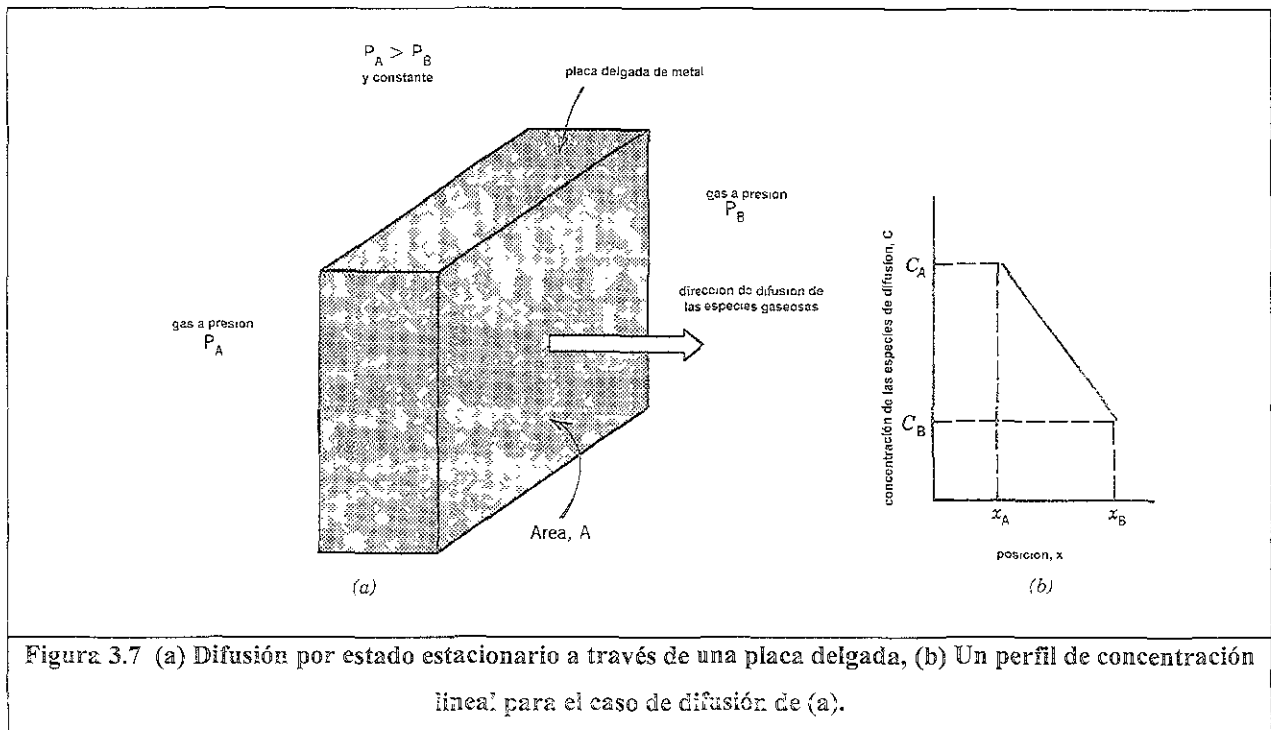
t, es el tiempo requerido (s).

En forma diferencial se puede escribir:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt}$$

cuando J no varia con el tiempo decimos que tenemos J en estado estacionario y podemos simplificar a la siguiente expresion de flujo.

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$



Cuando la concentración C es graficada contra posición o distancia dentro del sólido (x), el resultado es la curva de la figura anterior que da el perfil de la concentración; la pendiente particular de la línea se conoce como gradiente de concentración y se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Gradiente de concentración} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B}$$

La expresión matemática en la difusión en estado estacionario en una sola dirección (x) es relativamente simple, en ésta, el flujo es proporcional al gradiente de concentración dando como resultado la siguiente expresión;

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Donde: D es el coeficiente de difusión (m²/s)

dC es el diferencial de concentraciones

dx es el diferencial de distancias respectivo de las concentraciones

Difusión en estado no estacionario (2da. ley de Fick).

Sin embargo en la mayoría de los casos se tiene que la velocidad de flujo es, no proporcionalmente lineal al tiempo, esto es que varía con respecto al tiempo, cuando esto ocurre se dice que la difusión es en estado no estacionario, por lo que la ecuación de la primera ley de Fick es inoperante, utilizando en cambio la siguiente expresión en diferenciales parciales:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

La expresión anterior es la segunda ley de Fick.

Si el coeficiente de difusión es independiente de la composición, la ecuación se simplifica a:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Una solución práctica muy importante es para un sólido semi-infinito, frecuentemente la fuente de difusión es un gas, el cual tiene una presión parcial constante, se hacen además las siguientes consideraciones:

1. Antes de la difusión se suponen a los átomos originales en el material uniformemente distribuidos con concentración C_0 .
2. El valor de x es cero en la superficie y aumenta hacia el interior del material.
3. El tiempo es cero hasta que comienza el proceso de difusión.

z	$\text{erf}(z)$	Z	$\text{erf}(z)$	z	$\text{erf}(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.934
0.025	0.0282	0.6	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.642	1.5	0.9661
0.1	0.1125	0.7	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.168	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.2	0.2227	0.8	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.3	0.3286	0.9	0.797	2	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.4	0.4284	1	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.5	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

Tabla 3.5 Valores para la función de error de Gauss

Estas, son las condiciones de frontera y se toman como:

Para $t = 0$, $C = C_0$ a $0 \leq x \leq \infty$

Para $t > 0$, $C = C_s$ (concentración superficial constante) en $x = 0$

$C = C_0$ en $x = \infty$

La aplicación de estas condiciones de frontera dan como resultado la siguiente solución:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Donde:

C_x representa la concentración a la profundidad x después del tiempo t .

la expresión $\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ es la función de error de Gauss, para la que se dan algunos valores en la siguiente tabla.

Suponga ahora que se desea llegar a una concentración específica de soluto, C_1 en una aleación; el lado izquierdo de la 2da. ley se convierte en:

$$\frac{C_1 - C_0}{C_s - C_0} = \text{constant}$$

y consecuentemente:

$$\frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \text{constante}$$

o;

$$\frac{x^2}{Dt} = \text{constant}$$

Para ejemplificar el funcionamiento de la 2da. ley vea el siguiente diagrama:

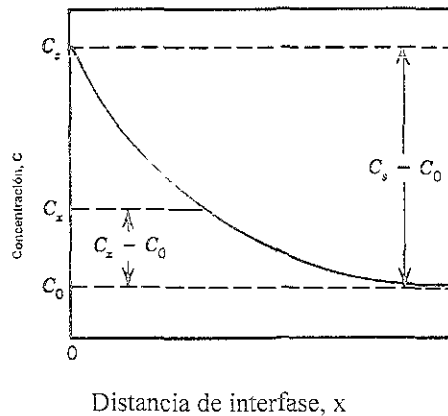


Figura 3.8 Perfil de concentración para difusión en estado estacionario; parámetros de concentración relacionados con la ecuación anterior.

CAPÍTULO 4:

MECANISMOS DE LA CORROSIÓN Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN.

EFFECTO DE ALGUNAS ALEACIONES EN EL MATERIAL A GALVANIZAR

El material a galvanizar. La calidad del material a galvanizar es una cuestión que debe considerarse con gran interés, puesto que la reacción del hierro con el zinc del baño y, por tanto, las características del recubrimiento que así se obtiene, están ligadas a su composición química como por los factores físicos relacionados con su estado. Se pueden galvanizar no sólo una gran variedad de aceros, sino también la fundición de hierro.

La mayor parte del acero laminado que se galvaniza es acero suave al carbono, bien sea acero efervescente con bajo contenido de carbono; y como calidad especial el denominado hierro puro con contenido de cobre, bien sea acero calmado con aluminio o silicio, o acero limpiado mecánicamente. También se galvanizan aceros de alta resistencia y baja aleación. Todos estos aceros pueden contener hasta un 0.20% *Cu* para mejorar su resistencia a la corrosión. El empleo de este tipo de aceros va en aumento, ya que aunque el costo de fabricación es mucho más elevado, también es considerable el ahorro de peso muerto que se consigue. Esto último tiene una repercusión muy amplia sobre el costo total (transporte, cimentaciones, ligereza de estructura, mano de obra y tiempo de construcción, entre otros factores), y hace que en algunos casos llegue a ser el óptimo económico. En la tabla 4.1 (pág. 61) se indica la composición de los distintos aceros.

Para contenidos iguales de los elementos habitualmente considerados, la clase de acero, esto es, de convertidor, eléctrico, no parece que condicione la velocidad de ataque por el zinc ni las características del depósito. La variación del contenido de los elementos habitualmente presentes en los aceros al carbono sí puede influir sobre las características del depósito, en tanto que modifican la cinética de la reacción entre el zinc y el hierro. En la tabla 4.2. en términos generales, pueden apreciarse que el aumento del contenido de cada

uno de los cinco elementos comunes de los aceros al carbono produce un aumento de la velocidad de ataque, que puede disminuir sobrepasado un máximo (caso del silicio). Debe aclararse que el estudio de Horstmann se ha efectuado con aleaciones binarias y para tiempos de inmersión comprendidos entre 1 y 5 h; esto es, muy superiores a los que se utilizan en la práctica de la galvanización, por lo que procede considerar más detenidamente las condiciones próximas a las reales de trabajo en taller.

Para el intervalo de concentraciones de los aceros al carbono que se señala en la tabla 4.1, y para tiempos de inmersión bajos, del orden de minutos, que son los que normalmente se utilizan en la práctica, la velocidad de ataque apenas si se modifica con el contenido de carbono, incrementándose el espesor del recubrimiento para el mismo tiempo de inmersión en un 10% al pasar el contenido de C de 0.04-0.07% a 0.15%. Para contenidos de carbono elevados, de aproximadamente 0.8%, la microestructura, condicionada principalmente por el carbono, según sea el tratamiento térmico a que se ha sometido al acero, condiciona la velocidad de ataque, siendo ésta mayor en el caso de presentarse perlita laminar que si la perlita está globulizada, y mayor, a su vez, en este caso que cuando el material está templado y revenido. El carbono mejora la adherencia del recubrimiento. Para aceros bajos en carbono se observó que la galvanización es mucho mejor cuando se encuentra la cementita en los bordes de grano que cuando lo hacen juntamente la perlita y la cementita. Esto se atribuye a la acción del hidrógeno que penetra durante el decapado en cualquier discontinuidad de la estructura de grano y que es expulsado al calentarse durante la galvanización, interfiriendo así la cristalización del zinc.

Por otra parte, se ha comprobado que el aumento del tamaño de grano provoca el incremento de la velocidad de difusión y, en suma, el del peso del recubrimiento, contrariamente a lo que hubiera podido suponerse, ya que, en principio, se suele asociar un grano fino con una mayor velocidad de difusión.

Tabla 4.1.- Composición de diferentes aceros

<i>Clase</i>	<i>% C</i>	<i>% Mn</i>	<i>% P</i>	<i>% S</i>	<i>% Si</i>	<i>% Cu</i>	<i>Observaciones</i>
Efervescente	0.05 -0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	Residual	Estos aceros pueden suministrarse también con un contenido de manganeso de 0 20% <i>Ni</i> -residual o hasta 1,00% <i>Cr</i> -residual o hasta 1,00%
Limpio							
mecánicamente	0.05 -0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	Residual	
Calmado con <i>Al</i>	0 05 -0.10	0 25 - 0.50	0 030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	Residual	
Calmado con <i>Si</i>	0.05 -0.10	0.25 - 0.50	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	0.15 - 0.25	Residual	
De alta resistencia	0.05 -0.20	0.30 - 1.30	0.030 - 0 11	0.050	Residual o hasta 0.80	Residual o hasta 0.60	
Hierro puro con <i>Cu</i>	Mínimo posible	Mínimo posible	0.015 Máx.	0.040 Máx.	Residual	0.20 Min.	La suma de los cinco primeros elementos 0 10% Máx.
Hierro con cobre	--	--	0.015 Máx.	0.040 Máx.	Residual	0 20 Min.	La suma de los cinco primeros elementos 0.25% Máx.
Acero con cobre	0.05 -0.10	0.25 - 0.40	0.030 Máx. (*)	0.050 Máx.	Residual	0.20 Min.	La suma de los cinco primeros elementos 0.70% Máx.

(*) El contenido de P puede llegar hasta el 0.10% para facilitar la laminación en paquetes o para mejorar la adherencia del recubrimiento de zinc.

El silicio favorece un ataque rápido, sobre todo porque, incluso para contenidos moderados, disminuye sensiblemente la temperatura a partir de la cual empieza el ataque lineal; así ocurre que a 450°C el ataque es ya de este tipo y conduce a depósitos de gran espesor y con predominio de la capa aleada. Cuando los tiempos de inmersión son cortos, del orden de minutos, los resultados que se obtienen obedecen al mismo esquema. Sandelin, para tiempos de inmersión cortos, de 30 seg. 1 y 3 min, a 454°C, ha comprobado un crecimiento del espesor del depósito, asociado a un mayor espesor de la capa de aleación, al incrementar el silicio de 0.05 a 0.1% y posteriormente a partir del 0.3%, la influencia del silicio es pequeña. Para tiempos de inmersión muy cortos (30, 45 y 60 seg.) y con condiciones que corresponden a la galvanización en continuo, no se ha confirmado el efecto apuntado por Sandelin. En los aceros que contienen silicio (hasta 0.3%) el espesor del depósito puede ser incluso inferior al de los aceros exentos de este elemento.

No obstante, para condiciones de galvanización más generales, puede afirmarse que el silicio conduce a depósitos en los que el espesor correspondiente a la capa de compuestos intermetálicos es grande. En un acero que contenga alrededor de 0.3% Si, la capa de aleación que se forma durante la galvanización es una capa pseudo aleada, constituida por un esqueleto de cristales ζ más o menos soldados entre sí en los puntos de contacto. Los intersticios de esta estructura se encuentran llenos del zinc puro que solidificó al enfriarse. Esto hace que el depósito tenga escasa ductilidad, un color gris mate, poco vistoso, aunque la adherencia, en general, sea buena y la resistencia a la corrosión, condicionada principalmente por el espesor del recubrimiento, sea muy buena. Por este motivo, su contenido en los aceros para galvanizar es inferior al 0.3%.

Otro elemento que mejora la adherencia del recubrimiento es el fósforo, que, hasta contenidos del 0.05%, no altera el espesor del depósito, pero que para contenidos mayores parece aumentarlo.

La presencia de azufre en proporción elevada puede conducir a un ataque excesivo durante el decapado, lo que da lugar a que la superficie sea muy rugosa y el depósito poco uniforme y con escasa ductilidad.

El nitrógeno mejora la adherencia del recubrimiento; el tratamiento de nitruración en cianuro sódico (proceso Crapo) da lugar a depósitos muy adherentes.

El manganeso da lugar a una mayor velocidad de ataque y a un incremento moderado del espesor de la capa para los contenidos que corresponden a los aceros reseñados en la tabla 4.1.

Los elementos cromo y níquel, característicos de los aceros débilmente aleados, aumentan tanto la velocidad de ataque como el espesor del depósito. Sin embargo, sus efectos son sensiblemente inferiores a los del silicio, de forma que el problema afecta, sobre todo, a los aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, cuyo contenido de silicio oscila entre 0.20 y 0.90%. Otros elementos que recientemente se van añadiendo a los aceros son el molibdeno (0.10-0.30%), niobio (0.010-0.040%), vanadio (0.020-0.070%), titanio (0.005-0.050), circonio (0.03-0.15%) y boro (0.0015-0.0035%), aunque, en general, pueden considerarse muy poco habituales todavía. La finalidad de estas adiciones es conseguir mejores resistencias mecánicas sin pérdida de condiciones de soldabilidad, y la razón de su empleo poco popularizado es en la actualidad sólo un problema económico.

El estado de la superficie del material condiciona las características del depósito, siendo preciso someter al acero a los tratamientos previos para limpiar y acondicionar debidamente la superficie que se va a recubrir. De los productos laminados, tienen preferencia los que se laminan en frío, dado que su estado superficial es mejor que el de los

laminados en caliente; sin embargo, si a éstos, como ocurre con frecuencia, se les somete a una ulterior pasada en frío se obtiene una calidad superficial muy satisfactoria.

Una superficie muy regular y lisa favorece la adherencia, si bien, por otra parte, se ha comprobado que en la chapa fina laminada en frío conviene producir una cierta rugosidad para mejorar la adherencia del depósito. La presencia de tensiones internas en la superficie parece que no afecta al depósito que pueda obtenerse; no obstante, existe una tendencia al aumento de peso del recubrimiento, que crece para tiempos de inmersión elevados debido al trabajo en frío del metal base. Esta tendencia está de acuerdo con el hecho de que la deformación en frío aumenta las velocidades de difusión de los metales al modificar la estructura reticular, con lo que resulta facilitado el intercambio atómico, concretamente la difusión del hierro y del zinc. Este aumento de peso es más pronunciado en los aceros bajos en silicio. Los métodos mecánicos de limpieza de superficie aumentan la rugosidad más que los métodos químicos y dan lugar a una superficie real mayor, siendo, por lo tanto, su reactividad algo superior. La presencia de carburos en la superficie del material puede dar lugar a un comportamiento variable en la galvanización, dependiendo de las variables del proceso. Sebisty ha comprobado que en un baño saturado de hierro y libre de aluminio no existe ninguna influencia, mientras que cuando el contenido de aluminio es del 0.1%, trabajando a 450°C, aumenta la reactividad de los carburos, produciéndose masivamente cristales de la fase ζ ; disminuyendo la temperatura a 435°C, los carburos vuelven a perder su reactividad.

La galvanización de la fundición de hierro presenta dificultades que se resuelven en la práctica prolongando el tiempo de inmersión, para evitar la presencia de zonas sin recubrimiento protector. Así por ejemplo, frente a un tiempo de inmersión de 5 min. en el caso de piezas de acero, en las piezas de fundición se aplican tiempos de 15-20 min, e incluso de 30 min. Tal práctica, sin embargo, no es satisfactoria, pues da lugar a la

formación de depósitos de gran espesor y a la de grandes cantidades de matas (Fig. 4.1). La inmersión durante un tiempo reducido, unos 2-3 min. a 450°C, que permita obtener unos depósitos satisfactorios, puede conseguirse siempre que la superficie de la pieza moldeada esté exenta de restos de arena u otros materiales, lo cual puede lograrse por chorreado con granalla. Para estos tiempos de inmersión reducidos, los efectos del silicio (de 1.5 a 4%) y del fósforo (de 0.1 a 1.0%), en lo que se refiere al aumento de peso del recubrimiento y a las pérdidas de zinc, son poco acusados (fig. 4.2).

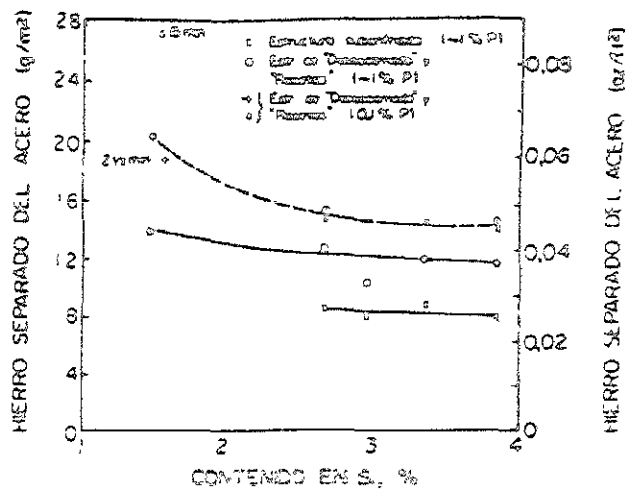


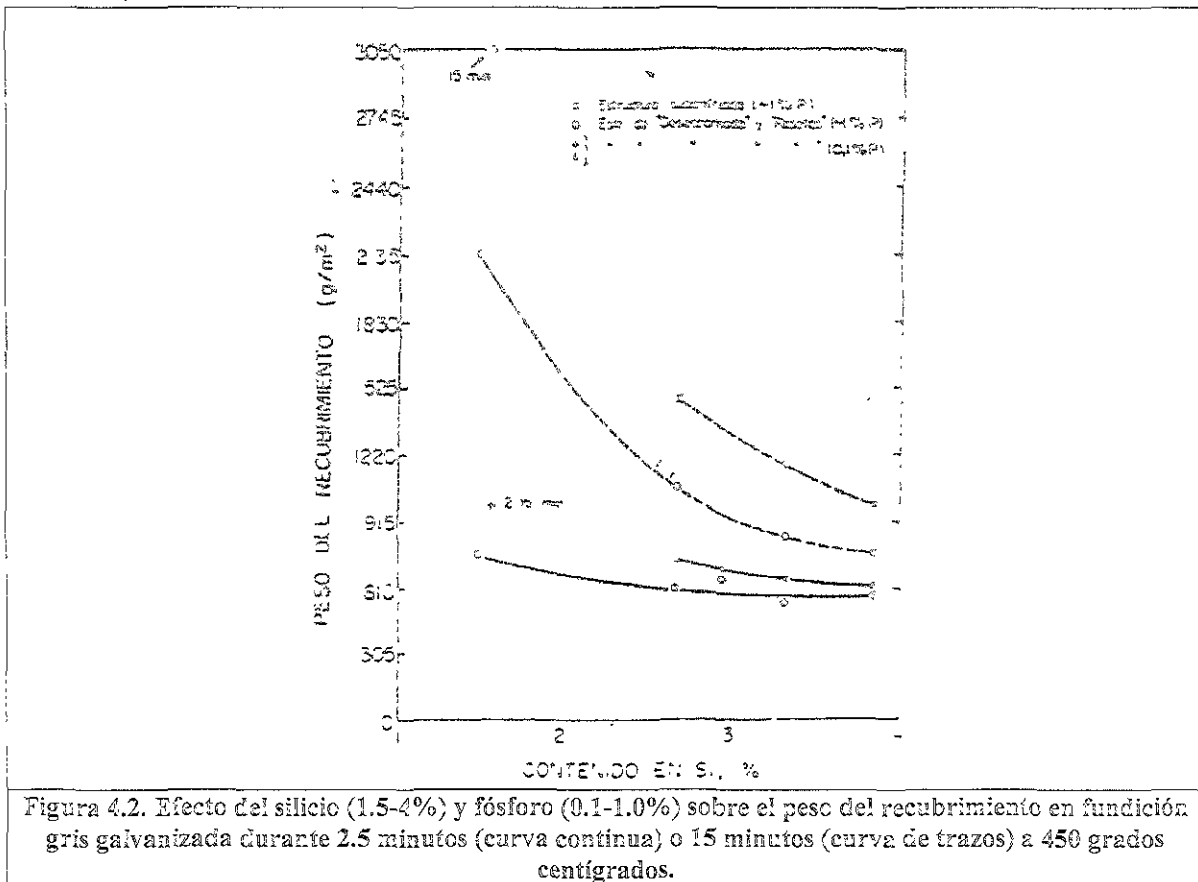
Figura 4.1. Efecto del silicio (1.5-4%) y fósforo (0.1-1.0%) sobre el peso del recubrimiento en fundición gris galvanizada durante 2.5 minutos (curva continua) o 15 minutos (curva de trazos) a 450 grados centígrados.

Un procedimiento ensayado recientemente, y con el que se han obtenido resultados satisfactorios, se basa en la inmersión de la pieza de fundición en *NaOH* fundido a 450-500°C antes del decapado.

Este método resulta ventajoso frente al empleo del decapado en *HF*, que es de manejo peligroso, y, además, tiene gran utilidad en el caso de piezas de formas complicadas y fundiciones con gran porosidad superficial, para las cuales el chorreado con granalla resulta ineficaz.

Las sustancias orgánicas de las arenas de moldeo, el grafito y otros elementos superficiales, tales como el silicio, fósforo, azufre y manganeso, se oxidan en el NaOH fundido a 450-500°C y se separan como gangas mediante un lavado con agitación en agua. Este proceso es preferible al de un sobredecapado en el que tendría lugar en las piezas una gran acumulación de hidrógeno que se desprendería durante la galvanización perjudicando la formación de la capa aleada.

Cuando por determinadas razones sea precisa la inmersión de las piezas durante tiempos prolongados, sin que ello implique la formación de depósitos de un excesivo espesor ni altas pérdidas de zinc por formación de matas, se utilizan fundiciones con 3-4% Si y 1% P, los efectos del silicio sobre la formación de matas para dos contenidos de fósforo, y en la figura 4.2 sobre el peso del recubrimiento.



El zinc para galvanizar

El zinc que normalmente se utiliza para galvanizar es zinc térmico del 98.5% ó del 99.5%. Según la norma española UNE 37.301, los contenidos máximos de impurezas en ambas calidades han de ser los siguientes:

	Pb	Cd	Fe	Sn	Total
Zn 99.5	0.45	0.15	0.03	0.005	0.50
Zn 98.5	1.4	0.20	0.05	—	1.50

No está absolutamente claro de qué forma influyen sobre las características del depósito las impurezas contenidas hasta los límites señalados anteriormente e incluso si dentro de ellos influyen de forma alguna. De todas las impurezas citadas, las que conviene tener en cuenta son, principalmente, el plomo y el hierro.

Los datos que se pueden encontrar en la bibliografía sobre los efectos del plomo no son siempre concordantes. En primer lugar, debe tenerse en cuenta que la presencia del plomo en el zinc se debe no sólo a que el lingote de zinc de partida contenga plomo, sino también a que este elemento se adiciona en ocasiones voluntariamente al baño para que se forme una capa rica en plomo en el fondo de la cuba, a la que protege del ataque del zinc a la vez que facilita la eliminación de las matas. De cualquier forma, empleando zinc del 98.5% se formaría una capa rica en plomo, ya que su solubilidad en el zinc a 450°C es, aproximadamente, del 1.2%.

Bablik y colaboradores señalan que la adición de un 0.4% *Pb* al baño, o sea, dentro de los límites de contenido de esta impureza que corresponden al *Zn* de 99.5%, provoca una fuerte disminución de la adherencia del depósito que se obtiene y que incluso, basta un 0.01% *Pb* para que ya se reduzca esta característica, por lo cual recomiendan que, siempre

que interese obtener una elevada adherencia y ductilidad del depósito, debe emplearse zinc de pureza elevada. Por el contrario, otros autores señalan que, en el caso de alambres, los depósitos que se obtienen utilizando zinc de 98.5% son algo más adherentes que cuando se utiliza zinc de 99.5%; la resistencia a la corrosión de los primeros es, sin embargo, aproximadamente un 15-20% inferior a la de los depósitos con zinc del 99.5%.

Raedeker y Friche, ensayando en chapas los efectos de contenidos de plomo de hasta el 1%, observan que la adición de este elemento al baño empeora la ductilidad del depósito aunque muy ligeramente, si bien la resistencia al ataque químico en medio industrial mejora algo. Sebisty y Edwards, empleando tiempos de hasta 4 min. encuentran que un contenido de plomo de hasta un 1% no altera la ductilidad ni la adherencia del depósito, aunque sí su aspecto; el depósito exento de plomo era rugoso, reduciéndose la rugosidad para contenidos en el baño de 0.5-1% *Pb* y siendo inferior el brillo del depósito.

Quizá, parte de la discrepancia de los resultados haya de atribuirse a los métodos de ensayo empleados en la determinación de la adherencia de los depósitos. Bablik y colaboradores la determinan midiendo en un ensayo de tracción en la dirección del espesor del depósito la tensión requerida para despegar el recubrimiento, mientras que el resto de los autores aplican los ensayos tecnológicos normales de flexión, tracción o embutición.

La presencia de hierro en el baño es inevitable, como consecuencia del ataque del acero por el zinc; independientemente del contenido inicial que tenga el zinc, el baño se satura en hierro (0.018% a 450°C) y el exceso cae al fondo de la cuba en forma de matas, cuyo contenido de hierro oscila entre el 3 y el 4%. Es conveniente efectuar con relativa frecuencia una eliminación de matas; si se puede, semanalmente. Si debido a que no se retiran las matas, el contenido de hierro llega a ser muy alto, pueden flotar algunos cristales de *Fe/Zn*, produciéndose así la formación de inclusiones en la capa de zinc de los

recubrimientos que obtengan. Bablik señala que un contenido de hierro en la superficie del baño inferior a 0.05% es índice de una buena práctica de galvanización.

Según Horstmann los contenidos elevados de plomo y de hierro aumentan la viscosidad del baño y facilitan la formación de una capa de zinc puro de gran espesor, puesto que estos baños se pueden utilizar a una temperatura algo más baja.

En la galvanización de chapa se suelen agregar en algunas ocasiones una pequeña cantidad de zinc de segunda fusión, ya que la pequeña adición de estaño al baño que se realiza de esta forma, da lugar a la formación de un floreado en el depósito que, en muchos casos, es apreciado por su valor estético. Los datos aportados por Raedeker y otros permiten concluir que el estaño no tiene influencia sobre el espesor del recubrimiento ni sobre la estructura de la capa aleada hasta un contenido de 1% *Sn* en el baño. La ductilidad del recubrimiento, medida en ensayos de tracción y de plegado, baja ligeramente con el contenido de estaño, en tanto que la adherencia, según el ensayo Erichsen, permanece a niveles satisfactorios. La tendencia a la formación de manchas blancas permanece inalterada y la resistencia a la corrosión atmosférica disminuye en un 10% independientemente del contenido de estaño. En la práctica no se suelen emplear concentraciones superiores al 0.2% *Sn* en el baño de zinc.

El efecto de otros elementos se recoge en la tabla 4.2

Tabla 4.2.- Efecto de algunos aleantes en el baño de zinc.

Elemento	Concentración	Efectos	Bibliografía
Cd	Hasta 1% (tiempos de inmersión cortos)	Mejora algo la resistencia a la formación de manchas blancas y moderadamente la resistencia a la corrosión atmosférica.	24
	0.05%	Mejora el aspecto superficial, que queda brillante.	25
	1.25%	Se obtiene una superficie rugosa sin floreado y mate.	25
Cu	Hasta 1% (tiempos de inmersión cortos, 15 segundos)	Hace disminuir el espesor del recubrimiento en proporción a su concentración; no afecta, al parecer, las características de la capa aleada. Perjudica la adherencia y la ductilidad aunque parece que se mejoran a partir de 0.3% de cobre. Mejora marcadamente la resistencia a la corrosión, y probablemente reduce la tendencia a la formación de manchas blancas. El color, ligeramente amarillo que produce el cobre, puede eliminarse agregando aluminio (0.1%) al baño.	24
	0.05% y 1.25%	Reduce el espesor del depósito y de la capa aleada para tiempos de inmersión de hasta 1 min., teniendo efectos inversos para 2 min. Para 1.25% de cobre se producen manchas en la superficie, no siendo, por tanto, admisible este nivel.	
Sb	0.25%	Da lugar a un floreado muy marcado y a un depósito con escasa ductilidad y adherencia	25
	Hasta 1%	Eleva la resistencia a la corrosión en medio industrial reduciendo en un 20% la pérdida de peso cuando se agrega por encima de un 0.3%. Aumenta el espesor del recubrimiento, pero no mejora la resistencia a la formación de manchas blancas	21
Bi	Hasta 1%	Mejora ligeramente la resistencia a la corrosión en medio industrial; la superficie es brillante y con floreado.	21
Mg	0.1 - 1%	El recubrimiento tiene un aspecto mate grisáceo	21

Tiene gran interés la influencia que, según se ha comprobado, ejercen las adiciones al baño de aleantes como el cromo, vanadio, manganeso, níquel, titanio, cobalto y circonio, entre otros. Esta influencia se ha estudiado en el cuadro de la posibilidad de galvanización de aceros de alta resistencia y baja aleación, de creciente interés como se han señalado anteriormente, con particularidad para la industria de la construcción y cuyos contenidos de silicio oscilan, en general, entre 0.1 y 0.9%; la reactividad de tales aceros frente al baño de zinc es así elevada y, por tanto, interesa reducirla mediante adiciones al baño de zinc. Estos trabajos han sido desarrollados por Sebisty y Palmer y en ellos se ha puesto de manifiesto que un 0.1% de *V*, 0.2% de *Cr*, 0.2% de *Ni* y 0.5% de *Mn* son eficaces para disminuir la reactividad elevada debida a la presencia de silicio en el acero, proporcionando así un depósito con un menor espesor de capa aleada.

En términos generales, la acción más eficaz corresponde al vanadio, que controla eficazmente el crecimiento de la capa de aleación, tanto si se galvaniza a la temperatura habitual de 450°C como a las inferiores, del orden de 430°C; las adiciones de níquel, por ejemplo, son poco eficaces a una temperatura de galvanización de 450°C, si bien actúan reduciendo el espesor de la capa de aleación cuando se galvaniza a temperaturas más bajas. La adición de vanadio al baño se puede realizar mediante una aleación con 0.5-0.6% *V*, partiendo de una aleación media de 85% *Zn* y 15% *Al*. El peso del recubrimiento puede reducirse en un 50% galvanizando a 450°C durante 8 min. El inconveniente es que el vanadio sólo puede utilizarse trabajando en seco, ya que en húmedo reacciona con el flujo. Las adiciones de níquel, por no reaccionar con el flujo, se pueden utilizar, en principio, para trabajar, tanto por vía húmeda como por vía seca. El empleo de estas adiciones todavía no ha alcanzado la etapa de aplicación industrial. Se piensa, sin embargo, que pueden ofrecer gran interés no sólo para los aceros que contienen silicio, sino también para los aceros utilizados normalmente en galvanización, pues conducen a un depósito de buen aspecto,

homogéneo y regular, lo cual resulta muy interesante, en especial en el caso de aceros que tienen una superficie rugosa, como son los que han sido laminados en caliente.

El elemento aleante del zinc que se utiliza con mayor extensión es el aluminio. Los efectos de la incorporación del aluminio al baño de zinc para galvanizar han sido estudiados recientemente a la vista de la bibliografía existente por Hershmann a quien nos remitimos.

La acción del aluminio es la formación sobre la superficie del acero de una película delgada de un compuesto de aluminio y de hierro, cuya fórmula, para los depósitos obtenidos en baños que contienen un 0.2 a 0.5% *Al*, es Fe_2Al_3 ; la composición puede ser diferente para contenidos superiores de aluminio en el baño. Mientras esta película existe, el acero resulta protegido frente al zinc, de manera que la reacción del hierro con el baño es escasa. Por esta razón, se producen unos depósitos delgados, con una pequeña capa de compuestos intermetálicos, y de buena ductilidad. Al cabo de cierto tiempo de estar sumergido el material en la cuba de galvanización, la capa del compuesto *Al-Fe* se rompe y comienza el ataque del acero. Por analogía con la terminología que se utiliza en cinética química, el tiempo durante el cual la capa del compuesto protector permanece estable se denomina tiempo de incubación.

Lo característico de este efecto es que, para tiempos de galvanización superiores al tiempo de incubación, el ataque que el acero sufre por la acción del zinc que contiene aluminio será superior, más enérgico, que cuando el zinc está exento de este aleante. La causa y el mecanismo de este comportamiento no están claros. El ataque rápido, una vez superado el tiempo de incubación, no se produce uniformemente sobre todo el material, sino que empieza en algunos puntos y zonas y se va extendiendo paulatinamente; la velocidad de ataque es prácticamente lineal.

La influencia de distintos factores sobre el periodo de incubación queda reflejada en el siguiente cuadro.

Factores que prolongan el periodo de incubación:

1. Aumento de *Al* en el baño.
2. Bajas temperaturas de galvanización.
3. Contenidos de hierro bajos en el baño.
4. Agitación.
5. Presencia de silicio en el acero

Factores que acortan el periodo de incubación:

1. Superficie rugosa a galvanizar
2. Temperaturas de galvanización altas en el baño.
3. Baños saturados de hierro.

La disminución del espesor del recubrimiento se produce hasta contenidos de aluminio de 0.2% en el baño de zinc. La capa de aleación *Fe-Zn* es muy delgada para 0.06% *Al* y no es perceptible para 0.08% *Al* en el baño. Así cuando los tiempos de galvanización son muy cortos, inferiores al periodo de incubación, lo que, por ejemplo, acaece en general en los procesos continuos como el Sendzimir, el depósito que se obtiene es delgado y tiene una ductilidad extraordinaria. La adherencia, medida según el ensayo Erichsen, y la ductilidad del depósito mejoran hasta un 0.3% *Al*, pero a partir de este contenido empeoran ambas propiedades. La incorporación de aluminio al depósito resulta perjudicial en tanto que produce un aumento de la tendencia a la formación de manchas blancas (efecto perceptible

ya para 0.06% *Al* en el baño, pero que es débil hasta un 0.15%); análogamente, la resistencia al ataque atmosférico aumenta con el contenido de aluminio.

En efecto, en presencia de 0.15% *Al* en el baño, las propiedades de los depósitos que se tienen por adiciones aisladas de cobre (0.05%), cadmio (0.5%), antimonio (0.01%) y estaño (0.10%), se modifican poco para tiempos de inmersión cortos y temperaturas bajas (430°C). Para temperaturas más elevadas y tiempos de inmersión más prolongados esas adiciones pueden llegar a anular los efectos debidos al aluminio y dar lugar a depósitos irregulares, que tienen una ductilidad y una adherencia mediocres. Esto ocurre, en especial, cuando los elementos adicionados son cadmio y cobre en un nivel de concentración de 1.25% cada uno de ellos. En presencia de una cantidad de aluminio baja (0.05%), la presencia en el baño de cobre, cadmio, antimonio y estaño aumenta la sensibilidad del depósito a la formación de manchas blancas.

El depósito de aluminio en presencia simultánea de plomo es susceptible a un marcado ataque por el agua caliente y el vapor de agua, por lo que en tales casos, procede utilizar zinc de elevada pureza, de calidad electrolítica o extrafino.

La adición de aluminio al baño es práctica bastante extendida en la galvanización en continuo y se efectúa en forma de aleaciones madre *Al-Zn* (2-4% *Al*).

Se vio que las adiciones de manganeso, cromo, níquel, vanadio y cobalto al baño de zinc, con 0.15% *Al* trabajando a una temperatura de 450°C y tiempos de inmersión de hasta 4 min, no producían ninguna mejora respecto a los efectos conseguidos por el aluminio. Por el contrario, tales adiciones resultaban poco beneficiosas, en tanto que contrarrestaban sus efectos, ya que algunas dan lugar a que el aluminio forme una mata relativamente insoluble, lo que provoca la eliminación de este elemento. Es interesante señalar que el aluminio

ejerce efectos inhibidores respecto a la formación de las capas aleadas siempre que esté en solución y no si se encuentra segregado de ésta.

Los espesores que deben obtenerse dependen de las condiciones del servicio a que ha de hacer frente el objeto galvanizado, siendo lo más conveniente aplicar el espesor mínimo admisible, no sólo por razones de tipo económico, sino por otras de diferente carácter.

Así las chapas muy gruesas tienen con gran frecuencia un color superficial gris mate, debido a que los compuestos intermetálicos se han ido difundiendo hasta la superficie, y este aspecto no suele agrandar por considerarlo poco vistoso.

Por otro lado nos encontramos con el problema de la adherencia y de la ductilidad del recubrimiento. La presencia de un espesor grande de compuestos son frágiles, aunque sean resistentes al desgaste. Esto significa que si el material se deforma, pueden producirse grietas en el depósito, las cuales no obstante, no son tan perjudiciales frente a la corrosión como cuando tienen lugar una exfoliación del depósito. En el primer caso, las grietas se llenan con productos de la corrosión y, además para pequeñas zonas desnudas del metal base, el carácter de sacrificio anódico del depósito de zinc continúa protegiéndolo en las grietas producidas.

La tendencia a la exfoliación no depende directa y simplemente de la cantidad de compuestos intermetálicos presente, ya que no se produce únicamente en depósitos en los que se encuentran estos constituyentes, tales como el material <<galvannealed>> (recocido después de galvanizar), sino que depende también de la adherencia de la capa aleada al metal base. Por otra parte, cuando la película aleada es muy fina y por tanto el depósito está constituido preferentemente por la capa γ , la tendencia a la exfoliación del depósito sólo se

consigue en general, para espesores pequeños, que son poco favorables desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión. La exfoliación se produce por la presencia simultánea de la fase η y de los compuestos intermetálicos en cantidades del mismo orden.

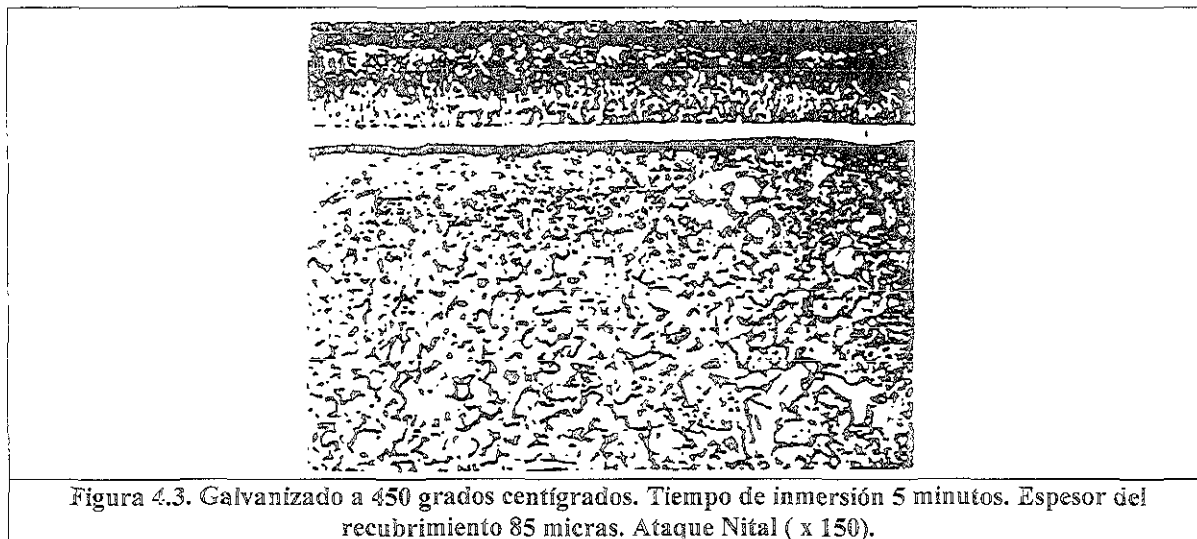
Si bien es claro que el espesor y la composición de la capa son factores que influyen sobre la adherencia y por tanto, sobre la tendencia a la exfoliación del depósito, no puede establecerse una relación de carácter general entre la adherencia y el espesor del recubrimiento.

La formación de la capa aleada es consecuencia de la reacción entre el zinc fundido y el hierro; la cinética de la reacción se estudia, en general, determinando en función del tiempo, la pérdida de peso respecto al inicial del material que se galvaniza, después de eliminadas las capas de zinc y de aleación.

Según el intervalo de temperaturas que se considere, la pérdida de peso se relaciona con el tiempo, de acuerdo con una expresión parabólica, $\Delta P = At^{1/2}$; o lineal, $\Delta P = Bt$ en la que A y B son constantes. Así, en el intervalo 430-490°C, para el hierro puro se cumple esta relación parabólica inferior en el que la velocidad de la capa aleada (que si se admite que se adhiere al metal base, tiene un espesor proporcional al ataque experimentado por aquél) disminuye con el tiempo. Por lo tanto, aumentando el tiempo de inmersión: $\Delta P = Bt$, para tiempos de reacción prolongados cabe esperar, en este intervalo de temperaturas, la formación de recubrimientos de mayor espesor que en el anterior. La existencia del intervalo de temperaturas, la formación de recubrimientos de mayor espesor que en el anterior. La existencia del intervalo lineal es debida a que los cristales τ a los 490°C dejan de ser adherentes al metal de base, pasando así al baño. Resulta con ello que la difusión del zinc en el hierro (mas propiamente en la capa δ_1) no está impedido, lo cual da lugar a la relación lineal del ataque al metal base.

Por encima de los 530°C se cumple nuevamente la relación parabólica entre la pérdida de peso y el tiempo, y éste es el intervalo parabólico superior.

Según cual sea la ley que corresponde el ataque, la estructura de la capa resulta diferente.



Para un acero que a 450°C reacciona según la ecuación parabólica, en el caso de un acero no calmado, la estructura visible al microscopio, fig. 4.3, consta de fases Γ , ϵ , y τ luego, la η formando un conjunto compacto. Si a esta temperatura el ataque es del tipo lineal (caso de un acero con 0.50%Si), se ve al microscopio que la fase τ no es compacta (fig. 5) sino que forma cristales fragmentados, frecuentemente amorfos embebidos en las fases η_1 y δ_1 ; debajo de esta zona bifásica $\eta+\delta$, con los cristales τ existe una capa de δ_1 compacta. La capa de aleaciones Γ es en general, muy delgada.

Si el ataque corresponde al intervalo superior (caso de aceros altos en carbono, la capa δ es porosa y debajo de ella δ que es muy delgada).

4.2. Diagramas de fase de las aleaciones presentes en el zinalquizado.

Naturaleza del diagrama de fases.

Empezaremos éste tópico diciendo "Las propiedades de un material dependen de la naturaleza, cantidad, tamaño y distribución y orientación de las fases", definamos ahora lo que debemos entender con los puntos anteriores.

- Naturaleza de las fases, evidentemente cada fase al estar diferenciada tendrá propiedades diferentes, sin embargo las propiedades individuales de cada fase determinarán en conjunto las características de la aleación.
- Cantidad de las fases, es claro que la presencia de una fase en mayor cantidad que otra marcará acentuadamente las propiedades de la aleación.
- Tamaño de las fases, el tamaño de las fases tienen influencia principalmente en las propiedades que tendrá la aleación ya que el tamaño de una fase más grande que otra impondrá la inclinación del material al comportamiento de esta fase, pero esta inclinación estará determinada por el tamaño y no en realidad por las propiedades de la fase.
- Forma de las fases, la forma de cada fase es de suma importancia sobre todo en el viaje de los esfuerzos y deformaciones a través de cada grano.

- Distribución de las fases, dependiendo de la ubicación espacial que guarde cada fase dentro del grano y por ende dentro del material, las propiedades de la aleación variarán grandemente.
- Orientación de las fases, así mismo la relación angular que guarden las fases con la conformación del material, será más viable o menos viable realizar un trabajo sobre la aleación en cuestión.

Finalmente, hagamos la observación de que el diagrama de fases nos brindará información de forma indirecta, ya que para un punto específico del diagrama nos será posible inferir las propiedades que tendrá la aleación o metal elemental - es decir el metal sin aleantes, o mejor dicho prácticamente sin aleantes - pues a partir del conocimiento del como están estructuradas las fases dentro del material, podremos suponer el comportamiento del material.

INSTITUTO VEC
TECNOLOGÍA

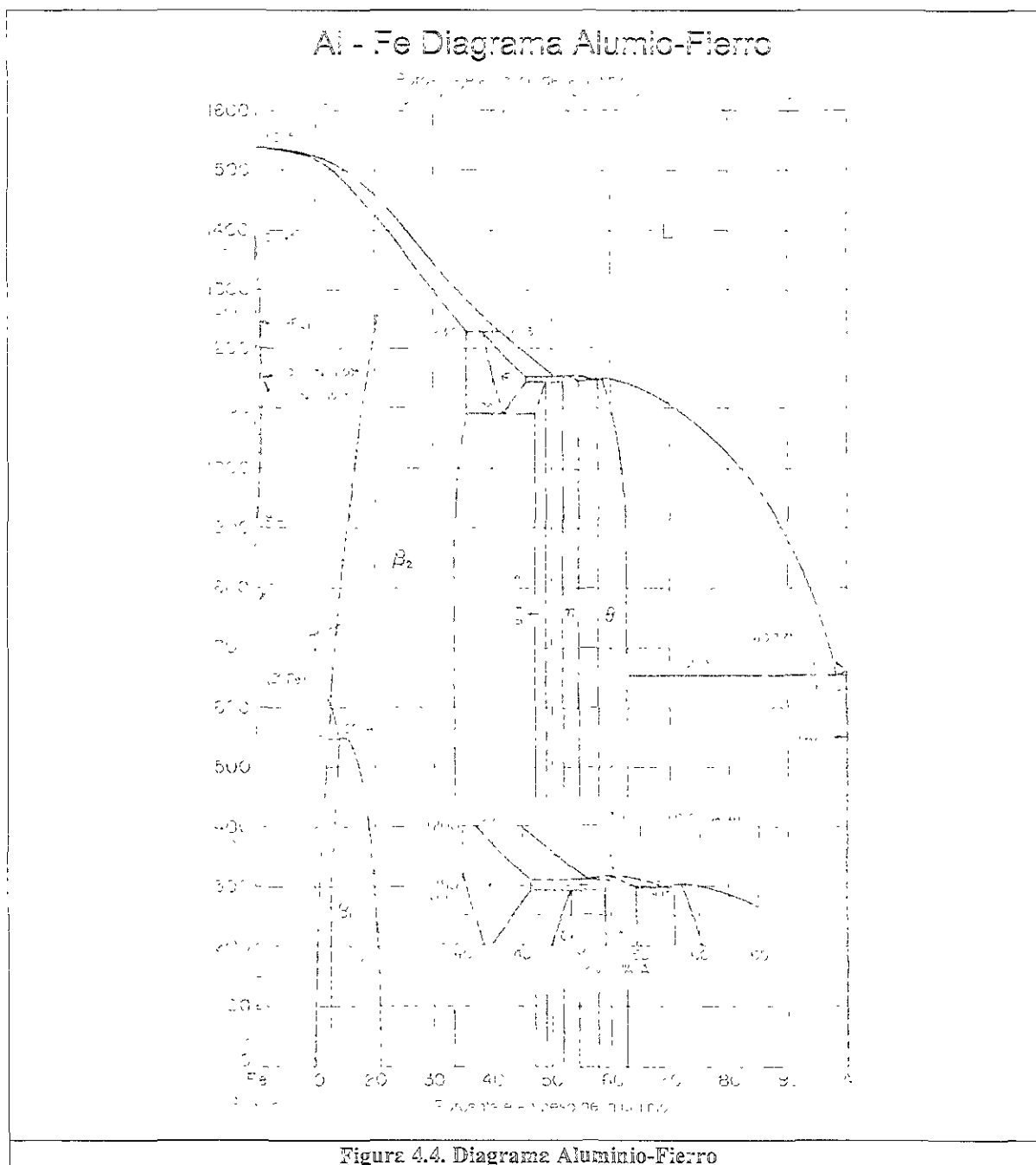


Figura 4.4. Diagrama Aluminio-Fierro

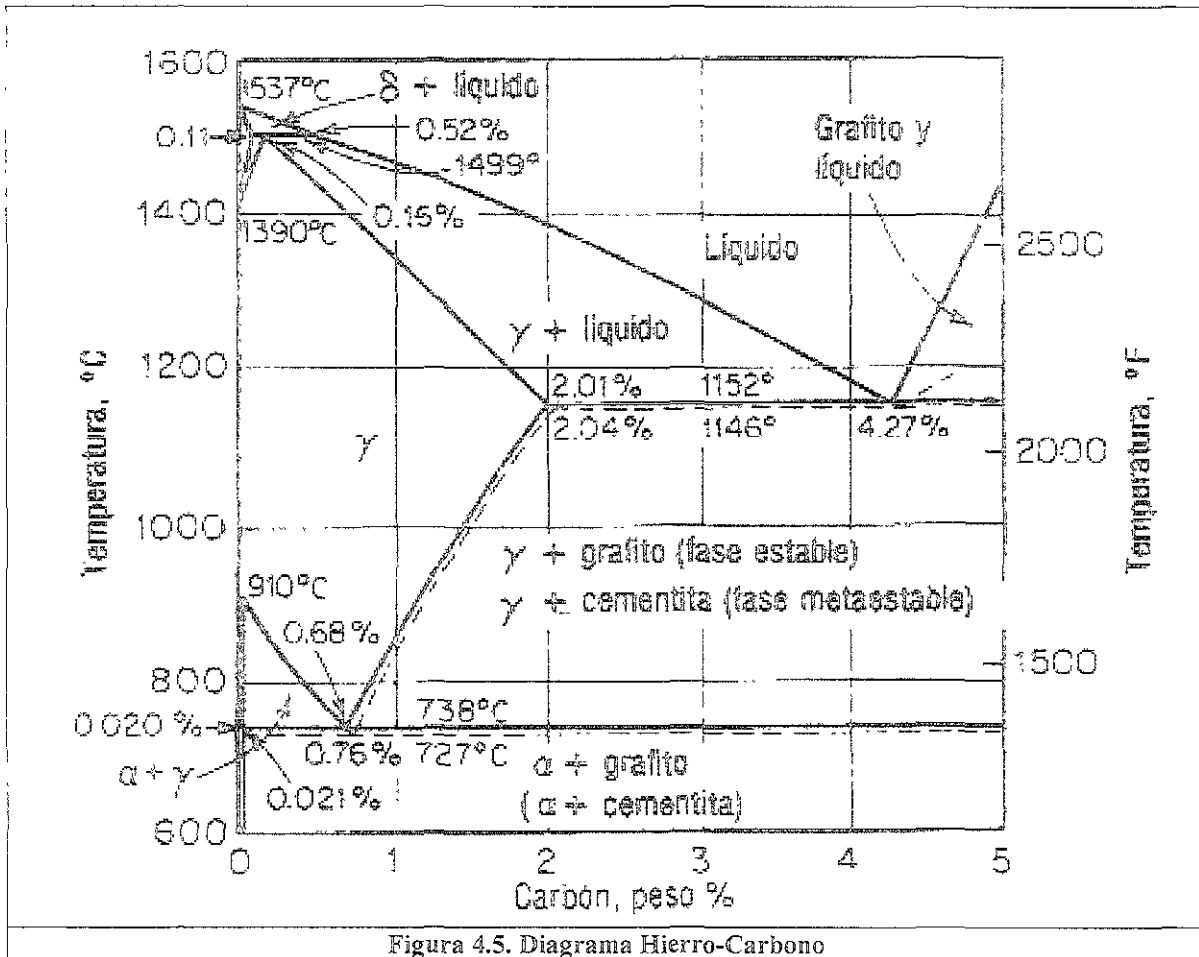
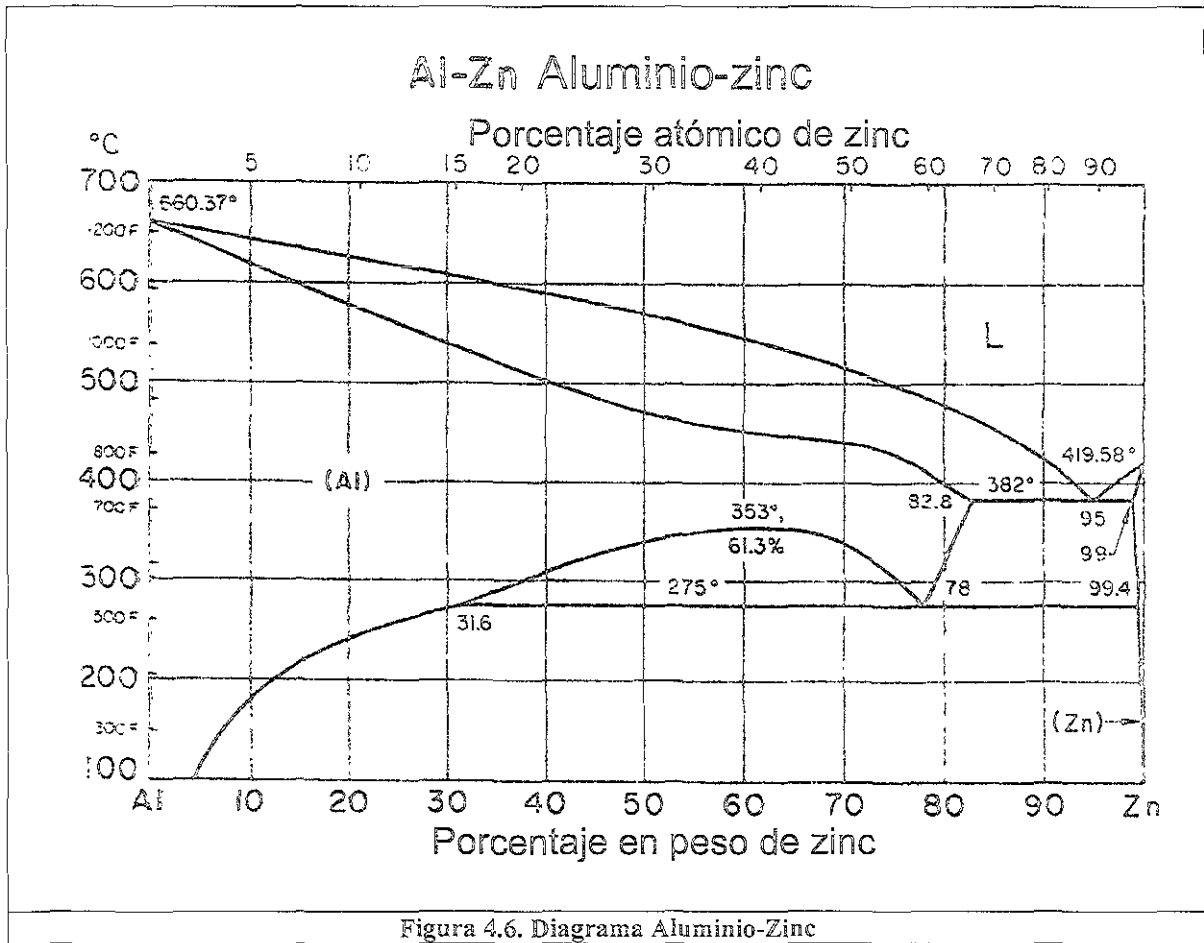


Figura 4.5. Diagrama Hierro-Carbono



CAPÍTULO 5:

DESARROLLO EXPERIMENTAL EN LA PRODUCCIÓN DE ZINALQUIZADO

5.1 ACTIVIDAD EXPERIMENTAL. INTRODUCCIÓN.

Con la finalidad de generar el recubrimiento de zinc sobre el acero 1018 se procedió a experimentar con el fin de desarrollar la metodología que a continuación se detalla. Para lograr el recubrimiento se requiere llevar un control estricto de las variables que intervienen en el proceso, desde las materias primas, temperaturas, tiempos, reactivos de limpieza y de activación, así como del metal líquido. En las líneas siguientes se detalla el procedimiento experimental que se siguió para lograr el recubrimiento.

5.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

5.2.1 MATERIAL EMPLEADO.

ACERO.

En la experimentación del presente trabajo, se empleó chapa de acero tipo SAE 1018 con calidad comercial producida por AHMSA.

Composición química. El material contenía la siguiente composición química:

C - 0.18

Si - 0.25

Mn - 0.75

La cual fue proporcionada por el fabricante y es certificado que cumple con las normas vigentes

Dureza. El material empleado tenía una dureza a la entrega Brinell máxima de 206

ZINALCO.

El zinalco utilizado cumplía con las siguientes características

Composición química. El material contenía la siguiente composición química:

Zn - 75%

Al - 22%

Cu - 3%

5.2.2. REACTIVOS UTILIZADOS.

En esta experimentación se utilizaron los siguientes reactivos.

- Percloroetileno.
- Ácido Clorhídrico al 10 %
- Tiourea.
- Cloruro de Zinc.
- Cloruro de amonio.
- Agua destilada.
- Pistola de aire caliente

5.2.3. EQUIPO EMPLEADO.

- Horno de crisol Para fundir el material se utilizó este horno marca SIEMENS que realiza el calentamiento por medio de un motor eléctrico monofásico tipo IRT-3252-2YC3 de 127 voltios y 7.2 amperios que gira a 3480 revoluciones por minuto y alcanza hasta una temperatura de 800 °C y que inyecta a la cámara de combustión una mezcla de gas LP y aire para lograr el calentamiento de esta.

- Horno eléctrico 1. Para realizar el precalentamiento de las piezas antes de introducirlas al laminado se utilizó un horno marca LINDBERG modelo 439DL tipo 41SE8156 que alcanza una temperatura máxima de 1371 °C por medio de resistencias eléctricas y cuenta con un control de temperatura, de 220 voltios, trifásico y cuenta con un sistema de atmósfera controlada a base de Argón
- Horno eléctrico 2. Para fundir el ZINALCO y para realizar el recocido se utilizó este horno marca CONSTRUCTORA DE APARATOS INDUSTRIALES, Modelo 12BMPCH que utiliza un voltaje de 220 voltios y es de una fase, cuenta con un control de temperatura realizando el calentamiento a base de resistencias eléctricas y alcanza una temperatura de hasta 1350 °C.
- Horno eléctrico 3. Para hacer un postcalentamiento después de aplicado el recubrimiento y para evitar enfriamientos bruscos se utilizó este horno de resistencias eléctricas marca LINDBERG modelo 151333 que utiliza 240 voltios, realiza el calentamiento a base de resistencias eléctricas y cuenta con un control de temperatura alcanzando 1500 °C como temperatura máxima
- Laminadora. El laminador empleado, fue un laminador dúo con posibilidades de arreglarse como cuarto marca HILLE con capacidad de carga de 30 toneladas, en el cual se puede controlar la velocidad de laminación y el porcentaje de deformación.
- Microscopio electrónico de barrido. Este equipo fue empleado para observar la interfase de la unión a diferentes aumentos y en diferentes secciones de las probetas, las características del microscopio son las siguientes:

* Voltaje de aceleración 0 – 30 Kv.

* Detector de electrones secundarios y retrodispersados.

* Almacenamiento de información: cámara fotográfica de 35 mm, videoprint, disco duro del sistema de cómputo y unidad de discos flexibles de 3.5mm.

* Equipo de microanálisis por dispersión de energía

- o Equipos auxiliares. Para la fabricación de las probetas que se utilizaron en las pruebas se empleó una cizalla de pedal marca CHICAGO modelo FS-416, con capacidad de corte de calibre 18 y un esmeril circular para lograr un acabado superficial rugoso.

5.3. EXPERIMENTACIÓN PREVIA.

Con el objeto de determinar los valores de las variables a utilizar y el procedimiento final para el zinalquizado de acero se siguió la siguiente metodología.

- I) Variar el tiempo de 3 a 18 segundos mientras se mantenía constante la temperatura a un valor de 550°C que es un valor por encima de la temperatura de fusión;
- II) Variar el tiempo de 3 a 30 segundos mientras se mantenía constante la temperatura a un valor de 700°C;
- III) Habiendo determinado que el tiempo mas adecuado para la inmersión fue de 5 segundos y manteniéndolo constante se procedió a variar la temperatura al enfriamiento desde 768 hasta 481°C para ver los efectos de esta en el grosor de la capa y el acabado;
- IV) Por último se realizaron pruebas de inmersión con los valores obtenidos como óptimos de temperatura y tiempo de inmersión

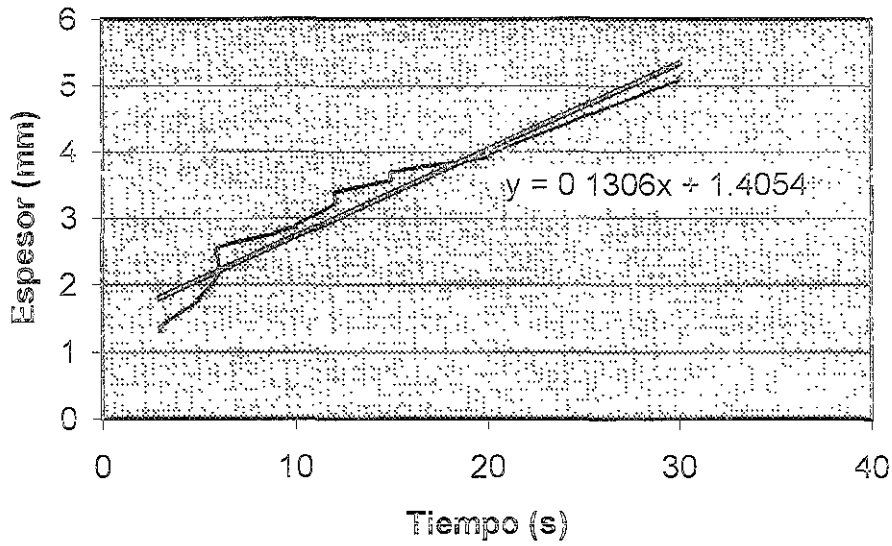
Los resultados arrojados por la prueba del inciso I y II son los siguientes:

# Probeta	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Espesor (mm)
1	700	3	1.30
2	700	3	1.35
3	700	3	1.37
4	700	5	1.75
5	700	5	1.76
6	700	5	1.79
7	700	6	2.13
8	700	6	2.38
9	700	6	2.54
10	700	9	2.75
11	700	9	2.77
12	700	9	2.78
13	700	10	2.85
14	700	10	2.86
15	700	10	2.88
16	700	12	3.21
17	700	12	3.35
18	700	12	3.37
19	700	15	3.57
20	700	15	3.58
21	700	15	3.68
22	700	20	3.90
23	700	20	3.93
24	700	20	3.94
25	700	30	5.07
26	700	30	5.08
27	700	30	5.10

28	550	3	0.97
29	550	3	0.98
30	550	3	1.02
31	550	5	1.01
32	550	5	0.99
33	550	5	1.02
34	550	6	0.93
35	550	6	0.94
36	550	6	1.00
37	550	9	1.02
38	550	9	0.96
39	550	9	1.07
40	550	10	0.99
41	550	10	1.02
42	550	10	0.96
43	550	12	1.01
44	550	12	0.98
45	550	12	0.96
46	550	15	1.00
47	550	15	0.91
48	550	15	1.04
49	550	18	1.02
50	550	18	0.95
51	550	18	0.98

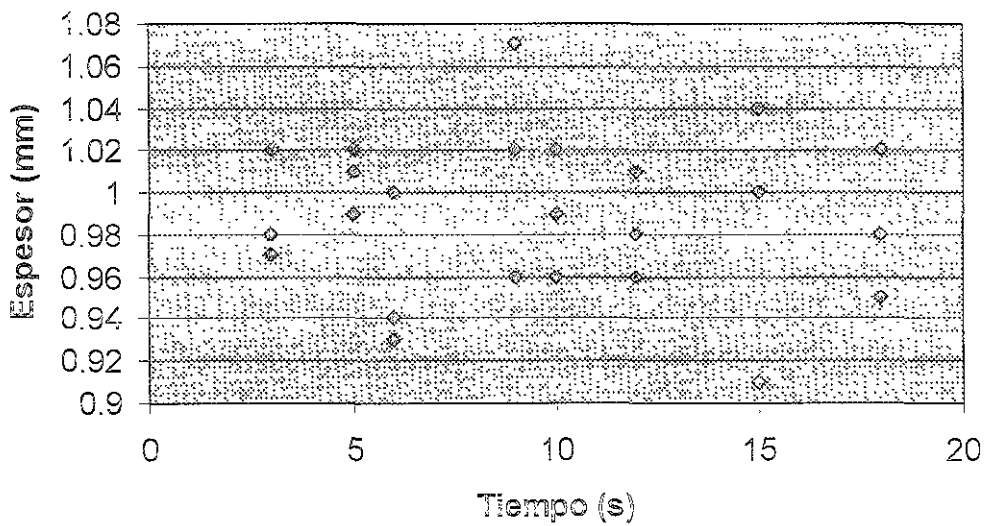
De los resultados anteriores obtenemos las siguientes gráficas.

Experimento I (T=700°C)

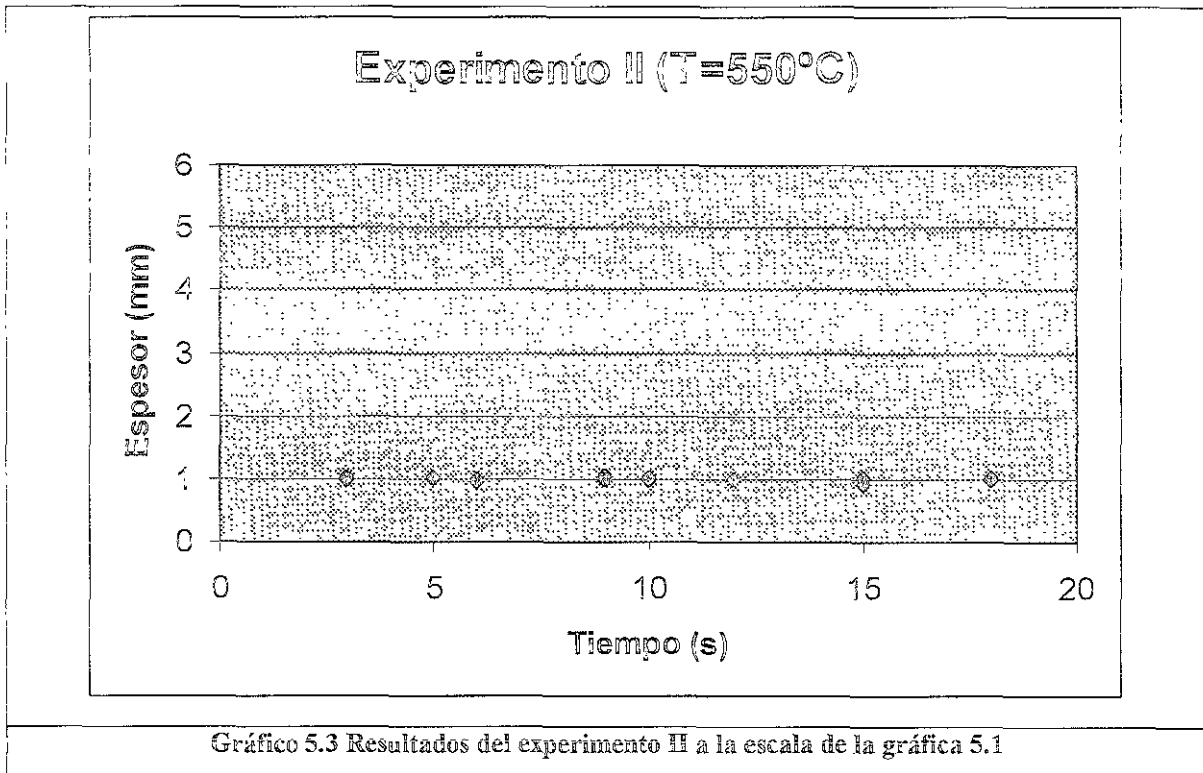


Gráfica 5.1 Resultados del experimento I

Experimento II (T=550°C)



Gráfica 5.2 Resultados del experimento II

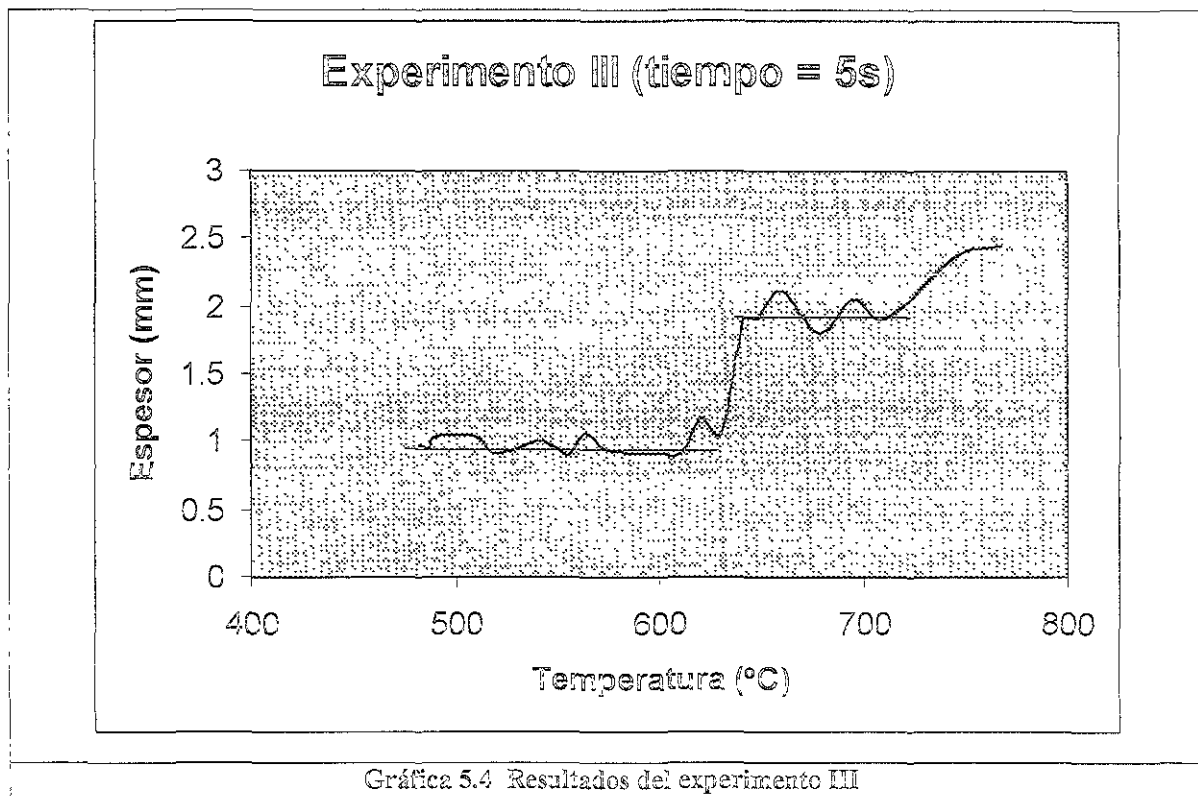


Los resultados arrojados por la prueba del inciso III son los siguientes:

# Probeta	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (s)	Espesor (mm)
1	768	5	2.45
2	749	5	2.40
3	730	5	2.18
4	720	5	2.00
5	707	5	1.90
6	695	5	2.06
7	678	5	1.80
8	660	5	2.12
9	648	5	1.90
10	641	5	1.90
11	630	5	1.06
12	621	5	1.19
13	611	5	0.91

14	599	5	0.92
15	588	5	0.92
16	574	5	0.95
17	564	5	1.07
18	556	5	0.90
19	549	5	0.96
20	540	5	1.00
21	527	5	0.93
22	518	5	0.91
23	510	5	1.04
24	490	5	1.04
25	486	5	0.95
26	481	5	0.98

De los resultados anteriores obtenemos la siguiente gráfica:



De la experimentación realizada se deduce que la temperatura mas adecuada para realizar el recubrimiento es alrededor de 550°C. En cuanto al tiempo de inmersión y con base a pruebas preliminares de la resistencia del recubrimiento, se estima que los tiempos hasta este punto trabajados fueron insuficientes, lo cual se corrobora con antecedentes bibliográficos relativos a los recubrimientos metálicos por inmersión en zinc, estimando que el tiempo adecuado para lograr el recubrimiento es del orden de 5 a 10 minutos. Por lo cual las pruebas siguientes se realizaron con este rango de temperatura y tiempo de inmersión.

5.4. PRODUCCIÓN DEL MATERIAL.

La preparación que requiere el acero para ser recubierto por el zinalco es de suma importancia, ya que de ello depende que el zinalco se adhiera al acero. Al ser la preparación un factor de fundamental importancia, se explica a continuación en forma detallada.

La primera etapa consiste en cortar la placa de acero a las dimensiones apropiadas para que se facilite su manejo a la hora de introducirla al baño. Para esta investigación las probetas fueron cortadas en tramos de 26 X 90 mm

Una vez obtenidos los materiales con las dimensiones requeridas se procedió a realizar el proceso de limpieza, el cual inicia con la limpieza mecánica por medio del esmeril de tal manera de eliminar impurezas y dejar una superficie rugosa para permitir una mejor adherencia entre los materiales.

Concluida la limpieza mecánica se procedió a hacer el proceso de desengrasado que consiste en sumergir las probetas 10 minutos en una tina que contiene percloroetileno al 100% para poder quitar la grasa que se adhiere al acero debido a su manejo con las manos.

Después de este procedimiento se prosiguió con el decapado que consiste en preparar ácido clorhídrico diluido en agua al 10% y después aplicar el 10% de Tiourea que

funciona como inhibidor para que las piezas al ser sacadas del decapado y expuestas al ambiente no se oxiden rápidamente, en este proceso se dejan las piezas 4 minutos.

A continuación se procedió al fluxado (activación de la superficie) que consiste en hacer una preparación en un vaso de precipitado de cloruro de zinc al 15% en agua destilada y en otro vaso cloruro de amonio al 15% en agua destilada también, después se mezclan en una proporción de 10% de cada preparación previa en agua destilada, y se sumergen las piezas en esta solución durante 3 minutos para lograr que la superficie esté lista para poder ser difundida. Después de esto se procede a sacar las probetas y secarlas en una pistola de aire para que no se oxiden

El paso siguiente consiste en poner zinalco en un crisol y calentar el horno eléctrico 2 a una temperatura de 570°C para lograr que el zinalco este completamente en estado líquido y permitir su manejo sin que el proceso de solidificación entorpezca la introducción de las probetas a la solución

Se saca el crisol del horno eléctrico y se procede a introducir las probetas y dejarlas de 5 a 10 minutos para poder lograr la difusión del zinc en el acero

Las probetas son introducidas en el horno eléctrico 3 que está a 350 °C para evitar un choque térmico en las probetas recubiertas y dejar las probetas a una temperatura cercana a la de recocido.

A continuación las probetas que van a ser recocidas se introducen en el horno eléctrico 2 a una temperatura de 380 °C durante 1 ó 2 horas.

Se procede a la laminación superficial precalentando las piezas 25 minutos a 350°C, introduciéndolas a la laminadora a una velocidad de laminación de 10 m/min, realizando 2 pasos de 20 milésimas cada uno para lograr un acabado superficial mejor.

En la tabla 5.1 se ejemplifica el trabajo realizado en cada una de las probetas utilizadas

Probeta	Limpieza Mecánica	Desengrasado	Decapado	Fluxado	Tiempo de Inmersión	Recocido	Laminación
1-3	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	10 min	SIN	SIN
4-6	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	10 min	1 h	SIN
7-9	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	10 min	1 h	Laminada
10-12	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	10 min	2 h	SIN
13-15	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	10 min	2h	Laminada
16-18	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	5 min	SIN	SIN
19-21	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	5 min	1 h	SIN
22-24	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	5 min	1 h	Laminada
25-27	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	5 min	2 h	SIN
28-30	Esmerilado	Percloroetileno	4 min	3 min	5 min	2 h	Laminada

Tabla 5.1. Trabajo realizado en las probetas.

Con estos valores se logró una unión satisfactoria y se procede a hacer las observaciones microscópicas de la unión

CAPÍTULO 6:
OBTENCIÓN DE RESULTADOS

6.1 OBTENCIÓN DE RESULTADOS.

Evaluación de la unión.

Una vez logrado el recubrimiento del acero bajo los parámetros estudiados previamente se procedió a evaluar la unión mediante pruebas de microscopía electrónica de barrido con la finalidad de determinar las mejores condiciones para obtener la unión.

Microscopía electrónica de barrido.

De las 10 probetas se obtuvieron muestras en dirección longitudinal y transversal, las cuales se montaron en baquelita conductora, realizando un pulido mecánico con lijas de carburo de silicio del número 180, 220, 300, 400 y 600, continuando con un acabado con alúmina gris y un acabado fino con alúmina blanca, y un secado con la pistola de aire, procediendo a observarlas en el microscopio electrónico de barrido

De cada una de las direcciones se procedió a tomar tres fotografías: una general, una de la capa intermetálica y una vista de microestructura.

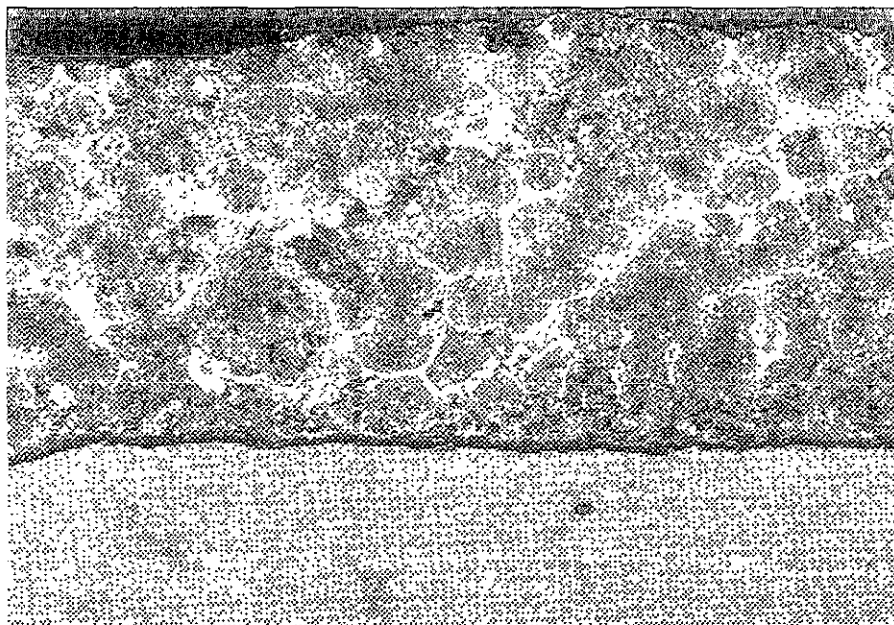
Algunas de las observaciones realizadas en el microscopio electrónico de barrido se muestran en las siguientes fotografías.

PROBETA 1-3

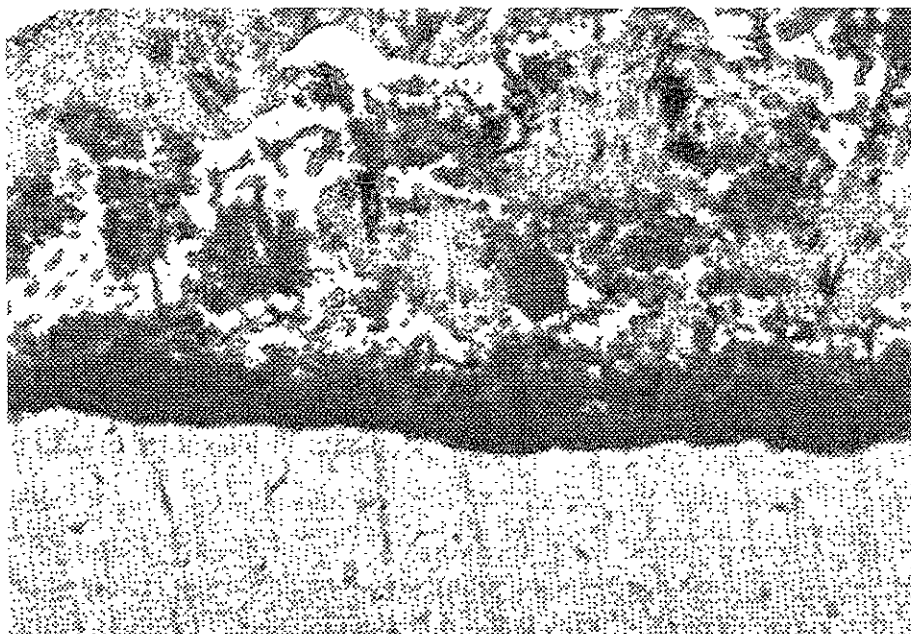
Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Sin recocido

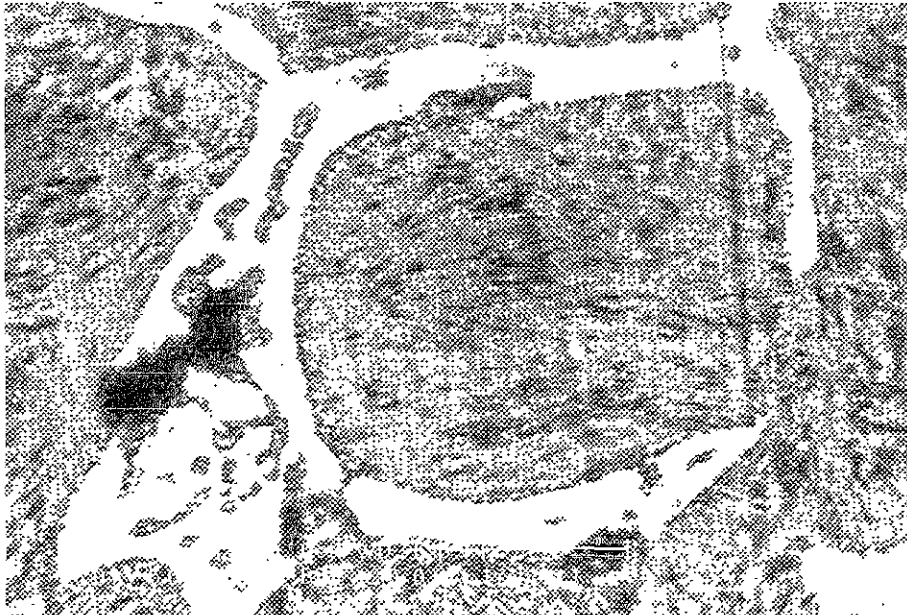
CORTE LONGITUDINAL



Fotografía 1. Vista General de Interfase

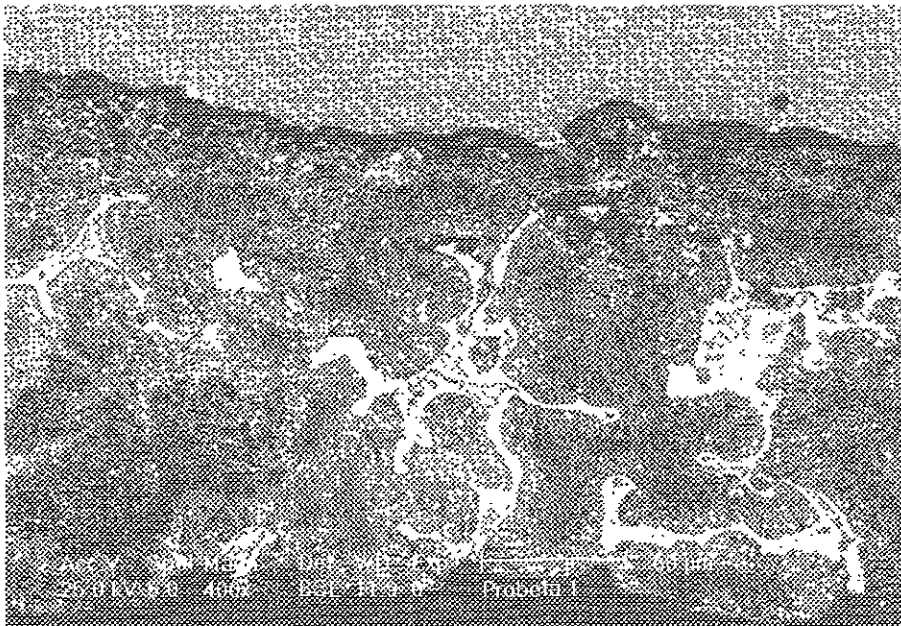


Fotografía 2. Acercamiento de la interfase

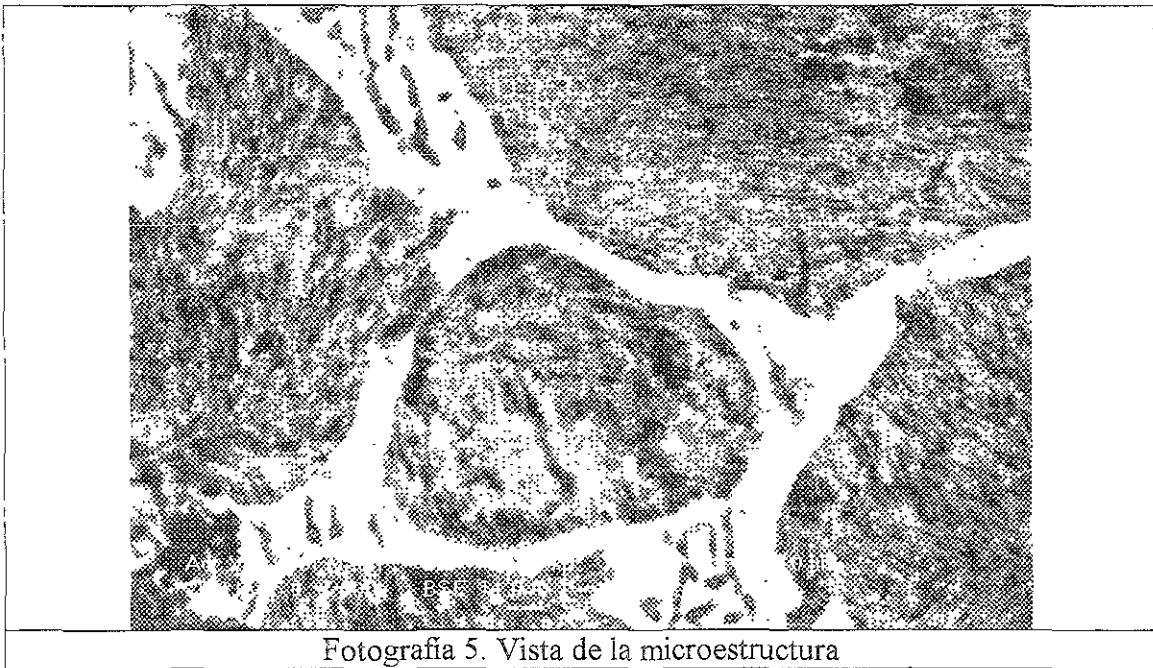


Fotografía 3. Vista de la microestructura

CORTE TRANSVERSAL



Fotografía 4. Acercamiento de la interfase

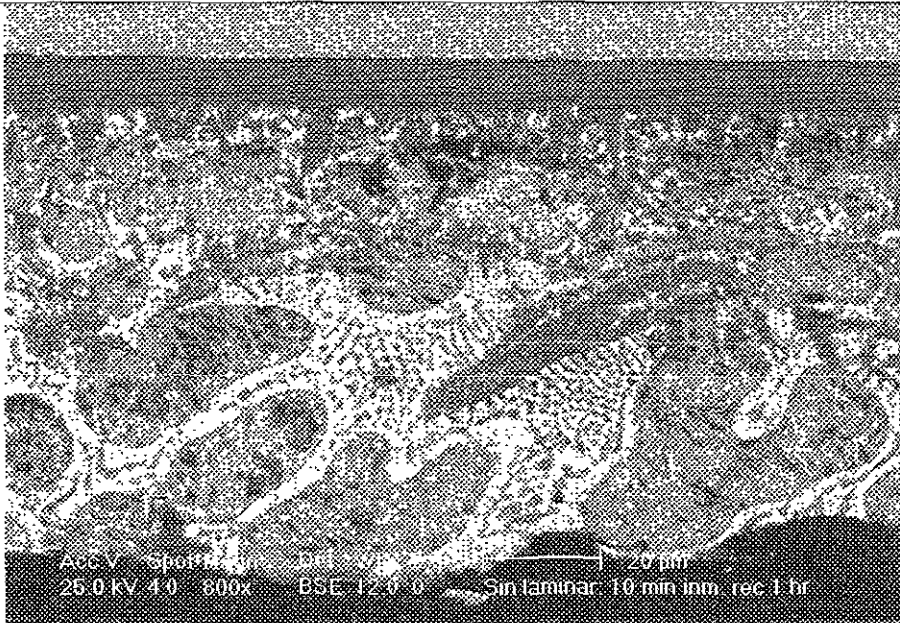


PROBETA 4-6

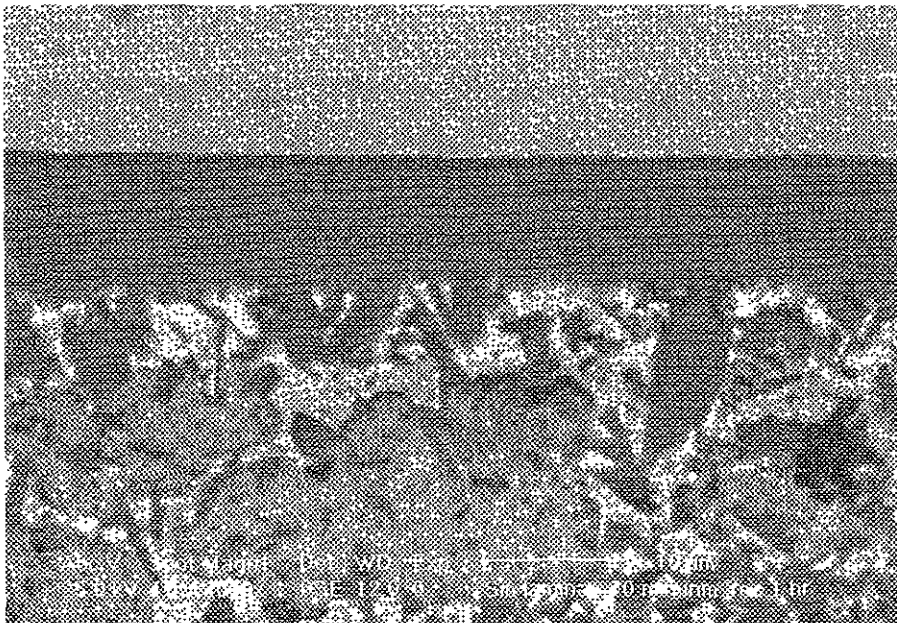
Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 1 hora
- Sin laminar

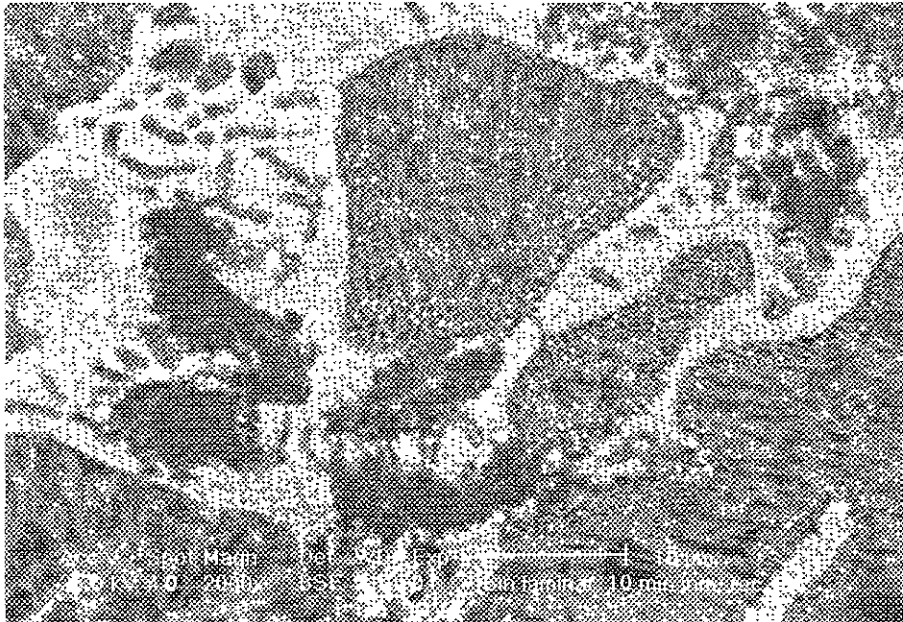
CORTE LONGITUDINAL



Fotografía 6. Vista General de Interfase

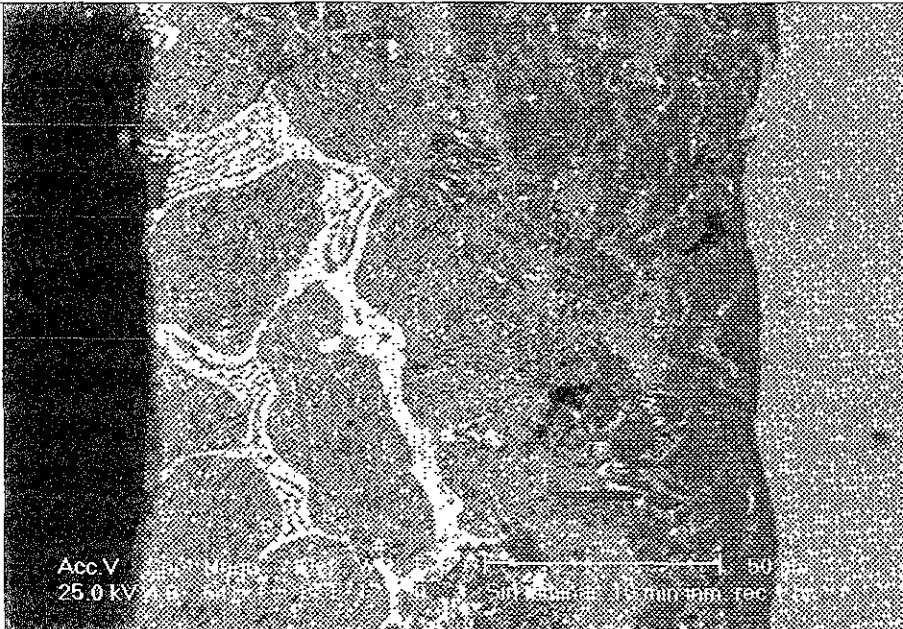


Fotografía 7 Acercamiento de la interfase



Fotografía 8 Vista de la microestructura

CORTE TRANSVERSAL



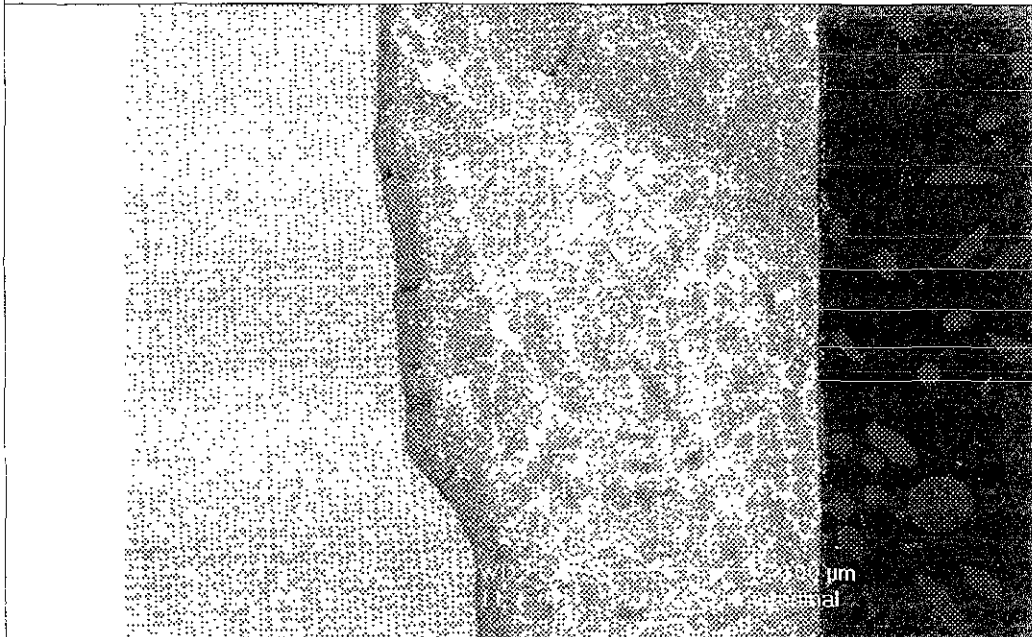
Fotografía 9 Acercamiento de la interfase

PROBETA 7-9

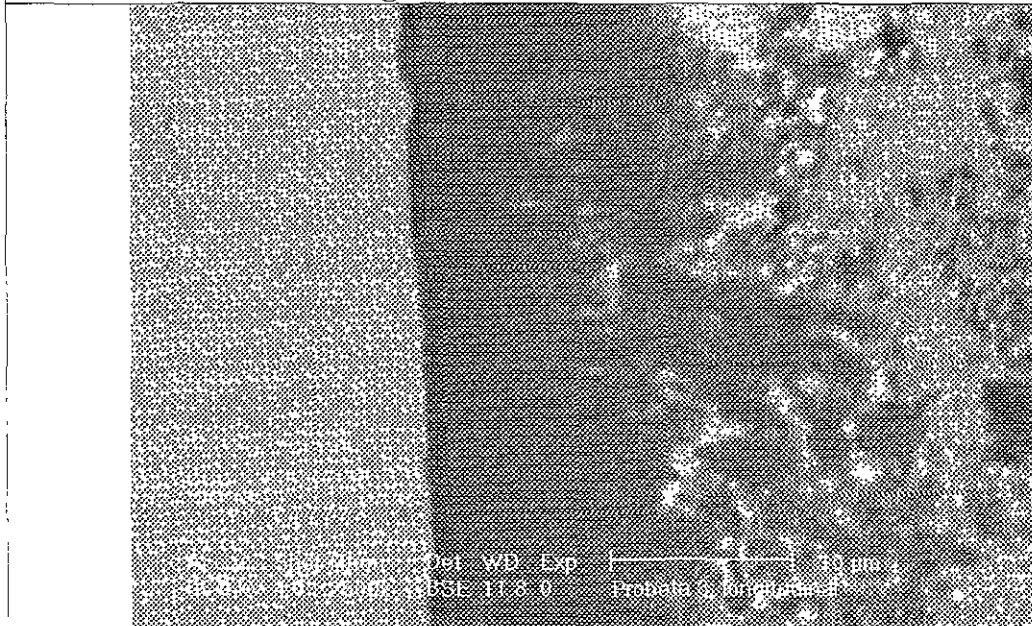
Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 1 hora
- Laminada

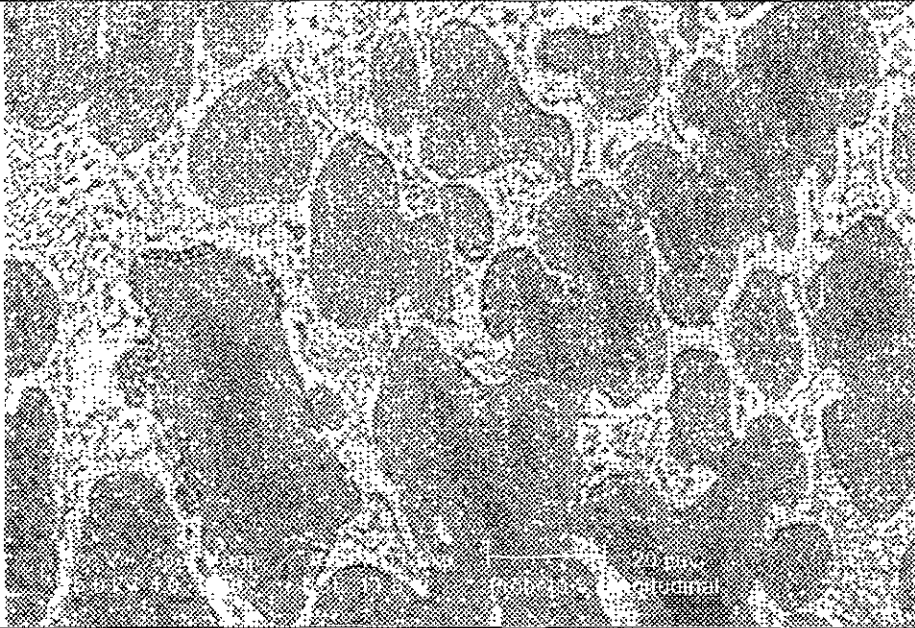
CORTE LONGITUDINAL



Fotografía 10. Vista General de Interfase

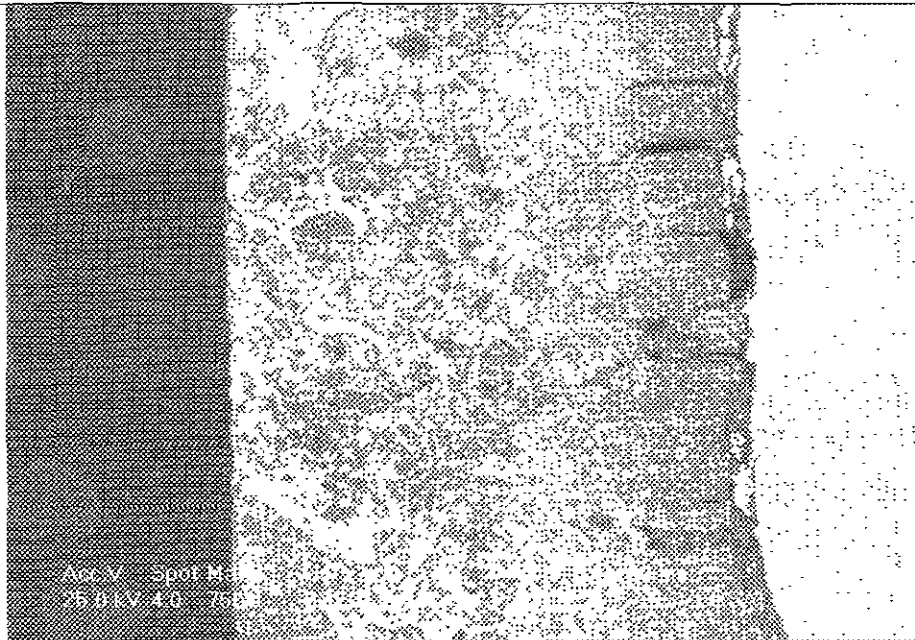


Fotografía 11. Acercamiento de la interfase

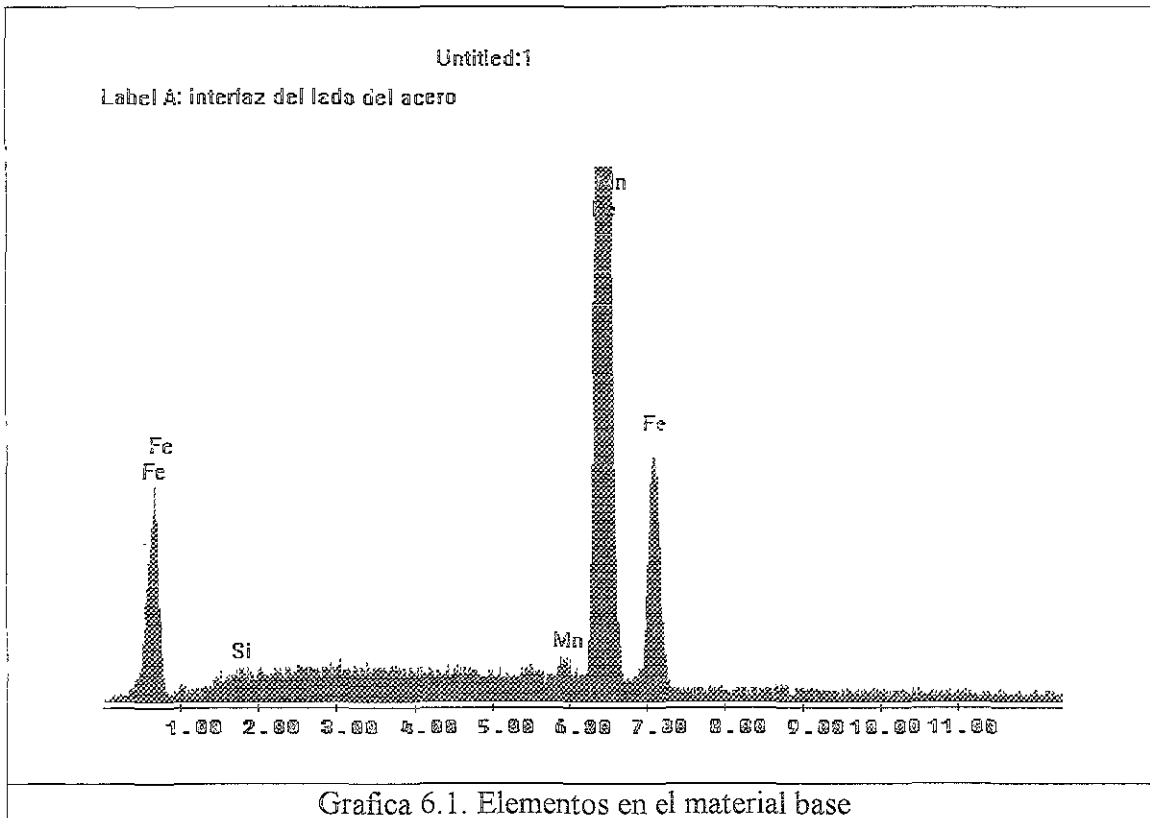


Fotografía 12. Vista de la microestructura

CORTE TRANSVERSAL



Fotografía 13. Vista General de Interfase

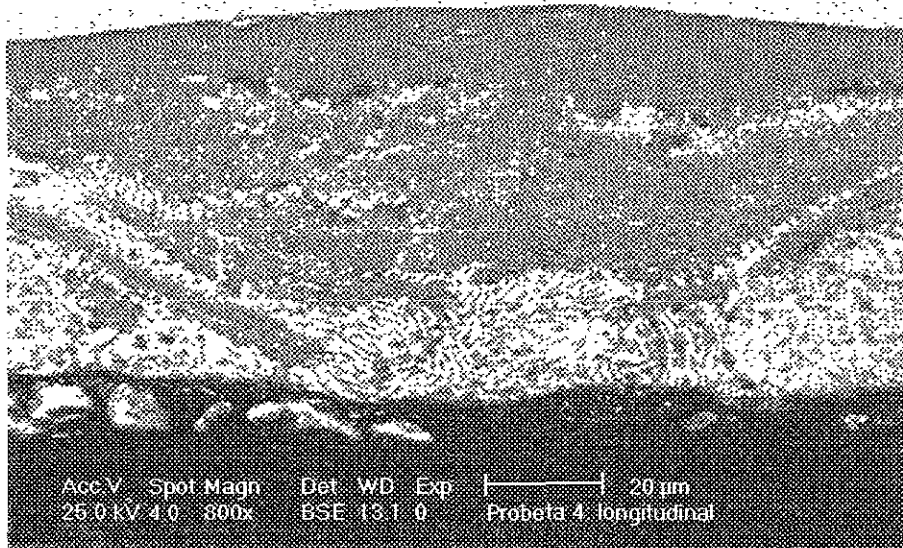


PROBETA 10-12

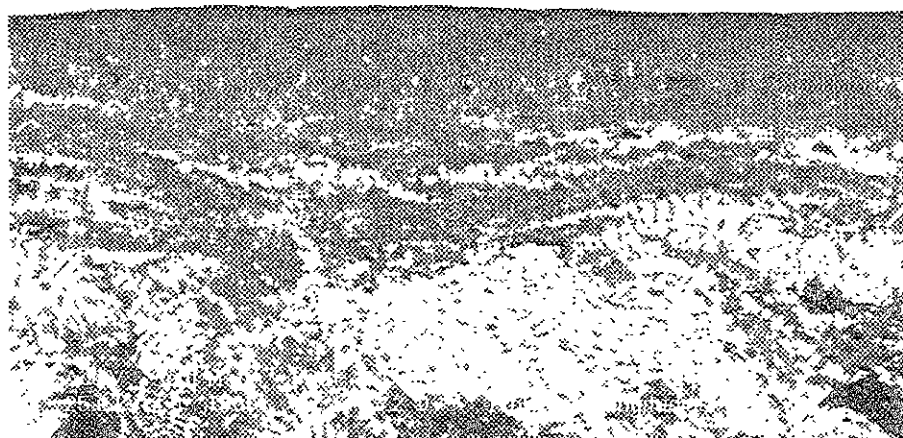
Características

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 2 horas
- S/Laminar

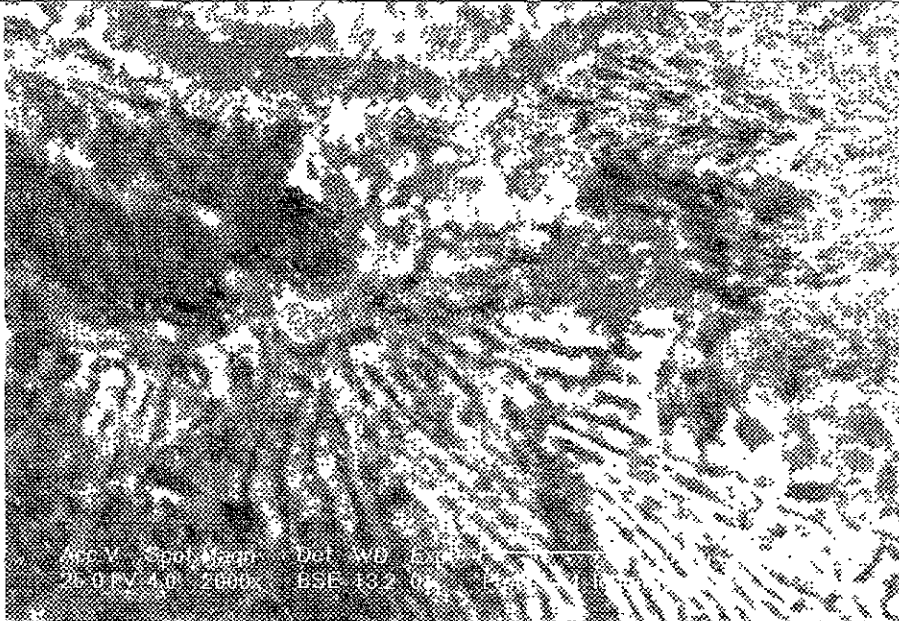
CORTE LONGITUDINAL



Fotografía 14. Vista General de Interfase

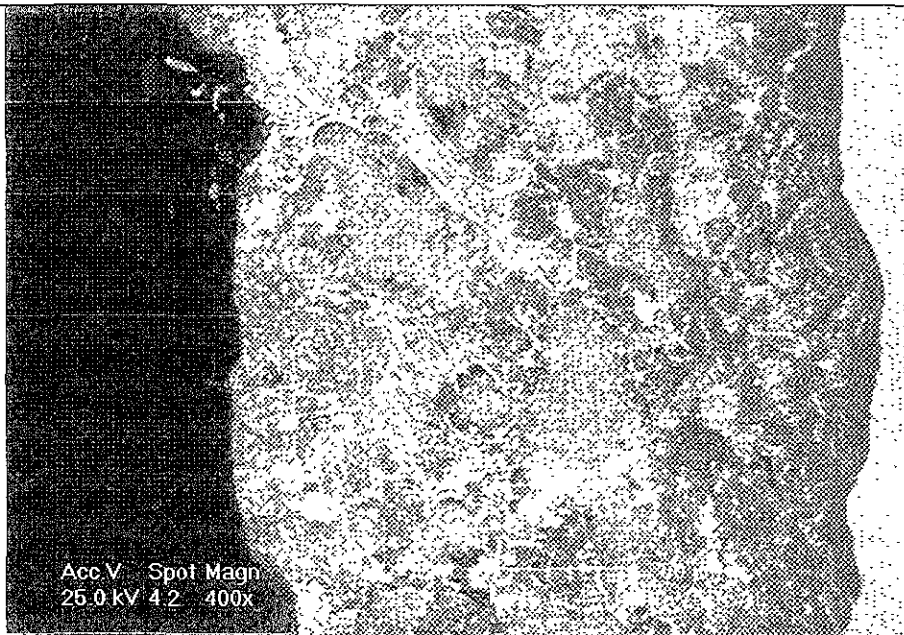


Fotografía 15. Acercamiento de la interfase

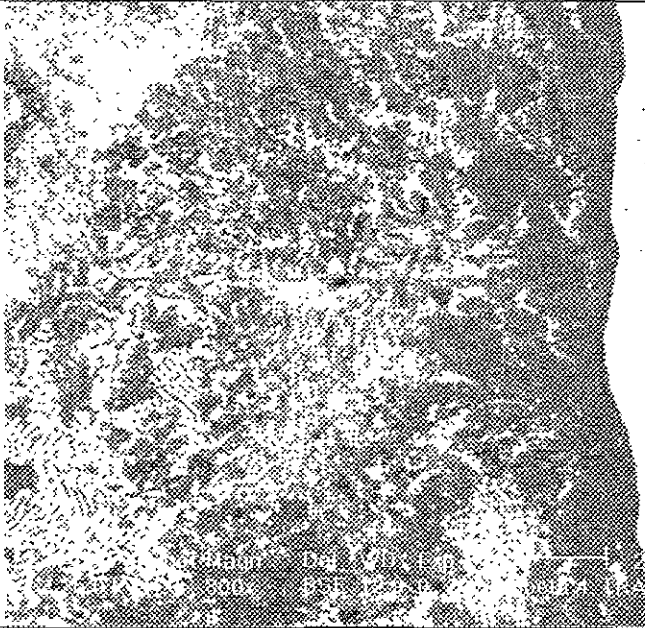


Fotografía 16. Vista de la microestructura

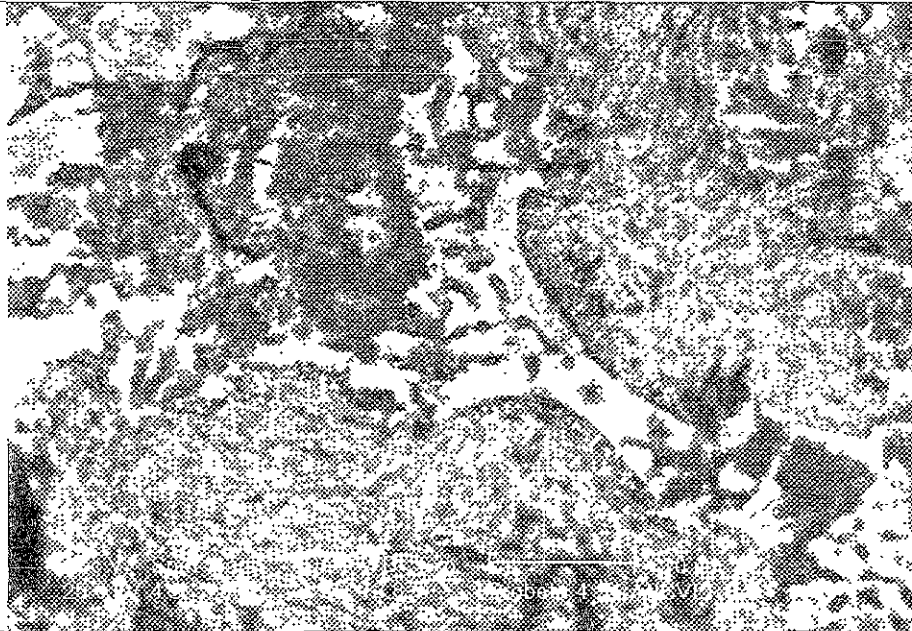
CORTE TRANSVERSAL



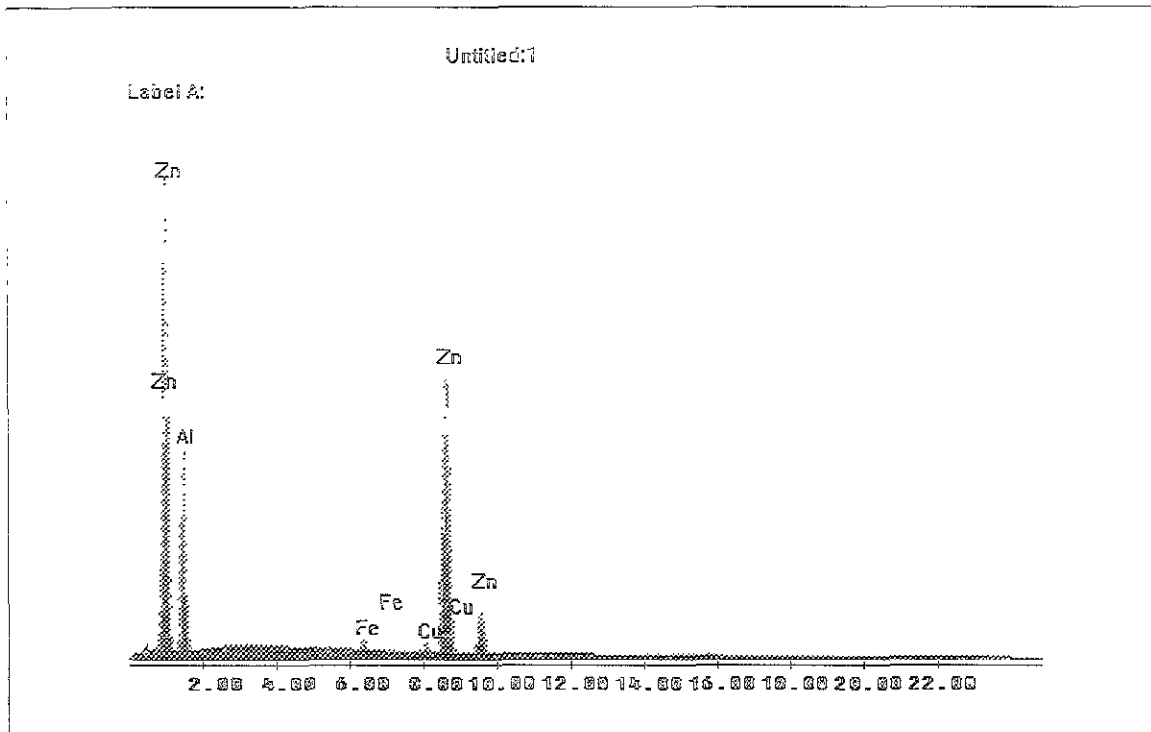
Fotografía 17. Vista General de Interfase



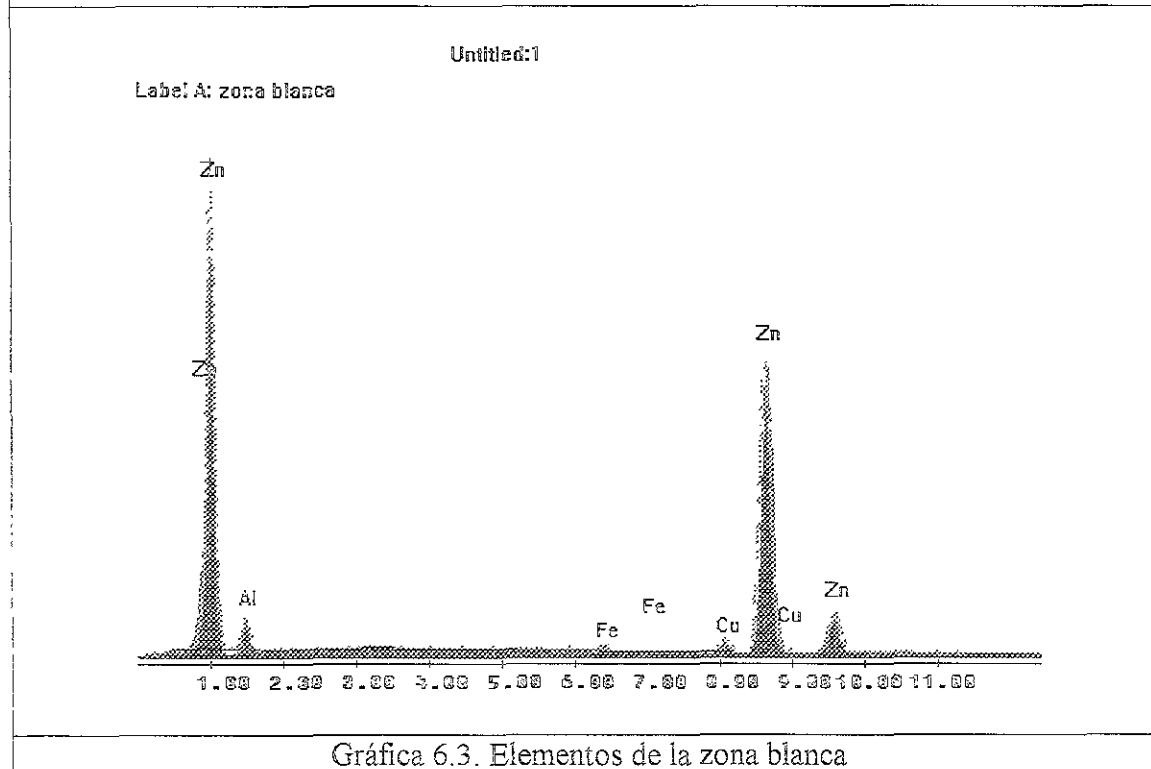
Fotografía 18. Acercamiento de la interfase



Fotografía 19. Vista de la microestructura



Gráfica 6.2. Elementos en la interfase



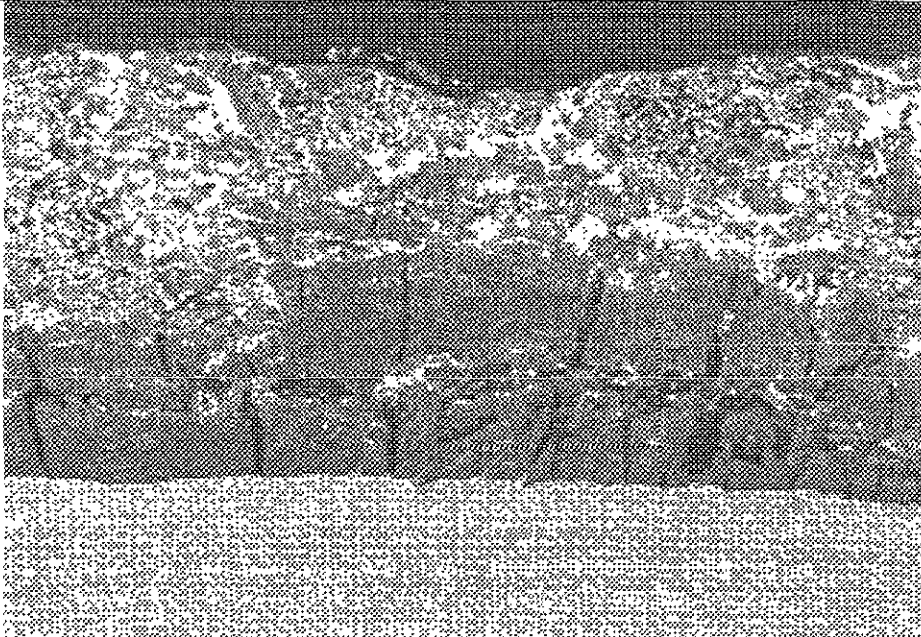
Gráfica 6.3. Elementos de la zona blanca

PROBETA 13-15

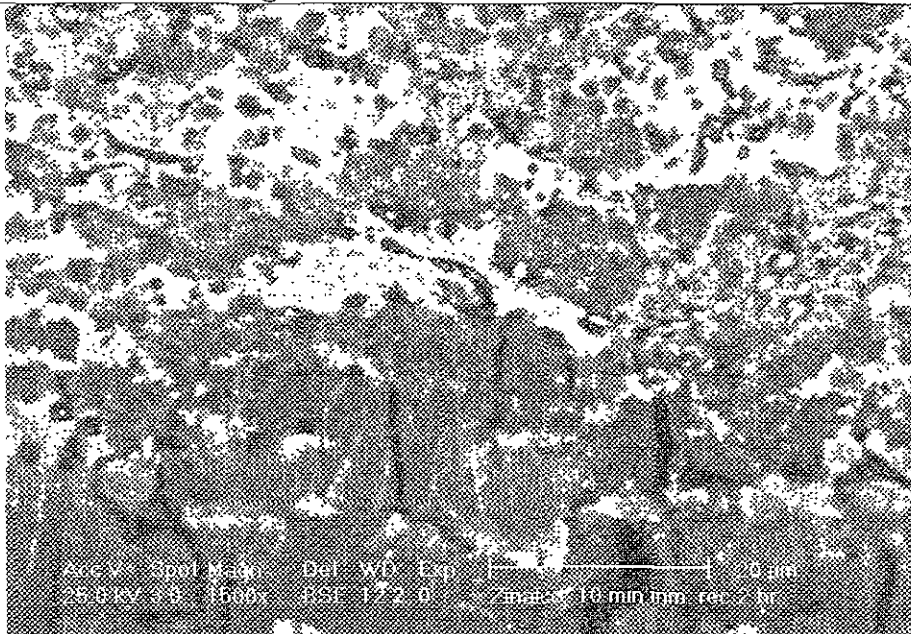
Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 2 horas
- Laminada

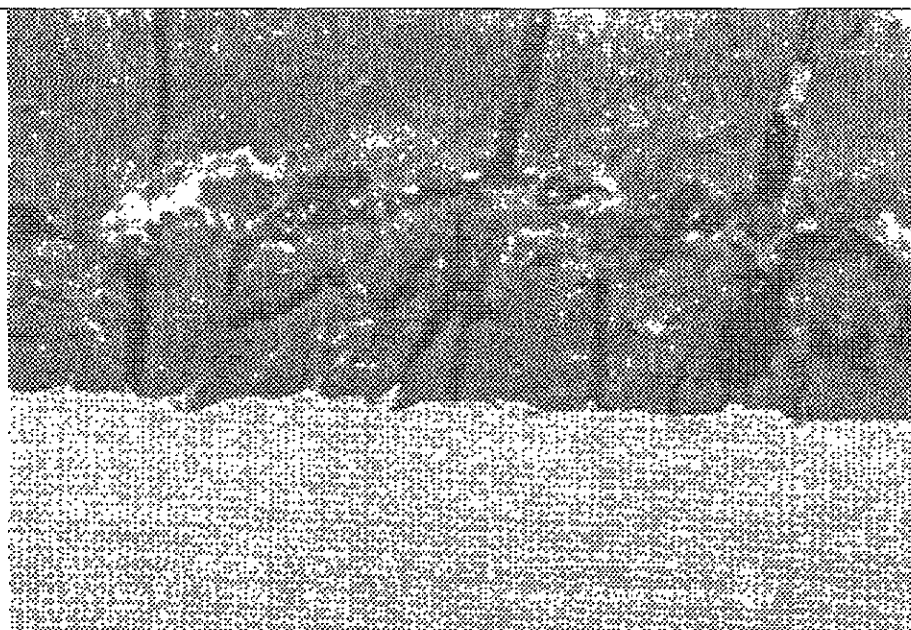
CORTE LONGITUDINAL



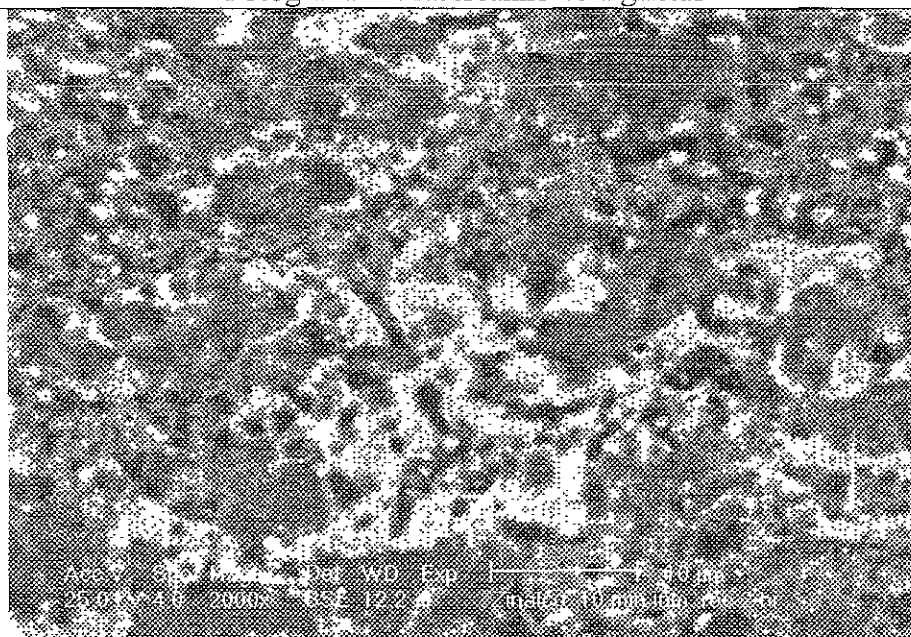
Fotografía 20. Vista General de Interfase



Fotografía 21. Acercamiento de la interfase



Fotografía 22. Acercamiento a grietas



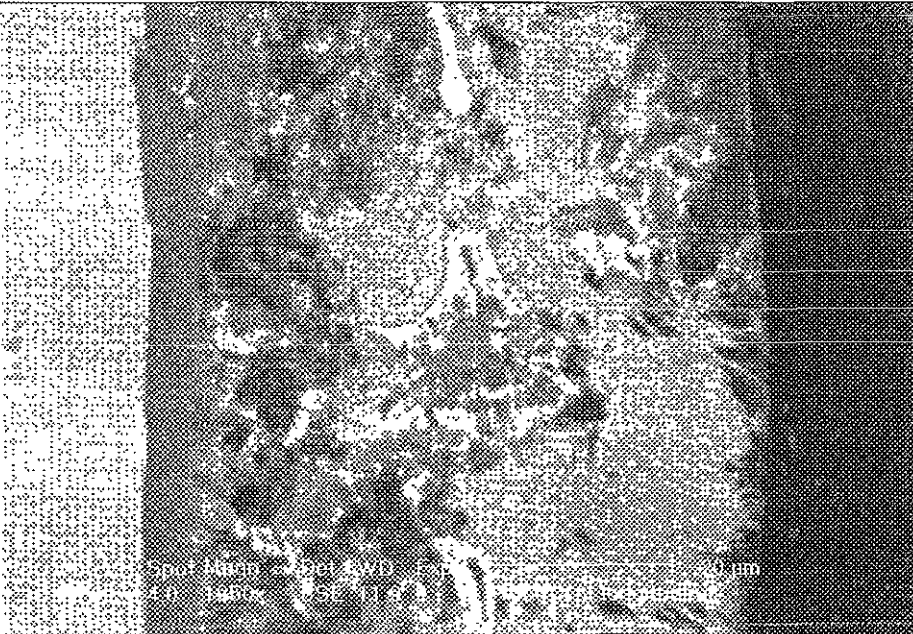
Fotografía 23. Vista de la microestructura

PROBETA 16-18

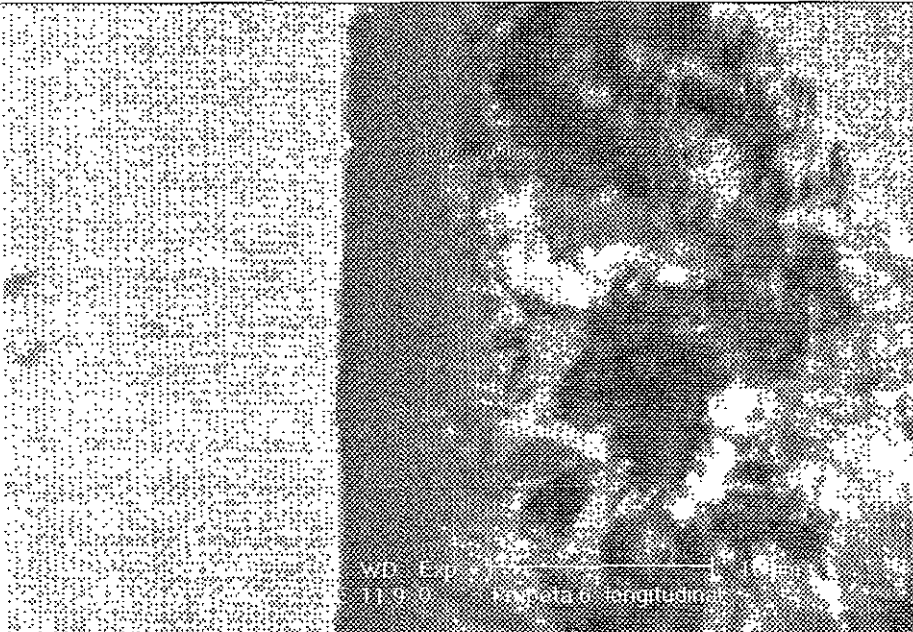
Características:

- Limpieza Mecánica (esmerinado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- S/Recocido
- No Laminada

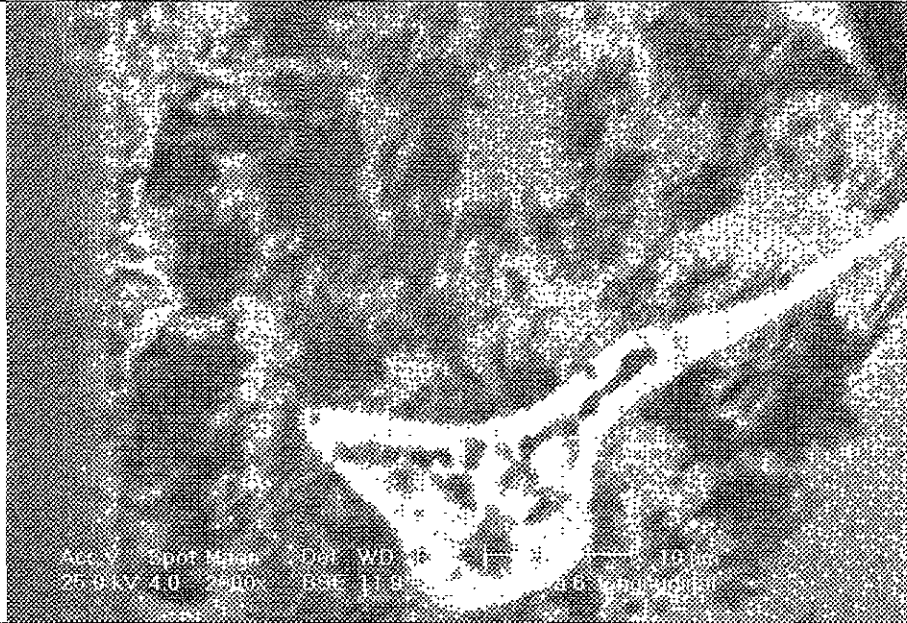
CORTE LONGITUDINAL



Fotografía 24. Vista General de Interfase

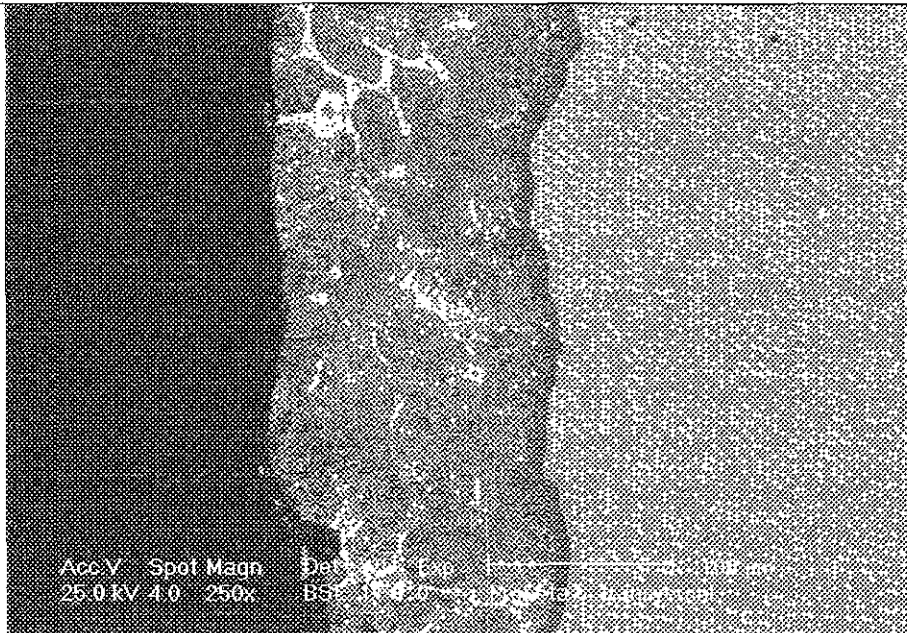


Fotografía 25. Acercamiento de la interfase



Fotografía 26. Vista de la microestructura

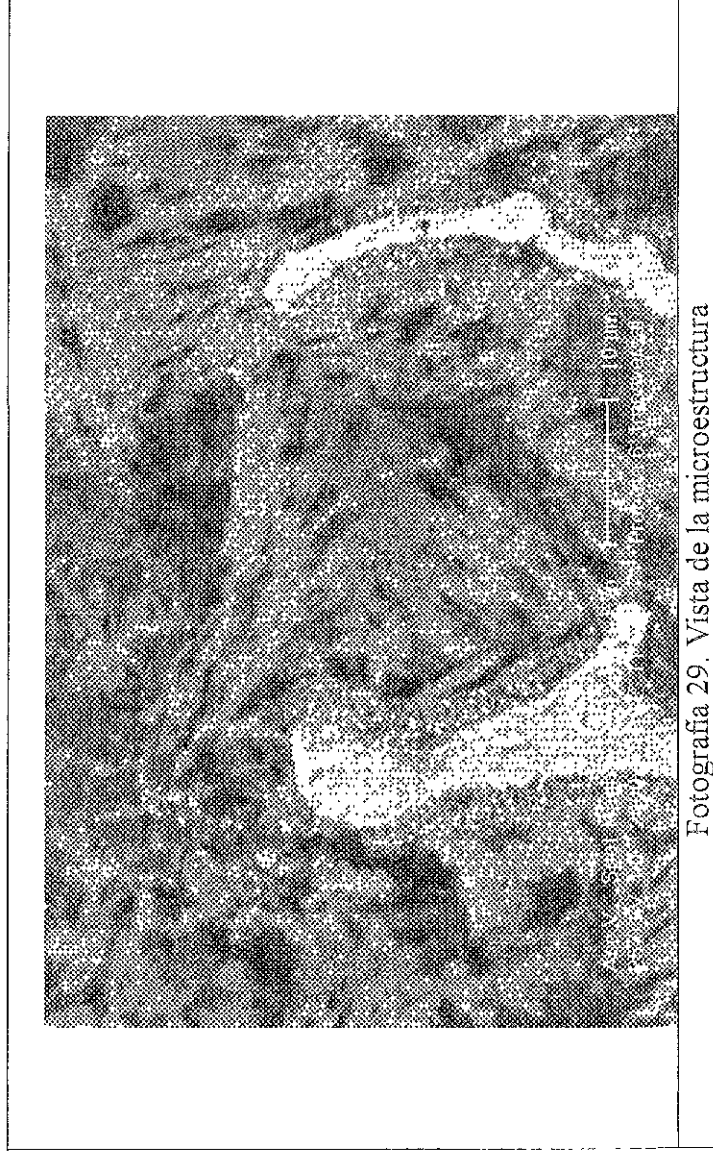
CORTE TRANSVERSAL



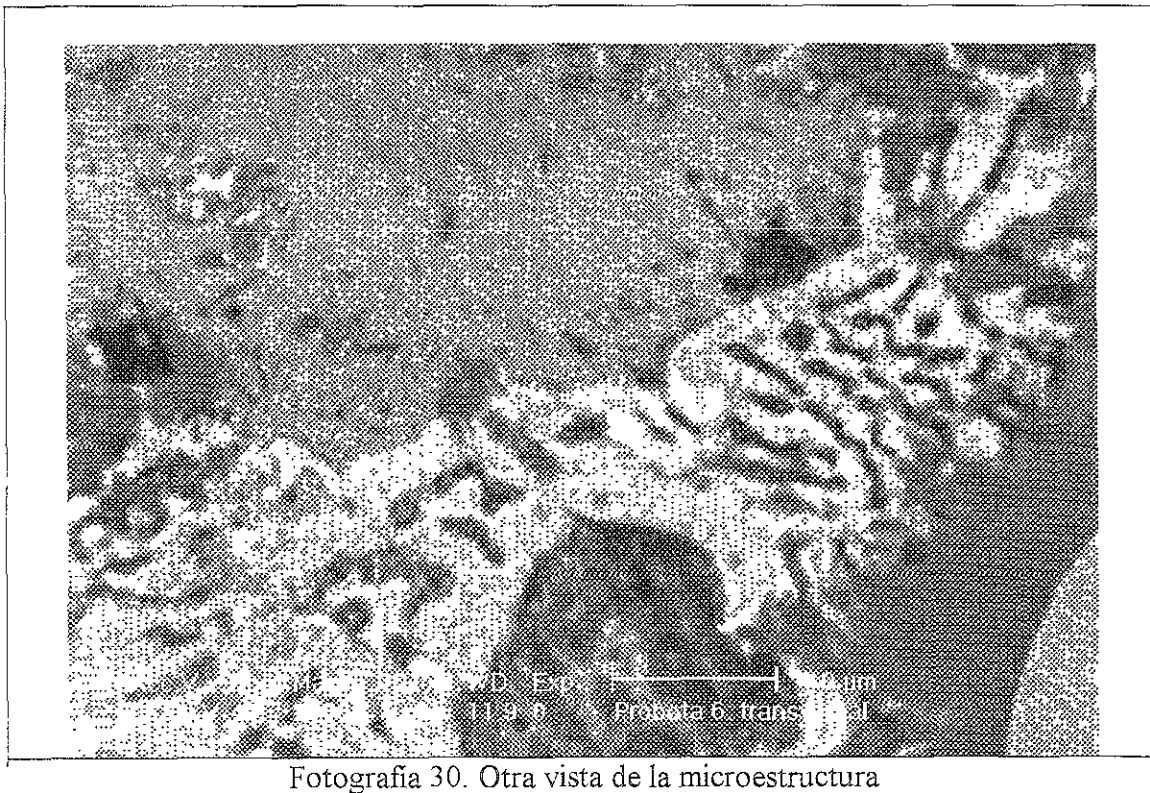
Fotografía 27. Vista General de Interfase



Fotografía 28. Acercamiento de la interfase



Fotografía 29. Vista de la microestructura



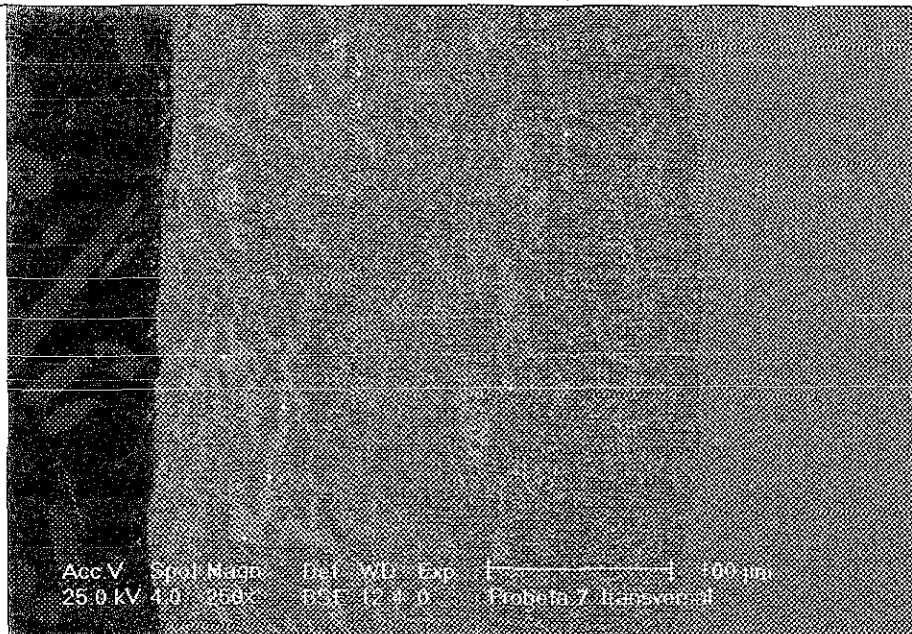
Fotografía 30. Otra vista de la microestructura

PROBETA 19-21

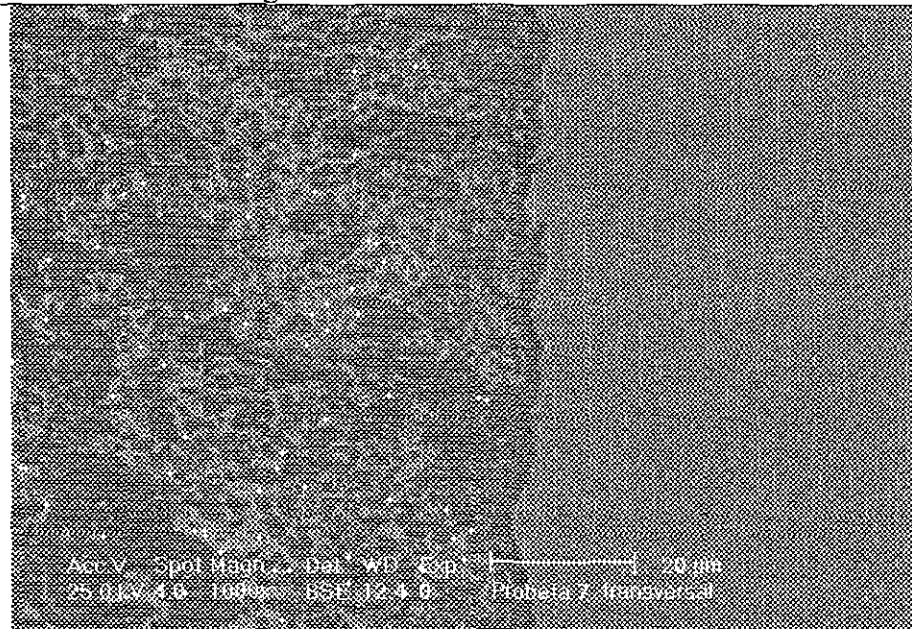
Características.

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxaço 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 1 hora
- S/Laminar

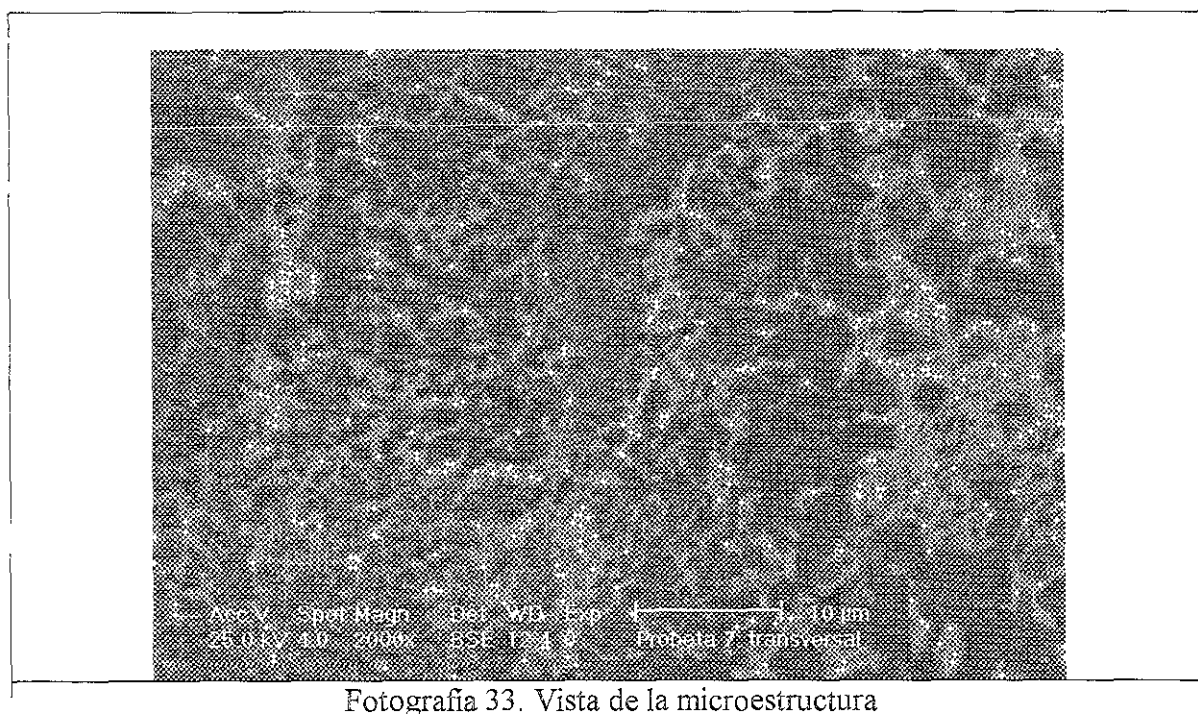
CORTE TRANSVERSAL



Fotografía 31. Vista General de Interfase



Fotografía 32. Acercamiento de la interfase

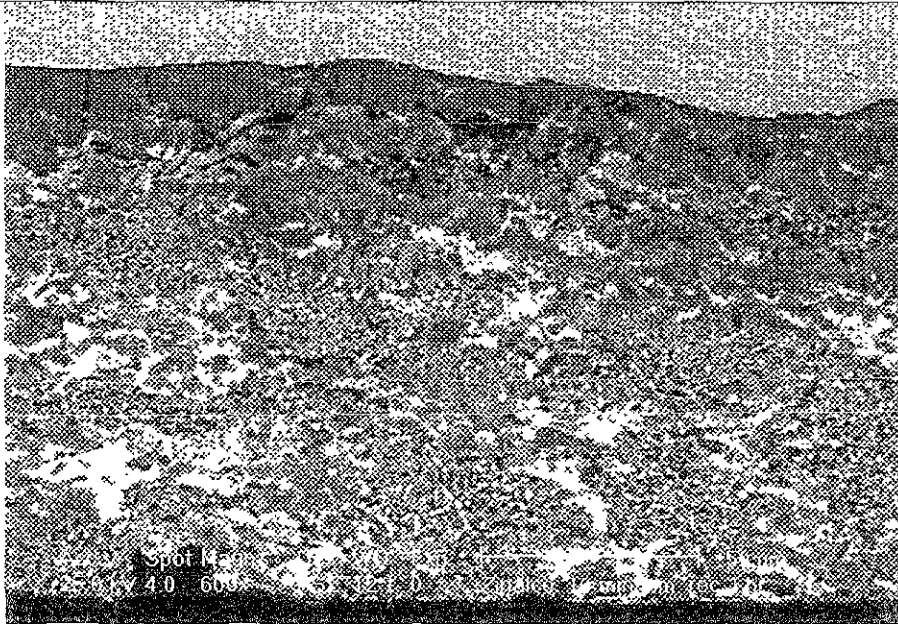


PROBETA 22-24

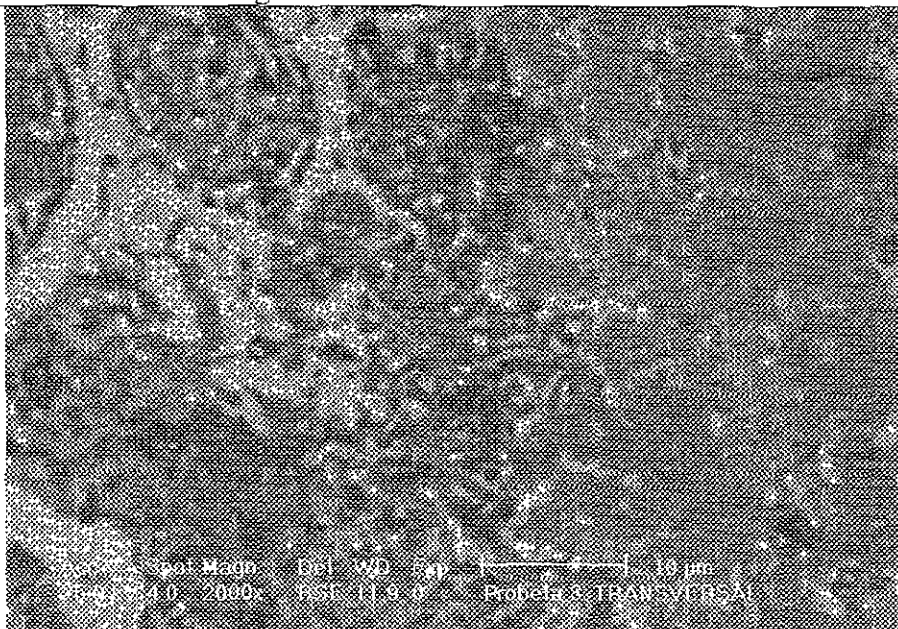
Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 1 hora
- Laminada

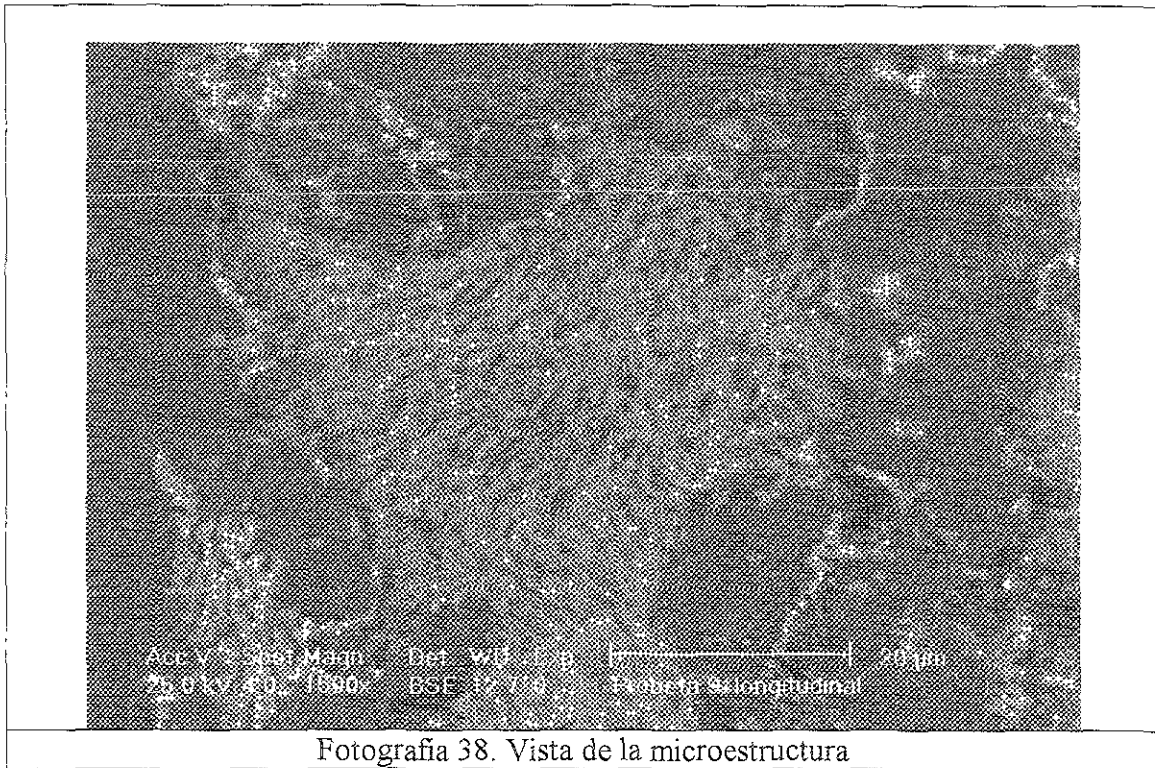
CORTE TRANSVERSAL



Fotografía 34. Vista General de Interfase



Fotografía 35. Vista de la microestructura

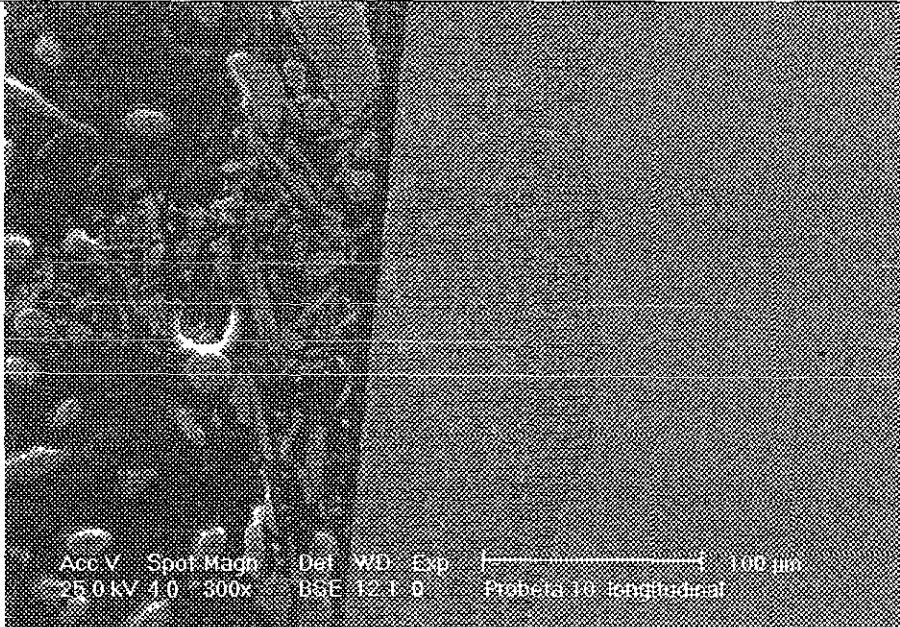


PROBETA 28-30

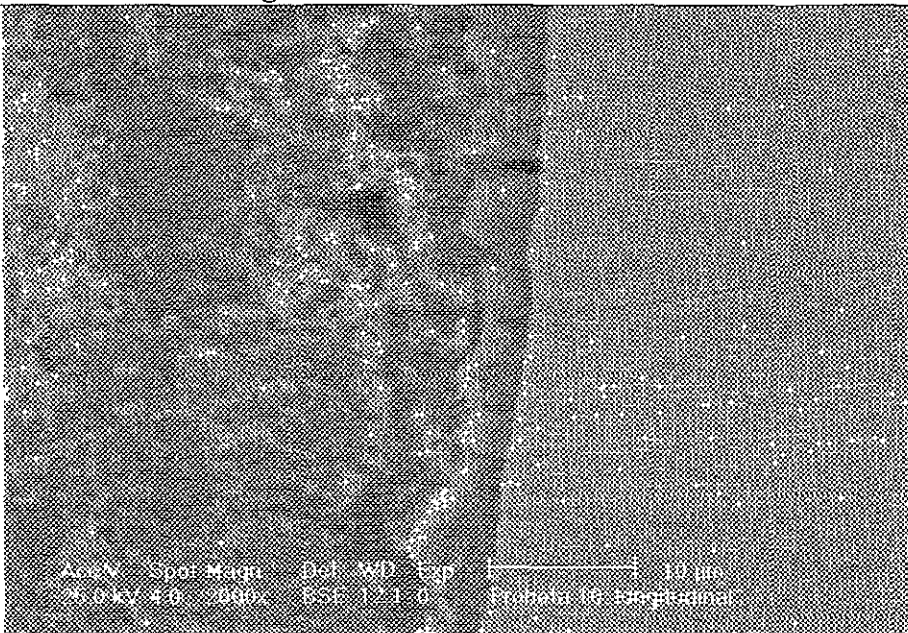
Características

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 2 horas
- Laminada

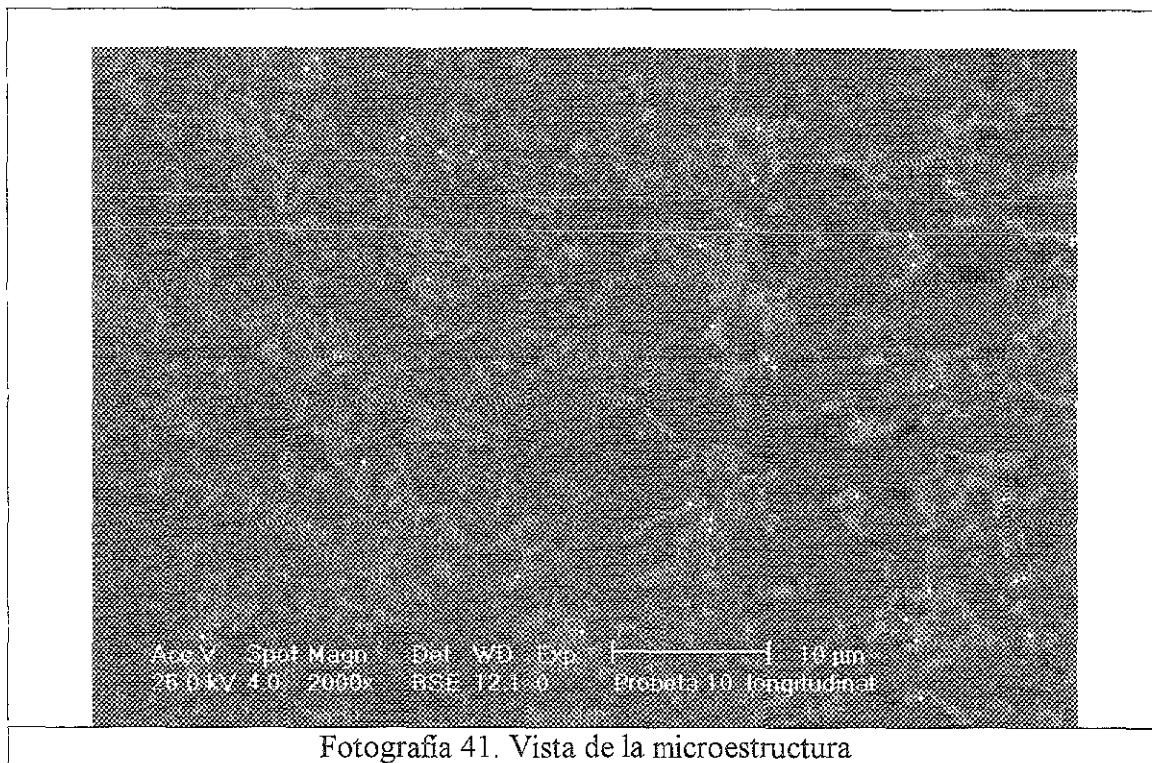
CORTE LONGITUDINAL

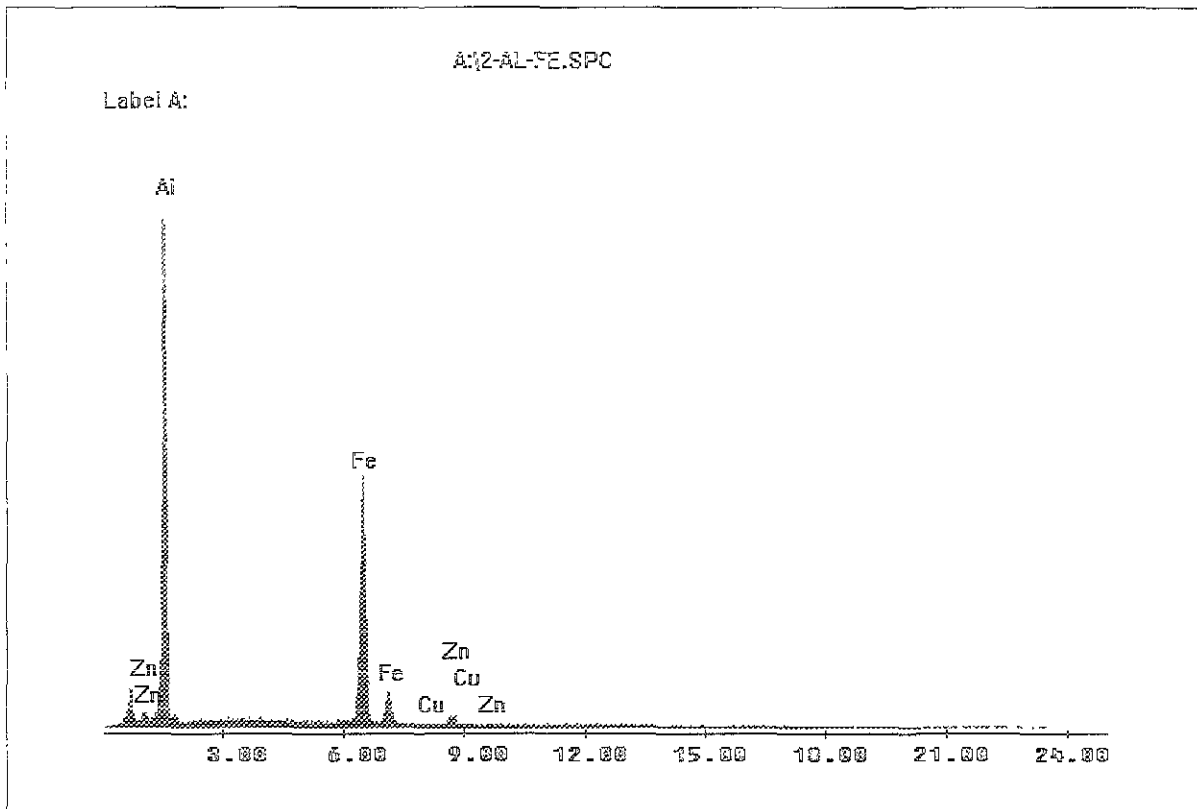


Fotografía 39. Vista General de Interfase

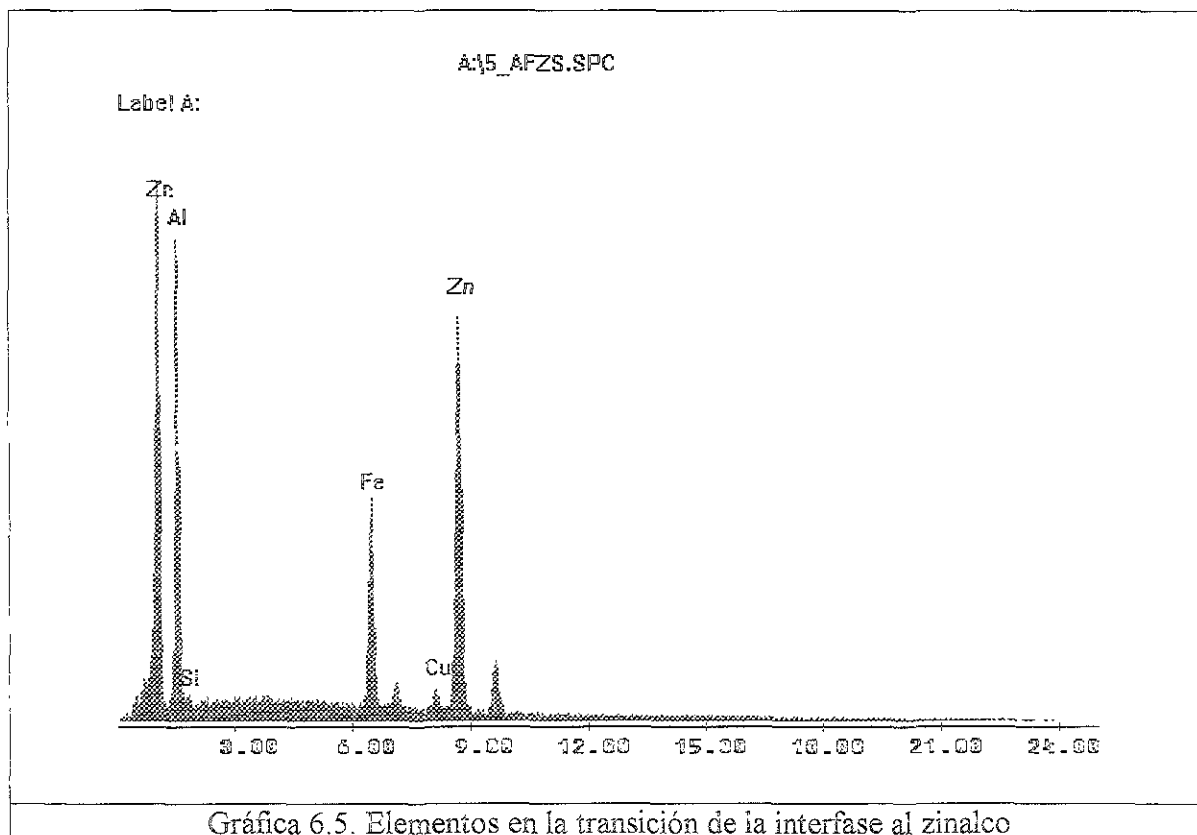


Fotografía 40. Acercamiento de la interfase

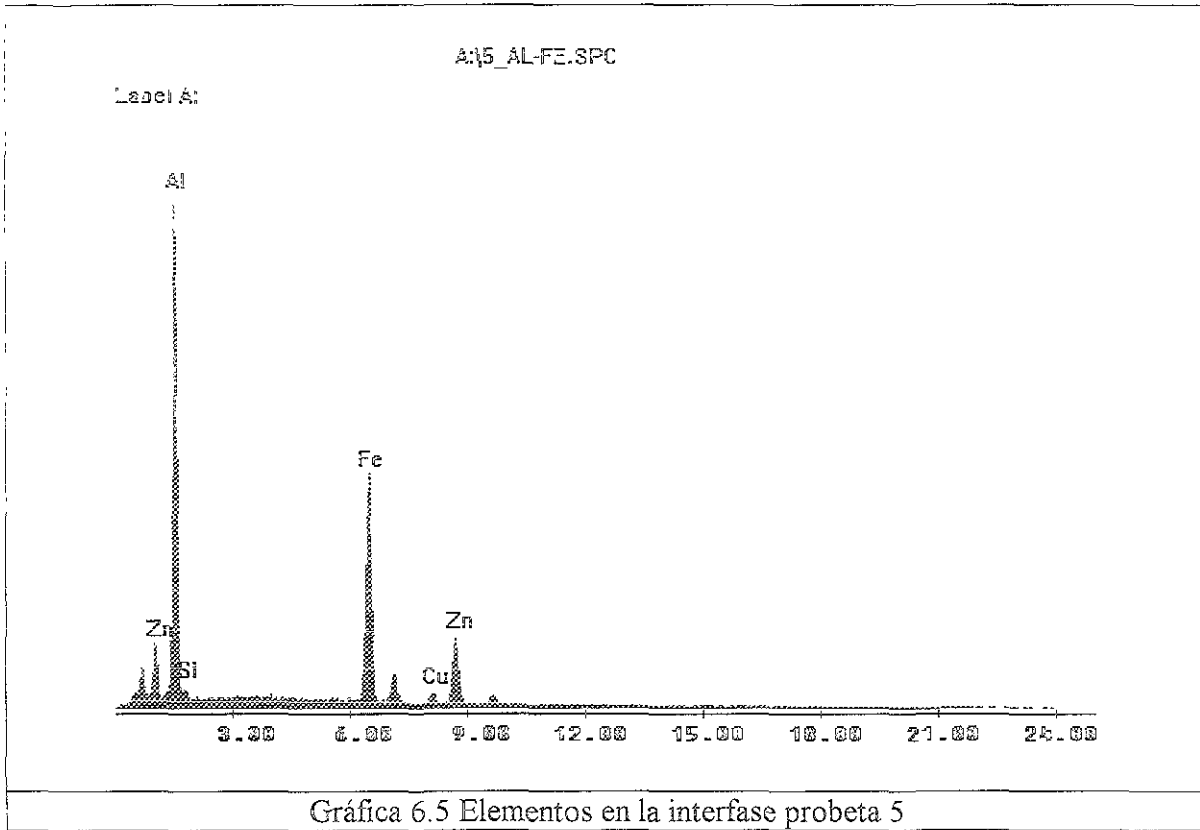




Gráfica 6.4. Materiales en la interfase probeta 2



Gráfica 6.5. Elementos en la transición de la interfase al zinalco



CAPÍTULO 7:
ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS. INTRODUCCIÓN.

En el presente capítulo se procederá a analizar los resultados obtenidos, por lo cuál se hará referencia continuamente al capítulo anterior.

En general los resultados que se han obtenido son satisfactorios, ya que se ha logrado una buena unión de los materiales que en un principio se pensaba que serían difíciles de unir, dada la tendencia que tiene el hierro, cuando se encuentra a cierta temperatura de formar óxido de hierro o a formar una capa denominada cascarilla en su superficie. Dicho efecto de oxidación del acero fue logrado gracias a la utilización del baño de sales previo a la inmersión del acero en el metal líquido.

El recubrimiento que se ha obtenido sobre el acero presenta un aspecto similar al del aluminio, siendo este blanco grisáceo con tonalidad brillante, así mismo la superficie puede ser rugosa, si durante el proceso de extracción de la pieza no se aplica ningún proceso de limpieza posterior siendo posible, obtener superficies con mejor acabado superficial si se emplea un rastrillado posterior a la extracción del baño, es posible obtener una superficie totalmente lisa, aplicando un proceso de laminación posterior a la extracción de las piezas.

7.2 OBTENCIÓN DEL MATERIAL RECUBIERTO

Es importante notar que durante la obtención del acero zinalquizado se realizaron varias pruebas a diferentes temperaturas y tiempos de inmersión lo cual se muestra en las gráficas 5.1, 5.2 y 5.3 en las cuales se observa lo siguiente:

- a) De la gráfica 5.1 se observa que a temperaturas muy altas (700 °C), la variación del espesor con respecto al tiempo de inmersión es extrema y va de 1.3 hasta 5 mm conforme el tiempo va aumentando;
- b) De la gráfica 5.2 se aprecia que a temperaturas menores (550 °C), la variación del espesor no es realmente grande (siendo de 0.91 a 1.07

solamente) y el tiempo de inmersión no influye en el espesor del recubrimiento.

- c) De la gráfica 5.3 se deduce que el espesor en el rango de temperaturas de 480 a 600°C es casi constante, de 600 a 610°C tiene un incremento importante, de 610 a 700°C vuelve a ser casi constante y de 700 a 770°C aumenta con respecto a la temperatura en una proporción que se adecua a la siguiente ecuación cuadrática:

$$y = -1E-04 x^2 + 0.1502 x - 56.754$$

- d) A la temperatura superficial de 780°C no es posible trabajar con la aleación del zinalco 1 ya que se presenta una fuerte tendencia a la formación de óxido de zinc en forma de gas, así como a la presencia de sales en la superficie del baño metálico, lo cual no es adecuado ya que al perderse el contenido del óxido de zinc del metal líquido este pierde su composición química.

De la experimentación realizada se deduce que la temperatura más adecuada para realizar el recubrimiento es alrededor de 550°C. En cuanto al tiempo de inmersión y con base a pruebas preliminares de la resistencia del recubrimiento, se estima que los tiempos hasta este punto trabajados fueron insuficientes, lo cual se corrobora con antecedentes bibliográficos relativos a los recubrimientos metálicos por inmersión en zinc, estimando que el tiempo adecuado para lograr el recubrimiento es del orden de 5 a 10 minutos.

7.3 ANÁLISIS POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

La siguiente etapa en la evaluación de la unión se realizó mediante microscopía electrónica, ya que el método permite observar a nivel microestructural los resultados logrados en la unión.

Los resultados obtenidos se muestran en las fotografías del capítulo 6, con base en las cuales se realiza el siguiente análisis:

PROBETAS 1-3 (1)

Características:

Limpieza Mecánica (esmerilado)

Fluxado 3 minutos

Secado

Inmersión 10 minutos

Sin recocido

Sin laminar.

Se observa un crecimiento dendrítico propiciado por la solidificación del metal líquido (Zinalco) sobre la superficie del acero, así como tendencia a la formación y consolidación de granos, en las fotografías se aprecian grandes secciones de tipo perlítico compuestas de la aleación Zinalco, así como algunas regiones en los límites de grano constituidas fundamentalmente por zinc, de igual forma se aprecia claramente la región correspondiente al acero SAE 1018 perfectamente delimitada, por lo que se puede asegurar que no se presentó difusión de Zinalco hacia el acero. Por otro lado se observa claramente la región correspondiente al intermetálico, que de acuerdo al análisis químico está constituido por hierro y aluminio con un espesor aproximado según la escala utilizada de 5 micrómetros. La presencia de este intermetálico es indicio de que se ha logrado una unión por difusión entre el recubrimiento y el metal base. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 200 micrómetros.

PROBETAS 16-18 (6).

Características:

Limpieza Mecánica (esmerilado)

Fluxado 5 minutos

Secado

Inmersión 10 minutos

Sin recocido

Sin laminar.

Las fotografías muestran la presencia de las regiones correspondientes a el acero y el intermetálico, que en este caso tiene un espesor aproximado de 5 micrómetros y una tercera región correspondiente a la fase rica en zinc con presencia de estructuras perlíticas y con una menor presencia de granos delimitados. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 60 micrómetros.

PROBETA 4-6 (2).

Características.

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 1 hora
- Sin laminar.

En estas probetas se observan unas geometrías que se forman a partir de la capa del intermetálico en dirección del zinalco, debido a que se empieza a difundir el aluminio contenido en la capa del intermetálico de regreso al material de recubrimiento, también es notoria la aparición de una estructura perlítica bien diferenciada y tendiente a crecer, en cuanto a los granos, están presentes en menor cantidad que los observados en las primeras probetas, conservando aún el tipo de estructura de fundición, la capa intermetálica mide aproximadamente 10 micrómetros. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 200 micrómetros.

PROBETA 7-9 (3).

Características.

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 1 hora
- Laminada.

Las tomas fotográficas en el microscopio electrónico de barrido permiten determinar que la laminación afecta significativamente la capa de recubrimiento, ya que el intermetálico sufre fracturas por efecto de la deformación durante la laminación (del

estudio químico del intermetálico se ha determinado que este está constituido por Al_2Fe_6 , el cual comúnmente presenta elevada dureza y por ende fragilidad, lo que hace lógico que esta zona se fracture con facilidad) así mismo se aprecia un efecto similar al de recristalización ya que, el tamaño de grano que se presenta durante el recocido es modificado al realizar la laminación en caliente generando un tamaño menor de grano. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 150 micrómetros.

PROBETA 10-12 (4)

Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 2 horas
- Sin laminar.

Las fotografías permiten apreciar que al aplicar un proceso de recocido durante dos horas se modifican las estructuras que inicialmente se obtienen durante la inmersión, los cambios significativos consisten en, delimitación de los granos del material de recubrimiento (Zinalco), así como la presencia de una mayor densidad de estructuras perlíticas y la tendencia al incremento del intermetálico. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 90 micrómetros.

PROBETAS 13-15 (5).

Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 3 minutos
- Secado
- Inmersión 10 minutos
- Recocido 2 horas
- Laminada

En estas fotografías se aprecia que hay presencia de granos finos propiciados por el efecto de recristalización inducido por la laminación, a su vez se puede observar que la capa intermetálica mide aproximadamente 20 micrómetros. Así mismo se observa la aparición de grietas en la capa intermetálica generados por el trabajo de laminación ejercido sobre la probeta. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 70 micrómetros.

PROBETAS 19-21 (7).

Características

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 1 hora
- Sin laminar.

En esta probeta se observa una estructura no definida que ya no corresponde a la típica de fundición pero parece tender a formar perlita, también se muestra una capa intermetálica mucho menor que todas las observadas anteriormente, siendo de solo 6 micrómetros de lo cual se deduce que a un menor tiempo de inmersión, la capa intermetálica es menor. El espesor del recubrimiento es de aproximadamente 290 micrómetros.

PROBETAS 22-24 (8)

Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 1 hora
- Laminada.

Estas fotografías nos muestran el mismo tipo de estructura que la anterior pero con las grietas en la capa intermetálica, siendo estas grietas de 17 micrómetros. El espesor del recubrimiento es aproximadamente de 110 micrómetros.

PROBETAS 25-27 (9).

Características

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 2 horas
- Sin laminar.

En estas probetas se observa que la capa intermetálica mide aproximadamente 5 micrómetros, y la estructura que presenta, aunque indefinida aún, es homogénea y comienza a mostrar zonas donde se comienza a formar una estructura perlítica, viéndose unas zonas oscuras que pueden ser debido al efecto Kirkendall pero esto es susceptible de estudio para otros experimentos. El espesor total de la capa es de 120 micrómetros aproximadamente.

PROBETAS 28-30 (10)

Características:

- Limpieza Mecánica (esmerilado)
- Fluxado 5 minutos
- Secado
- Inmersión 5 minutos
- Recocido 2 horas
- Laminada.

En estas tomas podemos apreciar que la capa intermetálica muestra grietas de aproximadamente 4 micrómetros y se observa una estructura parecida a la probeta anterior. El espesor total del recubrimiento es 100 micrómetros aproximadamente.

ANÁLISIS COMPARATIVO.

Un análisis comparativo de las muestras 1-3 y 16-18 nos permite determinar que en ambos casos, independientemente del tiempo de inmersión se logra un intermetálico con ligeras variaciones en sus dimensiones. Por otro lado ambas probetas presentan estructuras típicas de fundición, sin ninguna orientación preferencial de las estructuras granulares.

NOTA. Se considera que cualesquiera de los dos tiempo de inmersión son adecuados para lograr una unión por difusión con el metal base, siendo mas recomendable el tiempo de 5 minutos para aplicación en condiciones industriales.

La diferencia esencial entre las probetas 4-6 y 7-9, estriba en que cuando las probetas son laminadas en caliente a 350°C el acabado superficial de la probeta cambia de una tonalidad similar a la del aluminio a una tonalidad grisácea y con un acabado superficial de mayor calidad, así mismo cuando las piezas son laminadas se generan fracturas en el intermetálico, así como una disminución en el tamaño de grano del recubrimiento

NOTA.- Con base al análisis comparativo de esta sección se sugiere, para condiciones industriales, evitar en la medida de lo posible el proceso de laminación con la intención de minimizar la presencia de grietas en el intermetálico, o de otra forma si se requiere buen acabado superficial se sugieren pequeños porcentajes de deformación.

Se puede decir de la observación de las probetas 10-12 y 13-15 que su diferencia principal es la aparición de grietas, aunque de menor tamaño que las de las probetas 7-9, y esto es debido a que la capa intermetálica después de dos horas de recocido es menor por lo que la extensión de las grietas también disminuye considerablemente siendo esto benéfico.

NOTA.- En base a la comparación anterior se recomienda un tiempo de recocido mayor a 1 hora ya que, esto propicia la aparición de la estructura de perlita y que haya una capa intermetálica menor.

Entre estas dos series de probetas (19-21 y 22-24) la diferencia radica en que se observa el efecto de recristalización y formación de grietas cuando las probetas son laminadas a diferencia de las que no lo están.

NOTA.- Se recomienda tener tiempos de inmersión aproximados a 5 minutos debido a que esto favorece que la capa intermetálica sea mucho menor espesor

La diferencia principal entre estas dos series de probetas (25-27 y 28-30) reside en la aparición de grietas generadas por la laminación, y que en las probetas de la 28 a la 30 no se aprecia la presencia de porosidades, como sucede en las probetas 25 a 27 (se considera que la presencia de grietas es provocada por el recocido, si este fuese el caso se considera que existe efecto Kirkendal.)

NOTA.- Se recomienda hacer un estudio a fondo para conocer las causas de la porosidad.

Probeta	Tiempo de inmersión	Efecto de la inmersión	Tiempo de Recocido	Efecto del recocido	Laminación	Efecto de laminación
1	10 minutos	Crecimiento	SIN	XX	SIN	XX
2	10 minutos	dendrítico (prob 1)	1 hora	Inicio de presencia	SIN	XX
3	10 minutos	Intermetálico constituido de hierro y aluminio	1 hora	de estructura perlítica.	CON	Presencia de grietas en el intermetálico
4	10 minutos	(Al ₂ Fe ₆).	2 horas	Presencia notoria	SIN	XX
5	10 minutos	Región correspondiente al acero	2 horas	de estructura perlítica	CON	Presencia acusada de grietas en el intermetálico
6	5 minutos	perfectamente delimitada.	SIN	XX	SIN	XX
7	5 minutos	Granos definidos.	1 hora	Capa intermetálica	SIN	XX
8	5 minutos		1 hora	de menor dimensión	CON	Se observa un efecto de recristalización
9	5 minutos		2 horas	Tendencia al	SIN	XX

10	5 minutos		2 horas	crecimiento de la capa intermetálica	CON	Grietas de menor tamaño debido al espesor mínimo de la capa intermetálica
----	-----------	--	---------	--------------------------------------	-----	---

CONCLUSIONES

8. CONCLUSIONES.

Realizadas las actividades experimentales y el análisis de los resultados se concluye lo siguiente.

8.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.

1. Se cumplió con el objetivo de lograr la unión del zinalco con el acero como material base por medio de inmersión en baño caliente.

La utilización de este material compuesto redundará en la utilización de insumos de origen nacional con el consiguiente beneficio económico para el país, ya que con esto se disminuiría en buen grado el alto consumo de aluminio de importación y permitiría el consumo propio de zinc, del cual México cuenta con grandes reservas.

2. Se estableció el proceso y los parámetros óptimos para lograr la unión más adecuada, los cuales son detallados a continuación

8.1.1. PREPARACIÓN DEL MATERIAL.

- Limpieza mecánica. Esta es necesaria para eliminar el óxido presente sobre la superficie de la lamina de acero, así como para eliminar suciedad, polvo y agentes externos al material, logrando una superficie rugosa que facilite la unión.
- Limpieza química. Se debe usar un agente de limpieza que quite la grasa de la superficie del material, en este caso se recomienda usar percloroetileno. A continuación se realiza una limpieza más profunda, para lo cual se usa ácido clorhídrico y Tiourea como inhibidor. Y por último para activar la superficie se utiliza cloruro de zinc y cloruro de amonio

8.2. PARÁMETROS PARA LA REALIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO.

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye que los parámetros adecuados para lograr una buena unión son los siguientes:

- Temperatura del horno de fundición. La temperatura más adecuada para el baño es de 550 a 600°C, ya que a esta temperatura el espesor del recubrimiento se mantiene constante siendo una temperatura adecuada para trabajar en la industria.
- Tiempo de inmersión de las probetas. En base a los resultados obtenidos se observó que el tiempo más adecuado es alrededor de 5 minutos, ya que, con un tiempo menor, la difusión del acero en el zinc es casi nula y además, con este tiempo el espesor de la capa intermetálica es menor, propiciado así que se puedan realizar trabajos mecánicos con menos riesgos de fracturas.
- Temperatura de recocido. La temperatura más adecuada para el recocido es 350°C, ya que es la observada en el diagrama de fases y se obtiene la homogeneidad deseada según las observaciones realizadas.
- Tiempo de recocido. El tiempo de recocido más recomendable es de más de 2 horas ya que con el tiempo utilizado no se obtiene una estructura perlítica que es la deseable en el zinc.

8.3. CONCLUSIONES RELATIVAS A LAS OBSERVACIONES REALIZADAS CON EL MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO.

La preparación del material a recubrir es de suma importancia ya que si esta no se realiza de forma adecuada el material base no se une al zinc logrando así uniones fallidas.

Con respecto al tiempo de inmersión se considera que cualesquiera de los dos tiempos son adecuados para lograr una unión por difusión con el material base, siendo más recomendable el tiempo de 5 minutos para aplicación en condiciones industriales.

La temperatura del baño es también de importancia ya que para lograr un recubrimiento uniforme se recomienda que sea del orden de 550 a 600 °C considerándose una temperatura adecuada para condiciones industriales.

La capa intermetálica es deseable que sea del menor espesor posible ya que es en esta donde se inicia el desarrollo de las fracturas cuando se hace trabajo mecánico sobre el material recubierto por lo que es deseable un tiempo de inmersión menor para evitar que esta capa crezca.

El tiempo de recocido para lograr una estructura deseable para el zinc como lo es la perlita se recomienda sea, según la literatura, de 2 a 5 horas, para que se logre que la mayor parte del recubrimiento tenga esta estructura.

Para condiciones industriales se sugiere evitar en la medida de lo posible el proceso de laminación con la intención de minimizar la presencia de grietas en la capa intermetálica, o de otra forma, si se requiere buen acabado superficial, se sugieren pequeños porcentajes de deformación.

8.4 RECOMENDACIONES A FUTUROS TRABAJOS CON ESTE RECUBRIMIENTO.

Como recomendaciones a futuros trabajos acerca de este recubrimiento se hacen las siguientes observaciones:

- Se recomienda realizar pruebas con un análisis químico más detallado acerca de la composición química presente en el recubrimiento.

- Observar los resultados cuando se hace un proceso de laminación posterior a la inmersión, y seguido por un proceso de recocido.
- Realizar recocido a tiempos mayores para observar si se logra la estructura perlítica deseable
- Hacer pruebas de corrosión en el material compuesto obtenido para poder hacer comparaciones con otros procesos de recubrimiento.

Con respecto a los objetivos de esta investigación (lograr la unión del zinc con el acero por medio de un baño de inmersión y determinar la metodología para realizarlo) se considera fueron alcanzados y solo se sugiere hacer evaluaciones ulteriores de esta unión (pruebas de corrosión y resistencia mecánica) para ver su desempeño en futuras áreas de aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

9. BIBLIOGRAFÍA.

9.1 LIBROS.

- METALS HANDBOOK, Volume 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, Autores varios, Editorial ASM INTERNATIONAL, 10ª. Edición, Estados Unidos de América, 1995.
- MARKS, MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO, Volumen 1, Theodore Baumeister, Editorial Mc Graw Hill, 8ª Edición (2ª en español), México, 1987
- LA CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES, Donald R. Askeland, Editorial: Grupo Editorial Iberoamérica, 2ª Edición, México, 1993.
- DICCIONARIO PARA INGENIEROS ESPAÑOL-INGLES E INGLES-ESPAÑOL, Louis A. Robb, Editorial CECSA, 29ª Edición, México, 1992
- MATERIALES DE INGENIERÍA Y SUS APLICACIONES, Flinn/ Trojan, Editorial Mc Graw Hill, 3ª edición, México, 1994
- METALS HANDBOOK, Volume 2: Surface cleaning, finishing, and coating, Autores varios, Editorial ASM INTERNATIONAL, 9ª. Edición, Estados Unidos de América, 1991
- ZINALCO: Trabajos de investigación realizados sobre el zinalco en el periodo de 1979 a 1990, Gabriel Torres, Editorial: publicación realizada con fondos OEA, 1ª edición, México, 1990.

- MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING An introduction, William D Callister Jr, Editorial John Wiley & Sons Inc, 4ª edición, USA, 1997.
- DETERGENTS AND CLEANERS: a Handbook for formulations, K Robert Lange, Editorial Hansers Publishers, 3ª edición, USA, 1994.
- SURFACE COATINGS, Volumen 2 Paints and their applications, Autores varios, Editorial TAFE (Educational books), 2ª edición, Australia, 1984.
- MANUAL AHMSA PARA CONSTRUCCIONES DE ACERO, Autores varios, Editorial AHMSA S A De C. V. (Altos Hornos de México), 1ª edición, México, 1993
- SURFACE MODIFICATIONS TECHNOLOGIES: An engineer's guide, T S. Sudarshan, Editorial Marcel Dekker Inc , 5ª edición, UK, 1998
- METALLIC AND CERAMICS COATINGS: Production, high temperature properties and applications, Hocking/ Vastaree/ Sidky, Editorial Longman Scientific and Technical, 2ª edición, USA, 1989

9.2 TESIS.

- TESIS: DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS LAMINADOS ZINALCO-ALUMINIO
AUTOR: Cervantes Cabello José Javier.
Tesis para la obtención del grado de maestría en Ingeniería Mecánica.
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
México, 1996.

9.3 PUBLICACIONES.

- R. Campos C , EFECTO DEL RECOCIDO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALEACIONES ZN-AL, Memoria Sexto Congreso Academia Nacional de Ingeniería, páginas: 289-293.

- Gabriel Torres V., MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO, CIENCIA. Revista de la Academia de la Investigación Científica, páginas. 103-111.

- Arturo Barba Pingarrón, DESARROLLO DEL ZINALCO Y SUS PROCESOS DE CONFORMADO, DEFORMETAL NO 96: IV Congreso Nacional de la Deformación Metálica, páginas: 89-95.