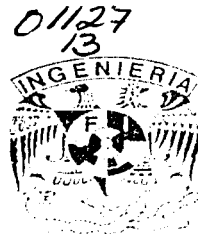




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Caracterización de Recubrimientos de Acero 1018 por Inmersión en Caliente mediante el proceso de Aluminizado.

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A N:

Cutzi Citlalli Guzmán López

Miguel David Ferreira Orta

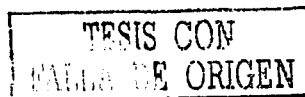
Directores de Tesis:

**M.I. Javier Cervantes Cabello
Dr. Arturo Barba Pingarrón**

México D.F.

FEBRERO 2003.

A





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por darme la fortaleza para cumplir este sueño.

* * *

Este trabajo lo dedico:

Con todo mi amor y respeto a mi Papá Agustín Guzmán y a mi Mamá Delfina López, por haber llenado mi vida de cariño, cuidados y enseñanzas valiosas. Esto que hoy me congratula tanto papás, es uno de los mejores regalos que puedo brindarles por todo su esfuerzo, MIL GRACIAS.

A ti Miguel con mucho cariño, por tu entusiasmo y apoyo mostrados en todo momento. Me siento orgullosa de haber compartido este trabajo contigo y llegar hoy, a la meta juntos.

A mis hermanos Cuitláhuac y Nallely por ser fuentes vivas de enseñanza.

A mi Abuelita Tina por ser una pieza importante en mi corazón.

A mis sobrinas Viole, Alesi, y a mi primo Quique, quienes me han brindado sonrisas y alegrías a través de su inocencia.

Al Sr. Miguel y a su esposa Rosi por todo el apoyo y cariño que siempre nos brindaron.

A la Sra. Ludi por su ayuda cariñosa e incondicional.

A todos mis profesores de toda la vida, por su ardua labor con la estudiante, que hoy se consolida como profesionista.

Al Dr. Arturo Barba, a los Ingenieros: Javier Cervantes, Magdalena Trujillo, Jesús Roviroza, Eduardo Garduño, Efraín Ramos, Roberto Cisneros, al Biólogo Germán Álvarez y al M. en C. Rafael Schouwenars por su asesoramiento y guía para la realización de este trabajo.

A mis amigos: Claudia, Lupita, Edgar, Alejandro, Iván, Ascary, Martita, Miguel Peralta, Oscar, Ana, Marianita, Ceci, Beth, Oli, Andrea y Ernesto por la valiosa amistad que me han mostrado en todo momento.

A los Ingenieros Carrillo y Rodríguez por su comprensión y apoyo en este trabajo.

Cutzi Citlalli Guzmán López

Quiero dar las gracias principalmente a Dios por su amor y su voluntad para terminar este trabajo.

** * **

Agradezco:

A mi Padre Miguel Ángel Ferreira Fuentes, a mi Madre Ludivina Orta Torres y a mi hermana Ana Ferreira porque se esforzaron todos los días para que yo culminara con este trabajo mis estudios profesionales.

A mis tutores, al M. en I. Javier Cervantes y al Dr. Arturo Barba por su orientación, disponibilidad y consejos.

Al equipo del M.I. Armando Ortiz Prado por la disponibilidad que siempre mostraron sin pedir nada a cambio. En especial a Efraín R. German A, Roberto C. y al M. en C. Rafael Schouwenaars.

A Cntzi por su tenacidad, esfuerzo y coraje para realizar este trabajo.

A mis maestros de la vida por realizar el trabajo más difícil, el de educar.

** * **

DEDICATORIA ESPECIAL

Este trabajo lo dedico a mi Padre Miguel Ángel y a mi Madre Ludivina para que de cierta manera reciban la honra que ellos se merecen.

Miguel David Ferreira Orta.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	6
CAP. I.- NOCIONES SOBRE RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES	7
1.1 RECUBRIMIENTOS POR ELECTRODEPOSICIÓN	
<i>1.1.1 RECUBRIMIENTOS DE DEPOSICION SIN ELECTRICIDAD</i>	
1.2 RECUBRIMIENTOS POR CONVERSIÓN	
<i>1.2.1 ANODIZACIÓN</i>	
1.3 RECUBRIMIENTOS POR DEPOSICIÓN FÍSICA DE VAPOR	
<i>1.3.1 EVAPORACIÓN AL VACÍO</i>	
<i>1.3.1.1 Calentamiento por resistencia</i>	
<i>1.3.1.2 Bombardeo con haz de electrones</i>	
<i>1.3.2 BOMBARDEO CON PARTÍCULAS ATÓMICAS (SPUTTERING)</i>	
<i>1.3.2.1 RECUBRIMIENTO IÓNICO</i>	
1.4 RECUBRIMIENTOS POR DEPOSICION QUIMICA DE VAPOR	
<i>1.4.1 FORMAS ALTERNATIVAS DE LA DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR</i>	
<i>1.4.1.1 Deposición química de vapor a baja presión</i>	
<i>1.4.1.2 Deposición química de vapor asistida con plasma</i>	
1.5 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS	
<i>1.5.1 METODOS DE APLICACIÓN</i>	
<i>1.5.2 RECUBRIMIENTO PULVERIZADO</i>	
1.6 ESMALTADO EN PORCELANA Y OTROS RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS	
1.7 PROCESO DE RECUBRIMIENTOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS	
<i>1.7.1 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO TÉRMICO</i>	
<i>1.7.2 CHAPEADO MECÁNICO</i>	

CAP. II.- GENERALIDADES DEL ALUMINIZADO **34**

2.1 APLICACIONES

- 2.1.1 EXPOSICIÓN ATMOSFÉRICA*
- 2.1.2 EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS*
- 2.1.3 FABRICACIÓN Y ACABADOS*

2.2 ALUMINIZACIÓN CONTINUA POR INMERSIÓN EN CALIENTE DE PRODUCTOS ALUMINIZADOS

- 2.2.1 PROCEDIMIENTOS Y CONTROL*
- 2.2.2 EQUIPO PARA ALUMINIZACIÓN CONTINUA*
- 2.2.3 EFECTO DEL RECUBRIMIENTO EN LA RESISTENCIA Y LA MAQUINABILIDAD*
- 2.2.4 APLICACIONES TÍPICAS*

2.3 ALUMINIZACIÓN POR INMERSIÓN EN CALIENTE DE PIEZAS EN LOTES

- 2.3.1 PROCEDIMIENTOS Y CONTROL*
- 2.3.2 LIMITACIONES*

2.4 ALTA PRODUCCIÓN DE PIEZAS RECUBIERTAS

- 2.4.1 PIEZAS FUNDIDAS*
- 2.4.2 ÁLABES Y ASPAS DE TURBINA*

CAP. III.- METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ALUMINIZADO Y PRUEBAS **54**

3.1 PROCESO EXPERIMENTAL

- 3.1.1 EQUIPO EMPLEADO*
- 3.1.2 PRODUCCIÓN DEL MATERIAL*

3.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS

- 3.2.1 METALOGRAFÍA*
- 3.2.2 MICRO-DUREZA.*
- 3.2.3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.*
- 3.2.4 ENSAYO DE CORROSIÓN*
 - 3.2.4.1 Naturaleza de la corrosión*

CAP. IV.- PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS _____ 68

4.1 METALOGRAFÍA

4.2 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MICRODUREZA

4.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE MICRODUREZA

4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO

4.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

4.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE IMÁGENES

4.3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS

4.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN

4.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN

4.5 ANÁLISIS DE COSTOS

CAP. V.- CONCLUSIONES _____ 123

BIBLIOGRAFÍA _____ 125

INTRODUCCIÓN

Antes de ahondar en el tema, es importante mencionar que la expresión recubrimiento se refiere normalmente a una capa de material, relativamente delgada, que recubre a un metal o aleación. Es sabido que los recubrimientos se aplican para conseguir alguna propiedad superficial deseada que no tiene el metal base, siendo algunas de ellas: protección contra medios corrosivos, mejorar resistencia al desgaste, mejorar la apariencia, reducir la fricción en la superficie, recuperar superficies gastadas durante periodos largos de trabajo, etc.

Con lo antes mencionado, se puede decir que el objetivo primordial para recubrir un acero, es el aumentar de manera importante su resistencia a la corrosión, pues en este caso, el acero tiene por sí, propiedades mecánicas importantes, sin embargo, su ineficiencia natural de protección contra medios corrosivos lo hace en ciertos casos no apto para ser utilizado dentro de estos ambientes y por tal motivo se decide recubrirlo.

El escoger el tipo de recubrimiento que el acero tendrá en muchas ocasiones depende entre algunos casos: del costo, del tamaño, de la forma de la pieza y del uso final.

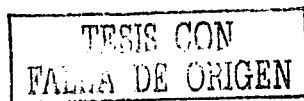
Así pues, es como el presente trabajo tiene la finalidad de recopilar diversos conocimientos de la ingeniería mecánica en el área de los materiales, enfocado principalmente al estudio de un tipo de recubrimiento aplicado al acero llamado: Recubrimiento por Inmersión en caliente, siendo en específico el Aluminizado.

El proceso del Aluminizado, a grandes rasgos consta en sumergir el acero (previamente preparado con distintos tipos de limpiezas), durante algunos minutos en un crisol que contiene aluminio fundido (a lo antes expuesto se le denomina "baño").

Este trabajo, trata de realizar en gran medida un análisis completo de las características generales que tiene dicho recubrimiento, al aplicársele distintos procesos posteriores al baño, como lo son: enfriamientos, recocido y laminado. Esta caracterización es realizada mediante la preparación metalográfica de las probetas, seguida de ensayos de microdureza donde también se toma la medición del espesor promedio del recubrimiento, y por último el estudio de imágenes y análisis químicos obtenidos mediante el microscopio electrónico de barrido.

De igual forma se realizarán pruebas de corrosión para conocer el comportamiento que tiene dicho recubrimiento en este medio.

Como punto extra, se desea hacer una pequeña investigación y comparación económica del aluminizado con otros procesos de recubrimiento similares ó con materiales más económicos y por ende en ocasiones más utilizados.



OBJETIVOS

- a) Caracterizar el recubrimiento de aluminio en un Acero 1018 mediante el proceso de inmersión en caliente, incluyendo las fases presentes.
- b) Evaluar la resistencia a la corrosión del recubrimiento en medio salino.

HIPÓTESIS

Para cumplir con los objetivos antes mencionados se pretenden realizar distintas pruebas al recubrimiento con el fin de determinar las características que se han obtenido, posteriores a los distintos procesos que se le aplicaron.

Las pruebas que se realizarán se cree son las idóneas para estudiar este tipo de recubrimiento, las cuales son:

- Realizar metalografía. El acabado y el tamaño final de las probetas facilitarán el manejo durante el ensayo de dureza y la caracterización microscópica del recubrimiento.
- Ensayo de dureza. Para relacionar la dureza que tienen las partes que componen al recubrimiento y al material base, con las fases que se presenten debido a los distintos procesos posteriores.
- Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido. El estudio físico y químico de las probetas mediante microscopía electrónica de barrido, permitirá conocer la estructura del recubrimiento así como las características que presenten las probetas debido a los procesos que se realicen en ellas.
- Ensayo de Corrosión. Verificar el comportamiento que tienen las probetas en un medio corrosivo permitirá evaluar la resistencia del recubrimiento dentro de ambientes agresivos al mismo.

CAPITULO I

NOCIONES SOBRE RECUBRIMIENTOS SUPERFICIALES

Los productos hechos de metal casi siempre están recubiertos con pintura, chapeado u otros procesos. Las razones principales para recubrir un metal son:

- 1) Proporcionar protección contra la corrosión del metal (sustrato).
- 2) Aumentar la resistencia al desgaste y reducir la fricción de la superficie.
- 3) Mejorar el aspecto del producto proporcionando ya sea un color o textura especificados.
- 4) Mejorar la conductividad eléctrica.
- 5) Aumentar la resistencia eléctrica.
- 6) Preparar una superficie metálica para un proceso posterior.
- 7) Reconstruir las superficies gastadas o erosionadas durante el servicio.

En la figura 1.1 se muestran las partes que componen un material al ser recubierto.

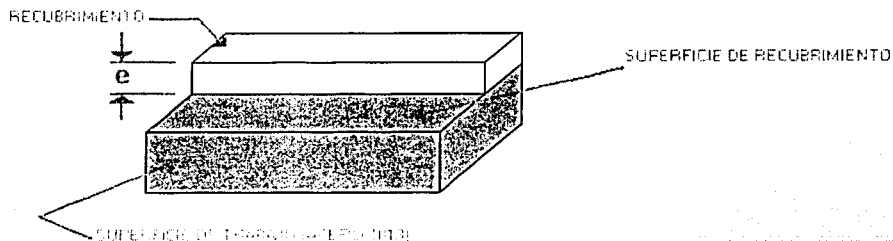


FIG. 1.1 Vista del corte de un recubrimiento de espesor e en una superficie de sustrato, característica de los procesos que se verán en este capítulo.

Para lograr todos estos fines es necesario conocer los procesos y las características de cada uno. A continuación se muestran algunos de los más importantes.

1.1 RECUBRIMIENTOS POR ELECTRODEPOSICIÓN

Algunos metales como el aluminio y el cromo tienden a formar películas de óxido relativamente estables en su superficie al estar en contacto con la atmósfera. Estas películas son el resultado de cierta pasividad y reducen considerablemente, la velocidad de corrosión del metal protegido en medios corrosivos. El objetivo de la deposición electrolítica es preparar depósitos metálicos que se adhieran correctamente sobre un sustrato y presenten una serie de propiedades predeterminadas (físicas, mecánicas o químicas), a partir de la reducción de los correspondientes iones metálicos realizada mediante la aportación de energía eléctrica. Es, pues, un sistema experimental en el que se transforma de forma controlada energía eléctrica en energía química.

Los componentes básicos de este sistema son:

- Baño electrolítico, que actúa como conductor iónico y que contiene una sal conductora, el metal a depositar en forma soluble y otros componentes como reguladores de pH, aditivos, etc.
- El cátodo a recubrir debe ser un conductor eléctrico.
- El ánodo, también conductor eléctrico que puede ser soluble (ánodo de sacrificio) ó insoluble (ánodo inerte).
- Una cuba inerte que contiene los componentes antes descritos.
- Una fuente de corriente continua.

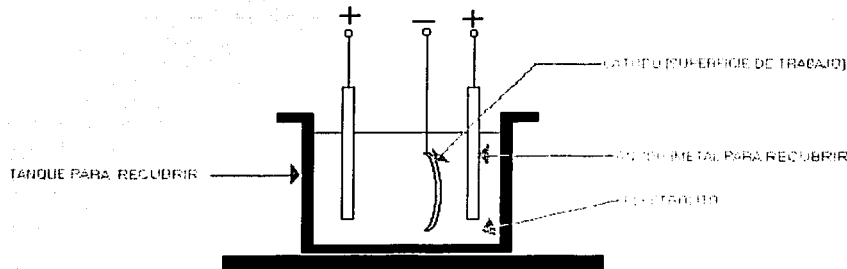


FIG. 1.2 Disposición para la electrodeposición

El cambio químico que se produce en la cuba electrolítica es la suma de procesos que tienen lugar en los electrodos: oxidación en el ánodo (-) y reducción en el cátodo (+). Así se forman óxidos, fosfatos, cromatos, etc., que protegen posteriormente a los metales de la corrosión.

La capa de recubrimiento obtenida, a menudo presenta un aspecto más o menos irregular. Precisamente en algunos casos esta irregularidad se aprovecha para facilitar el anclaje superficial de lubricantes, colorantes y de otros sistemas de protección como pinturas.

Una característica general de este tipo de recubrimientos es la buena adherencia, que suele presentar, sobre todo si se comparan con otros tipos de recubrimientos metálicos y orgánicos.

La calidad de un recubrimiento electrolítico depende de un amplio conjunto de variables relacionadas con el baño electrolítico y los parámetros eléctricos del proceso, en resumidas cuentas, de variables como la naturaleza del metal, el tipo de electrolito y de las condiciones de trabajo tales como concentración, pH y temperatura del electrolito, voltaje y densidad de la corriente, etc.

Los parámetros o condiciones más importantes se describen a continuación:

Concentración del electrolito. Teóricamente, la concentración de electrolito más conveniente es la que presenta menos resistencia óhmica al paso de corriente eléctrica.

Temperatura del baño. El aumento de la temperatura del baño implica un aumento de la conductividad iónica. La densidad de corriente permanece constante en la cuba sólo cuando en el baño existe una agitación mínima. del electrolito y un aumento del brillo del recubrimiento, pero también se produce un aumento de la disolución anódica, generándose porosidad muy acusada en el recubrimiento, además de disminución de la resistencia por abrasión.

Agitación.

Densidad de corriente. La densidad de corriente es función de la fuerza electromotriz aplicada, de la intensidad de corriente que circula por el baño y de la superficie del ánodo.

Tiempo de duración del proceso. El espesor en los recubrimientos depende del tiempo de duración del tratamiento, utilizando densidades de corriente convencionales.

1.1.1 RECUBRIMIENTOS DE DEPOSICION SIN ELECTRICIDAD

La deposición sin electricidad es el nombre que se da al proceso de recubrimiento que se produce completamente mediante reacciones químicas y no se requiere una fuente de corriente eléctrica externa. La deposición del metal en una superficie ocurre en una solución acuosa que contiene los iones del metal para el recubrimiento que se vaya a utilizar. El proceso usa un agente reductor y la superficie de trabajo actúa como catalizador para la reducción. El proceso se caracteriza por una reducción selectiva y por la deposición continua sobre el sustrato a través de la acción catalítica del mismo depósito. El metal para deposición sin electricidad más común es el níquel y algunas de sus aleaciones (Ni-Co, NiP y Ni-B). Mediante este proceso se han logrado depositar materiales como cobalto, cromo, cobre, paladio, níquel, etc. Algunas de las características más importantes del depósito es que posee elevada dureza, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión.

En general una solución en el proceso químico contiene los siguientes componentes:

- a) Una sal que suministre el níquel, un sulfato o fosfato comúnmente.
- b) Un agente reductor
- c) Agua destilada
- d) Agentes complejantes, para controlar la cantidad de níquel libre disponible para la reacción.
- e) Un regulador de pH
- f) Estabilizadores
- g) Aceleradores
- h) Una temperatura adecuada
- i) Una superficie catalítica a ser recubierta

El tratamiento previo a la realización de la deposición química es muy semejante al utilizado para los recubrimientos electrolíticos, aunque en muchas ocasiones, adicionalmente, las superficies deben ser adecuadamente activadas con el fin de que funcionen como un catalizador eficiente de la reducción de los iones.

Si se considera una composición constante en el baño, la velocidad de deposición guarda una relación directa con las siguientes variables:

- a) La temperatura. La velocidad de deposición es una función exponencial de la temperatura. La temperatura óptima para efectuar el proceso de recubrimiento está entre 85°C y 95°C, y a medida que se alcanza el punto de ebullición de la solución, la estabilidad tiende a disminuir.
- b) Cantidad del agente reductor. La velocidad de deposición es una función directa de dicha concentración. De este modo un alto contenido de este ión sería deseable, de no ser porque la estabilidad del baño disminuye como función directa de la concentración de iones.
- c) pH. En términos generales la velocidad de deposición aumenta con el pH de la solución. La zona de pH preferida para una solución de níquelado químico, esta entre 4.3 y 4.8.
- d) Agitación. En general, la agitación aumenta la velocidad de deposición; esto es probablemente debido a que la capa de difusión adyacente a la superficie catalítica, está a un menor pH en el baño estático, la agitación eleva en esa interfase el pH e incrementa así la velocidad de deposición.

Algunas aplicaciones de los recubrimientos obtenidos por deposición sin electricidad han encontrado utilización en industrias como la petrolera, química, de plásticos, minería, nuclear, automotriz, de alimentos, etc. La deposición con cobre se usa para recubrir a través de orificios de tableros de circuitos impresos (industria electrónica). El cobre también puede utilizarse para recubrir partes plásticas con propósitos decorativos. La deposición con níquel se utiliza en elementos hidráulicos, tanques y tuberías (industria aeronáutica).

Las ventajas de la deposición sin electricidad se enumeran a continuación:

- 1) Espesores de chapeado uniformes sobre geometrías de partes complejas (lo cual es un problema con la electrodeposición).
- 2) El proceso puede usarse en sustratos metálicos y no metálicos.
- 3) No se necesita una provisión de corriente directa para realizar el proceso.



1.2 RECUBRIMIENTOS POR CONVERSIÓN

Algunos metales, como el aluminio y el cromo, tienen tendencia a formar películas de óxidos relativamente estables en su superficie al estar en contacto con la atmósfera. Estas películas son el resultado de cierta pasividad y reducen (ya formadas) considerablemente la velocidad de corrosión del metal en medios corrosivos. Este comportamiento es debido a la formación de recubrimientos obtenidos por conversión. Por lo general los recubrimientos obtenidos por conversión se consiguen reaccionando la superficie metálica con la disolución que está en contacto con el metal. En el caso del anodizado, en ocasiones esta reacción tiene lugar con el curso de la corriente eléctrica. Así se forman: óxidos, fosfatos, cromatos, etc., protegiendo a los metales de una corrosión posterior.

Los recubrimientos obtenidos en este proceso por lo general presentan un aspecto mas o menos irregular; y es precisamente este aspecto que se aprovecha para facilitar el anclaje superficial de lubricantes, colorantes y de otros sistemas de protección (pinturas).

1.2.1 ANODIZACIÓN

El anodizado es una capa de óxido, que recubre la superficie metálica después de haber conectado el metal al ánodo de una celda electrolítica, dentro de una solución iónica adecuada.

El proceso del anodizado u oxidación anódica consta, de tres etapas:

- a) Oxidación del metal aluminio y formación sobre su superficie de una película dura de óxido.
- b) Disolución del metal aluminio en el electrolito.
- c) Desprendimiento de oxígeno en el ánodo

En la oxidación anódica, la continuidad del proceso tiene lugar entre el óxido formado al comienzo y el metal base aluminio. El óxido inicial no actúa como aislante entre el metal situado debajo de él y la disolución electrolítica que la rodea, debido a una de las propiedades intrínsecas de la película de óxido (la porosidad); esa disolución electrolítica penetra a través de la película y establece contacto con el metal base situado debajo de él. De esta manera, las dimensiones de la pieza de aluminio sometida al anodizado no sufren alteración apreciable, pues si bien el espesor de la misma aumenta un poco debido a que el volumen de óxido de aluminio es inferior al volumen de óxido de aluminio formado.

El procedimiento de la anodización del aluminio comprende:

- a) Oxidación anódica
- b) Colmatación
- c) Coloración

a) OXIDACIÓN ANÓDICA

Este fenómeno consiste en la producción de una capa de óxido, más o menos hidratada, en la superficie metálica sumergida en un medio electrolítico y con la intervención de una corriente eléctrica.

Las tres reacciones que se tienen dentro de una cuba como la que se muestra en la figura 1.3 (utilizando corriente continua y la pieza a anodizar colocada al electrodo positivo (ánodo)) son:

1. Descomposición del agua. En el cátodo se genera hidrógeno y en el ánodo oxígeno.
2. Disolución parcial del aluminio del ánodo. El líquido de la cuba electrolítica se va enriqueciendo en iones de aluminio.
3. Oxidación superficial del aluminio al ánodo. Este fenómeno no es otra cosa que la formación de una película continua y porosa, principalmente de óxido de aluminio. Por un lado la importancia de esta capa o película es que permite la protección de medios corrosivos naturales a un metal tan electroquímicamente activo como lo es el aluminio, y por otro lado, la posibilidad de colorear esta capa y conseguir aspectos tan interesantes como decorativos para aplicaciones del aluminio en arquitectura.

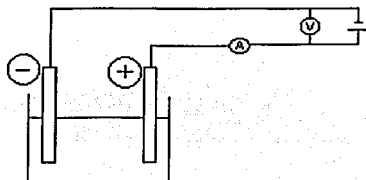


FIG. 1.3 Representación esquemática de la instalación del anodizado del aluminio.

Debido a las características aislantes (térmicas y eléctricas) que tiene la capa, repercute disminuyendo de manera importante la intensidad de corriente al permanecer constante la fuerza electromotriz inicialmente aplicada a la cuba electrolítica.

El valor de la intensidad de corriente llegaría a anularse si no fuera porque la capa de óxido hidratado contiene cierta porosidad y porque la tensión aplicada es superior a la tensión de rotura de esta capa aislante, esta resistencia eléctrica, que es la capa de óxido hidratado de aluminio depositada en la superficie de la pieza de aluminio a anodizar, aumenta la temperatura de esta zona y se produce una deshidratación parcial de la misma capa, originándose la denominada capa barrera. Si se mantiene constante la densidad de la corriente, la temperatura y la agitación del baño, la capa barrera alcanza un límite y sobre ella va creciendo una capa de óxido de aluminio más deshidratada y porosa que la capa barrera, pero también continua. Por esta característica de porosidad se le denomina a esta capa "capa porosa" y permite que su espesor crezca con el tiempo, mientras que el espesor de la capa barrera permanecerá prácticamente constante.

La capa porosa presenta una estructura celular hexagonal con un poro central (Figs. 1.4 y 1.5). Poro que termina de forma redondeada en la capa barrera y repercute en ella de tal modo que la prolongación de la base del poro en el metal base presenta, también, intercara redondeada.

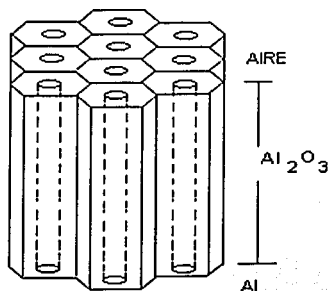


FIG. 1.4 Capas presentes en el aluminio después de haber sido sometido al procedimiento de la anodización.

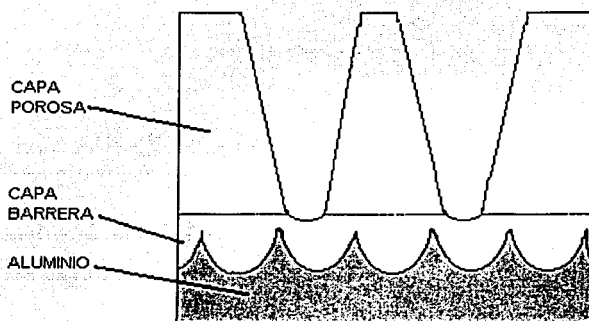


FIG. 1.5 Estructura celular de la capa porosa del aluminio anodizado.

Las propiedades del anodizado del aluminio, formado por la capa barrera y la capa porosa, son las siguientes:

1. Son adherentes, continuas, aislantes térmicos y eléctricos.
2. Tienen estructura porosa antes del sellado; de ahí sus características absorbentes y su capacidad para ser colorados por simple inmersión en disoluciones colorantes o electrolíticamente.
3. Son transparentes.
4. Después del colmatado (que se verá a continuación) tienen una inercia química muy grande en un intervalo de pH comprendido entre 5 y 9; de aquí su resistencia a la corrosión en una amplia variedad de medios.

Los factores que influyen en la calidad del anodizado del aluminio dependen de:

1. La naturaleza del metal.
2. Concentración del electrolito.
3. Temperatura del baño
4. Agitación
5. Densidad de corriente
6. Tiempo de duración del tratamiento.

c) COLMATACIÓN

La capa de óxido de aluminio poroso no constituye una barrera suficientemente protectora para evitar la corrosión del aluminio base. En cambio, si protege la capa obtenida por la transformación de este óxido monohidratado en otro mucho menos poroso y mas protector, ya que se ha originado un aumento de volumen (Fig.1.6). Esto se consigue calentando el anodizado en agua hirviendo.

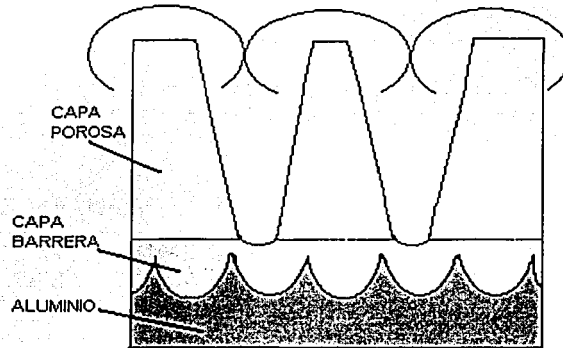


FIG. 1.6 Representación esquemática del anodizado del aluminio después de colmatar.

El mecanismo que se realiza para la colmatación es:

1. Absorción de moléculas de agua en la superficie mas externa de los poros.
2. Formación de cristales de agua en la superficie externa del anodizado
3. Microcristalización en el fondo de los poros.

Los factores a tener en cuenta en la operación de la colmatación son:

1. Pureza del agua
2. Temperatura del agua
3. Tiempo de tratamiento

d) COLORACIÓN

La coloración consiste en convertir la película transparente de óxido de aluminio en una película coloreada, la cual se consigue (Fig. 1.7) por los siguientes procedimientos:

- 1) Inmersión en disolución que contiene el colorante.
- 2) Deposición catódica a partir de iones metálicos.
- 3) Anodización autocolorante.

La coloración por inmersión se realiza introduciendo la pieza anodizada en disoluciones de:

- 1) Sales minerales que precipitan dentro del poro compuestos inorgánicos insolubles, como: óxidos e hidróxidos coloreados.
- 2) Colorantes orgánicos que quedan absorbidos, principalmente dentro de los poros.

La coloración por deposición catódica se lleva a cabo con disoluciones diluidas de electrolitos y densidades de corrientes bajas.

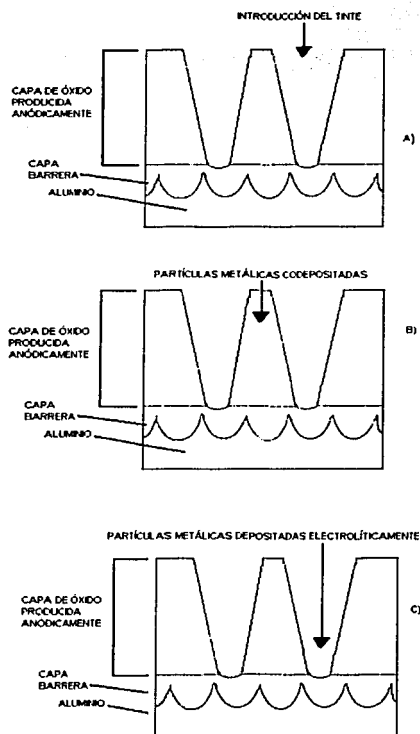


Fig. 1.7 Tres tipos de coloración del aluminio; a) por absorción, b) integral y c) electrolítica

TÉCNICAS PARA LA ANODIZACIÓN

Los procedimientos de anodización a destacar por su utilización industrial, son los tres siguientes:

- 1) El empleo de ácido sulfúrico
- 2) El empleo de ácido crómico
- 3) El empleo de ácido oxálico
- 4) El empleo de combinación de ácidos

En la Tabla 1.1 se indica la composición química de cada uno de estos electrolitos utilizados en la industria para el anodizado del aluminio, así como sus correspondientes parámetros de electrólisis.

TABLA 1.1. COMPOSICIÓN DE BAÑOS UTILIZADOS PARA EL ANODIZADO DEL ALUMINIO.

PROCESO	ACIDO %	DENSIDAD DE CORRIENTE (A/dm ²)	VOLTAJE (V)	TEMP. (°C)	TIEMPO (min.)	TIPO DE PELICULA
ACIDO CRÓMICO	3	0.4-0.6	Ciclo V/t	40	60	Gris-blanco
	10	0.4-0.6	Ciclo V/t	40	30	Opaco
ACIDO SULFÚRICO	14	0.8-1.0	15	10-15	30-40	Poco translúcido
	20	1.2-1.5	15	18-20	20	Normal translúcido
ACIDO OXÁLICO	5	0.5-1.5	30-60	20	30	Amarillo pálido
	5	1.5	50	35-40	60	Amarillo fuerte
	5	1.5	60	35-40	60	Grueso
	3+2% oxalato potásico	1.5	50	40	30-60	Grueso, incoloro.

Ácido sulfúrico. Este es el más utilizado en la industria por el bajo costo del electrolito y porque permite obtener películas de óxido de aluminio de gran dureza y de considerable estabilidad a los agentes atmosféricos. El aspecto de estas películas es que son claras y transparentes, permitiendo además obtener coloraciones de gran pureza, intensidad y brillo. De igual manera aumenta la capacidad de protección contra la corrosión y la propiedad dieléctrica de esta película anódica. Los espesores que se logran mediante este proceso van de 0.003 – 0.01 μm. Algunas desventajas que presenta el uso de este ácido son: requiere refrigeración, no es recomendable para el anodizado de piezas que posean ranuras estrechas, pequeñas concavidades o juntas, por el riesgo que se corre de que puedan quedar alguna porción de electrolito retenido en esas zonas y pueda corroerlas posteriormente.

Ácido crómico. Este proceso es mas recomendable para producir espesores o películas uniformes, duras, adheridas, translúcidas o absorbentes, todo esto debido a que posee un electrolito menos corrosivo cuando queda retenido en las citadas zonas de la piezas. Sin embargo genera películas de óxido de aluminio blandas, las cuales no son aptas para anodizar aleaciones de aluminio conteniendo cobre y recubrimientos de óxido de poco espesor (aproximadamente entre 3 y 5 micrómetros).

Ácido oxálico. Se emplea principalmente para aplicaciones de aislamientos eléctricos. Las películas son en general amarillas, pero puede producirse una película incolora en un baño oxálico-oxalato, para los teñidos de alta calidad. Este proceso desplazaría fácilmente a el que se utiliza con el ácido sulfúrico si sólo fuese necesario obtener calidad. Aquí se pueden utilizar como cátodos los propios revestimientos de plomo de la cuba , siendo factibles espesores de hasta 0.03 μm .

Combinación de ácidos. En ocasiones se utilizan procedimientos mixtos, esto es que utiliza como electrolito una mezcla de ácido sulfúrico y oxálico (la composición y los parámetros se muestran en la tabla 1.1). Este electrolito posee las ventajas y los inconvenientes inherentes a los electrolitos base (ácido sulfúrico y oxálico). La ventaja que se puede observar en comparación con solo utilizar el ácido sulfúrico es que evita la refrigeración y permitir el empleo de densidades de corriente algo mayores sin que se produzca la disolución parcial del óxido en formación.

1.3 RECUBRIMIENTOS POR DEPOSICION FISICA A PARTIR DE LA FASE VAPOR

La deposición física de vapor, DFV (en ingles PVD), se refiere a los procesos en los cuales se convierte un material a su fase de vapor en una cámara de vacío y se condensa sobre una superficie de sustrato como una película delgada. Este tipo de recubrimientos se utiliza para aplicar una amplia variedad de materiales de recubrimientos: metales, vidrio y plástico. Por lo que este proceso representa una tecnología de recubrimiento muy versátil aplicable a una combinación casi ilimitada de sustancias de recubrimiento y materiales de sustratos.

Los procesos para la deposición física de vapor consisten en los siguientes pasos:

- 1) Síntesis del vapor de recubrimiento
- 2) Transporte del vapor al sustrato
- 3) Condensación de los vapores sobre la superficie del sustrato.

Por lo general, la secuencia anterior se realiza dentro de una cámara de vacío.

La deposición física de vapor se obtiene mediante tres métodos principales, los cuales son:

- 1) Evaporación en vacío
- 2) Bombardeo de partículas atómicas
- 3) Recubrimiento iónico

A continuación se presenta en la tabla 1.2 algunas características generales de cada proceso antes mencionado, aunque se tocara más a fondo cada proceso en su respectiva introducción.

TABLA 1.2. RESUMEN DE PROCESOS POR DEPOSICIÓN FÍSICA DE VAPOR.

PROCESO DE DEPOSICION	CARACTERISTICAS	MATERIALES DE RECUBRIMIENTO
EVAPORACION AL VACIO	El equipo tiene un costo relativamente bajo y es muy sencillo. La deposición de compuestos es difícil. La adhesión del recubrimiento no es muy buena.	Ag, Al, Au, Cr, Cu, Mo, W
BOMBARDEO DE PARTICULAS ATOMICAS (SPUTTERING)	Mejor descarga de energía y adhesión del recubrimiento que en la evaporación al vacío. Posibilidad de recubrir compuestos. Velocidades de deposición más lentas y un control del proceso más difícil que el de vacío.	Al ₂ O ₃ , Au, Cr, Mo, SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , TiC, TiN
RECUBRIMIENTO IONICO	La mejor cobertura de adhesión del recubrimiento hablando de proceso de deposición física. El control del proceso es muy complejo. Velocidades de deposición más altas que la deposición electrofítica.	Ag, Au, Cr, Mo, Si ₃ N ₄ , TiC, TiN

APLICACIONES GENERALES

Este tipo de recubrimientos incluyen los decorativos delgados sobre partes de plástico y metálicas, tales como trofeos, juguetes, plumas y lápices, empaques para relojes y adornos para interiores de automóviles. Los recubrimientos son películas delgadas de aluminio (aprox. 150 nm) aplicadas con laca transparente para proporcionar un aspecto de plata o cromo satinado. Otro uso importante es en recubrimientos antirreflejantes de fluoruro de magnesio (MgF₂) sobre lentes ópticos. También se aplica en la fabricación de artículos electrónicos, principalmente para la deposición de metales que tiene el propósito de formar conexiones eléctricas en circuitos integrados. Por último, la deposición física de vapor se usa ampliamente para recubrir herramientas de corte y moldes de inyección de plásticos con nitruro de titanio (TiN) para que resistan el desgaste.

1.3.1 EVAPORACION AL VACIO

Es posible depositar ciertos materiales (principalmente metales puros) sobre un sustrato, transformándolos primero de estado sólido a vapor en una cámara de vacío y después permitiendo que se condensen en la superficie del sustrato. Este proceso se muestra en la figura 1.7.

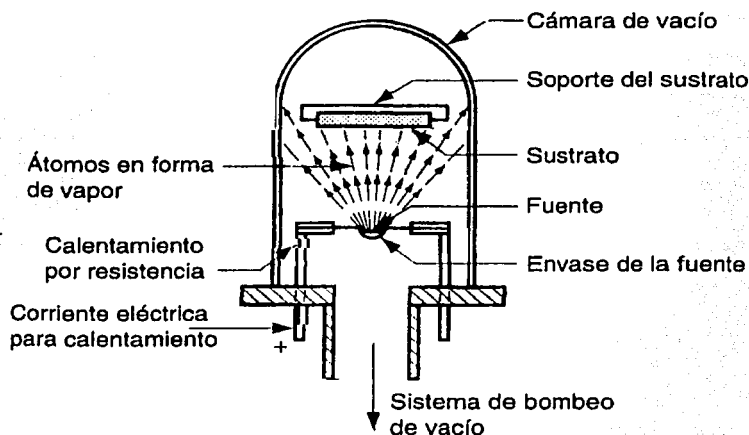


FIG. 1.7 Instalación para la deposición física de vapor por evaporación al vacío.

La evaporación se lleva a cabo en sistemas de vacío (el vacío es conveniente que sea del orden de 9.9866 Pa o mayor), dentro de los cuales se calienta el material a evaporar, llamado fuente, hasta temperaturas cercanas a su punto de fusión o de sublimación. Dado que el calentamiento se obtiene en un vacío, la temperatura requerida para la evaporación es significativamente menor que la temperatura requerida a presión atmosférica normal. Asimismo, la ausencia de aire en la cámara evita la oxidación del material fuente a las temperaturas de calentamiento.

Se utilizan varios métodos para calentar y vaporizar el material. Entre los más importantes están:

1.1.1 Calentamiento por resistencia.

Esta técnica es la más sencilla. Primero se forma un metal refractario (ej. W ó Mo) en un envase adecuado para contener al material fuente. Se aplica una corriente para calentar el envase (crisol) y este transmite calor al material en contacto (Fig. 1.8). El problema en este método es la película posible entre el envase y su contenido, ya que la película depositada se contamina con el metal del envase de calentamiento por resistencia.

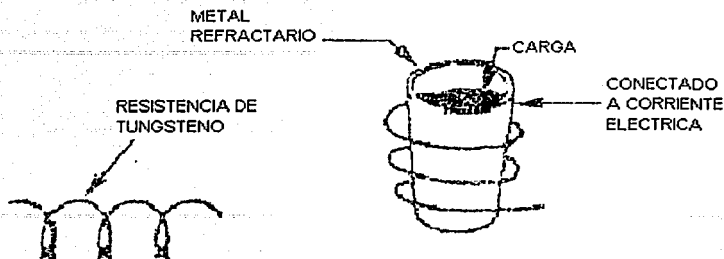


FIG. 1.8 Esquema de evaporación

1.1.2 Bombardeo con haz de electrones.

En este método el material es bombardeado por un haz de electrones de alta energía, calentando así el material (Fig. 1.9) Por este método, electrones de cualquier elemento de la Tabla periódica o compuesto puede ser evaporado. Elementos con muy baja presión de vapor como W, Ta y Mo pueden también evaporarse por haz de electrones.

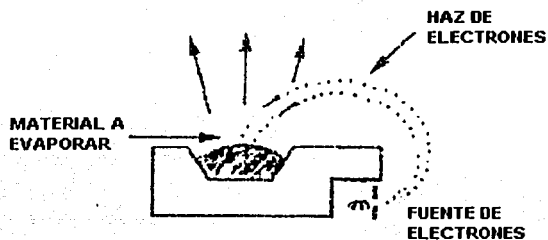


FIG. 1.9 Esquema de evaporación.

Se utilizan presiones por debajo de 0.133 Pa, donde ya no hay flujo molecular de los gases; por lo que hay un alto grado de pureza en el sistema (falta de gases contaminantes) y se pueden mantener altas diferencias de voltaje.

El material del centro funciona como soporte o "vasija contenedora" con lo que se evita la contaminación del crisol (Fig. 1.10).

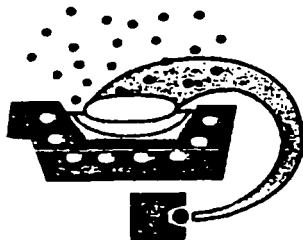


FIG. 1.10 Haz de electrones

Este método de bombardeo con haz de electrones es el más utilizado actualmente en la industria, ya que posee las siguientes ventajas:

- a) Permite grandes cargas de material
- b) Permite evaporación secuencial de material depositado en diferentes crisoles hacia los cuales puede dirigirse el haz de electrones
- c) Permite evaporación simultánea de materiales colocados en distintos crisoles
- d) Velocidad típica de deposición de $100 \mu\text{m}/\text{min}$.
- e) Además con las presiones que se utilizan de 10 Pa y siendo un proceso muy rápido se puede conseguir que los depósitos tengan menos impurezas por cada millón de átomos.

Cualquiera que sea la técnica de evaporación, los átomos evaporados dejan la fuente y siguen trayectorias en línea recta hasta que chocan con otras moléculas de gas o con una superficie sólida. El vacío dentro de la cámara prácticamente elimina otras moléculas de gas, por lo que reduce la probabilidad de choques con átomos del vapor de la fuente, además el mismo gas que se evapora hace reducir la presión parcial de los contaminantes. La superficie del sustrato que se va a cubrir generalmente se coloca en relación con la fuente, de este modo se asegura la deposición de los átomos en forma de vapor sobre la superficie sólida. En ocasiones se utiliza un manipulador mecánico para rotar el sustrato de tal manera que se recubran todas las superficies.

Tras el contacto con la superficie del sustrato relativamente fría, el nivel de energía de los átomos que chocan se reduce repentinamente, hasta un punto donde ya no pueden permanecer en estado de vapor, entonces, se condensan y se pegan a la superficie sólida, donde forman una película delgada.

El sistema que utiliza el manipulador se llama Epitaxia por haces moleculares MBE (Molecular Beam Epitaxy) y utiliza ultra alto vacío. En este sistema se alcanza un gran control del material depositado. Es muy apropiado para la producción de superredes o nanoestructuras en general.

1.3.2 BOMBARDEO CON PARTICULAS ATOMICAS (SPUTTERING)

El sputtering o pulverización catódica es otra de las técnicas de deposición física en fase vapor que más se emplea en la formación de capas delgadas, sobre todo en microelectrónica y óptica. En esta técnica se lanzan partículas (generalmente iones acelerados por una diferencia de potencia, es decir el bombardeo de material de recubrimiento catódico con iones de gas argón) contra la superficie de un blanco, provocando que los átomos de la superficie escapen, para depositarse sobre un sustrato formando de esta manera una película delgada sobre él. Debido a que en este caso se emplean partículas de alta energía es conveniente el uso de un gas ionizado, como el argón energizado mediante un campo eléctrico para formar un plasma. El sustrato debe colocarse cerca del cátodo y por lo general, se calienta para mejorar la unión de los átomos del recubrimiento. Este proceso se muestra en la Figura 1.11 .

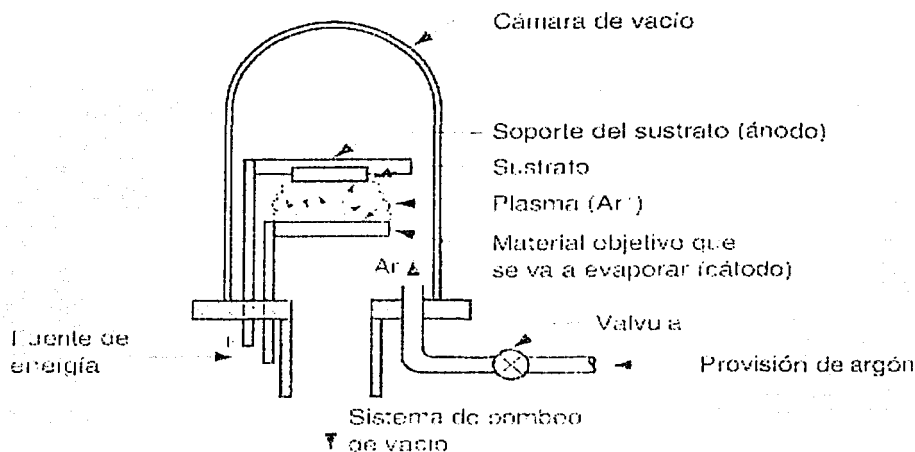


FIG. 1.11 Instalación para el bombardeo de partículas atómicas. Una forma de deposición física de vapor

Este proceso presenta ventajas sobre la evaporación para la deposición de aleaciones, por ser la estequiometría de la película obtenida parecida a la del sustrato del que proviene. La deposición de metales refractarios se realiza asimismo mas fácilmente que mediante la evaporación. En sí, mientras que la evaporación al vacío generalmente se limita a metales, el bombardeo con partículas atómicas se aplica en su mayoría a metales como no metales, aleaciones, cerámica y polímeros. Las películas de compuestos químicos también se depositan mediante el empleo de gases reactivos que forman óxidos, carburos o nitruros con el metal chisporroteante. Dentro de otros resultados que se obtienen en este proceso es que: las películas depositadas presentan un espesor muy uniforme; se puede utilizar de modo efectivo para la limpieza de superficies a nivel atómico. Este proceso también se caracteriza por tener una uniformidad significativamente mejor que la de la deposición por evaporación.

En este proceso existen ciertas desventajas como lo es su baja producción debido a las velocidades de deposición tan lentas. Otra desventaja es que los iones que bombardean la superficie son en forma de gas y por lo general se encuentran restos del gas en las películas de recubrimiento; en ocasiones, estos gases atrapados llegan a afectar las propiedades mecánicas del mismo.

1.3.2.1 Recubrimiento iónico

Este proceso es una combinación de bombardeo con partículas atómicas y evaporación al vacío para depositar una película delgada sobre un sustrato. Es decir: se prepara el sustrato para que funcione como cátodo en la parte superior de la cámara y el material fuente se coloca debajo. Después se establece un vacío en la cámara. Se inyecta gas argón y se aplica un campo eléctrico para ionizar el gas (Ar^+) y establecer un plasma. Esto produce un bombardeo iónico (sputtering) del sustrato, por lo que su superficie se frota hasta una condición de limpieza atómica ("muy limpia"), enseguida se calienta el material fuente lo suficiente para generar vapores de recubrimiento. Los métodos de calentamientos son los que se emplean en la evaporación al vacío, como: calentamiento por resistencia, bombardeo con haz de electrones, etc. Las moléculas de vapor pasan a través del plasma y recubren el sustrato. El bombardeo de partículas atómicas continua durante el proceso por lo que el bombardeo con iones no solo consiste en los iones de argón originales, sino también en los del material fuente que se han energizado mientras han estado sujetos al mismo campo de energía que el argón. Los efectos de estas condiciones de procesamiento producen recubrimientos de espesor uniforme y una excelente adherencia al sustrato.

Este tipo de recubrimiento se aplica para geometrías irregulares debido a los efectos de dispersión que existen en el campo del plasma. Además de la buena adherencia y uniformidad al recubrimiento, otras ventajas del proceso son sus altas velocidades de deposición, altas densidades de película y la capacidad de recubrir las paredes internas de orificios y otras formas huecas, como ya antes lo mencionamos de manera breve.

1.4 RECUBRIMIENTO POR DEPOSICIÓN QUÍMICA A PARTIR DE LA FASE VAPOR

El procedimiento de la deposición física de vapor (en inglés CVD) implica la interacción entre una mezcla de gases y la superficie de un sustrato calentado, provocando la descomposición química de algunas de las partes del gas y la formación de una película sólida en el sustrato. Todo esto ocurre en una cámara de reacción sellada. El producto de la reacción (sea un metal o un compuesto) forma un núcleo y crece en la superficie del sustrato para formar el recubrimiento. Por lo general todas las reacciones de la deposición química de vapor requieren calor; sin embargo esto dependerá de los productos químicos implicados, las reacciones pueden ser provocadas por otras fuentes de energía, como la luz ultravioleta o un plasma. Este proceso incluye un amplio rango de presiones y temperaturas y se aplica a una gran variedad de materiales de recubrimiento y de sustrato.

Las ventajas que se citan comúnmente para la deposición química de vapor son:

- Es posible depositar materiales refractarios a temperaturas debajo de sus puntos de fusión o sinterizado.
- Posible control del tamaño de grano.
- El proceso se realiza a presión ambiente (es decir, no se requiere equipo de vacío).
- Existe una buena unión del recubrimiento a la superficie del sustrato.

Las desventajas son:

- La naturaleza corrosiva y tóxica de los productos químicos, por lo general, se requiere una cámara cerrada al igual que equipo de bombeo y disposición especial.
- Algunos ingredientes para la reacción son relativamente costosos.
- Se utiliza poco material.

Los materiales que no se utilizan por lo general son los que se electrodepositan con facilidad, debido a los productos químicos peligrosos que deben utilizarse y a los costos de medidas de seguridad para evitar riesgos. Los metales recomendables a utilizar para este tipo de recubrimiento son el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el vanadio y el tantalio. Este proceso es muy recomendable para el caso de compuestos como el óxido de aluminio (Al_2O_3), el dióxido de silicio (SiO_2), el nitruro de silicio (Si_3N_4), el carburo de titanio (TiC) y el nitruro de titanio (TiN).

Los gases o vapores reactivos que se utilizan, por lo general son hidruros metálicos (MH_x), cloruros (MCl_x), fluoruros (MF_x) y carbonilos [$M(CO)_x$], en donde "M" es el metal que se va a depositar y "x" se usa para equilibrar las valencias en el compuesto. En algunas reacciones se usan otros gases, como el hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco (NH_3).

EQUIPO

El proceso de deposición química de vapor se realiza en un reactor que consiste en:

- Sistema de provisión de reactivos
- Cámara de deposición
- Sistema de reciclado/evacuación

Por lo regular las configuraciones de los reactores difieren dependiendo de la aplicación, aunque en la Figura 1.12 se presenta un diseño posible de reactor para el proceso de CVD.

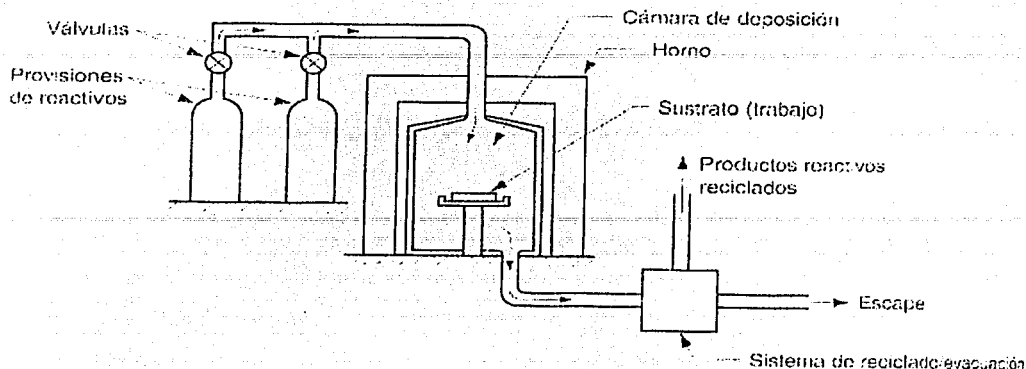


FIG. 1.12 Reactor común usado en la deposición química de vapor.

El sistema de provisión de reactivos sirve para incorporar reactivos en la cámara de deposición en las proporciones adecuadas. En realidad, se requieren diferentes tipos de sistemas de provisión dependiendo de si los reactivos se incorporan como gas, líquido o sólido.

La cámara de deposición contiene los sustratos y las reacciones químicas que conducen a la deposición de los productos de reacción sobre las superficies. La deposición ocurre a elevadas temperaturas y el sustrato debe calentarse por inducción, mediante calor radiante u otros medios. Las diferentes temperaturas que se utilizan, varían de acuerdo a las diferentes reacciones de CVD oscilando entre 250 y 1950°C (500 y 3500°F), por tanto el diseño de la cámara debe ser diferente para cumplir con estas demandas de temperatura.

La función del sistema de reciclado/evacuación, es volver inofensivos los subproductos de la reacción de CVD, esto incluye la recolección de materiales tóxicos, corrosivos y flamables, seguida por una disposición y procesamiento adecuados.

1.4.1 FORMAS ALTERNATIVAS DE LA DEPOSICIÓN QUÍMICA DE VAPOR

1.4.1.1 Deposición química de vapor a baja presión

Existe una alternativa para la deposición química de vapor y es realizar este proceso a presiones inferiores a la atmosférica, llamándose por consiguiente deposición química de vapor a baja presión DQVBP en donde las reacciones ocurren en un vacío parcial.

Las ventajas que presenta este proceso son:

- Grosor uniforme
- Buen control sobre la composición y la estructura
- Baja temperatura de procesamiento
- Altas velocidades de deposición
- Rendimientos altos
- Bajos costos de procesamiento

Las desventajas son:

Principalmente es el diseño de bombas de vacío, es decir que puedan crearlo de manera parcial cuando los productos de la reacción no-solo estén calientes sino también sean corrosivos. Por lo general estas bombas deben incluir sistemas para enfriar y atrapar gases corrosivos antes de que lleguen a la unidad de bombeo real.

1.4.1.2 Deposición química de vapor asistida con plasma

Otro sistema es la deposición química de vapor asistida con plasma, en la cual la deposición sobre un sustrato se consigue mediante la reacción de los ingredientes en un gas que se ha ionizado mediante una descarga eléctrica (esto es un plasma). Es decir se utiliza la energía que contiene el plasma en lugar de energía térmica para activar las reacciones químicas.

Las ventajas son:

- Menores temperaturas del sustrato
- Mejor energía de cobertura
- Mejor adhesión
- Velocidades de deposición más altas

Las aplicaciones más comunes son en el procesamiento de semiconductores donde la deposición es mediante nitruro de silicio (Si_3N_4), también en recubrimientos de TiN y TiC para herramientas y recubrimientos de polímeros.

1.5 RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

Este tipo de recubrimientos son polímeros y resinas producidos en forma natural o sintética, generalmente formulados para aplicarse de manera líquida que se secan o endurecen como películas de superficie delgadas en materiales del sustrato. Estos recubrimientos se aprecian por la variedad de colores y texturas posibles, su capacidad de proteger la superficie del sustrato, su bajo costo y su facilidad de aplicación.

Las formulaciones de los recubrimientos orgánicos contienen lo siguiente:

- *Aglutinantes*. Estos dan al recubrimiento sus propiedades.
- *Tintes o pigmentos*. Dan color al recubrimiento.
- *Solventes*. Son para disolver los polímeros y resinas, además dan una fluidez conveniente al líquido.
- *Aditivos*.

Aglutinantes. En los recubrimientos orgánicos son polímeros y resinas que determinan las propiedades del estado sólido del recubrimiento, tales como la resistencia, propiedades físicas y la adhesión a la superficie del sustrato. Los aglutinantes contienen pigmentos y otros ingredientes en el recubrimiento, durante y después de la aplicación a la superficie. Los aglutinantes más comunes en los orgánicos son aceites naturales, resinas de poliéster, poliuretanos, epóxicos, acrílicos y celulósicos.

Tintes o pigmentos. Estos son productos químicos que dan color al recubrimiento líquido, mas no ocultan la superficie cuando se aplican. Por lo tanto, los recubrimientos con color

de tinte son por lo regular transparentes o translúcidos. Los pigmentos son partículas sólidas de tamaño uniforme y microscópico que se dispersan en el líquido de recubrimiento, pero no se disuelven en él. Además de dar color, ocultan la superficie que está debajo y fortalecen el recubrimiento.

Solventes. Son utilizados para disolver el aglutinante y otros ingredientes que constituyen el recubrimiento líquido. Los solventes más utilizados son hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, ésteres, acetonas y solventes clorinados. Es importante señalar que para aglutinante existe un solvente específico. Los aditivos en los recubrimientos orgánicos incluyen a los dispersantes (esto funciona como ayuda en el momento de dispersión sobre la superficie) insecticidas y fungicidas, espesantes, estabilizadores de congelación o deshielo, estabilizadores para calor y luz, plastificantes y desespumantes. Estos ingredientes se formulan para obtener una amplia variedad de recubrimientos, tales como pinturas, lacas y barnices.

1.5.1 MÉTODOS DE APLICACIÓN

El método de aplicación depende de varios factores como la composición del líquido de recubrimiento, el espesor requerido, la velocidad de producción, consideraciones de costo, tamaño de parte y requerimientos ambientales. Antes de la aplicación es importante siempre preparar la superficie de manera conveniente. Esto incluye una limpieza y el posible tratamiento de la superficie, tal como un recubrimiento de fosfato. Por lo general algunas superficies metálicas se chapean para maximizar la protección contra la corrosión. Con cualquier método a elegir es importante siempre fijarse en la eficiencia de transferencia y esto no es más que la proporción de pintura que se suministra para el proceso y se deposita sobre la superficie de trabajo.

Los métodos disponibles para aplicar recubrimientos líquidos incluyen:

1.- *Uso de brochas y rodillos.* Estos métodos son de los más conocidos y tienen una eficiencia de transferencia cercana al 100%. Estos se utilizan para bajos volúmenes de producción. Dentro de estos métodos hay un pequeño inconveniente ya que el uso de rodillos es para superficies planas mientras que la brocha es de un uso mas versátil.

2.- *Aplicación por aspersión.* Este proceso obliga al líquido del recubrimiento a atomizarse dentro de un vapor fino inmediatamente antes de la deposición sobre la superficie de la parte; cuando las gotas chocan contra la superficie se extienden y fluyen juntas para formar un recubrimiento uniforme dentro de la región localizada de la aspersión. Haciéndose de manera adecuada este proceso, puede lograrse una buena uniformidad en el recubrimiento. Este proceso por lo general se realiza manualmente en cabinas para pintura por aspersión o también puede establecerse como un proceso automatizado. En este caso la eficiencia de transferencia es relativamente baja (de sólo 30%), por estos métodos. La eficiencia llega a mejorar mediante la aspersión electrostática. Esto hace que las superficies de la parte atraigan las gotas y aumenten las eficiencias de transferencia a valores que alcanzan el 90%. Este proceso se utiliza en la industria automotriz, para recubrir aparatos eléctricos y otros productos de consumo.

3.-*Recubrimiento por inmersión y por flujo.* Estos métodos aplican grandes cantidades de recubrimiento líquido a la parte de trabajo y permiten drenar el exceso para reciclarlo. El método más simple es el recubrimiento por inmersión, en el cual se sumerge la parte en un tanque abierito con material de recubrimiento líquido; cuando se retira la parte, el exceso de líquido se drena de vuelta al tanque. Una variante del recubrimiento por inmersión es el electrorrecubrimiento, en éste, la parte se carga en forma eléctrica y después se sumerge en un baño de pintura que ha recibido una carga opuesta. Esto mejora la adhesión y permite el uso de pinturas en donde el solvente es agua, lo cual reduce los riesgos de incendio y contaminación.

En el recubrimiento por flujo, las partes de trabajo se mueven a través de una cabina cerrada para pintura en donde una serie de boquillas bañan las superficies de la parte con el líquido para recubrimiento. El exceso de líquido se drena de regreso a un vertedero, lo cual permite que se reutilice.

4.-*Secado y curado.* El secado es un proceso de conversión en el cual el recubrimiento líquido debe convertirse a sólido. Muchos recubrimientos orgánicos se secan mediante la evaporación de sus solventes. Sin embargo, para formar una película más duradera, es necesaria una conversión adicional, llamada curado. El curado es un cambio químico en la resina orgánica en la cual ocurre una polimerización o formación de cadenas transversales para endurecer el recubrimiento.

El tipo de resina determina la clase de reacción química que ocurre en la vulcanización. Los métodos principales de vulcanización en los recubrimientos orgánicos son los siguientes:

- *Curado a temperatura ambiente.* Implica en este caso la evaporación del solvente y la oxidación de la resina. Casi todas las lacas se vulcanizan con facilidad mediante este método.
- *Curado a temperatura elevada.* En ocasiones este método se le llama cocido. En este caso las temperaturas elevadas aceleran la evaporación del solvente, así como la polimerización y la formación de cadenas transversales de la resina.
- *Curado por catalización.* Aquí los recubrimientos requieren agentes reactivos mezclados con las resinas de arranque, originando la polimerización y la formación de cadenas transversales. Ejemplos de estos son las pinturas epóxicas y de poliuretano. Frecuentemente son sistemas de dos componentes que deben mezclarse inmediatamente antes de la aplicación.
- *Curado por radiación.* Ciertas resinas se vulcanizan mediante diversas formas de radiación. Como microondas, luz ultravioleta y haz de electrones.

1.5.2 RECUBRIMIENTO PULVERIZADO

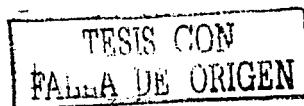
Estos recubrimientos se aplican como partículas sólidas, secas y finalmente pulverizadas que se funden en la superficie para formar una película líquida uniforme, después de lo cual se solidifican en un recubrimiento seco. Los sistemas de recubrimientos pulverizados incluyen varias resinas que no se usan en recubrimientos orgánicos líquidos. Lo importante de esto es que el material para recubrimiento pulverizado es sólido a temperatura ambiente. Los recubrimientos pulverizados se clasifican como termoplásticos o termofijos.

Dentro de los termoplásticos comunes incluyen el cloruro de polivinilo, el nylon, el poliéster, el polietileno y el polipropileno. En general se aplican como recubrimientos "gruesos", en un rango 0.003 a .00012 in. (0.08 a 0.30 mm).

Dentro de los termofijos comunes están los epóxicos, poliésteres y acrílicos. Se aplican como resinas no curadas que se polimerizan y forman cadenas transversales cuando se calientan o reaccionan con otros ingredientes. Los grosores que alcanzan estos oscilan entre 0.001 a 0.003 in (0.025 a 0.075mm).

Los dos métodos principales para recubrimientos pulverizados son los siguientes:

- *Aspersión.* Se aplica en este caso una carga electrostática a cada partícula para atraerla a una superficie de la parte que forma una tierra. Existen diversos diseños de pistola a fin de impartir la carga a los polvos. Estas pistolas se operan de manera manual o mediante robots industriales. Se utiliza aire comprimido para impulsar los polvos a la boquilla. Los polvos están secos cuando se dispersan y es posible reciclar cualquier exceso de partículas que no se pega a la superficie (a menos que se mezclen múltiples colores de pintura en la misma cabina para aspersión). Los polvos se aplican a temperatura ambiente sobre la pieza, después ésta se calienta para fundir los polvos; también pueden aplicarse sobre una parte que se ha calentado arriba del punto de fusión del polvo, con lo cual se obtiene un recubrimiento más grueso.
- *Lecho fluidizado.* Esta es una alternativa de uso menos frecuente que la aspersión electrostática. Aquí se calienta con anticipación la parte de trabajo que va a ser recubierta y se pasa por un lecho fluidizado que contiene polvos suspendidos (fluidizados) mediante una corriente de aire. Estos polvos se adhieren a la superficie de la parte para formar el recubrimiento. En algunas implantaciones de este método, los polvos se cargan electrostáticamente para aumentar la atracción hacia la superficie de la parte conectada a tierra.



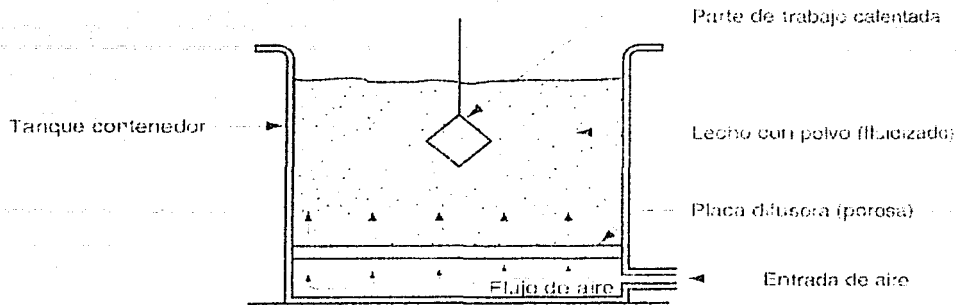


FIG. 1.13 Lecho fluidizado para la aplicación de recubrimientos pulverizados.

1.6 ESMALTADO EN PORCELANA Y OTROS RECUBRIMIENTOS CERÁMICOS

La porcelana es una cerámica hecha de caolín, feldespato y cuarzo. Se aplica a sustratos tales como acero, hierro fundido y aluminio como un esmalte vítreo. El nombre que recibe esta tecnología de materiales de recubrimiento cerámico es “Esmalte porcelanizado”, así como los procesos mediante los cuales se aplica.

El proceso del esmalte porcelanizado consiste en:

1.- *Preparación del material de recubrimiento.* La preparación implica convertir el esmalte vítreo en partículas llamadas *frita*, las cuales se trituran a un tamaño conveniente y consistente.

2.- *Aplicación sobre la superficie.* Los métodos para aplicar la *frita* son muy similares a los de recubrimientos orgánicos, pese a que en ocasiones el material inicial es muy distinto. Algunos métodos de aplicación de ésta implican mezclar la frita con agua como transporte (la mezcla se le llama colada), otros métodos aplican el esmalte como polvo seco. Una de las técnicas es la aspersión sin corriente, la aspersión electrostática, el recubrimiento por flujo, la inmersión y la electrodeposición.

3.- *Secado (si se requiere).* En los métodos de aplicación “a la colada”, se requiere secar el recubrimiento para remover la humedad antes del quemado. Los secadores utilizan calentamiento radiante o por convección.

4.- *Quemado.* El quemado es un proceso de sinterizado, en el cual la frita se transforma en esmalte vítreo no poroso. Éste se realiza a temperaturas de 800°C (1500°F). El nivel varía dependiendo de la composición, las propiedades y los requerimientos de producción.

Los grosores obtenidos varían desde 0.003 in (0.075 mm) hasta cerca de 0.075 pulg.(2mm). La secuencia de procesamiento se repite varias veces para obtener el espesor deseado.

Los recubrimientos porcelanizados son valiosos por su belleza, color, tersura, facilidad de limpieza, inercia química y durabilidad general. El esmalte porcelanizado se usa en una amplia variedad de productos, incluyendo accesorios para baños, artículos eléctricos para el hogar, utensilios para hospitales, componentes de motores a chorro, silenciadores de automóviles y tableros de circuitos electrónicos. La composición de las porcelanas dependen de los requisitos del producto. Algunos esmaltes se formulan por color y buena apariencia, en tanto otros por su funcionalidad.

Dentro de las propiedades funcionales se encuentran:

- Resistencia a los productos químicos y el clima
- Resistencia a altas temperaturas de servicio
- Resistencia eléctrica
- Resistencia a la abrasión
- Dureza

1.7 PROCESOS DE RECUBRIMIENTOS TÉRMICOS Y MECÁNICOS

Estos dos procesos térmicos aplican recubrimientos separados y por lo general son mas gruesos que los recubrimientos depositados mediante los otros procesos considerados con anterioridad. Además estos, se basan en energía mecánica y térmica.

1.7.1 PROCESOS TÉRMICOS

Estos procesos utilizan energía térmica en diversas formas para aplicar un recubrimiento cuya función es proporcionar resistencia contra la corrosión, la erosión, el desgaste y la oxidación a altas temperaturas.

***PROYECCIÓN TÉRMICA.** En este proceso se aplican materiales de recubrimiento fundidos y semifundidos sobre un sustrato, donde se solidifican y adhieren a la superficie. Se aplican una amplia variedad de materiales de recubrimiento; las categorías son:

- Metales puros y aleaciones metálicas
- Cerámica (óxidos, carburos y ciertos vidrios)
- Otros compuesto metálicos (sulfuros)
- Cermets
- Ciertos plásticos (epóxicos, nylon, teflón, etc.)

Los sustratos incluyen metales, cerámica, vidrio, algunos plásticos, madera y papel. Es importante señalar que no todos los recubrimientos pueden aplicarse a todos los sustratos. Cuando el proceso se usa para aplicar un recubrimiento metálico, se denomina "Metalización o Aspersión metálica"

Para calentar el material de recubrimiento se utilizan los procesos de:

- La flama de oxígeno y gas combustible
- El arco eléctrico
- El arco de plasma

El material para recubrimiento inicial se encuentra en forma de:

Alambre (o varilla). Cuando se utiliza el alambre, la fuente de calentamiento funde el extremo conductor del alambre y lo separa de la materia prima sólida. Enseguida el material fundido se atomiza mediante una corriente de gas a alta velocidad (aire comprimido u otra fuente) y las gotas chocan contra la superficie de trabajo, las velocidades de impacto varían entre 250 m/s (800 ft/s) para la combustión con oxígeno y gas combustible, y de 500 m/s (1750 ft/s) ó más para el arco de plasma a alta velocidad.

Polvos. Cuando se utiliza materia prima en polvo, un alimentador de polvos coloca las partículas finas dentro de una corriente de gas, la cual las transporta dentro de la flama donde se funden, los gases que se expanden en la flama impulsan los polvos fundidos (o semifundidos) contra la pieza de trabajo a velocidades aproximadas a 100 m/s (300 ft/s).

La unión del proceso de proyección térmica se hace principalmente mediante el entrelazado mecánico de las partículas atomizadas y la superficie del sustrato; por tanto, para una mejor adhesión, la superficie debe hacerse áspera como uno de los pasos de preparación. Una vez que el recubrimiento tapa por completo la superficie del sustrato, el material del recubrimiento se adhiere a sí mismo. Algunos metales que se aplican por aspersión forman uniones metalúrgicas con ciertos sustratos metálicos. El grosor del recubrimiento en la aspersión térmica generalmente es más grande comparado con otros procesos de deposición; este va de 0.05mm (0.002 in) a 2.5 mm (0.100 in).

Las primeras aplicaciones con este proceso fueron para reconstruir áreas gastadas en componentes de maquinaria usada y salvar partes de trabajo maquinadas a un tamaño menor al necesario. En estos momentos el área en la cual se aplica es en la manufactura logrando con esto resistencia contra la corrosión, protección contra las altas temperaturas, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica, resistencia eléctrica, recubrimiento ante la interferencia electromagnética, etc.

***REVESTIMIENTO DURO.** Es una técnica de recubrimiento en la cual se aplican aleaciones a los metales del sustrato como depósitos soldados. En el proceso ocurre una fusión entre el revestimiento y el sustrato, la cual da una gran ventaja para aplicaciones que requieren buena resistencia contra el desgaste. Las aplicaciones incluyen el recubrimiento de partes nuevas y la reparación de piezas usadas muy desgastadas, erosionadas o corroídas. Cabe mencionar que es un proceso que se realiza con gran facilidad y es relativamente controlado mediante muchos de los procesos de soldadura comunes.

Como técnica para soldadura, el revestimiento duro se une con cualquiera de los procesos de soldadura; soldadura con oxiacetileno, soldadura metálica con arco protegido, soldadura con arco sumergido, Soldadura TIG, Soldadura MIG, soldadura con plasma de arco, soldadura con rayo láser. La selección del proceso depende del tamaño de la piezas de

trabajo, el metal sustrato, el metal de recubrimiento, el grosor deseado y el costo. Algunos materiales para recubrimientos comunes son el acero y las aleaciones de hierro, las aleaciones basadas en cobalto y las aleaciones basadas en níquel. En general el espesor del recubrimiento está en el rango de 0.030 a 0.125 pulg., aunque son posibles grosores hasta de 3/8 de pulg.

*PROCESOS DE REVESTIMIENTO FLEXIBLE.

El proceso de revestimiento flexible es capaz de depositar un material muy duro, tal como el carburo de tungsteno (WC), en una superficie del sustrato, lo cual permite una dureza en el recubrimiento de hasta 70 RC.

El proceso consiste en colocar una tela impregnada con polvos cerámicos o metálicos duros y otra tela impregnada con una aleación de soldadura blanda sobre un sustrato, ambas se calientan para fundir los polvos sobre la superficie (Fig. 1.14). El grosor del recubrimiento generalmente está en el rango de 0.010 a 0.100 pulg. Además de los recubrimientos de Carburo de tungsteno, también se aplican aleaciones basadas en cobalto y aleaciones basadas en níquel. Las aplicaciones incluyen brocas de taladro para concreto, dientes de sierras de cadena, collarines de taladro en aceite, dados de extrusión, y en general partes que requieren buena resistencia contra el desgaste.

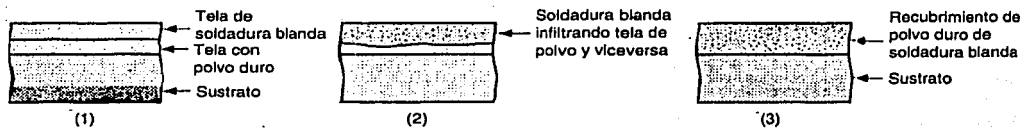


FIG. 1.14 Proceso de revestimiento flexible: 1) aplicación de tela que contiene polvos duros y tela que contiene aleación de soldadura blanda, 2) soldadura blanda y 3) recubrimiento terminado.

1.7.2 ALEADO MECÁNICO.

Es un proceso de recubrimiento que en lugar de utilizar energía térmica o química para realizar la deposición, utiliza energía mecánica para reconstruir el recubrimiento metálico sobre la superficie. En el proceso, se frota en un tambor las partes que se van a recubrir, junto con polvos metálicos para chapeado, gotas de vidrio y productos químicos especiales para promover la acción del recubrimiento. Conforme se frota la mezcla, la energía mecánica del tambor rotatorio se transmite a través de las perlas de vidrio para golpear los polvos metálicos contra la superficie de la parte, provocando una unión mecánica. Los metales depositados deben ser maleables para obtener una unión satisfactoria con el sustrato. Entre los metales para chapeado están el zinc, el cadmio, el estaño y el plomo. Las aplicaciones más comunes incluyen sujetadores tales como tornillos, pernos, tuercas y clavos. Normalmente el grosor del aleado mecánico varía de 0.0002 a 0.001 pulg.

CAPITULO II

GENERALIDADES DEL ALUMINIZADO

Los productos de acero recubierto por aluminio (aluminizado) podrían ser clasificados con respecto a la intención o fin de su servicio, de acuerdo a sus propiedades, a su comportamiento y en base a la economía que se obtiene gracias a la propiedad de protección contra la oxidación en la superficie.

Las propiedades del aluminizado son de gran beneficio para muchos productos que requieren buena resistencia a la corrosión, una buena apariencia de brillo, alta reflectividad y buena conductividad eléctrica. Para algunos productos, el comportamiento del compuesto o interfase que se genera entre el acero y el aluminio es favorable por la resistencia a la corrosión (oxidación), espesor de la capa, abrasión y resistencia a esfuerzos elevados. Otro aspecto que es importante son los bajos costos que genera el aluminizado en productos antioxidantes, ya que proporciona características importantes en propiedades mecánicas como lo son la formabilidad o soldabilidad del acero en piezas donde el acabado peculiar del aluminio puede ser aplicado.

Los métodos para realizar recubrimientos de aluminio son: inmersión en caliente por lotes o continua, difusión conjunta, procesos de mezcla, pulverización térmica, revestimiento, deposición química de vapor o de vacío, deposición de iones vapor, electrodeposición y electrofóresis. La manera en la que se determina el método para realizar el recubrimiento se basa en el uso que se requiera, así como el tamaño, la forma del producto, el volumen de la producción y el costo.

Dos puntos importantes para obtener de manera exitosa un buen recubrimiento son:

- I. Una correcta preparación de la superficie del material base (acero)
- II. En el caso de utilizar un proceso de alta temperatura, es importante el control de la formación y crecimiento del compuesto o fase intermetálica entre el aluminio y el acero.

A través de los muchos procesos que se tienen para preparar la superficie, el método a seleccionar debe remover la oxidación del metal base ya sea mecánicamente o químicamente y de igual manera es importante remover o absorber la humedad y el gas de la superficie del metal base.

Elementos como el silicio, antimonio, cromo, manganeso, dificultan el crecimiento y formación de la fase intermetálica mientras que el calcio y el estaño ayudan a incrementar su espesor.

2.1 APLICACIONES

Los productos de acero de bajo carbono que tienen un recubrimiento de aluminizado son usados de manera exitosa en ambientes corrosivos y oxidantes en los cuales los rangos de exposición de temperatura del medio pueden llegar hasta temperaturas cercanas a los 1150°C.

2.1.1 Exposición atmosférica

Algunas de las sustancias corrosivas que se encuentran en el medio ambiente y a los que están expuestos los productos aluminizados son:

- I. Altos contenidos de azufre en atmósferas industriales.
- II. Químicos de nitrato-fosfato, los cuales vienen de los fertilizantes o abonos en atmósferas rurales.
- III. Compuestos de sal utilizados para la remoción de hielo en calles o carreteras.
- IV. Ácidos orgánicos por desperdicios de comida.
- V. Ambientes marinos.

Ejemplos importantes que presenta el aluminizado expuesto a severos ambientes industriales tal como: estacas para jardinería, materiales corrugados para techos (láminas acanaladas) y edificios prefabricados de acero, han sido encontrados en perfectas condiciones después de 15 o 20 años. Sin embargo materiales galvanizados utilizados en las mismas aplicaciones han sido oxidados en menos de cuatro años.

En general estas aplicaciones exigen altos módulos de elasticidad del acero y resistencia a la corrosión del aluminio. La oxidación ataca principalmente puntos no recubiertos, bordes y esquinas, pero, usualmente el daño no es muy severo. La primera capa de óxido formada en discontinuidades del acero recubierto con aluminio, forma un producto de protección, el cual actúa como una barrera a una mayor corrosión y previene el ataque al metal base o el ataque interno al aluminio.

Ejemplos de aplicaciones exteriores de aceros de bajo carbono recubiertos con aluminio están dados en la Tabla 2.1.

TABLA 2.1. RECUBRIMIENTOS CON ALUMINIO EN ACEROS DE BAJO CARBONO CON APLICACIONES AL AIRE LIBRE.

APLICACIONES	MÉTODO DE RECUBRIMIENTO
<p>*FABRICACIÓN DE BARRAS, CINTAS O SUJETADORES.</p> <p>Sujeciones de tornillos para rejas de aluminio, postes de alumbrado, sujetadores para artículos fabricados de aluminio, estoperol que resiste altas temperaturas para plantas químicas y refinerías.</p>	<p>Aluminización por inmersión en caliente por lotes</p>
<p>*HOJAS O CINTAS</p> <p>Aire acondicionado para casas, toldos, revestimiento de paneles para edificios, pisos corrugados y revestimientos exteriores, conductos, cubiertas o adornos de pisos, señales exteriores, hojas exteriores del silenciador para tractores, revestimientos para la intemperie, soldadura en tubería para postes, componentes para tubos de escape automotrices.</p>	<p>Aluminización continua por inmersión en caliente (a)</p>
<p>*UNIONES SOLDADAS</p> <p>Implementos de la agricultura, secadora de ropa, armazón (cuerpo) para filtros de aire, cubierta (revestimiento) para horno.</p>	<p>Aluminización por inmersión en caliente por lotes o por rociado térmico.</p>
<p>*PRODUCTOS DE ALAMBRE</p> <p>1) Materiales para eslabones de cadena, alma para líneas de transmisión eléctrica de aluminio, alambre de púas. 2) Clavos</p>	<p>1) Aluminización continua por inmersión en caliente 2) Aluminización por inmersión en caliente por lotes</p>
<p>Nota: a) La deposición de vapor es utilizada cuando el acero tiene un espesor menor de 0.378 mm.</p>	

Los remaches de acero recubiertos con aluminio pueden ser utilizados para mantener la apariencia y la integridad estructural de las uniones. Es recomendado para utilizar en ambientes de condensación continua o de inmersión en líquidos, grandes recubrimientos de aluminio entre 230 a 380 μm de espesor. Espesores mas delgados conducirían a un ataque, el cual perfora el recubrimiento y corroe el metal base. Una excepción son los recubrimientos de aluminio aplicados por el proceso de deposición iónica de vapor, con el cual 25 μm es suficiente para evitar la corrosión.

2.1.2 Exposición a altas temperaturas.

Una aplicación exitosa del recubrimiento de aluminio para la resistencia a la corrosión a elevadas temperaturas depende de las propiedades físicas y mecánicas de la unión química que existe entre el aluminio y el acero. Recientemente los aceros de bajo contenido de carbono, aleados con titanio o columbio, microaleados, han sido utilizados para ofrecer mejoras en resistencia al desplazamiento a altas temperaturas cuando es usado como sustrato en recubrimientos con aluminio.

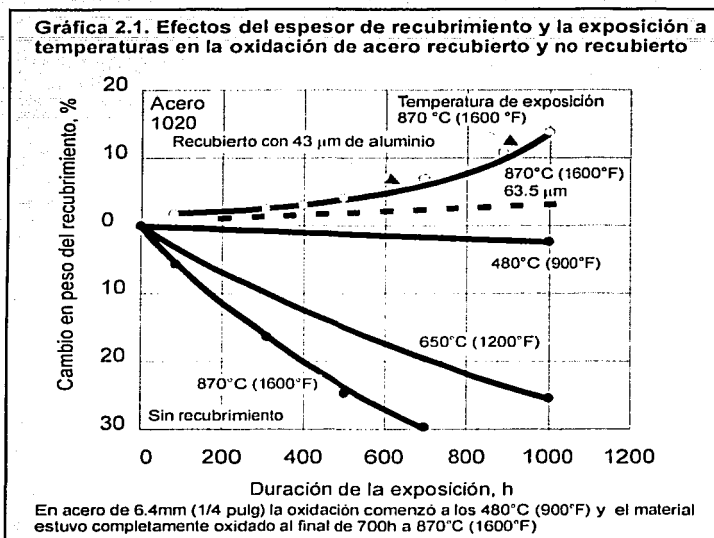
El aluminio que contiene de 5% a 11% de silicio aplicado a una hoja de acero, minimiza el espesor de la capa intermetálica y la hace homogénea. Sin difusión, este recubrimiento tiene una excelente reflectividad calorífica a temperatura de 480 ° C.

Arriba de los 480°C ocurren en mayor medida aleaciones entre el recubrimiento de aluminio y el acero base. Debido a que la velocidad de unión depende del tiempo y la temperatura, todo el recubrimiento se convierte en una combinación de hierro, aluminio y silicio con suficiente tiempo y temperatura. El compuesto refractario formado es extremadamente resistente al calor y no tiende a separarse hasta 680° C. Esta tendencia a separarse a temperaturas de servicio arriba de 680° C es superada en un nuevo acero aluminizado resistente al calor con suficiente titanio para estabilizar el carbono y el nitrógeno tan bien que mantiene el exceso de titanio en solución.

Un acero aluminizado y posteriormente tratado térmicamente para difundir el aluminio en el acero, elimina la tendencia a separarse y produce un recubrimiento protector durante el servicio a altas temperaturas.

El uso de aluminio como recubrimiento de aceros al carbono para instalaciones complejas de tratamientos térmicos sujetas a temperaturas por debajo de los 870°C puede disminuir el costo sobre todo de instalaciones para la misma aplicación comparado con aquellas hechas de Aceros inoxidables austeníticos altamente aleados.

La gráfica 2.1 muestra los efectos del espesor del recubrimiento y la temperatura de operación sobre la resistencia de oxidación para aceros 1020 tratados térmicamente, recubiertos y no recubiertos.



El acero aluminizado ofrece una gran resistencia al ataque de ácido sulfhídrico como lo hace el acero inoxidable sólido. Pero, según estudios, el acero aluminizado es 100 veces más resistente a este ataque que el acero inoxidable a 595° C. Otro dato es que el acero aluminizado es 25 veces más resistente que el acero al cromo. El gran incremento en el uso de recubrimientos de aluminio, ya sea con difusión o sin ella, ha ocurrido en aplicaciones de ultra altas temperaturas para componentes automotrices y de aviación, tales como aspas, y álabes de turbina que resisten la oxidación, erosión y choque térmico entre 815 y 925 ° C, válvulas de admisión y de escape para resistir la oxidación y corrosión de los productos de la combustión a 760° C.

Pueden ocurrir problemas con partes soldadas de acero aluminizado. En sí, la unión no es generalmente el problema, pero la aleación de aluminio y acero puede crear una pérdida en ductilidad y reducción de la resistencia a la corrosión en la soldadura y en la zona afectada por el calor.

2.1.3 Fabricación y acabados

El acero aluminizado puede ser procesado, ya sea por trabajo en frío o por conformado, aunque como se indicó, se requiere tomar en cuenta cuidados en el rango o porcentaje de deformación y en la selección de lubricante, para evitar dañar el recubrimiento.

El acero aluminizado puede ser unido mediante cualquier método convencional de soldadura o método mecánico. En comparación con el acero sin recubrimiento, durante la soldadura de acero aluminizado, existe una reducción en la vida del electrodo, debido a la solubilidad del electrodo de cobre en el aluminio, pero a diferencia del acero galvanizado, no se crea el problema de la existencia de vapores o gases tóxicos. El recubrimiento cercano a una soldadura sufrirá cierto daño, pero como la soldadura tendrá en si misma aluminio disuelto del recubrimiento, su resistencia a la corrosión se incrementará. Así mismo el acero aluminizado puede ser pintado para mejorar su apariencia, sin la necesidad de un tratamiento previo o de la aplicación del "primer".

El acero aluminizado encuentra muchas aplicaciones en donde se requieren propiedades de gran resistencia a la corrosión ambiental y a altas temperaturas. A continuación se presentan algunos ejemplos de estas aplicaciones.

1) Sistema de escape automotriz.

La combinación de altas temperaturas y un ambiente de condensación ácida que se encuentran en los sistemas de escape, pueden traer consigo fallas en los sistemas convencionales. En los sistemas de acero aluminizado, en contraste, el promedio de vida ha sido aumentado, según un estudio realizado en los Estados Unidos hasta hace aproximadamente de 5 años. Esto se puede observar en la siguiente figura.

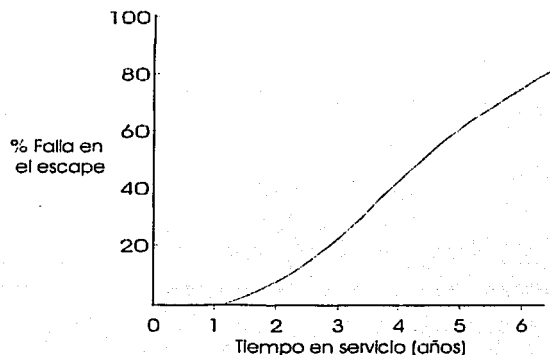


Fig. 2.1 Durabilidad del Acero aluminizado en vehículos motorizados

Incluso en el Reino Unido, se están reemplazando los sistemas de escape (fig. 2.2) como una alternativa contra el tiempo de servicio de los sistemas convencionales, y el alto costo de los sistemas de acero inoxidable.

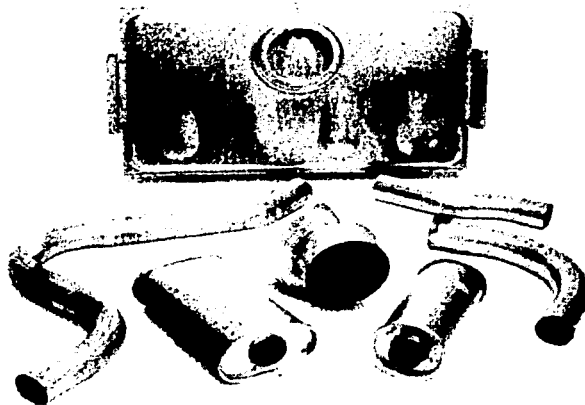


Fig. 2.2 Sistema de escape automotriz e intercambiador de calor hecho con acero aluminizado.

2) Intercambiadores de Calor.

Desde hace algunos años, la mayoría de los sistemas de gas en el mercado Británico, contienen quemadores e intercambiadores de calor contruidos con acero aluminizado. En estos sistemas la temperatura puede alcanzar los 500°C y ocasionalmente se pueden producir condensaciones ácidas. Bajo estas condiciones el acero aluminizado se ha comportado de manera aceptable a un costo bajo.

3) Aplicaciones Externas

Un recubrimiento de aluminio grueso es deseable cuando se requiere resistencia a un ambiente corrosivo con temperatura alta. Algunas aplicaciones típicas se dan en la construcción de casas prefabricadas y para la retención de capas aislantes en tuberías de la industria petroquímica.

En este último caso el acero aluminizado mantiene aislado al material rodeado de fluidos y gases calientes. En esta industria las especificaciones de ingeniería demandan la provisión de una envoltura que dure al menos 10 años. El acero galvanizado tiende a tener un tiempo de vida de solamente tres a cuatro años en un ambiente petroquímico. El aislamiento con envolturas de acero inoxidable es bastante caro mientras que el aislamiento con aluminio (fig. 2.3) tiene menor resistencia mecánica y es entonces más probable un accidente por

impacto. Una ventaja adicional del acero aluminizado en comparación con el acero galvanizado es la ausencia de ataque intergranular al acero por recubrimiento fundido, en el caso de un incendio.



Fig. 2.3 Acero aluminizado utilizado como envoltura para aislar tuberías en una refinería de petróleo.

El acero aluminizado ha mostrado un excelente comportamiento en aplicaciones de la construcción por algunos años (fig. 2.4). Es necesario enfatizar que su comportamiento difiere del acero galvanizado. Las secciones de techos y paredes de acero galvanizado muestran oxidación cuando no existe zinc suficiente para proveer protección de sacrificio. Esto señala el comienzo de un rápido ataque en el acero base.

En el caso del acero aluminizado, el cual en la mayoría de los ambientes no da protección de sacrificio, la oxidación se presenta inicialmente en bordes o discontinuidades del recubrimiento. Esto no indica el inicio de un rápido ataque, por el contrario, este manchado por el óxido probablemente será menos pronunciado con el tiempo, debido a que el acero expuesto queda protegido por tapones de productos férricos de la corrosión. Es únicamente cuando se mantiene una película continua de agua sobre la superficie aluminizada que ocurre un ataque progresivo. Esta condición se describe generalmente como "estancamiento".(1)

El acero aluminizado es un material para la industria muy útil, para aplicaciones donde se requiere resistencia a la corrosión. Es capaz de proveer de un alto grado de protección contra la corrosión a un costo similar al del acero galvanizado.

(1). Metals Handbook, 9ª. Edición 1982. Vol 5. Surface Cleaning, Finishing and Coating.



Fig. 2.4 Granero con techo y paredes laterales de acero aluminizado.

2.2 ALUMINIZACIÓN CONTINUA POR INMERSIÓN EN CALIENTE DE PRODUCTOS MAQUINADOS.

Existen varios procesos para poder aluminizar de forma continua tanto alambre como placas planas de acero. El método Sendzimir es el mas utilizado en la producción de lámina, y consiste en oxidar la superficie del acero, reducir el óxido en una atmósfera reductora, y sumergir el acero en aluminio fundido. Este procedimiento acelera la adhesión y la formación de aleaciones entre el aluminio y el hierro. El uso de un horno de fuego directo, en lugar de un horno que oxida la superficie ofrece beneficios substanciales en el aumento de la producción, reducción del diámetro del rollo de recolección , y la posibilidad de mantener una presión positiva dentro de la línea de horneado, lo cual previene que el aire se introduzca en la atmósfera del horno. Los productos de la combustión de horno de flama directa son mantenidos con un exceso ligero de combustible, asegurando una fácil limpieza de aceite y cenizas de las superficies oxidadas del alambre de suministro.

Otros procesos están también basados en utilizar una atmósfera reductora, pero sin una oxidación preliminar del alambre; en un sentido burdo, la atmósfera reductora se puede considerar como un flujo gaseoso.

El proceso Lundin, utiliza flujos acuosos que son aplicados al alambre antes de la inmersión en aluminio. Esto elimina la necesidad de una atmósfera reductora. En este proceso se requiere adecuar ciertos ductos para remover humos de sales corrosivas de la superficie del recubrimiento. Estos humos son llevados a través de sistemas de lavado hacia afuera.

2.2.1 Procedimientos y Control.

La mayoría de los alambres de acero aluminizado comerciales son producidos en equipos de inmersión ligado a un proceso de recocido continuo, que son muy similares a los utilizados para el galvanizado. El proceso consiste esencialmente en tres operaciones: Preparación de la superficie, tratamiento térmico del acero base, y recubrimiento de aluminio.

La preparación de la superficie es una operación con dos fases. En la primera, se remueven todas las manchas de la superficie así como la oxidación por medio de una limpieza química. Después, la superficie oxidada es reducida en una atmósfera especial, lo cual prepara al alambre para el recubrimiento.

Debido a que la reacción entre el aluminio y el hierro es muy rápida, el tiempo de inmersión, la temperatura del aluminio fundido y la temperatura del alambre antes y después de la inmersión deben ser controladas para prevenir la formación de una interfase hierro-aluminio.

A menos que una capa casi nula separe el recubrimiento aleado y el metal base, la cantidad de hierro en el recubrimiento aleado crecerá al mismo tiempo que el aluminio difunde en el metal base.

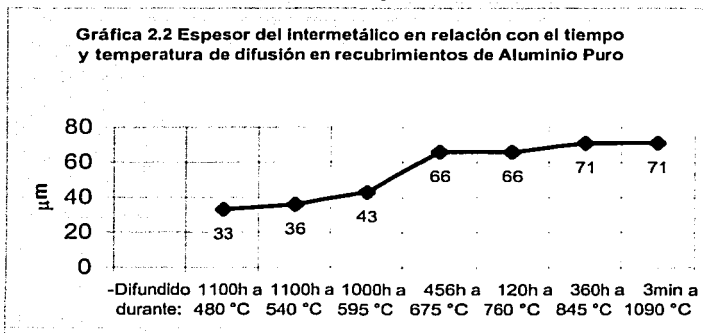
La cantidad de una interfase frágil en la capa intermetálica puede ser alterada también por medio de la adición de silicio en el baño del recubrimiento. En la tabla siguiente (Tabla 2.2) se muestra como esto incrementa aparentemente la ductilidad del recubrimiento, permitiendo que en la producción de lámina no exista un “descascare” del recubrimiento.

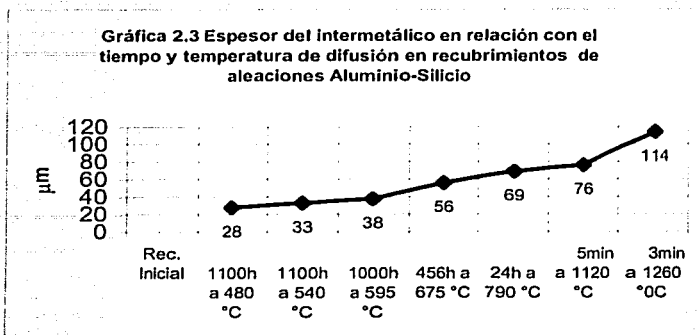
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TABLA 2.2. EFECTO DEL SILICIO Y DE LOS TRATAMIENTOS DE DIFUSIÓN EN EL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

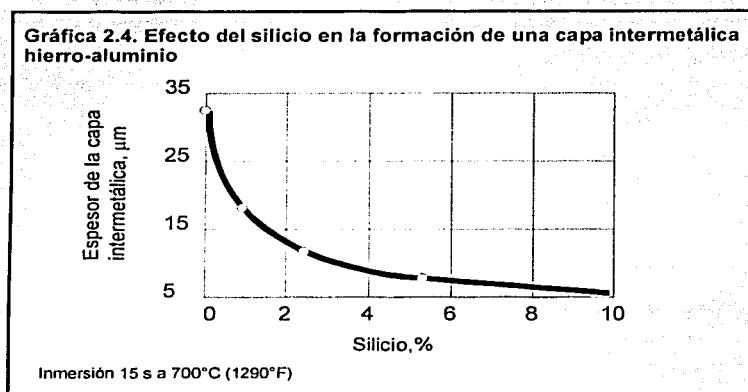
CONDICIÓN	CAPA DE INTERMETÁLICO		RECUBRIMIENTO TOTAL	
	μm	Pulg $\times 10^{-3}$	μm	Pulg $\times 10^{-3}$
*RECUBRIMIENTO DE ALUMINIO PURO (a)				
-Con recubrimiento	23	0.9	51	2.0
-Difundido durante:				
1100h a 480 °C	33	1.3	51	2.0
1100h a 540 °C	36	1.4	51	2.0
1000h a 595 °C	43	1.7	51	3.0
456h a 675 °C	66	2.6	66	2.6
120h a 760 °C	66	2.6	66	2.6
360h a 845 °C	71	2.8	71	2.8
3min a 1090 °C	71	2.8	71	2.8
*RECUBRIMIENTO CON ALEACIONES DE ALUMINIO-SILICIO (b)				
-Con recubrimiento	8	0.3	28	1.1
-Difundido durante:				
1100h a 480 °C	28	1.1	30	1.2
1100h a 540 °C	33	1.3	33	1.3
1000h a 595 °C	38	1.5	38	1.5
456h a 675 °C	56	2.2	56	2.2
24h a 790 °C	69	2.7	69	2.7
5min a 1120 °C	76	3.0	76	3.0
3min a 1260 °C	114	4.5	114	4.5
Nota:				
a) Peso del recubrimiento 0.3 kg/m ² .				
b) Peso del recubrimiento 0.15 kg/m ² , aleación que contiene 9% de silicio.				

En la gráfica 2.2 y 2.3 basadas en la tabla anterior, se puede observar en la relación del espesor del intermetálico con el tiempo y la temperatura de difusión.





Así mismo en la gráfica 2.4 se muestra una rápida disminución en el espesor de la capa intermetálica proporcionalmente al incremento del contenido de silicio.



2.2.2 Equipo para Aluminización continua.

El equipo para una línea continua de aluminizado por inmersión en caliente consiste en una sección de alimentación, una sección de horneado y una sección de entrega. En la sección de alimentación, el equipo desenrolla el alambre suministrado y lo alimenta a velocidad constante bajo una tensión específica a la línea de recubrimiento. La sección de horneado contiene un horno de precalentamiento o de oxidación, un horno de templado, un crisol de recubrimiento y un horno de enfriamiento. Si se utiliza una limpieza química, el limpiador alcalino y el tanque de enjuague con agua son sustituidos por el horno de precalentamiento. El horno de enfriamiento está conectado directamente con el horno de templado y se extiende hacia el baño de recubrimiento con su salida sellada que significa

un ducto extendido hacia el baño de aluminio fundido. Una atmósfera seca reductora de hidrógeno y nitrógeno se mantiene durante el templado y el enfriamiento. La sección de entrega está equipada para proveer un rápido enfriamiento y el tiempo suficiente para la unión del recubrimiento antes de que el alambre toque el rodillo de soporte. Los rodillos de tracción y el equipamiento para recolectar, el rodillo de nivelación y el equipo de enrollado están todos dentro de la sección de entrega.

2.2.3 Efecto del recubrimiento en la resistencia y la maquinabilidad.

Por diferentes razones, la resistencia de las placas y cables de acero recubiertos con aluminio decrece porque normalmente es recocido antes de ser recubierto para mejorar su maquinabilidad.

La resistencia del alambre disminuye como resultado de la alta temperatura, que es mayor a 650 °C del baño de recubrimiento en caliente.

La hoja de acero recubierta con aleación de aluminio-silicio presenta cierta moldeabilidad sin descarapelarse o pelarse el recubrimiento. La hoja de acero con un recubrimiento de aluminio puro resiste moderadas operaciones de laminación, al igual que puede ser extruido o bien repujado. Una hoja con cualquier tipo de recubrimiento puede dársele una vuelta de 180° a través de un diámetro igual a dos veces el espesor del material; como sea, en cualquier operación de formado, es conveniente permitir liberar el radio para prevenir un disparo o botadura del recubrimiento.

Debido a que los bordes de cizalladura son susceptibles a la corrosión, el uso de la hoja con recubrimiento de aluminio para fabricar ensambles puede ser limitado por consideraciones de su apariencia. La protección para la corrosión no es dañada, porque no hay desgarre del recubrimiento.

La hoja de recubrimiento debería ser fabricada antes de efectuar la difusión, ya que ésta convierte el recubrimiento en un compuesto de Fe-Al, el cual es muy quebradizo.

2.2.4 Aplicaciones típicas

Una gran variedad de productos industriales, agrícolas y productos terminados son fabricados de láminas de acero recubiertas con aluminio. Los siguientes productos requieren resistencia a la corrosión y oxidación a temperaturas que van de los 95 a 680 °C son: cámaras de combustión y su revestimiento, secadores de grano, escapes de automóviles, (radiadores), tubos de caldera, interiores de hornos, asadores y elementos para calentadores de agua.

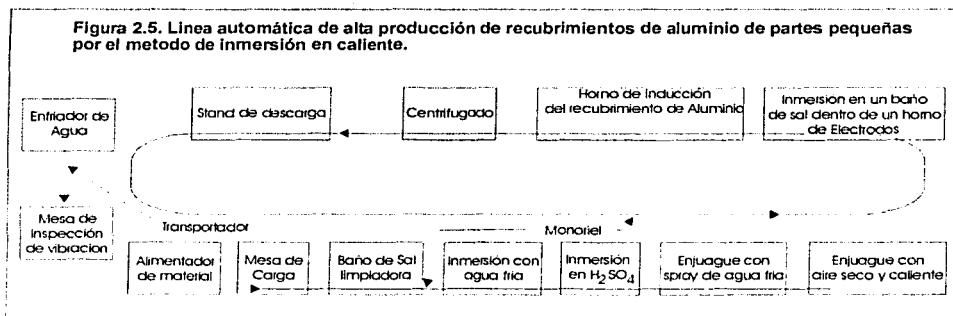
La fabricación de todos estos productos requieren de moderada formabilidad, conformado, punzonado o troquelado, y soldadura por puntos.

2.3 ALUMINIZACION POR INMERSION EN CALIENTE DE PIEZAS EN LOTES.

La adhesión de polvo a la superficie de las piezas es eliminada por medio de un baño alcalino caliente y un enjuague con agua. Las piezas de acero son después limpiadas mediante una chorro abrasivo, enjuagadas y secadas. Las piezas de hierro gris o hierro maleable son además limpiadas en sal fundida para limpiar residuos de carbono. Para recubrir piezas con el método desoxidante de sal fundida, se utiliza un horno eléctrico de desoxidación, el cual es usado en conjunto con el horno de recubrimiento. El horno desoxidante es alineado con un refractario cerámico poroso, como "mullita" aislado con otro refractario poroso de dióxido de silicio rodeado de una coraza de acero. El refractario de revestimiento debe ser compatible tanto con el aluminio y con las sales haloides (cloruros, yoduros y bromuros) de sodio y potasio, a temperaturas arriba de 790°C. El horno desoxidante contiene aluminio para mantener la sal del baño. El horno de recubrimiento es preferentemente un horno de inducción de baja frecuencia, con un recubrimiento fundido. Para prevenir la oxidación, una capa de sal fundida de 25 a 75 mm (1 a 3 pulg) debe estar sobre el aluminio fundido. Un refractario de acero para fundición puede ser usado para el horno de recubrimiento, pero el refractario debe ser recubierto con un lavado de óxido de hierro, dióxido de titanio en un silicato aglutinante para prevenir el ataque del aluminio fundido.

2.3.1 Procedimientos y Control.

Un ejemplo de una línea automática de transportación para alta producción de lotes por inmersión en caliente para piezas pequeñas pueden ser la mostrada en la Fig.2.1



El procedimiento consiste en limpieza, precalentamiento, desoxidación y recubrimiento. En el proceso de limpieza de las piezas la capacidad máxima es de hasta 113 Kg., en un recipiente y sumergidas en sal reductora a temperatura de 540°C entre 20 y 25 minutos. Las partes son sumergidas en agua fría para enjuagar, después son bañadas en una solución de 8 a 10% de H₂SO₄ (ácido sulfúrico) a 70°C. A las piezas se les aplica mediante un aspersor

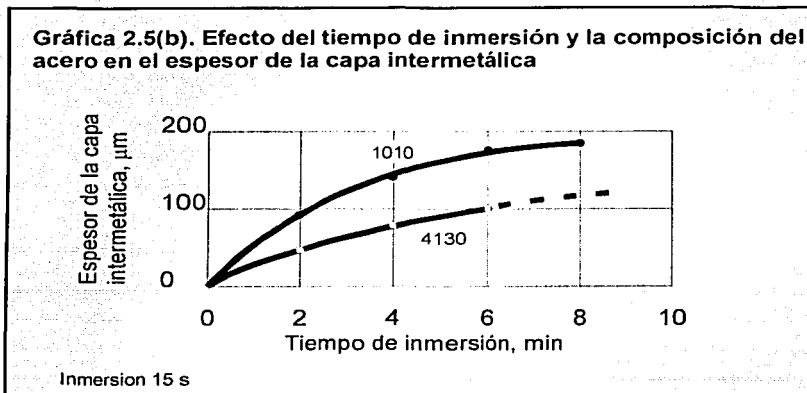
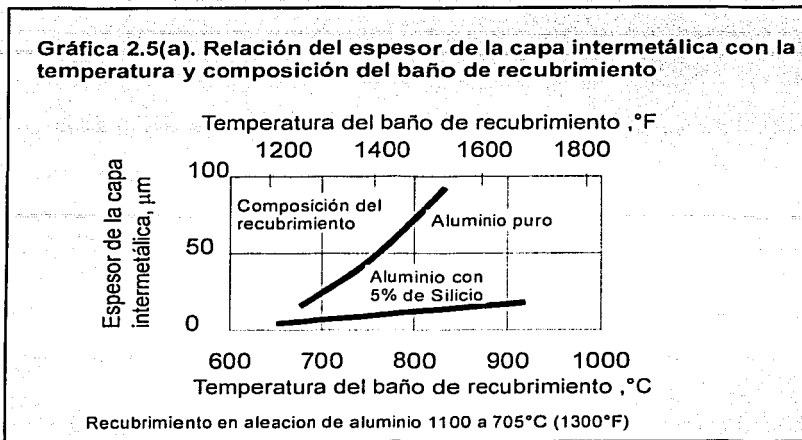
agua fría y después se sumergen en agua para enjuague, y son secadas en flujo de aire caliente.

En el procedimiento de precalentamiento y desoxidación, un recipiente es cargado con piezas limpiadas previamente (entre 9 y 18 Kg.). Las piezas son sumergidas en una mezcla de sales fundidas (40%NaCl, 40%KCl, 10%AlF₃, 10%Na₃AlF₆) durante 8 a 15 minutos a 705°C. El recipiente está en constante movimiento durante el precalentamiento, la desoxidación y el recubrimiento, para remover el aire atrapado y para desoxidar todas las superficies de las piezas a fondo. El recipiente de las piezas avanza al proceso de recubrimiento donde se colocan las piezas en el aluminio fundido a 700°C por 1 a 2 1/2 minutos. El exceso de aluminio es removido de las piezas mediante un centrifugado, aire a chorro o mediante una sacudida. Después el recipiente es vaciado, y las piezas son enfriadas en agua entre 70°C y 80°C, después son secadas con aire e inspeccionadas.

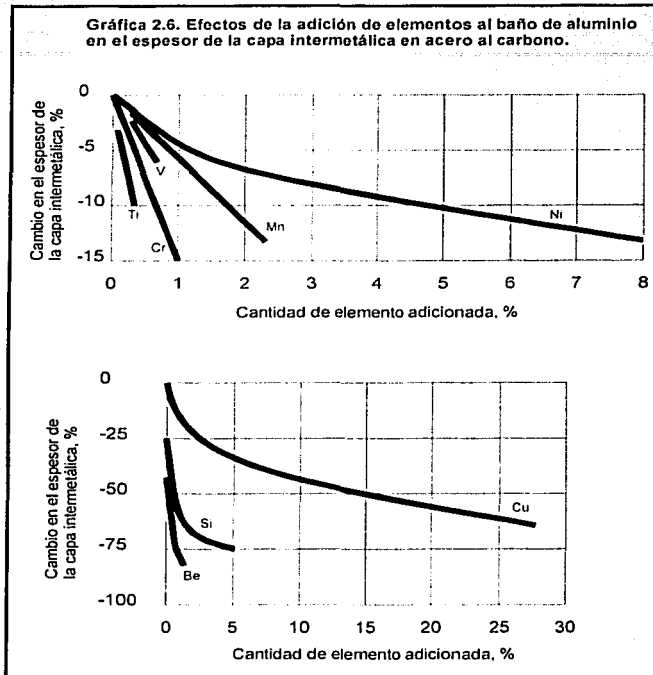
En otros procesos de recubrimientos, las operaciones de desoxidación y limpieza son eliminadas. Las piezas son golpeadas con arenas abrasivas, y sumergidas directamente en el aluminio fundido. La superficie del baño es limpiada de nata, antes y después de la inmersión. A pesar que el proceso es controlado cuidadosamente, tiene desventajas en que: el calentamiento de las piezas a temperaturas cercanas a la de inmersión, produce una capa mucho mas grande de aleación intermetálica, y la disolución de hierro adicional en el baño.

Un contenido de Fe en exceso de 2% puede producir un recubrimiento áspero. El contenido de hierro en el baño puede ser controlado en parte, reduciendo la temperatura del baño. A bajas temperaturas, el aluminio con alto contenido de hierro se vuelve sumamente blando y se concentra alrededor y en las esquinas del crisol, de donde puede ser removido rápidamente. Otro método para reducir la cantidad de hierro es remover parte del baño y añadir aluminio libre de hierro.

Controlar la temperatura de la fundición es muy importante, ya que como se indica en la gráfica 2.5(a), a mayores temperaturas se incrementa el espesor de la capa intermetálica y disminuye el espesor del recubrimiento de aluminio. Un amplio rango de temperaturas puede ser aceptado cuando el aluminio contiene un 5% de silicio. El tiempo de inmersión debe ser estrictamente controlado ya que el espesor de la capa intermetálica aumenta proporcionalmente con el tiempo (gráfica 2.5(b)). La capa de aluminio puro no se ve afectada, debido a que su espesor depende de la viscosidad del aluminio y de la velocidad con la que la pieza es sumergida en el baño. Gráficas 2.5(a) y 2.5(b)



Otras dos variables que afectan el espesor del recubrimiento son: la composición que tiene el acero y la composición del baño de recubrimiento del aluminio. Tal como se indica en la gráfica 2.5(b), los aceros con alto contenido de carbono y que contengan otro tipo de elementos aleantes, generan espesores de recubrimiento más pequeños. La Gráfica 2.6 muestra los efectos de varios elementos que son agregados al baño de aluminizado y que generan ciertas características importantes en el espesor del intermetálico formado sobre la cara externa del acero al carbono. Estos datos obtenidos experimentalmente, indican que el silicio y el berilio tienen un efecto muy importante, el cual es impedir el crecimiento de la capa de intermetálico.



2.3.2 Limitaciones

Las partes muy pequeñas con hilos finos son consideradas imprácticas para aplicar en ellas el proceso de recubrimiento en caliente. De igual forma se presenta en piezas con cavidades considerables, ya que estos pueden provocar ciertos contratiempos en el proceso del baño. Los recubrimientos continuos y uniformes son difíciles de producir sobre piezas con configuraciones complicadas envolviendo hoyos escondidos o ciegos y ángulos en los cuales el aire puede ser atrapado.

Partes muy delgadas y largas de secciones transversales delgadas pueden deformarse a temperaturas de recubrimiento de 660 a 720°C.

Tales partes deben estar bien soportadas o inmersas en una posición vertical para minimizar las deformaciones; sin embargo, algo de deformación puede ocurrir, como un resultado del efecto de eliminación de esfuerzos generados por la temperatura del baño. El uso de bajas temperaturas en la aleación de aluminio-silicio puede ayudar a minimizar las deformaciones.

La resistencia de las piezas que son recubiertas (especialmente las que son hechas con material trabajado en frío) pueden ser reducida por la operación de recubrimiento. En ciertas instancias, esta condición puede ser reducida o aliviada, utilizando un material de alta resistencia. (ver Tabla 2.3).

TABLA 2.3. VALORES DE DUREZAS DE LOS MATERIALES BASE ANTES Y DESPUÉS DEL RECUBRIMIENTO POR INMERSIÓN EN CALIENTE

Metal base	Tiempo de inmersión (min)	Temperatura de Recubrimiento		Dureza HRC	
		° C	° F	Antes	Después
4140	5	720	1330	32-36	29-32
4340	5	720	1330	32-36	29-32
410 inoxidable	4	715	1320	40-42	28-30
17-22AS	6	705	1300	46-48	40-41
17-7PH (a)	5	705	1300	24-25	28-37(b)
17-7PH (a)	5	705	1300	42-44	31-34(c)
17-7PH (a)	5	705	1300	38-40	27-29(c)
Acero para herrats.	5	715	1320	50-55	40-45
Acero para herrats.	4	705	1300	55-60	45-40
Hierro fundido	5	720	1330	32	32

(a) La dureza del acero depende de los tratamientos inicial y final, (b) Incremento en la dureza debido al envejecimiento a la temperatura de inmersión y al horno de envejecimiento a 510°C por 1 ½ h. (c) Decremento de la dureza causado por el efecto de liberación de esfuerzos de la operación de inmersión en caliente en los aceros endurecibles por precipitación.

La composición del acero no limita el proceso de recubrimiento en caliente. La elección del acero depende de la resistencia y del servicio para los cuales sea requerido. La aplicación del recubrimiento de aluminio por inmersión en caliente puede ser mucho más costosa que la utilización de otros metales. Esto ocurre debido: a) el material base requiere una limpieza minuciosa, b) es necesario mayor temperatura para el recubrimiento (alrededor de los 700°C) y c) Debe utilizarse electricidad para calentar el crisol de cerámica. El costo total puede ser disminuido si se utiliza un crisol de acero, calentado por gas o aceite, pero los crisoles de cerámica son preferibles para este proceso.

2.4 ALTA PRODUCCIÓN DE PIEZAS RECUBIERTAS

Las válvulas de vástago automotrices, álabes y aspas de las toberas para turbinas de gas, cerrojos y juntas utilizados en ensambles de aluminio, son ejemplos de la alta producción de piezas que son recubiertas con aluminio.

2.4.1 Piezas Fundidas

En contraste con la complejidad de la alta línea de producción para sujetadores y complicadas piezas pequeñas (Fig. 2.1), se tiene el procedimiento para recubrimiento extenso de fundiciones, utilizado en la fabricación de contenedores de carga de aluminio. Estas piezas fundidas son hechas de un acero al medio carbono, con un peso aproximado de 14 Kg.

El procedimiento para el recubrimiento de aluminio de una corrida de 12000 de estas piezas se efectúa como se describe a continuación.

INSPECCIÓN. Al ingresar las piezas son inspeccionadas visualmente buscando imperfecciones (defectos). Si se presentan cavidades, una de estas es utilizada para medir su tamaño. Porque el producto final debe acoplarse con otra pieza de acero, el tamaño de la pieza y la acumulación del exceso de aluminio son críticos.

LIMPIEZA. Las fundiciones son horneadas en lotes a 200°C por 5 horas, para remover la grasa y los gases contaminantes; después se limpia el acero mediante un chorro de arena (con una malla del No. 25 al 40).

ACOMODO. Las fundiciones son manejadas con guantes de algodón para prevenir daño a la superficie durante el acomodo. Las piezas deben ser colocadas de cierta manera en que no deben desarrollarse bolsas de aire durante la inmersión dentro del aluminio fundido. Una bolsa de aire causa oxidación de la superficie ferrosa del metal e interfiere con el recubrimiento.

INMERSIÓN. Cada rack contiene 30 piezas, este es sumergido dentro del aluminio fundido (99.5%) a 720° C durante 12 min. El hierro y silicio contenidos dentro del baño son cambiados semanalmente. Cuando el total de los dos excede el 3%, se agrega aluminio que no esté contaminado para reducir la concentración de hierro y silicio o bien el lugar del baño es raspado (o limpiado) y se recarga nuevamente de aleación limpia.

LIMPIEZA. Inmediatamente después de extraer la pieza del aluminio fundido, el rack se sacude y las piezas se chorrean con aire para remover el exceso de aluminio.

INSPECCIÓN. Cada pieza es inspeccionada para asegurar que sea adecuada de acuerdo a los regímenes establecidos.

2.4.2 Álabes y aspas de turbina.

Estas piezas, son hechas generalmente de superaleaciones (Ni-Co) para utilizarse a temperaturas que van de los 700 a 1100°C. Las piezas pueden ser recubiertas satisfactoriamente o impregnadas con aluminio por: Método de mezcla, difusión en lote, inmersión en caliente y difusión. En realidad el proceso mas utilizado es el de recubrimiento en caliente, debido a que con este proceso se obtiene una capa delgada en una aleación delgada, logrando una óptima resistencia a los choques térmicos y a la corrosión.

A continuación se presentan los pasos básicos de los métodos de recubrimiento de inmersión en caliente y difusión, para recubrir álabes y aspas de turbinas.

- Preparación de la superficie
 - Inmersión en una mezcla cáustica a 500°C por 15 min.
 - Chorro de agua a 80°C de 2 a 3 min.
 - Chorro de arena a 690 kPa (100 psi) de presión.
- Recubrimiento de aluminio
 - Inmersión en un baño de sal fundida a 720°C de 3 a 5 min. (Esta sal debe ser mantenida sobre el aluminio fundido para activarlo)
 - Inmersión en el baño de aluminio a 700°C de 3 a 10 seg.
 - Enjuagar, después aire a chorro o centrifugado y lavado en agua.
 - Meter en una solución de HNO₃ al 25% a 21°C, para dar mas brillo y limpiar la superficie.
 - Inmersión en una solución del HCl del 10 al 12% de 65 a 75°C, cuando el Al deba ser removido.
 - Lavar en agua a 100°C y secar.
- Tratamiento térmico por difusión
 - Preparar la temperatura del horno.
 - Difundir de 1090 a 1150° C por 2 hr. a temperatura en aire, argón, helio o en un generador endotérmico de gas.
 - Enfriar lentamente en el horno por debajo de los 760° C.

La limpieza final de los álabes tratados térmicamente es necesaria sólo si estos serán teñidos con un aceite fluorescente penetrante para inspeccionarlos.

Un chorro de arena húmeda es recomendable para remover el óxido que se forma previo a cada inspección.

CAPITULO III

METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL ALUMINIZADO Y PRUEBAS

3.1 PROCESO EXPERIMENTAL

Para poder caracterizar el recubrimiento de aluminio se llevó a cabo un control en el proceso de generación del aluminizado, controlando variables como temperaturas, tiempos, reactivos, así como procesos de limpieza y activación de la superficie.

Para la calidad del material a recubrir se decidió utilizar un Acero al carbono 1018 norma SAE y con una calidad comercial promedio producida por AHMSA. A continuación se presentan las características del acero:

Composición Química (proporcionada por el fabricante):

C – 0.18%
Si – 0.25%
Mn – 0.75%

Dureza.

El Acero empleado tiene una dureza Brinell promedio de 206 proporcionada por el fabricante con una equivalencia en Rockwell B de 96, Rockwell C de 18 y Vickers de 200 , que comparada con la tomada en el laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería de 195 Vickers no está muy lejos.

El aluminio utilizado en el proceso es tipo 1100 norma AA (Alluminum Association Standarized System) y tiene las siguientes características:

Composición química:

99% Aluminio puro.

Dureza.

El aluminio tiene una microdureza de 29 Vickers (tomada en el laboratorio de pruebas mecánicas de la Facultad de Ingeniería).

Limpieza

Los reactivos utilizados en el proceso de limpieza y preparación del aluminizado son:

- Percloroetileno
 - Ácido Clorhídrico al 10%
 - Tiourea
 - Cloruro de Zinc
 - Cloruro de Amonio
- Así como agua destilada.

3.1.1 EQUIPO EMPLEADO

- Horno de Crisol. El horno utilizado es marca SIEMENS y trabaja por medio de un motor monofásico tipo IRT-3252-2YC3 de 127 voltios y 7.2 amperes, que gira con una velocidad de 3489 revoluciones por minuto, alcanzando una temperatura máxima de 800°C y que inyecta a la cámara de combustión una mezcla de gas LP y aire para lograr el calentamiento de ésta.
- 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 por medio de resistencias eléctricas, una temperatura máxima de 1371°C y regula la temperatura por medio de un control trifásico de 220 voltios, además cuenta con un sistema de atmósfera controlada a base de Argón.
- Horno eléctrico #2. Para difundir el aluminio y realizar el recocido se utilizó un horno marca CONSTRUCTORA DE APARATOS INDUSTRIALES (CAISA), modelo 12BMPCH que utiliza un voltaje de 220 voltios y de una fase, cuenta con control de temperatura y realiza el calentamiento a base de resistencias eléctricas, alcanzando una temperatura de 1350°C como máxima.
- Laminadora. El equipo empleado fue un laminador dúo marca HILLE con capacidad de carga de 30 toneladas, donde además se puede controlar la velocidad de laminación y el porcentaje de deformación.
- 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 y una pistola de aire caliente.

3.1.2 PRODUCCIÓN DEL MATERIAL

La calidad del material recubierto depende directamente de la preparación que se le da al acero, la cual se explica a continuación en forma detallada.

La primera etapa consiste en cortar la placa de acero en diferentes probetas, que deberán poseer las dimensiones requeridas para que se facilite su manejo al momento de ser introducidas al baño, por lo que las probetas fueron cortadas en tramos de 26x90 mm.

La siguiente etapa consistió en realizar un proceso de limpieza a las probetas, iniciando con una limpieza mecánica por medio del esmeril, tratando de eliminar las impurezas superficiales, y dejando 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 cada probeta durante 10 minutos en una tina que contiene percloroetileno al 100% y que elimina la grasa que se adhiere al acero debido a su manejo.

Después de esto, se prosiguió con el decapado, que consiste en preparar ácido clorhídrico diluido en agua al 10% añadiendo Tiourea al 10%, que funciona como inhibidor, este proceso dura 4 minutos para que las piezas al ser retiradas del decapado y expuestas al ambiente no se oxiden rápidamente.

A continuación se procedió a la activación de la superficie (fluxado) que consiste en hacer una preparación en un recipiente de cloruro de zinc al 15% en agua destilada y en otro recipiente cloruro de amonio al 15% en agua destilada también, después de esto 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 el proceso de difusión. Después de esto se sacan las probetas y se secan con una pistola de aire para que no se oxiden.

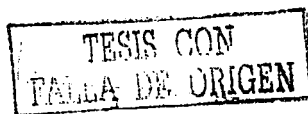
Mientras tanto se colocó el aluminio en un crisol y se calentó en el horno #2 a una temperatura de 800°C para lograr que el aluminio esté en estado líquido y de esta manera el proceso de solidificación no entorpezca la introducción de las probetas a la solución.

Se sacó el crisol del horno eléctrico y se procedió a introducir las probetas y dejarlas de 5 a 7 minutos para poder lograr la difusión del aluminio en el acero.

A continuación, las probetas que iban a ser recocidas se introdujeron en el horno eléctrico #2 a una temperatura de 380°C de 1 a 2 horas.

Como siguiente y último paso, se procedió a laminar las probetas, precalentándolas a 350°C durante 25 minutos. Después se laminaron a una velocidad de 10 m/min, realizando dos pasos de reducción, cada uno de 20 milésimas de mm.

En el siguiente capítulo se desarrollarán de forma exhaustiva las pruebas que se aplicarán a las probetas recubiertas, para obtener la caracterización del recubrimiento y los efectos de éste sobre el sustrato de modo que se justifique su utilización.



3.2 REALIZACIÓN DE PRUEBAS

Debido a los procedimientos posteriores al baño (como: enfriamientos después de la inmersión, laminado y recocido) que fueron aplicados a las probetas y los cuales se resumen en la en la Tabla 3.1 se piensa que esto puede provocar o no alteraciones externas e internas en la estructura del material base, la interfase y/o el recubrimiento; por tanto, es necesario caracterizar la pieza, para obtener sus propiedades.

TABLA 3.1 HISTORIA DEL PROCESAMIENTO DE CADA PROBETA

No.	PROBETA	LIMPIEZA MECÁNICA	LIMPIEZA ABRASIVA *	ACTIVACIÓN DE SUPERFICIE *	TIEMPO DE INMERSIÓN *	TIPO DE ENFRIAMIENTO	VARIANTE
1	32	SI	SI	SI	5 min.	Al medio ambiente	-
2	35	SI	SI	SI	5 min.	Al agua	-
3	38	SI	SI	SI	5 min.	Al medio ambiente	Recocida*
4	41	SI	SI	SI	5 min.	Al medio ambiente	Recocida* y Laminada*
5	43	SI	SI	SI	5 min.	Al agua	Laminada*
6	47	SI	SI	SI	5 min.	Al medio ambiente	Laminada*

* LIMPIEZA ABRASIVA: Ácido Sulfúrico 10%, Tiourea 10%Vol en Agua destilada por 5 minutos.

* ACTIVACIÓN DE SUPERFICIE: Cloruro de Zinc y Cloruro de Sodio por 5 minutos.

* TEMPERATURA DEL BAÑO: 800°C

* PARÁMETROS DE RECOCIDO: Recocido 1 hr a 550°C

* PARÁMETROS DE LAMINACIÓN: Laminación al 20% $v = 10\text{ft}/\text{min}$ a 300°C

En este caso, nos interesa conocer el comportamiento del material recubierto; de esta forma, podremos deducir a qué tipo de ambientes o aplicaciones podría ser expuesto, qué tipo de limitantes presenta o probablemente concluir qué procedimiento posterior al baño es el conveniente para un mejor resultado, etc.

Para esto, es necesario el estudio y caracterización de la capa obtenida mediante aluminizado por inmersión en metal fundido. Las pruebas que se desarrollaron son:

- Metalografía.
- Micro-dureza.
- Caracterización mediante microscopía electrónica de barrido.
- Ensayo de corrosión.

3.2.1 METALOGRAFÍA

La metalografía es un paso clave para poder realizar pruebas posteriores; debido a que la superficie queda perfectamente pulida (sin rayones o marcas) para poder hacer un estudio de su estructura, como el ensayo de micro dureza y caracterización microscópica.

De cada recubrimiento que obtuvimos (6) , se cortaron una o dos muestras, dependiendo si la pieza había sido o no laminada, después de haber sido recubierta. En el caso de haber sido laminada; se cortaron en dirección longitudinal (este valor se encuentra en la tabla 4.1 de resultados como “v”) y transversal (este valor se encuentra en la tabla 4.1 de resultados como “h”) en dirección a la laminación. Después de hacer los cortes respectivos, se montaron las piezas en baquelita, para poder tener un mejor manejo de éstas al hacerles la metalografía. El acabado realizado por la cortadora circular dejó listas las probetas para iniciar el pulido con la lija del número 180, 220, 320, 400, 500 y 600.

Para obtener un acabado espejo, se da un pulido final con partículas muy finas de óxido de aluminio, utilizando primeramente alúmina gris y por ultimo alúmina blanca (de 10 μ y 5 μ respectivamente). Para limpiarlas se da un baño con agua y luego con acetona, secándose al final con pistola de aire para evitar los residuos de agua que podrían ocasionar una oxidación prematura en la capa superior de la muestra (recubrimiento).

3.2.2 MICRO-DUREZA

El ensayo de la dureza entra dentro de los ensayos mecánicos con carga estática, debido a que la carga que es aplicada va aumentando de manera gradual y lenta. Este ensayo nos ayuda a conocer la capacidad de los materiales de oponerse a la deformación al aplicárseles una fuerza mediante una pieza. A su vez, la dureza se correlaciona de modo estrecho con la resistencia al desgaste, por tanto el estudio de esta prueba en nuestro material resulta de gran interés. Sin embargo, estas propiedades de resistencia dependen fundamentalmente de la clase de material, su tratamiento, su estructura interna, forma de la pieza, entre otros factores.

Debido a las áreas de estudio tan pequeñas, fue necesario utilizar un equipo especial, en este caso se hicieron ensayos Vickers, donde las pruebas se denominan de micro-dureza por las penetraciones tan pequeñas que se generan y por ende se requiere de un microscopio asociado para efectuar las mediciones de estas. A las 6 probetas a las que se les tomó lectura de espesores también se les tomó microdureza con la ayuda del microdurómetro Vickers, las piezas fueron montadas en el equipo y se les aplicó una carga de 50 P (490.3 Nm). Se tomaron 6 lecturas en el material base (acero 1018), 6 lecturas en la interfase y 6 lecturas en el recubrimiento.

Como apoyo teórico justificamos la combinación del uso del ensayo de micro-dureza Vickers, mediante una explicación breve de estos dos ensayos.

- *Ensayo de dureza en el durómetro tipo Vickers. (denominado dureza Vickers).* Este método permite medir la dureza de las capas finas exteriores que se originan después de cementar, nitrurar, cianurar o generar otros recubrimientos, así como la dureza de los materiales muy duros y piezas de sección pequeña. La dureza se

determina haciendo penetrar en el material de ensayo una pirámide de diamante de base cuadrada con un ángulo de 136° en el vértice. La acción penetrante se efectúa aplicando una de las cargas siguientes: 5; 10; 20; 30; 50; 100 y 120 g. Después, con ayuda del microscopio instalado en el aparato, se calcula el área de la huella por la longitud de la diagonal. Fig. 3.1

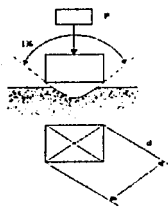


Fig. 3.1 Penetrador Vickers

El número de dureza Vickers se determina por la fórmula:

$$H_v = \frac{P}{F} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2} \right)$$

Donde:

P = Carga en Kg.

F = Área de la huella piramidal en mm^2

La dureza Vickers se expresa en las mismas unidades de medida que la dureza Brinell. Los números de dureza determinados por estos métodos coinciden para los materiales cuya dureza es hasta de 450 unidades.

- *Ensayo de microdureza.* Este ensayo se aplica para determinar la dureza de las capas superficiales muy finas, piezas pequeñas de mecanismos y aparatos, diferentes constituyentes estructurales de las aleaciones, hilos metálicos, etc. El ensayo se realiza introduciendo una pirámide de diamante con el ángulo de 136° en el vértice y a una carga de 1 a 20 g en la superficie de la probeta. Después de hacer penetrar la punta piramidal, se mide la longitud de la diagonal d de la huella obtenida Fig. 4.1 con ayuda del microscopio metalográfico, que es la parte principal del aparato. Para determinar el número de microdureza se utiliza la fórmula:

$$H = \frac{(1.8544)P}{d^2}$$

Donde:

H = número de dureza (Kg/mm^2)

P = Carga (Kg.)

d = Largo de la diagonal (μ)

1.8544 = Coeficiente

- Las características del microdurómetro Vickers utilizado son:

Marca: Leit Wetzlar Germany

Capacidad: 15g – 2000g

Aumentos: 10X y 50X

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En seguida describiremos como se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla correspondiente:

1. Se midió el espesor del recubrimiento. En esta parte se hicieron seis mediciones (tres de un lado del recubrimiento y tres del lado opuesto) del espesor, para obtener un valor mas real, pues, en ocasiones, el recubrimiento no era homogéneo.
2. Las pruebas de micro-dureza se hicieron en tres partes de la pieza:
 - Recubrimiento
 - Interfase
 - Material base

En cada una de estas tres pruebas se tomó un promedio para obtener un valor representativo de cada parte de interés de la pieza.

En la tabla de resultados aparece una sección de carga, la cual llegó a variar en algunos casos (25, 50, 100 y/o 200 g), pero si observamos los resultados generales, no cambian sustancialmente, pues el cambio de la carga es simplemente para que la huella que se va a evaluar sea clara al momento de su lectura y por ende será mas acertado el valor que se lea de las tablas. Éstas tablas, forman parte de los accesorios del micro-durómetro, las microdurezas fueron calculadas respecto a la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{(1854.4)P}{d^2}$$

Donde:
HV= Dureza Vickers (Kg/mm²)
P= Carga (Kg.)
D= Largo de la diagonal (μ)
1854.4 = Coeficiente

Siendo esta, la ecuación que se genera de la combinación de los ensayos de micro-dureza y Vickers.

3.2.3 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCÓPICA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

El caracterizar una pieza es de interés amplio para este trabajo, ya que de ello lograremos obtener resultados químicos y visuales (a nivel estructural), que generaran de manera mas profunda junto con las otras pruebas, un estudio completo y real del recubrimiento.

- Los estudios se hicieron con un microscopio electrónico de barrido; el cual tiene dos opciones en cuanto al tipo de electrones que utiliza y registra. Se pueden utilizar los electrones secundarios (SE. Secondary Electrons). Así mismo, existen los electrones retrodispersados (BSE. Back Scattered Electrons), los cuales dan el contraste de los elementos según su peso atómico y es muy útil para definir las zonas en donde existen diferencias en la composición. La pieza (previamente pulida) se coloca en una cámara donde se hace una presión de vacío y para poder observar la pieza, ésta tiene que estar colocada en baquelita conductora o se le puede adherir una cinta de grafito la cual genera un resultado semejante. Este proceso es necesario ya que como se ha mencionado el microscopio utiliza un haz de electrones, por lo que la resina en que se monta debe ser conductora y de esta forma todos esos "rebotes" de electrones son los que generan la imagen en el microscopio electrónico de barrido. Este equipo fue utilizado para observar las características físicas de las probetas, así como composiciones químicas aproximadas en las diferentes secciones de las probetas.
- Sus características son:

Voltaje de aceleración 0 – 30 KV

Detector de electrones secundarios (SE) y de electrones retrodispersados (BSE)

Equipo de microanálisis por dispersión de energía.

Gracias a los altos aumentos que puede alcanzar este microscopio de barrido (MEB), pudimos obtener imágenes muy nítidas; en donde se pueden apreciar aspectos importantes de la estructura del recubrimiento, interfase y material base. Con esto se podrán determinar las características de cada capa y si existe o no una adecuada adherencia del recubrimiento con el material base; además de la composición química en puntos de interés.

Como complemento a este estudio, las piezas fueron atacadas con distintos ácidos (Tabla 3.2), para hacer un análisis mas completo de las tres partes clasificadas en la pieza (recubrimiento, interfase y material base). El utilizar distintos ácidos, tiene dos explicaciones, la primera es, que debido a que los materiales (aluminio ó acero), tienen diferentes composiciones, por lo que los ácidos serán eficaces sólo para cierto tipo de materiales; y la segunda es, que en ocasiones a pesar de que un ácido es el indicado para atacar el material, tiene la característica de atacar solo a cierto nivel estructural (macro o micro). En nuestro caso llegamos a utilizar uno o más tipos de ataques en una pieza atacada previamente, por la simple razón de ver si podíamos explorar mas y de esta forma los datos o imágenes arrojadas, aportarán datos relevantes para generar mejores conclusiones.

TABLA 3.2 FORMAS Y MECANISMOS DE CORROSIÓN.

	NOMBRE DEL ÁCIDO	COMPOSICIÓN QUÍMICA	CONDICIONES	NOTAS
ALUMINIO	ACIDO FOSFÓRICO	90ml H ₂ O destilada 100ml H ₃ PO ₄ al 1.71	1 a 3min a 50°C	Aluminio puro, aleaciones: Al/Cu, Al/Mn, Al/Mg/Si.
	ACIDO SULFÚRICO	80ml H ₂ O destilada 20ml H ₂ SO ₄ al 1.84	30 seg. a 3 min. a 70°C	Diferencia de fases intermetálicas en aleaciones multicomponentes con Cu, Mn, Fe, Be, FeAl.
	SARGENT	15ml HNO ₃ 0.5ml HF 3.0gr CrO ₃ 84.4ml H ₂ O	Mezclar la solución antes de utilizarla y a temperatura ambiente. Sumergir la muestra y agitar regularmente de 20 a 60 seg.	Un segundo de ataque con esta solución puede observarse el desarrollo de la estructura.
	KELLER	2ml HF 3ml HCl al 48% conc. 5ml HNO ₃ (ácido nítrico) 190ml H ₂ O	8 seg.	Sirve para ver la estructura de aluminio.
ACERO	NITAL (al 5% en alcohol)	Textura 1-5ml HNO ₃ 100 ml Alcohol Etilico o Metílico (al 95%)	La vel. de ataque se aumenta selectivamente con incrementos porcentuales de HNO ₃ .	El 1% de la sol. es adecuado para usos como los que se notan recocido normalizado, templado revenido.

Todos los resultados (fotografías, espectros y análisis químicos) de cada pieza, se muestran en el capítulo siguiente.

3.2.4 ESTUDIO DE CORROSIÓN

Esta prueba podría decirse que es medular para el caso de estudio de los recubrimientos, pues el recubrimiento no sólo puede aumentar las propiedades mecánicas al material base, si no también, aminora el tiempo de aparición de la corrosión. Además de evaluar las dos ventajas antes mencionadas; podrá verse en los resultados, qué tanto perjudica o beneficia si existió o no, algún tipo de proceso posterior al recubrimiento. Enseguida se hace una breve semblanza de lo que es la corrosión.

3.2.4.1 NATURALEZA DE LA CORROSIÓN

La corrosión se denomina como el fenómeno que se genera, cuando el metal entra en contacto químico y electroquímico con el ambiente destruyendo la superficie. La corrosión causa grandes daños en la economía de cada país, destruyendo una enorme cantidad de construcciones metálicas y máquinas. Para tomar medidas efectivas contra la corrosión es necesario conocer sus causas y los métodos efectivos de proteger los metales contra ésta.

La corrosión se manifiesta en formas que tienen ciertas similitudes y que, por tanto se pueden clasificar en ciertos grupos específicos. En la tabla 3.3 se muestra una clasificación de la corrosión de acuerdo con los mecanismos de ataque y los tipos de corrosión que se enumeran bajo cada mecanismo.

TABLA 3.3 FORMAS Y MECANISMOS DE CORROSIÓN.

CORROSIÓN GENERAL	CORROSIÓN LOCALIZADA	CORROSIÓN CON INFLUENCIA METALÚRGICA	DEGRADACIÓN MECÁNICAMENTE ASISTIDA	DAÑO ASISTIDO POR EL AMBIENTE
Atmosférica	Filiforme	Intergranular	Erosión	Corrosión bajo esfuerzos
Galvánica	De grietas	Desaleación	Estregado	Daño por hidrógeno
Por corrientes parásitas	Picadura	-----	Cavitación	Fatiga por corrosión

La corrosión general es el ataque corrosivo que provoca el adelgazamiento uniforme del material. La corrosión atmosférica implica el aire natural, pero el componente real del aire que causa la corrosión es la humedad (humedad relativa). En ambientes muy secos, como los desiertos, por ejemplo, las piezas de acero permanecen brillantes y sin empañarse durante largos periodos. La corrosión se presenta cuando el aire contiene cierta humedad relativa mínima de alrededor del 50 al 70 por ciento. La corrosión se intensifica cuando la superficie del metal está mojada, con depósitos o capas visibles de agua que se han formado por efecto de salpicaduras de agua de mar, lluvia o rocío. Por consiguiente, vemos que, a la temperatura ambiente, la corrosión atmosférica es de naturaleza acuosa. De hecho, las soluciones acuosas, como las aguas naturales y otras soluciones hechas por el hombre, son los ambientes que se suelen asociar con los problemas de corrosión. Se distinguen dos tipos de corrosión:

Química: La reacción entre el metal y los gases secos y dieléctricos líquidos origina la corrosión química sin que aparezca la corriente eléctrica. Ejemplo de esto es: la oxidación de las válvulas de escape en los motores de combustión interna, tubos para el fuego, barras de emparrillados en los hornos, dispositivos interiores para el calentamiento de los hornos térmicos, de forjado, etc.

Electroquímica: Esta surge debido a que se origina una corriente eléctrica a causa de la reacción mutua entre el metal y el electrolito, cuando éstos se ponen en contacto. Ejemplos de esto: la oxidación del acero, fundición y otras aleaciones en atmósfera húmeda, en agua dulce o de mar, en ácidos, alcalinos, soluciones salinas y en tierra.

Los principios de la corrosión se pueden ilustrar mediante una celda electroquímica como la que se muestra en la Figura 3.2. La celda consiste en dos electrodos conectados (conductores eléctricos sólidos; los electrones son portadores de carga), un ánodo y un cátodo, que están en contacto con un electrolito (conductor iónico; los iones transportan carga). En este caso, el electrolito es la solución acuosa. Cuando se produce corrosión, se lleva a cabo un proceso de oxidación simultáneamente con un proceso de reducción. A lo anterior por tanto se llama "proceso redox". El proceso de oxidación se lleva a cabo en el ánodo, en tanto que el proceso de reducción ocurre en el cátodo. La reacción global de la celda difiere de una reacción química ordinaria en cuanto a que implica la transferencia o cesión de electrones entre los conductores electrónicos y los iónicos. Por tanto, se describe como una reacción electroquímica y fluye corriente por el circuito, porque las cargas (electrones e iones) se desplazan.

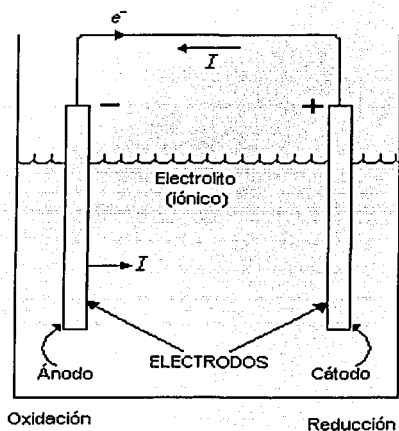


Fig 3.2 Esquema de una celda electroquímica; se indican los elementos fundamentales

La Figura 3.2 ilustra los cuatro elementos esenciales de la corrosión electroquímica acuosa. Siendo:

- Presencia de un ánodo.
- Presencia de un cátodo.
- Contacto físico entre el ánodo y el cátodo.
- Presencia de un electrolito.

Los cuatro elementos deben estar presentes para que se produzca la corrosión. Para impedir o contener la corrosión, "basta" con eliminar uno de los cuatro.

Habiendo hecho una pequeña semblanza de lo que es la corrosión podemos introducirnos en lo que fue el desarrollo del experimento.

Los pasos para realizar la prueba fueron los siguientes:

1. Las seis probetas se cortaron de: 2.5cm X 1.5cm. Para este caso utilizamos también una probeta de acero 1018 sin recubrimiento; la cual nos servirá para hacer una comparación mas completa del comportamiento de corrosión entre las probetas recubiertas con sus diferentes procesos y la probeta sin recubrimiento.
2. Todas las probetas ya cortadas, fueron limpiadas y posteriormente se protegió la parte de acero de los costados de cada pieza, con una pintura.
3. Después de ser pintadas las piezas en algunas secciones, se pesaron en una báscula electrónica (fotografía 3.3) con una precisión de 0.0001 g.

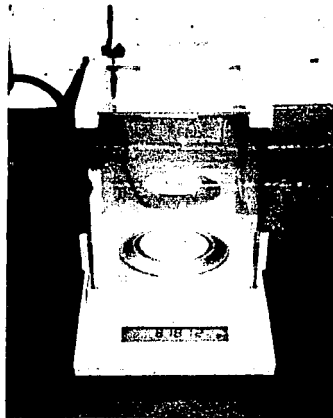


Fig. 3.3. Fotografía . Báscula electrónica

4. Todas las probetas se montaron en una base de acrílico de 70cm. de largo por 10cm. de ancho (fig. 3.4); la separación entre cada probeta fue de 5cm.

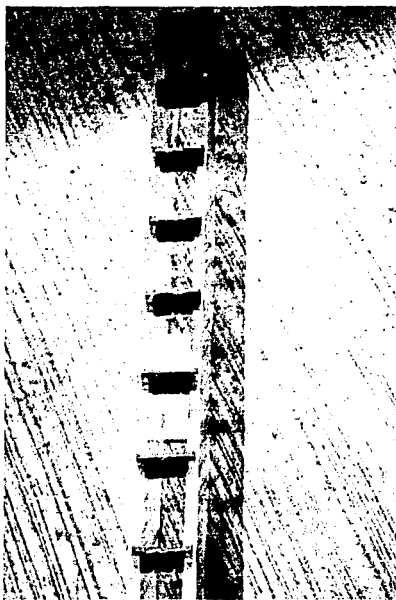


Fig. 3.4. Fotografía. Probetas montadas en la base de acrílico.

5. Listas las probetas ya montadas, se comenzó el experimento dentro de una cámara de niebla salina (fig. 3.5), la cual se encuentra en las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Para desarrollar la prueba en este equipo, fue necesario basarnos en la norma ASTM B 117. Las condiciones principales que seguimos para realizar el ensayo fueron las siguientes:

- Temperatura de la cámara: 35 °C
- Temperatura del humidificador: 35 °C
- Ciclo de trabajo: 59 min. De trabajo por 1 min. De paro cada 24 hrs.
- Concentración de sal al 5% (80lts. De agua por cada 4 Kg. De sal)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

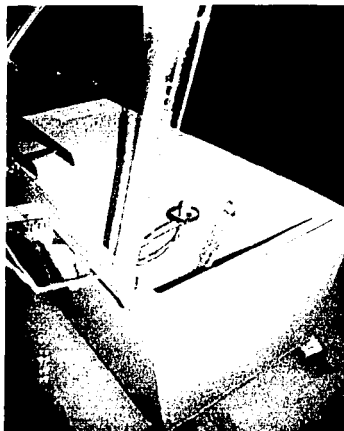


Fig. 3.5. Fotografía. Cámara de niebla salina

Una vez iniciado el experimento, éste duro ocho días. Lo que se hizo durante este tiempo fue evaluar los cambios de peso en cada probeta, es decir, se pesaron y fotografiaron diariamente las probetas para ver los cambios que ocurrían. Todos los datos y fotografías tomados, se presentan en el siguiente capítulo.

CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO IV

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados de las pruebas que se realizaron para cada una de las probetas. De manera general podemos decir que la forma de presentar dichos resultados será de acuerdo al experimento (según la necesidad o bien la forma en la cual se hayan obtenido dichos datos), ya sea representados en forma de imágenes, tablas y/o gráficas.

Cabe destacar, que el fin de este procedimiento es facilitar el análisis de resultados (siendo este el capítulo siguiente) y de esta forma obtener un estudio mucho mas completo y sencillo al final en la toma de decisiones (capitulo de las conclusiones).

4.1 Metalografía

En el capítulo anterior, mencionamos qué es el proceso de la metalografía, por tanto, sabemos que este proceso sólo se realiza con el fin de preparar las probetas para pruebas posteriores, en nuestro caso las pruebas que tienen necesidad de este proceso son las dos siguientes:

- Micro-dureza
- Caracterización mediante Microscopía Electrónica de Barrido

En cambio, la prueba que no requiere una preparación metalográfica para obtener los resultados descados es:

- Ensayo de corrosión

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las tres pruebas antes mencionadas.



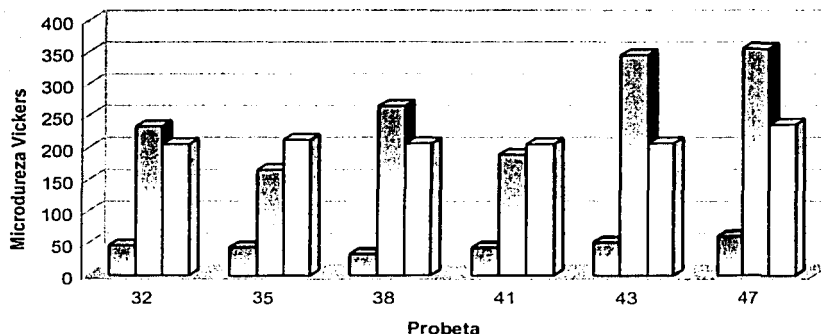
4.2 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MICRO-DUREZA

Para éste caso, los resultados de las pruebas realizadas en este proceso para cada pieza se muestran en la tabla siguiente, llamada Tabla 4.1 de Resultados, de igual manera para ejemplificar estos datos, se generaron gráficas para tener una mejor descripción de lo que esta ocurriendo en cada probeta.

Tabla 4.1 Resultados de Espesores y Micro-durezas promedio

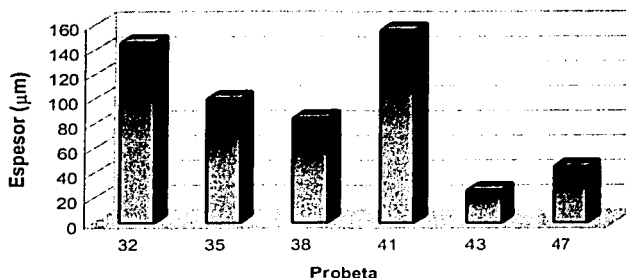
NO. DE PROBETA	PROCESO POSTERIOR	ESPESOR PROMEDIO (µm)	MICRODUREZA PROMEDIO (VICKERS)	
32	Enfriamiento al medio ambiente	145.53	Recubrimiento	47.45
			Interfase	233.33
			Material Base	206.00
35	Enfriamiento al agua	100	Recubrimiento	44.68
			Interfase	166.00
			Material Base	20.50
38	Enfriamiento al medio ambiente y recocida 1 hr a 550°C	84.08	Recubrimiento	33.36
			Interfase	265.00
			Material Base	206.17
41	Enfriamiento al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C	155.28	Recubrimiento	43.70
			Interfase	188.83
			Material Base	205.33
43	Enfriamiento al agua y laminada 20% a 300°C	26.25	Recubrimiento	52.27
			Interfase	345.75
			Material Base	207.00
47	Enfriamiento al medio ambiente y laminada 20% a 300 °C	44.98	Recubrimiento	60.91
			Interfase	355.33
			Material Base	236.70

Gráfica 4.1 Microdureza Vickers



□ DUREZA RECUBRIMIENTO (Vickers) ▨ DUREZA INTERFASE (Vickers) □ DUREZA MAT BASE (Vickers)

Gráfica 4.2 Espesores del recubrimiento



4.2.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MICRO-DUREZA.

Con base en la grafica 4.1 “Comparativo de micro-durezas” y en la “Tabla de Resultados de espesores y micro-durezas promedio”, se puede decir que, en las diferentes probetas, el material base (acero 1018), presenta muy poca variación en el valor de dureza, que tiene como promedio de 212.80 Vickers, con un mínimo de 205.33 en la probeta 41 (enfriada al medio ambiente, recocida y laminada) y un máximo de 236.66 Vickers en la probeta 47 (enfriada al medio ambiente y laminada 20%), los cuales no varían mucho del valor de dureza inicial 195 Vickers; demostrando que el acero no fue afectado de manera drástica en la dureza, ni en su microestructura al ser recubierto mediante el aluminizado o por alguno de los otros procesos posteriores (como recocido a 800°C durante 1 hr, laminado 20% a 300° C ó cualquier método de enfriamiento).

Por otro lado podemos mencionar que el recubrimiento presenta cierta variación en los valores de dureza, donde el mínimo es de 33.36 Vickers en la probeta 38 (enfriada al medio ambiente y recocida 1 hr.) y el máximo es 60.91 Vickers que se presenta en la probeta 47 (enfriada al medio ambiente y laminada 20%), dando como promedio 47.0 Vickers, esto lo comparamos con el valor de dureza del Aluminio antes del proceso que fue de 29 Vickers. Así, después del proceso de recubrimiento por inmersión en caliente, el aluminio, presenta un incremento de la dureza en un 15% al ser sólo enfriada al medio ambiente, y un incremento del 110% al ser enfriada al medio ambiente y laminada 20% a 300°C.

Donde existe una mayor variación en los valores de dureza es en la zona intermetálica, donde ésta ultima alcanza un mínimo de 166.0 en la probeta 35 (enfriada al agua) y un máximo de 355.33 Vickers en la probeta 47 (enfriada al medio ambiente y laminada 20%), arrojando un promedio de 260.19 Vickers y una variación entre ellos de 114%. De acuerdo a lo anterior podemos corroborar que la fases intermetálicas presentan características de mayor dureza aún mayor que la del material base en ciertas zonas aunque con cierta fragilidad y que la dureza del intermetálico aumenta con el proceso de laminación.

Las piezas con mayor índice de dureza en el recubrimiento, que en este caso son las probetas número 43 y la 47, en pruebas posteriores al desgaste pueden presentar un mejor desarrollo o mayor resistencia debido a la relación directa entre la dureza y la resistencia al desgaste.

4.2.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

Analizando el espesor de las piezas con base en la gráfica 4.2 se puede observar que los valores alcanzan un mínimo de 26.25 μm en la probeta 43 (enfriada al agua y laminada 20%) y un máximo de 155.28 μm en la probeta 41 (enfriada al medio ambiente, recocida y laminada), dando como promedio 97.98 μm . De acuerdo a los espesores esperados en este tipo de procesos y comparándolo con los espesores de recubrimientos de procesos comerciales como el galvanizado el cual es de 40 y 80 μm (siendo algo superiores cuando el material base es una fundición), podemos afirmar que este proceso está dentro de un rango útil de protección.

Si consideramos sólo las piezas que no fueron laminadas (32, 35 y 38) se observa que el recubrimiento es de mayor espesor respecto al del intermetálico y esto es por el efecto de la temperatura de fundición, es decir, mientras más se incrementa la temperatura, se propiciará el crecimiento del intermetálico (esto varía también con elementos aleantes que podamos agregar al baño) y el espesor del recubrimiento disminuirá. Pero el espesor que tenemos en las piezas 43 y 47, es un espesor mas pequeño que las restantes (26.25 y 44 μm respectivamente), esto se debe a que se aplica un laminado en caliente de 20% a 300 °C, proceso que en nuestro caso se realizó para dar un mejor acabado al recubrimiento.

4.3 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARACTERIZACIÓN MEDIANTE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Los resultados obtenidos de esta prueba son imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido, así como los análisis químicos generados de las mismas piezas fotografiadas, los cuales serán de ayuda para correlacionar las características o peculiaridades físicas de cada imagen con sus características químicas y estructurales.

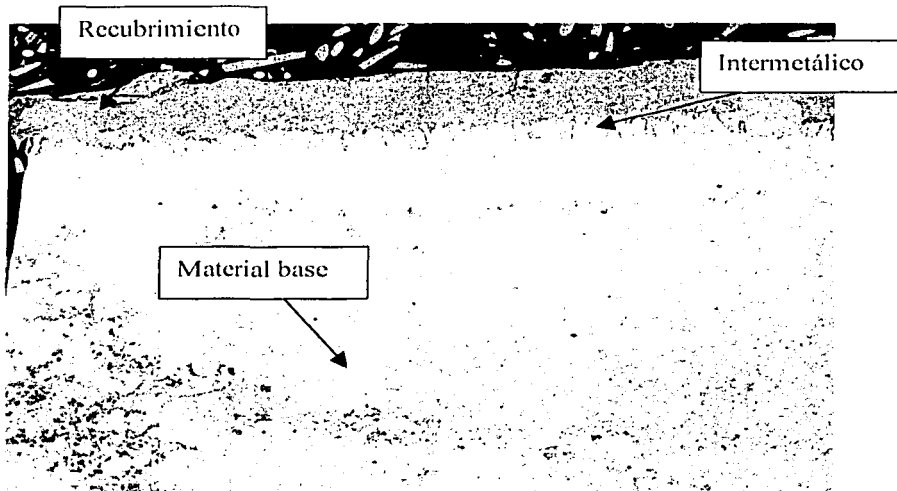
PROBETA 32. Enfriada al medio ambiente.**-FOTOGRAFÍAS**

Fig 4.1. Imagen 32.1 Vista General.100x (Electrones retrodispersados) Acero 1018 Recubierto por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada al medio ambiente.



Fig.4.2. Imagen 32.2 a 200x (Electrones retrodispersados). Recubrimiento de Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada al medio ambiente.



Fig. 4.3. Imagen 32.3 a 400x (Electrones retrodispersados). Ataque al recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada al medio ambiente. Se realizó un ataque con el reactivo Keller durante 8 seg.

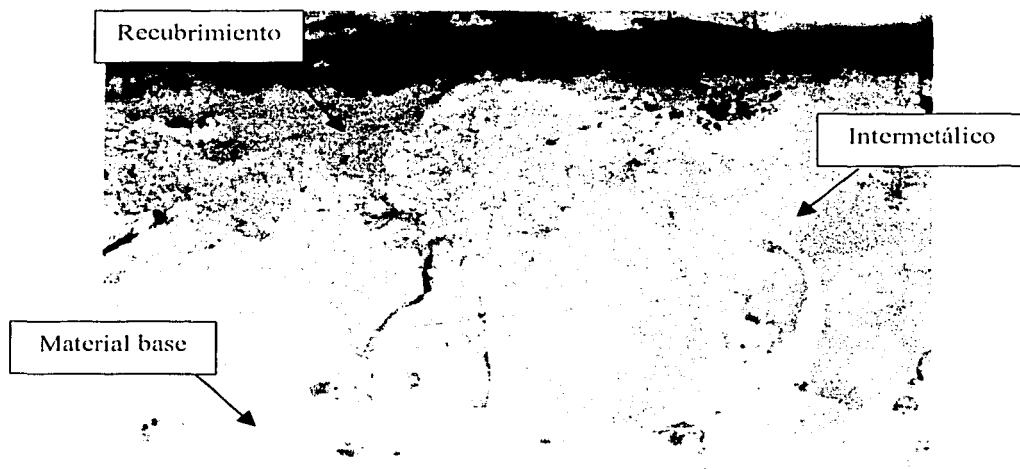
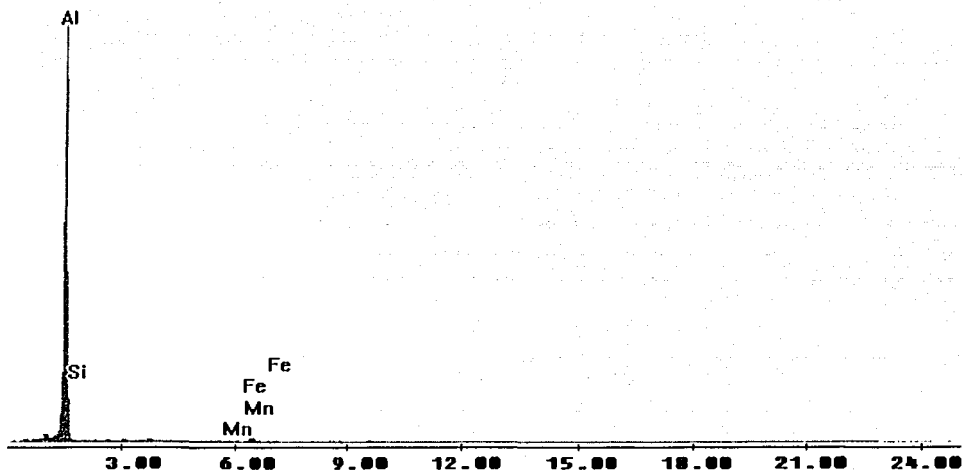


Fig. 4.4. Imagen 32.4 a 1200x (Electrones retrodispersados). Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada al medio ambiente. Atacada con reactivo Sargent 1 min. y Nital 10 seg.

-ANÁLISIS QUÍMICOS**Recubrimiento****Tabla 4.2. Análisis químico de la probeta 32 (recubrimiento)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	95.86	97.58
Si	0.59	0.6
Mn	0.17	0.09
Fe	3.38	1.73
Total	100	100

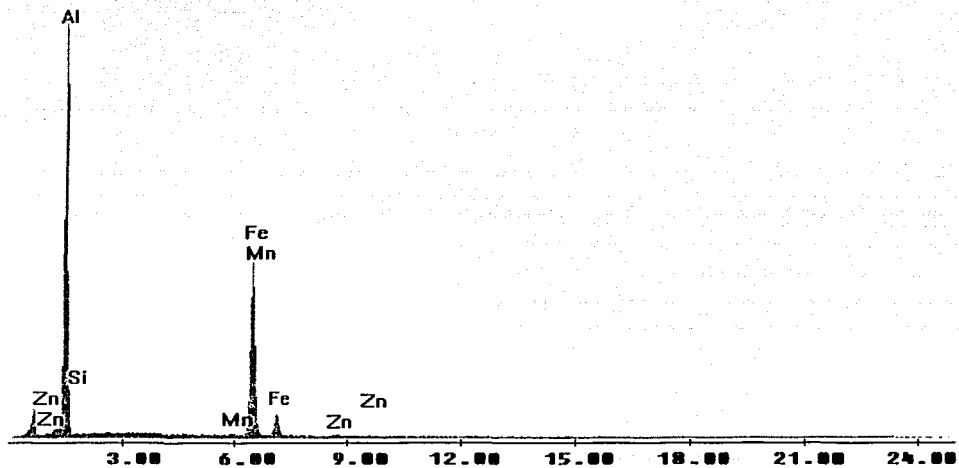
Label A: 32v recubrimiento



Realizado a 100x. Electrones retrodispersados (BSE), 15.0 KV

Intermetálico**Tabla 4.3 Análisis químico de la probeta 32 (intermetálico)**

ELEMENTO	% PESO	%AT
Al	53.79	69.9
Si	0.20	0.25
Mn	0.44	0.29
Fe	45.57	29.56
Total	100	100

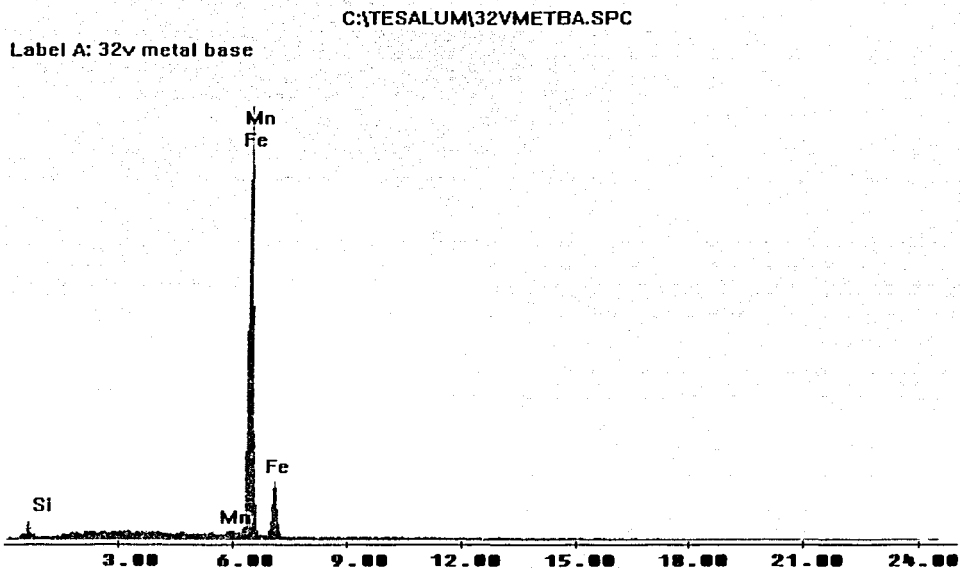
Label A: 32v intermetálico

Realizado a 200x. Electrones retrodispersados (BSE), 20.0 KV

Material Base

Tabla 4.4 Análisis químico de la probeta 32 (material base)

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	0	0
Si	0.31	0.26
Mn	0.79	0.81
Fe	98.9	98.93
Total	100	100



Realizado a 400x. Electrones retrodispersados (BSE), 15.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

PROBETA 35. Enfriada en agua**-FOTOGRAFÍAS**

Fig. 4.5. Imagen 35.1 a 500x (Electrones retrodispersados). Vista General. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada en agua.

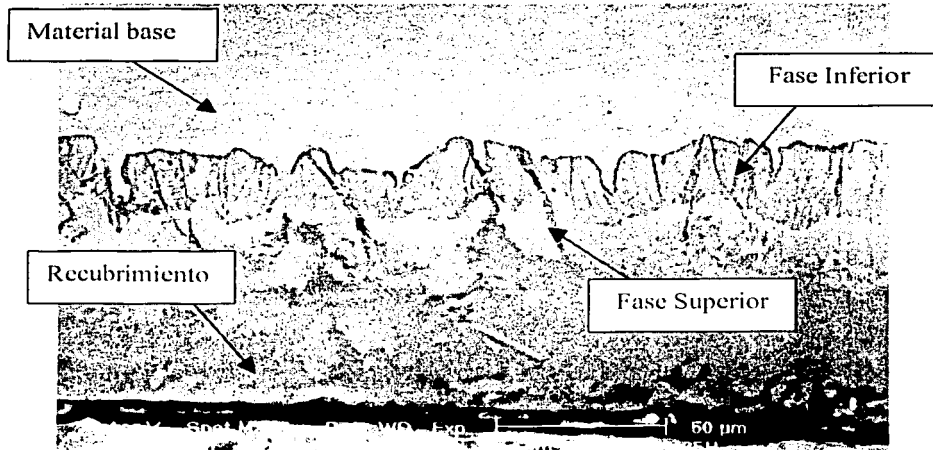


Fig. 4.6. Imagen 35.2 a 500x (Electrones secundarios). Vista General. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada en agua. En esta probetas se realizó un ataque inicial con ácido sulfúrico durante 30 segundos, y posteriormente un ataque con Nital durante 5 segundos.

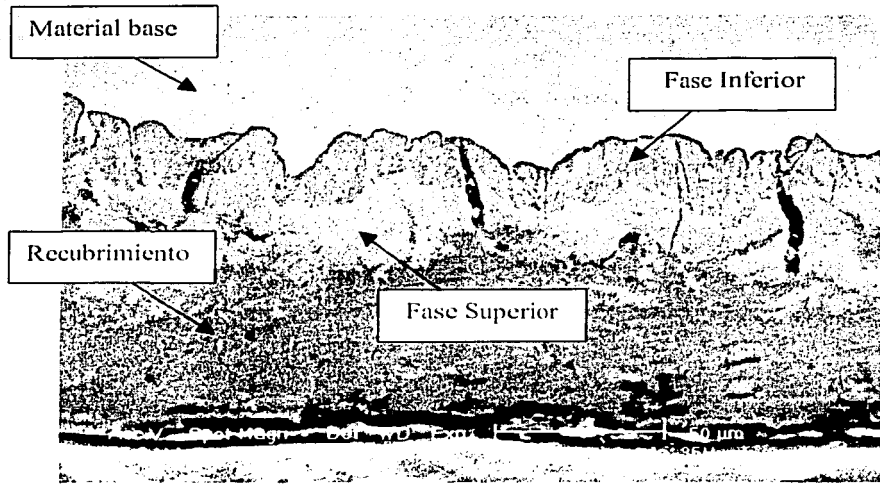


Fig. 4.7. Imagen 35.3 a 500x (Electrones secundarios). Vista General. Ataque de Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada en agua. Se atacó la probeta con ácido fosfórico durante 30 segundos.

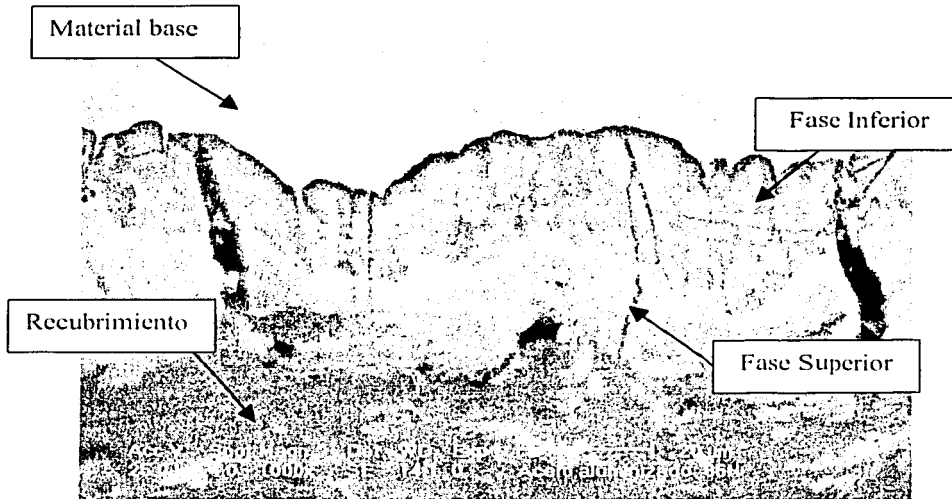


Fig. 4.8. Imagen 35.4 a 1000x (Electrones secundarios). Vista General. Ataque de Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Aluminizado. Probeta enfriada en agua. Se atacó la probeta con ácido fosfórico durante 30 segundos.

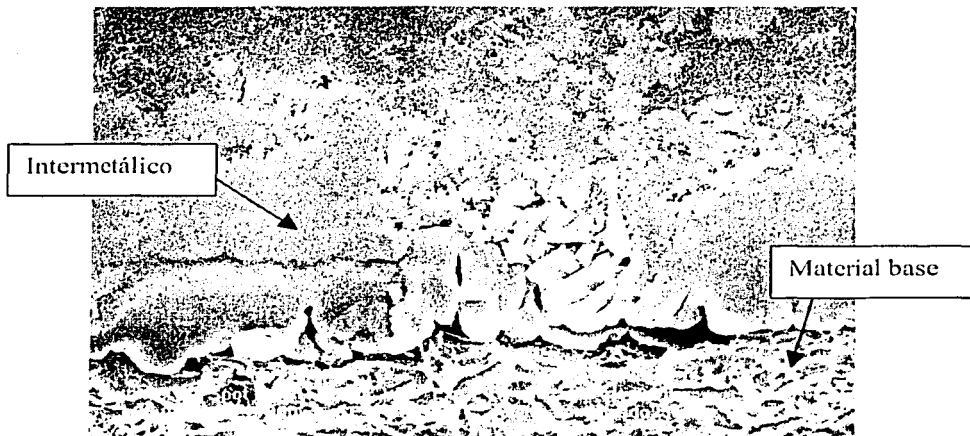
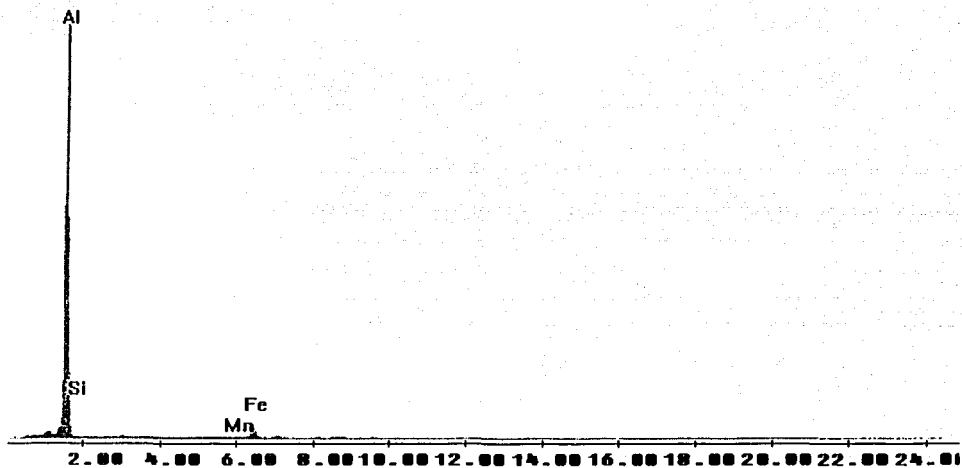


Fig. 4.9. Imagen 35.5 a 1000x (Electrones secundarios). Ataque de Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente En este caso, la probeta fue atacada con ácido fosfórico durante 1 minuto y después con el reactivo "Sargent", durante 1 minuto.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

-ANÁLISIS QUÍMICO**Recubrimiento****Tabla 4.5 Análisis químico de la probeta 35 (recubrimiento)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	91.83	95.57
Si	0.25	0.27
Mn	0.21	0.11
Fe	7.71	4.05
Total	100	100

Label A: 35 análisis de recubrimiento

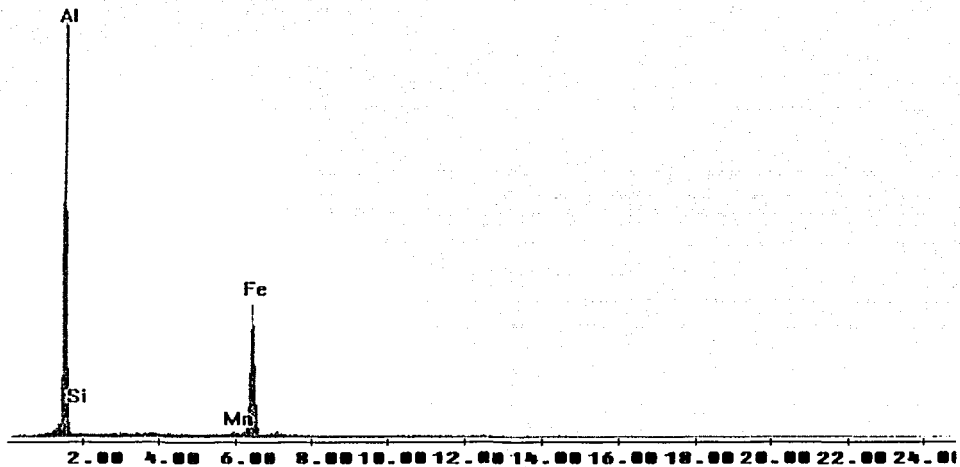
Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Intermetálico**Fase superior****Tabla 4.6 Análisis químico de la probeta 35 (intermetálico superior)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	59.78	75.1
Si	0.21	0.26
Mn	0.73	0.46
Fe	39.28	24.18
Total	100	100

Label A: 35 análisis de intermetálico superior.

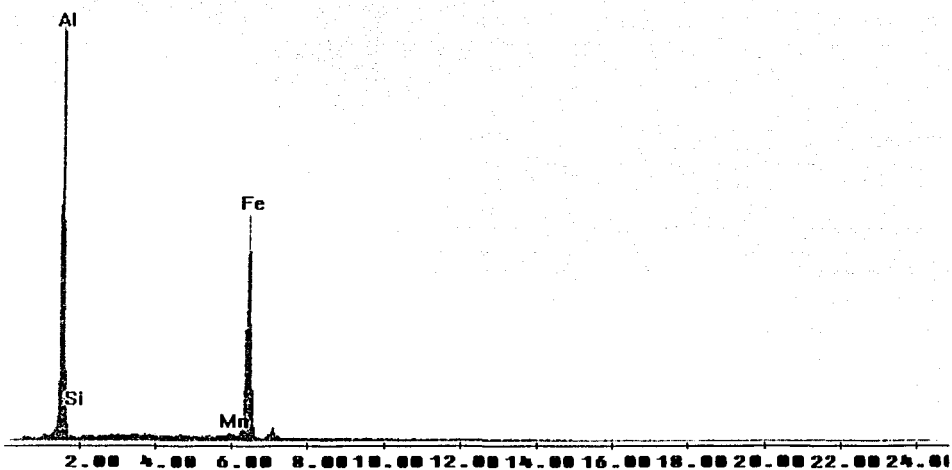


Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fase inferior**Tabla 4.7 Análisis químico de la probeta 35 (intermetálico inferior)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	48.3	61.25
Si	0.22	0.28
Mn	0.34	0.23
Fe	51.14	38.24
Total	100	100

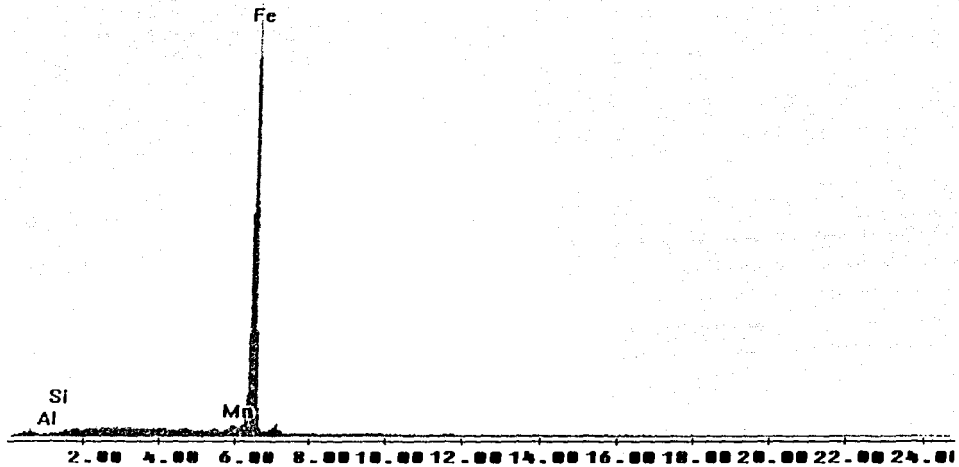
Label A: 35 análisis de intermetálico inferior

Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Material Base**Tabla 4.8 Análisis químico de la probeta 35 (material base)**

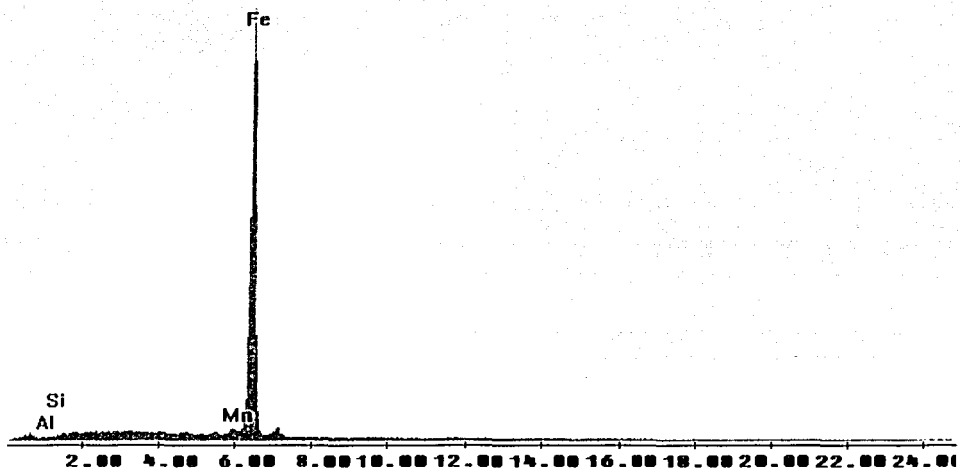
ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	0.37	0.78
Si	0.38	0.34
Mn	1.28	1.26
Fe	97.97	97.62
Total	100	100

Label A: 35 análisis del metal base

Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

Material Base**Tabla 4.8 Análisis químico de la probeta 35 (material base)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	0.37	0.78
Si	0.38	0.34
Mn	1.28	1.26
Fe	97.97	97.62
Total	100	100

Label A: 35 análisis del metal base

Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

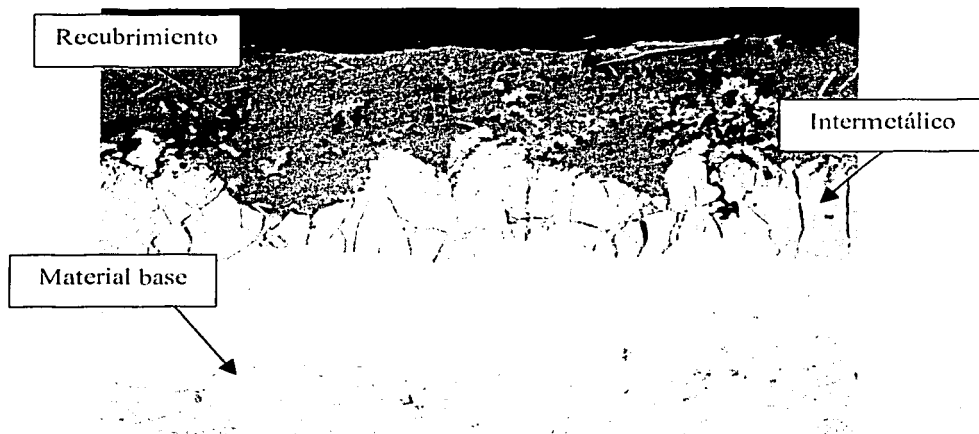
PROBETA 38. Enfriada al medio ambiente y recocida.**-FOTOGRAFÍAS**

Fig. 4.10. Imagen 38.1 a 400x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y recocida 1 hr a 550°C.

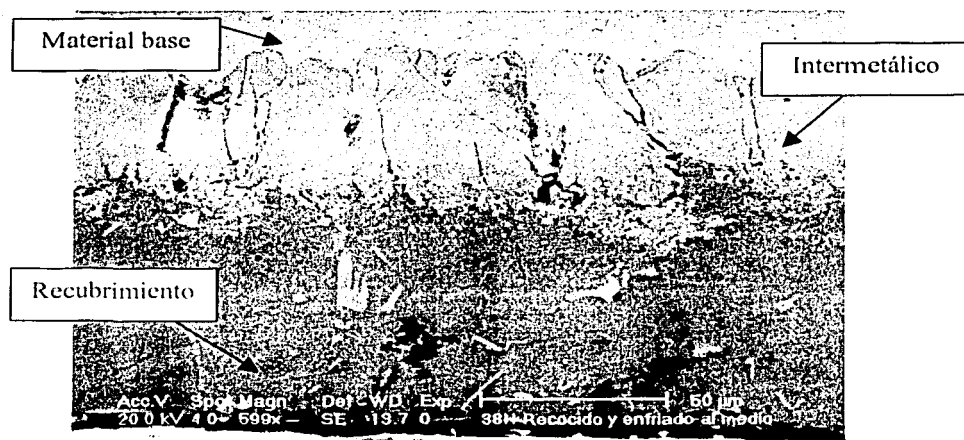


Fig.4.11. Imagen 38.2 a 599x (Electrones secundarios). Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y recocida 1 hr a 550°C.

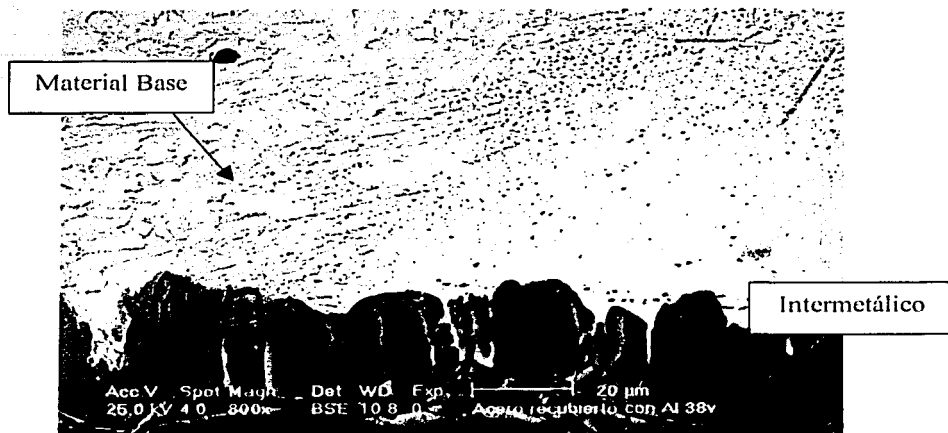


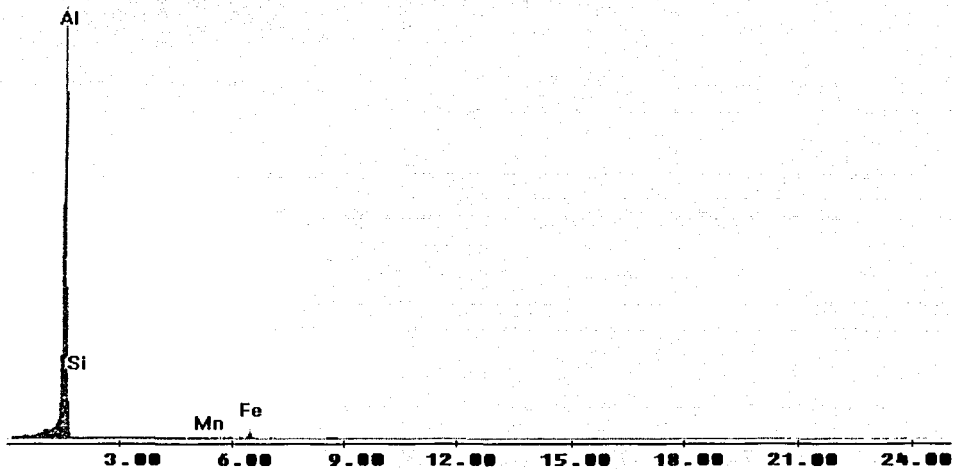
Fig. 4.12. Imagen 38.3 a 800x (Electrones retrodispersados). Material base y capa intermetálica Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y recoocida 1 hr a 550°C.



Fig. 4.13. Imagen 38.1 a 250x (Electrones secundarios). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y recoocida 1 hr a 550°C. En este caso, la probeta fue atacada con Nital durante 20 segundos.

-ANÁLISIS QUÍMICO**Recubrimiento****Tabla 4.9 Análisis químico de la probeta 38 (recubrimiento)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	93.39	97.06
Si	0.22	0.26
Mn	0.75	0.21
Fe	5.64	2.47
Total	100	100

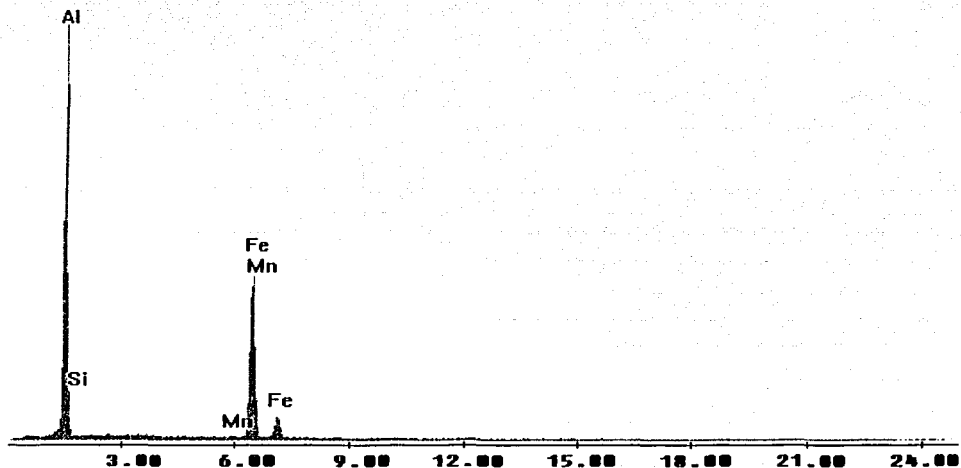
Label A: 38 recubrimiento

Realizado a 400x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Intermetálico**Fase superior****Tabla 4.10 Análisis químico de la probeta 38 (intermetálico superior)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	60.16	75.63
Si	0.25	0.31
Mn	0.26	0.16
Fe	39.04	23.9
Total	100	100

Label A: 38 v Intermetálico superior

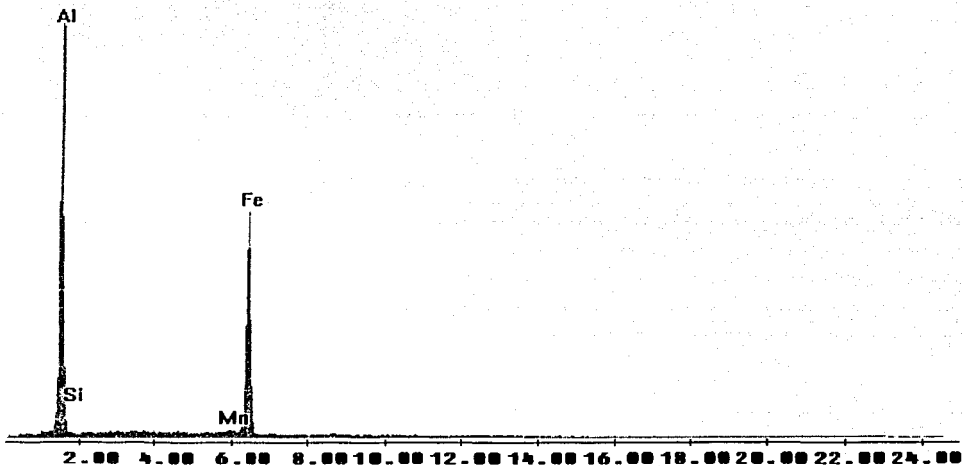
Realizado a 599x. Electrones retrodispersados (BSE), 20.0 KV

Fase inferior

Tabla 4.11 Análisis químico de la probeta 38 (intermetálico inferior)

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	48.50	60.94
Si	0.24	0.31
Mn	0.45	0.30
Fe	50.81	38.45
Total	100	100

Label A: 38 análisis de intermetálico inferior



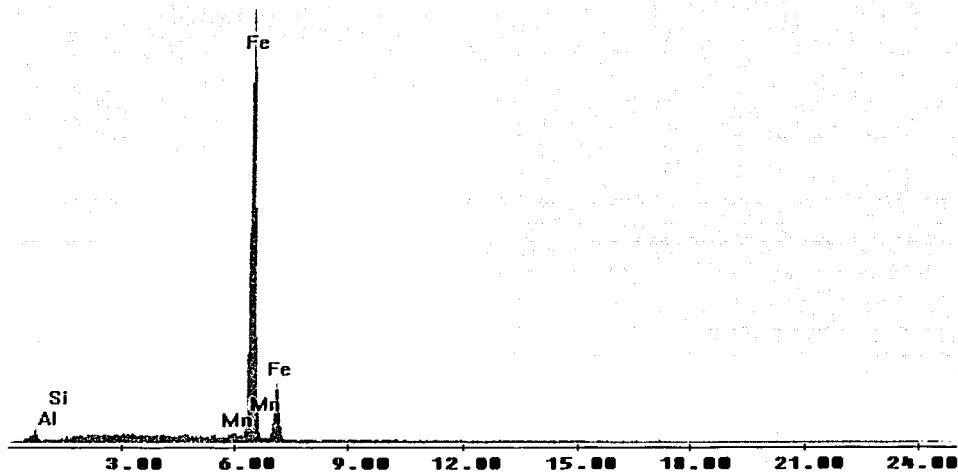
Realizado a 800x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Material base**Tabla 4.12 Análisis químico de la probeta 38 (material base)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	0.4	0.83
Si	0.29	0.58
Mn	0.86	0.87
Fe	98.44	97.72
Total	100	100

Label A: 38 metal base



Realizado a 250x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

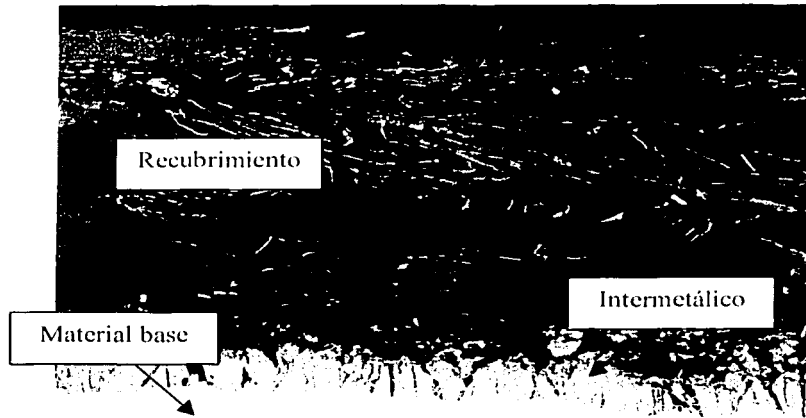
PROBETA 41. Enfriada al medio ambiente, recocida y laminada.**-FOTOGRAFÍAS**

Fig. 4.14. Imagen 41.1 a 200x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C.

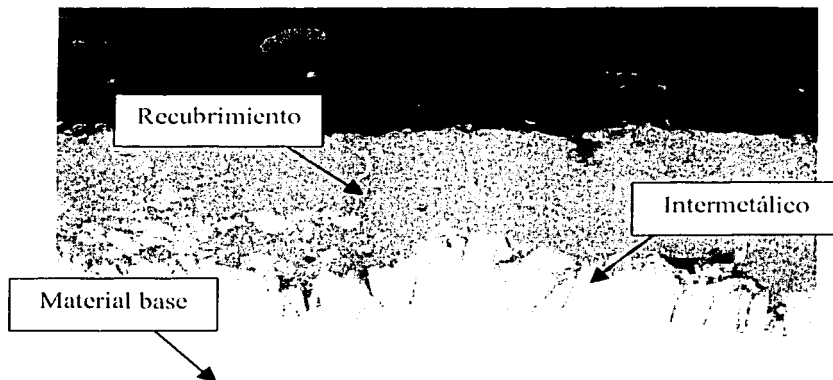


Fig. 4.15. Imagen 41.2 a 400x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C.



Fig. 4.16. Imagen 41.3 a 1500x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C.

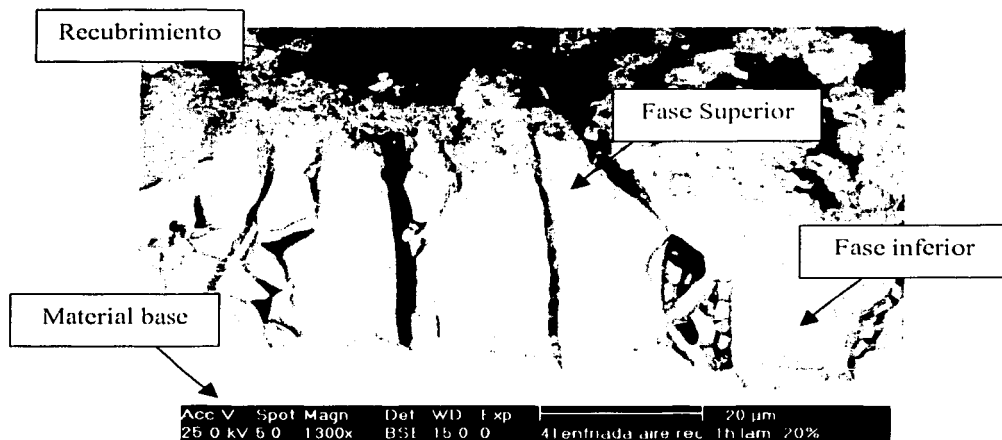


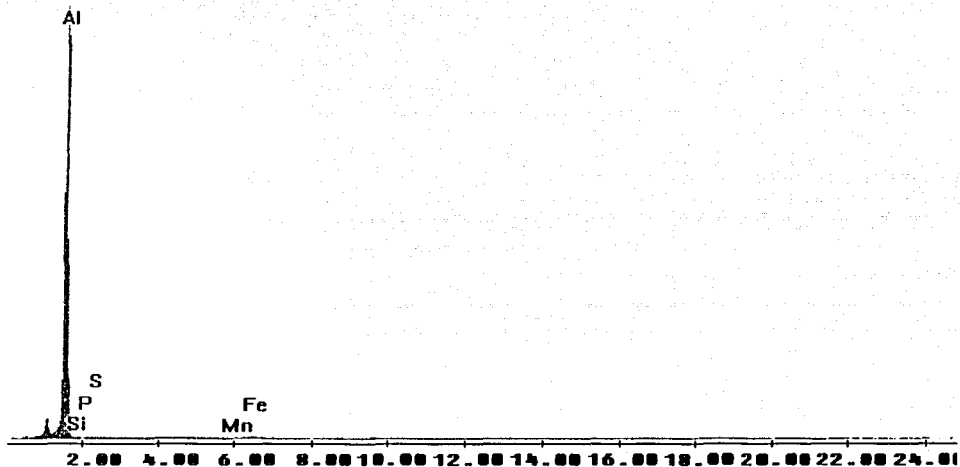
Fig. 4.17. Imagen 41.4 a 1300x (Electrones retrodispersados). Capa intermetálica. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C.



Fig. 4.18. Imagen 41.5 a 1000x (Electrones retrodispersados). Recubrimiento y capa intermetálica. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C.

-ANÁLISIS QUÍMICO**Recubrimiento****Tabla 4.13 Análisis químico de la probeta 41 (recubrimiento)**

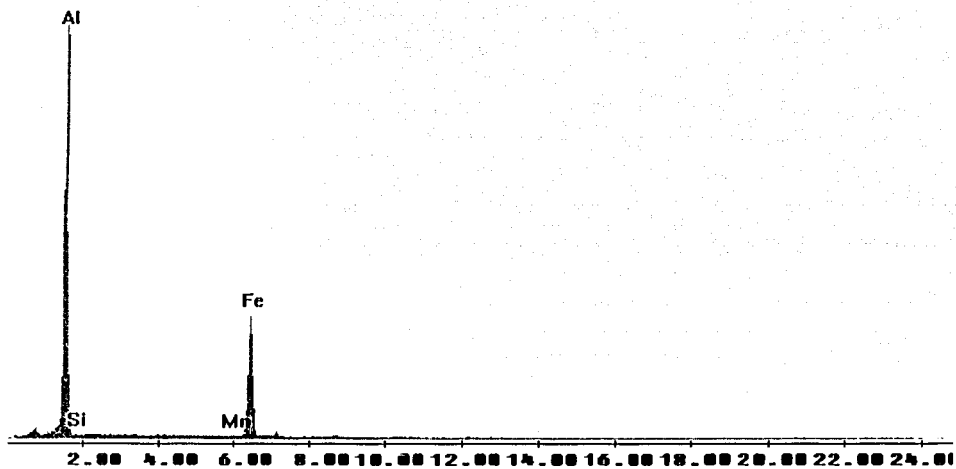
ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	98.93	99.36
Si	0.15	0.16
Mn	0.21	0.11
Fe	0.71	0.37
Total	100	100

Label A: Análisis químico recubrimiento

Realizado a 200x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

Intermetálico**Tabla 4.14 Análisis químico de la probeta 41 (intermetálico)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	54.93	71.11
Si	0.11	0.13
Mn	0.44	0.28
Fe	44.52	28.48
Total	100	100

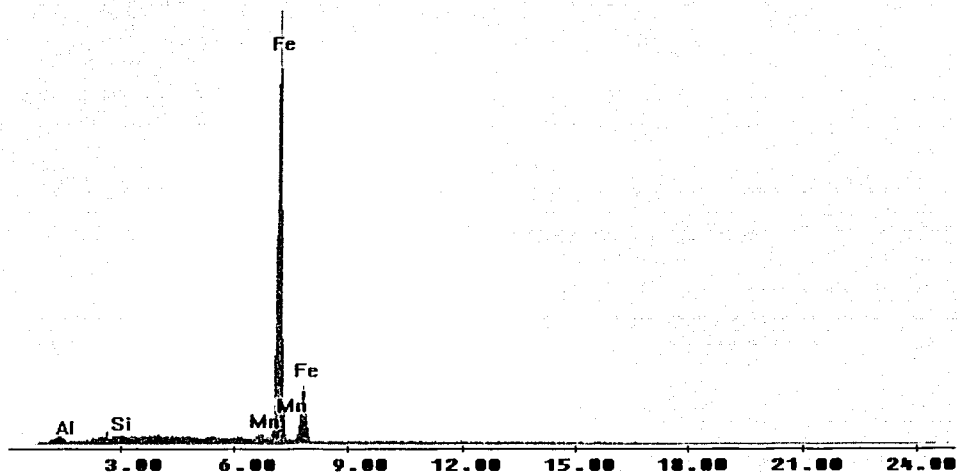
Label A: Análisis químico 41V Intermetálico

Realizado a 1500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Material base**Tabla 4.15 Análisis químico de la probeta 41 (material base)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	1.4	1.43
Si	0.39	0.98
Mn	0.96	0.87
Fe	97.25	96.72
Total	100	100

Label A: 41 metal base

Realizado a 1300x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

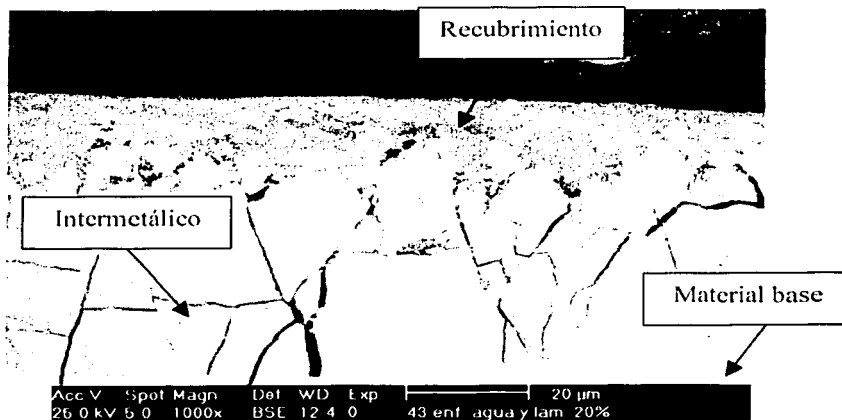
PROBETA 43. Enfriada en agua y laminada**-FOTOGRAFÍAS**

Fig. 4.19. Imagen 43.1 a 1000x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente Probeta enfriada en agua y laminada 20% a 300°C.

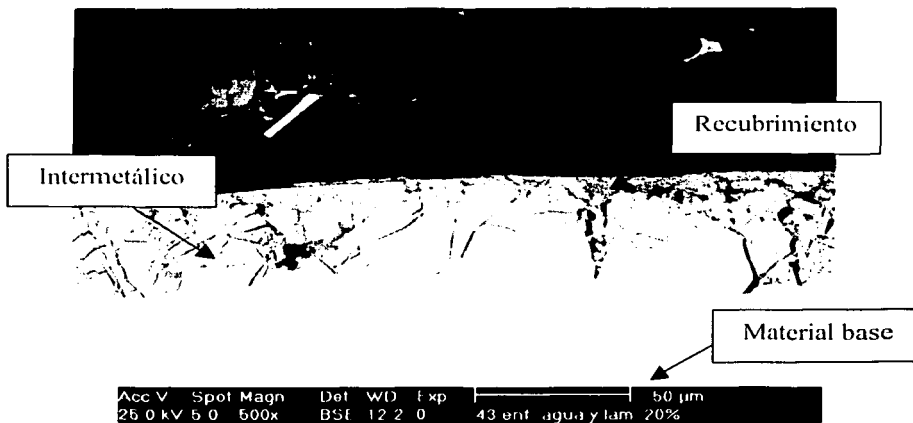


Fig. 4.20. Imagen 43.2 a 1000x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente Probeta enfriada en agua y laminada 20% a 300°C.



Fig. 4.21. Imagen 43.3 a 1500x (Electrones retrodispersados). Recubrimiento, capa intermetálica. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada en agua y laminada 20% a 300°C.

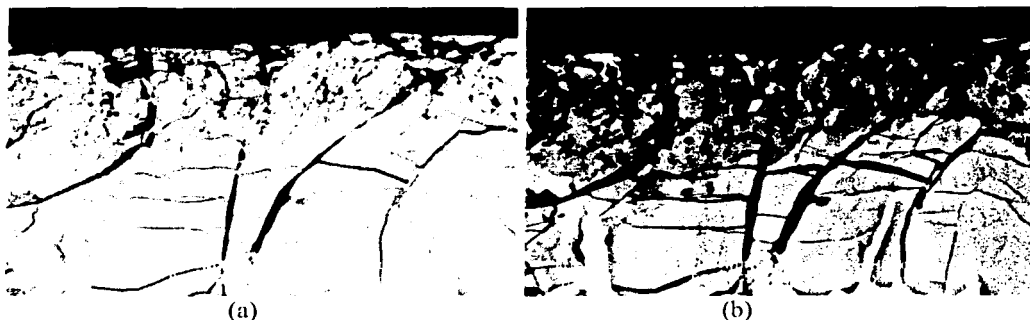


Fig. 4.22. Imagen 43.4 (a) a 2000x (Electrones retrodispersados). Interfase, recubrimiento casi nulo. (b) Misma imagen modificada con alto contraste y menor brillo. Fases presentes en el intermetálico. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada en agua y laminada 20% a 300°C.

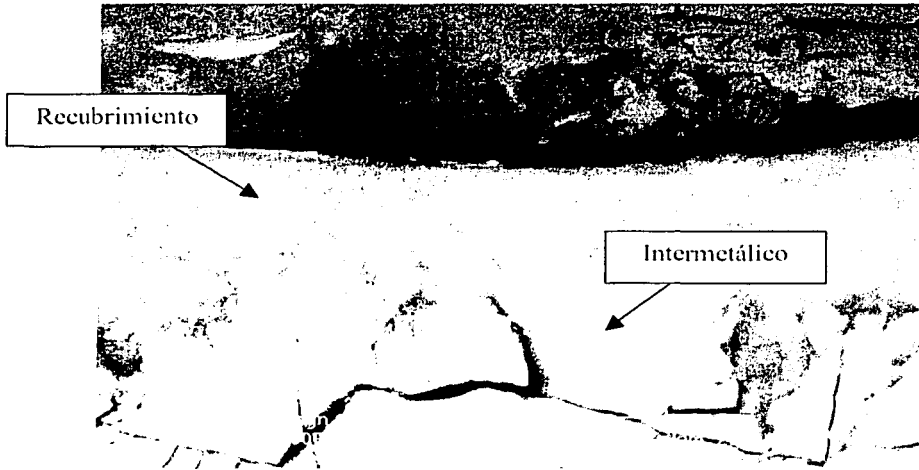
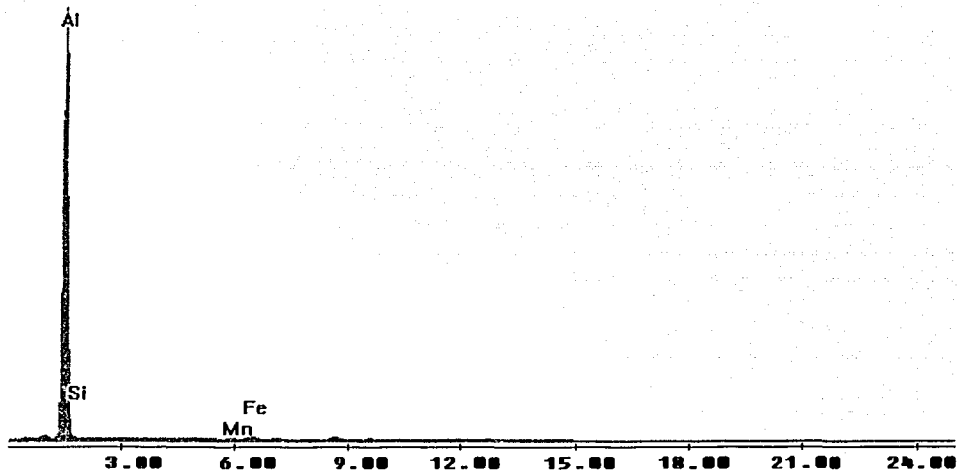


Fig. 4.23. Imagen 43.5 a 2000x (Electrones retrodispersados). Recubrimiento, capa intermetálica. Islas del intermetálico. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada en agua y laminada 20% a 300°C.

-ANÁLISIS QUÍMICO**Recubrimiento****Tabla 4.16 Análisis químico de la probeta 43 (recubrimiento)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	96.36	97.81
Si	0.64	0.65
Mn	0.25	0.13
Fe	2.75	1.41
Total	100	100

Label A: Análisis 43 recubrimiento

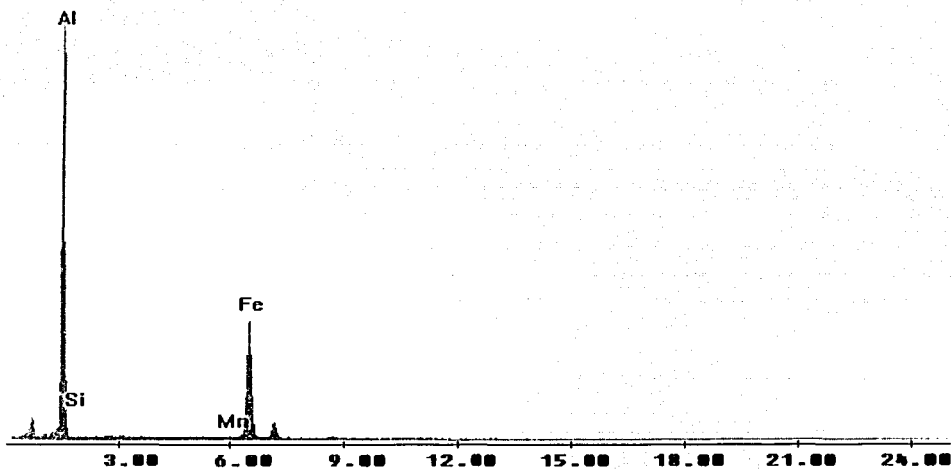


Realizado a 1000x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Intermetálico**Fase superior****Tabla 4.17 Análisis químico de la probeta 43 (intermetálico superior)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	59.64	79.37
Si	0.5	0.36
Mn	0.71	0.31
Fe	39.15	19.96
Total	100	100

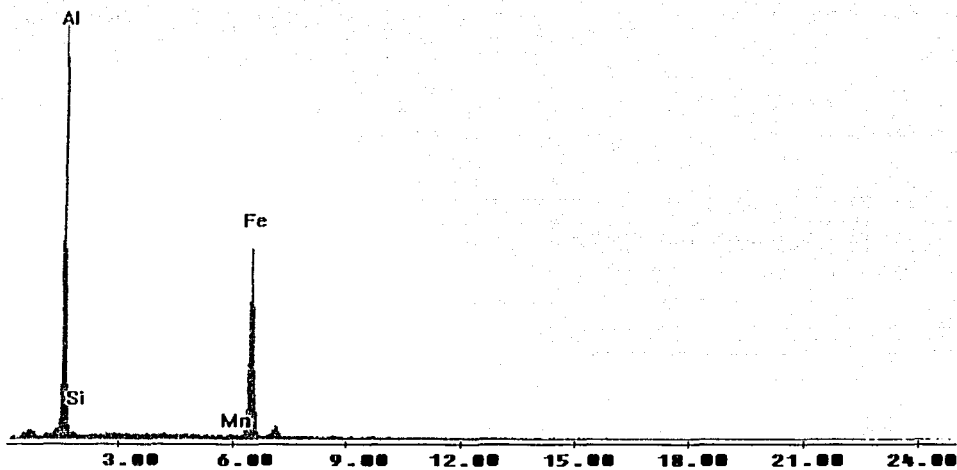
Label A: Análisis 43 fase superior

Realizado a 2000x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Fase inferior**Tabla 4.18 Análisis químico de la probeta 43 (intermetálico inferior)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	48.64	65.97
Si	0.73	0.95
Mn	0.32	0.21
Fe	50.31	32.87
Total	100	100

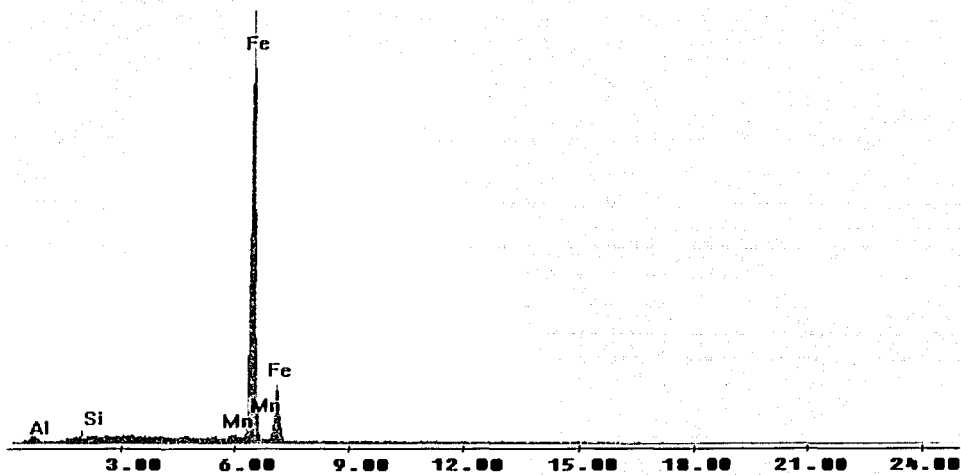
Label A: Análisis 43 fase inferior

Realizado a 2000x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

Material base**Tabla 4.19 Análisis químico de la probeta 43 (material base)**

ELEMENTO	%PESO	%AT
Al	1.16	2.33
Si	0.34	0.33
Mn	1.55	1.87
Fe	96.95	95.47
Total	100	100

Label A: 43 metal base



Realizado a 2000x. Electrones retrodispersados (BSE), 20.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

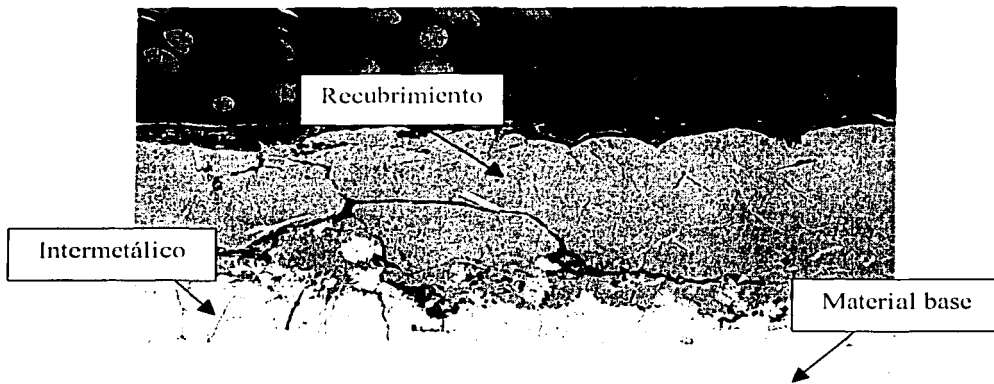
PROBETA 47. Enfriada al medio ambiente y laminada.**-FOTOGRAFÍAS**

Fig. 4.24. Imagen 47.1 a 300x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y laminada 20% a 330 °C.

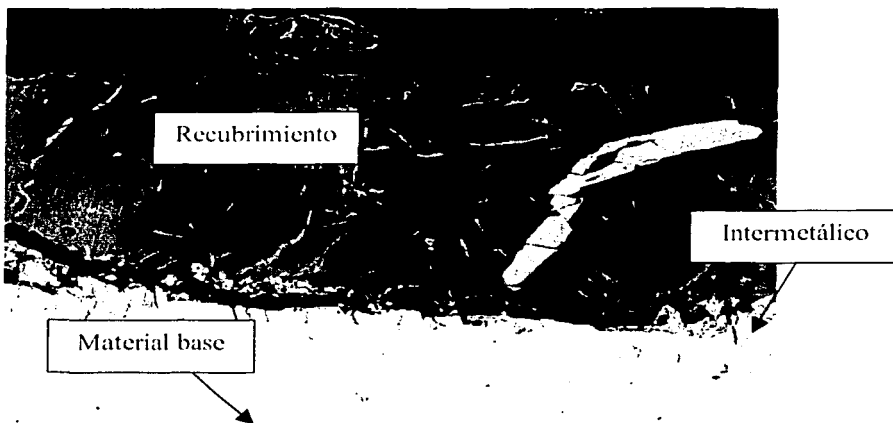


Fig. 4.25. Imagen 47.2 a 300x (Electrones retrodispersados). Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y laminada 20% a 330 °C.

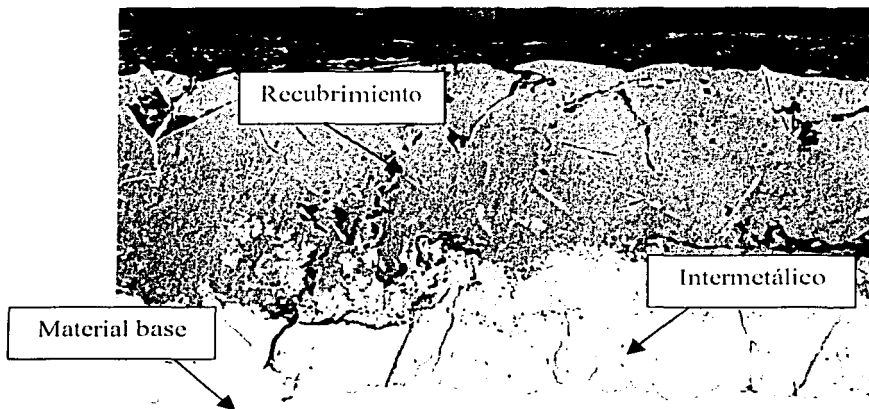


Fig. 4.26. Imagen 47.3 a 500x (Electrones retrodispersados). Vista general. Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Punto de interés en este caso el recubrimiento e interfase. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y laminada 20% a 330 °C.

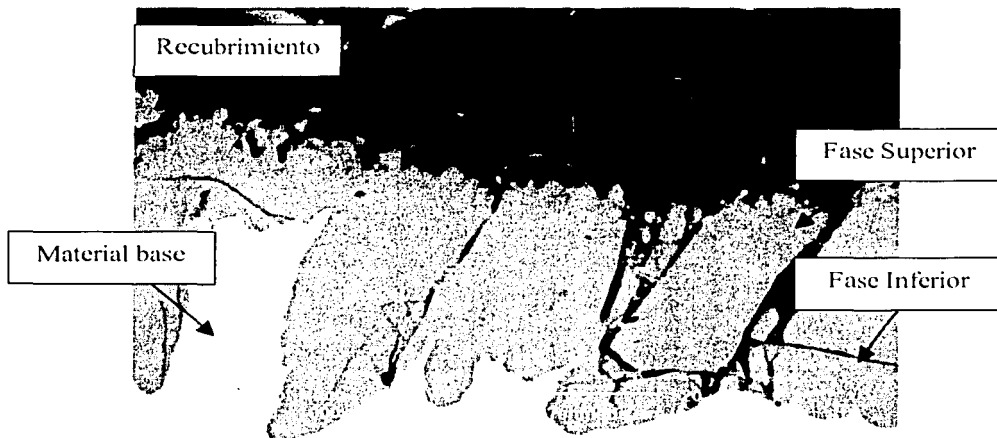


Fig. 4.27. Imagen 47.4 a 1000x (Electrones retrodispersados). Capa intermetálica. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y laminada 20% a 330 °C.

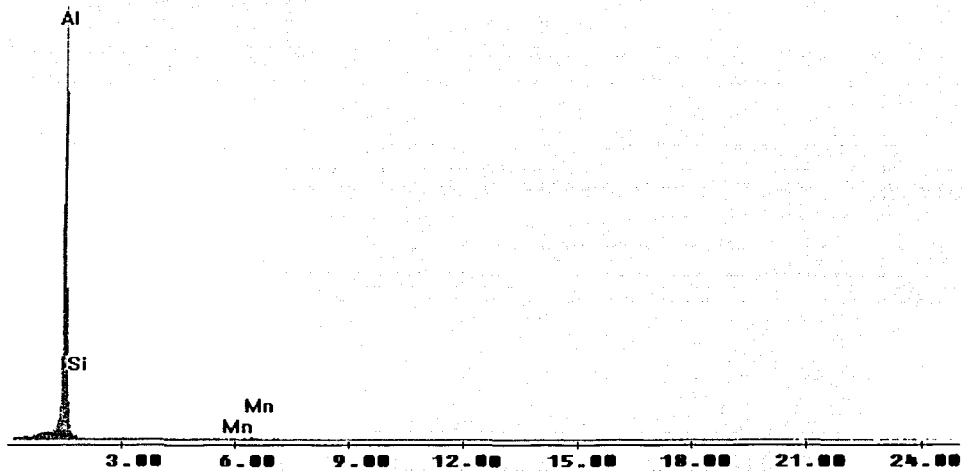


Fig. 4.28. Imagen 47.5 a 500x (Electrones retrodispersados). Recubrimiento, capa intermetálica y material base. Aluminio sobre Acero 1018 por inmersión en caliente. Probeta enfriada al medio ambiente y laminada 20% a 330 °C.

-ANÁLISIS QUÍMICO**Recubrimiento****Tabla 4.20 Análisis químico de la probeta 47 (recubrimiento)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	96.39	97.00
Si	0.26	0.26
Mn	0.15	0.07
Fe	3.20	2.67
Total	100	100

Label A: 47v recubrimiento

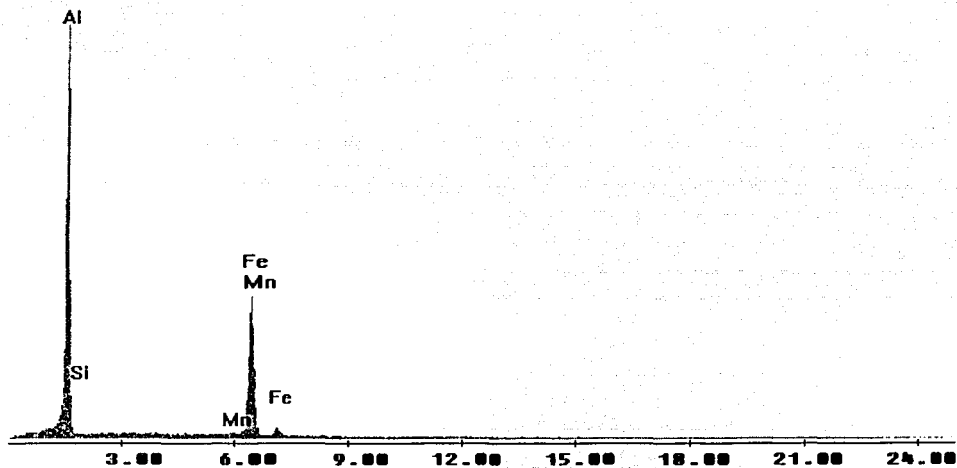


Realizado a 300x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Intermetálico**Tabla 4.21 Análisis químico de la probeta 47 (intermetálico)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	57.37	73.35
Si	0.20	0.14
Mn	0.65	0.41
Fe	41.78	26.1
Total	100	100

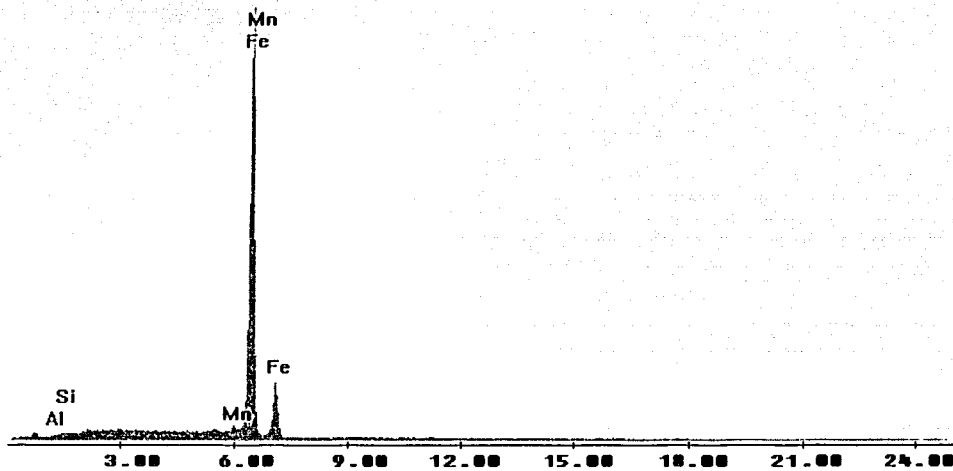
Label A: 47 intermetálico

Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Material Base**Tabla 4.22 Análisis químico de la probeta 47 (material base)**

ELEMENTO	% PESO	% AT
Al	0.34	1.7
Si	0.16	0.33
Mn	1.55	1.57
Fe	97.95	96.40
Total	100	100

Label A: 47 metal base

Realizado a 500x. Electrones retrodispersados (BSE), 25.0 KV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE IMÁGENES.

Dentro de esta sección se analizarán de manera global tanto imágenes como análisis químicos a fin de generar una idea comparativa mas detallada, dando lugar a conclusiones más claras y sencillas en el capítulo siguiente (Capítulo. V - Conclusiones). Podemos iniciar diciendo que de acuerdo a la literatura, las características generales obtenidas en el recubrimiento y en el intermetálico dependerán de: la temperatura y el tiempo a la cual se realice el baño, componentes que se agreguen al baño de aluminio o bien aleantes que contenga el mismo hierro. Por tanto, podemos aseverar, analizando los resultados, que, encontrados en efecto, todo lo anterior se cumple.

Así mismo, de acuerdo al trabajo presentado en el libro Heat treatments and corrosion wear resistance, en el capítulo VIII *Hot-dip aluminised steel strip for corrosion resistant applicattions* , se habla que dentro de los aceros aluminizados se pueden identificar dos tipos, el de grado 1 y el de grado 2. En donde el tipo grado 1 es un acero aluminizado recubierto con una aleación de Al-Si que contiene regularmente de 5 a 11% de Si (rango en el cual se presenta una reducción importante en el espesor del intermetálico), mientras que el tipo grado 2 está recubierto con una capa mucho mas grande de aluminio "puro". En el tipo grado 1 el espesor del recubrimiento total, incluyendo el intermetálico esta dentro de un rango de 14 a 25 μ m, por otro lado el espesor del recubrimiento en el tipo grado 2, supera normalmente las 40 μ m.

De acuerdo a lo anterior y observando que en todas las imágenes el espesor promedio de la capa intermetálica esta alrededor de 50 μ m y que la composición de nuestro Acero (1018) contiene pequeñas cantidades de Si 0.25% y Mn 0.75% , nuestro estudio cae en el caso de grado 2, además de que durante el proceso de inmersión en caliente con aluminio, no fue agregado ningún elemento intencionalmente; algo que corrobora esta información aparte de las imágenes, son los análisis químicos realizados puntualmente en el recubrimiento (en donde el porcentaje en peso del aluminio está entre 91 y 97% , casi puro). En ambos casos alrededor del 2-4% de Fe está presente en el recubrimiento, el cual es Fe disuelto de la probeta de acero y de residuos de baños previos.

El proceso de laminación para las piezas aluminizadas, fue realizado con la intención de dar un mejor acabado y apariencia superficiales; sin embargo este proceso genera la aparición de fracturas y grietas de manera importante en el intermetálico debido a los esfuerzos aplicados durante la laminación y además la fragilidad inherente del intermetálico del recubrimiento el cual tiende a fracturarse en mayor medida debido al espesor mayor del intermetálico. Esto se observa en las figuras de las imágenes 43.1, 43.3, 43.4, 47.1, 47.2 y 47.3. En un caso extremo, la laminación también logra fracturar o agrietar el recubrimiento.

En la probeta 38 se observa que tiene unas características peculiares, tiene un recocido más no un laminado, bien, el recocido en estos casos por lo general se realiza para difundir el aluminio aún más con el acero para evitar lo que le llaman "separación" del recubrimiento produciendo un recubrimiento protector durante el servicio a altas temperaturas, además de que se presenta una estructura de tipo columnar en la interficie del intermetálico y el

material base. En las probetas que no fueron recocidas mas sí laminadas (43 y 47) pueden ser observadas grietas y fracturas, ya que en estos casos existe un desprendimiento del recubrimiento y fracturas en el intermetálico debidas a su fragilidad, por el contrario al analizar la probeta que fue recocida y laminada (41), observamos que no existen este tipo de fracturas en el intermetálico, esto es debido a que el proceso de recocido posterior al aluminizado durante 1 hr, devuelve cierta ductilidad al material, además de permitir cierta difusión del aluminio al acero, aunque este fenómeno se promueve con tiempos mayores de recocido.

Analizando ahora los medios por los cuales fueron enfriadas (al medio ambiente y agua) las probetas 32 y 35, observamos una característica peculiar en la que fue enfriada al medio ambiente (32), ya que existe una fase de intermetálico más homogénea en comparación con la enfriada en agua (35), asumiendo por esto que un enfriamiento al medio ambiente da un mayor tiempo en el acomodo estructural interno así como tiempo para la difusión del aluminio en el acero, aunque un mayor tiempo también promueve el crecimiento de la capa intermetálica, en comparación con la enfriada en agua, la cual no permite el crecimiento de granos en equilibrio.

Las fases, a las que hacemos referencia en la capa intermetálica se pueden observar en la siguiente figura:

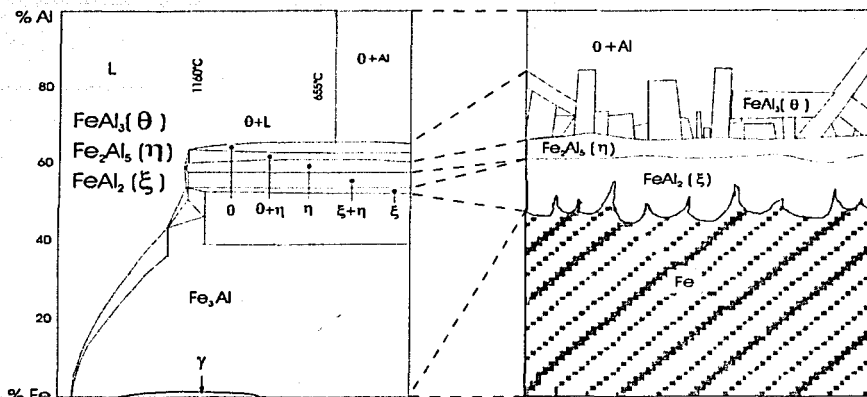


FIG. 4.30. Fases presentes en la capa de aluminizado por inmersión en caliente

la cual relaciona directamente el diagrama de fases Fe-Al con la ubicación de las fases dentro de la capa intermetálica.

Esto se corrobora al observar la siguiente tabla, la cual resume las fases presentes con el peso porcentual del aluminio.

Tabla 4.23. Fases y composición en aleaciones Fe-Al

FASE	COMPOSICIÓN, PESO % AL
(α Fe)	0 a ~ 28
(γ Fe)	0 a 0.6
FeAl	12.8 a ~ 37
Fe ₃ Al	~ 13 a ~ 20
ϵ	~ 40 a ~ 47
FeAl ₂	48 a 49.5
Fe ₂ Al ₅	53 a 57
FeAl ₃	58.5 a 61.3
Al	100

Basándose en los porcentajes obtenidos en los análisis químicos se pueden resumir de acuerdo a los porcentajes en peso del contenido de aluminio, las fases presentes en el intermetálico en la tabla siguiente.

Tabla 4.24. Resumen de porcentajes en peso de aluminio y fases presentes en el intermetálico.

PROBETA	PROCESO POSTERIOR	AL % EN PESO	FASE PRESENTE
32	Enfriamiento al medio ambiente	53.79	Fe_2Al_5
35	Enfriamiento al agua	59.78	$FeAl_3$
		48.30	$FeAl_2$
38	Enfriamiento al medio ambiente y recocida 1 hr a 550°C	60.16	$FeAl_3$
		48.50	$FeAl_2$
41	Enfriamiento al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C	54.93	Fe_2Al_5
43	Enfriamiento al agua y laminada 20% a 300°C	59.64	$FeAl_3$
		48.64	$FeAl_2$
47	Enfriamiento al medio ambiente y laminada 20% a 300 °C	57.37	Fe_2Al_5

En el recubrimiento se encontraron porcentajes de Aluminio entre 90 – 98 % y en el material base del 0.0 – 1.43%.

En el intermetálico, se encuentran distintos compuestos Al-Fe, con distinta composición, según estén próximos al aluminio o al acero base, de acuerdo a esto se puede decir que las fases con una mayor composición de Fe serán más duras.

4.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN.

Como bien lo mencionamos en el capítulo anterior, estos resultados los mostraremos mediante las lecturas que se hicieron a lo largo del ensayo en la cámara de niebla salina (Tabla 4.25) . Por otro lado, generaremos resultados comparativos por medio de la gráfica 4.3 y ayuda de la tabla 4.26 para que de esta forma obtengamos una visualización más amplia de lo que representó el fenómeno de corrosión en cada una de las probetas.

TABLA 4.25 PESO DE LAS PROBETAS ANTES Y DESPUÉS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN

NÚMERO DE LA PROBETA	NOMBRE DE LA PIEZA	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	DIFERENCIA DE PESO (g)
1	32	8.5250	8.5098	0.0152
2	35	8.4104	8.3990	0.0114
3	38	8.6653	8.6562	0.0091
4	41	8.4065	8.4005	0.0060
5	43	8.4930	8.4737	0.0193
6	47	8.4176	8.4160	0.0016
7	ACERO 1018	9.1378	9.0478	0.0900

Grafica 4.3 Diferencias en peso de las probetas aluminizadas

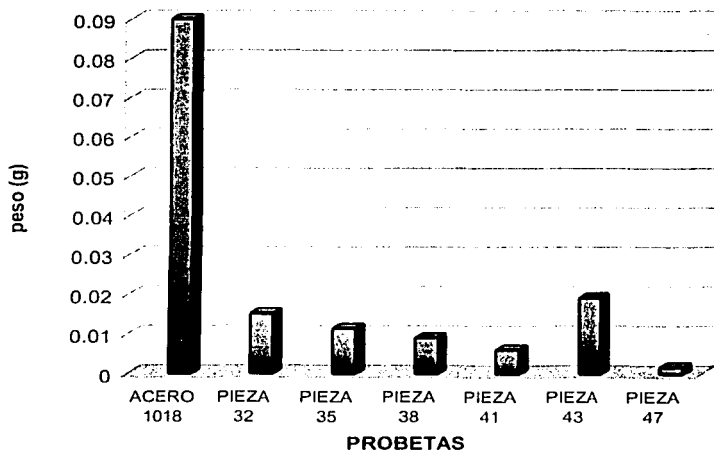


Tabla 4.26. Probetas

PROBETA	PROCESO POSTERIOR
32	Enfriamiento al medio ambiente
35	Enfriamiento al agua
38	Enfriamiento al medio ambiente y recocida 1 hr a 550°C
41	Enfriamiento al medio ambiente, recocida 1 hr a 550°C y laminada 20% a 300°C
43	Enfriamiento al agua y laminada 20% a 300°C
47	Enfriamiento al medio ambiente y laminada 20% a 300 °C

En seguida se muestran algunas fotografías que evidencian el proceso de corrosión que tuvo lugar:

El aluminizado

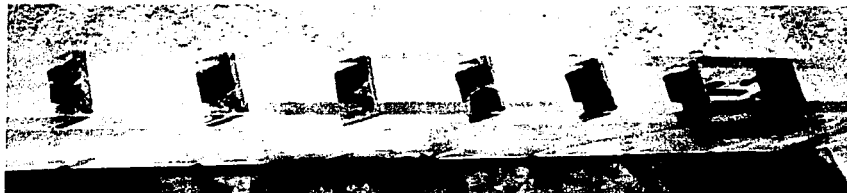


Fig. 4.31. Fotografía 1 . Probetas Aluminizadas a 5 días de exposición al ambiente salino.

El Acero 1018 sin recubrimiento.



fig.4.32. Fotografía 2. Probeta de Acero 1018 sin recubrimiento, luego de 2 días al ambiente salino.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 4.33. Fotografía 3. Probeta de Accro 1018 sin recubrimiento, luego de 5 días al ambiente salino.



Fig. 4.34. Fotografía 4. Probeta de Accro 1018 sin recubrimiento, luego de 8 días al ambiente salino.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4.4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE CORROSIÓN.

En éste caso, como era de esperarse después del experimento al cual fueron sometidas las probetas aluminizadas y la probeta de acero 1018 (sin recubrimiento), las probetas protegidas con el recubrimiento de aluminio pierden menos peso (independientemente del proceso posterior utilizado para el recubrimiento) que el acero 1018, dicho en otras palabras, se corroe menos que el acero. Esto puede ser observado claramente en la tabla 4.25 y en la grafica 4.3 en donde la probeta de acero no protegida, presenta un pérdida de peso de 0.9 g. en 8 días de exposición a un ambiente salino, lo cual representaría 4.1 gramos al año de una pieza que inicialmente pesó 9.137 g.

Sabemos que en efecto el aluminio al estar en contacto con el medio ambiente produce en su superficie una capa de óxido (Al_2O_3), sin embargo la oxidación (primera capa formada), no es un problema ya que forma un producto de protección debido a la característica que tiene ésta (adherente y no porosa) , la cual actúa como una barrera contra una corrosión mayor y previene así un ataque al metal base o un ataque interno al aluminio. Esto se debe a la reacción fisicoquímica que surge en el aluminizado en donde el aluminio al difundirse en el hierro hace que el material férreo adquiera propiedades superficiales equivalentes al del aluminio logrando así reunir en un material una buena resistencia frente a determinados medios corrosivos (recordando que en ocasiones la oxidación se acentúa con altas temperaturas) y con las buenas características mecánicas del material base.

Debemos recordar que la oxidación que presenta el hierro no es un medio de protección a éste, debido a las características de la capa que se le forma, pues ocupa un gran volumen el óxido sin embargo se desprende de la superficie, exponiendo al metal fresco que se continúa oxidando.

Analizando los resultados obtenidos en el experimento de corrosión, se puede asociar cada probeta, así como el tipo de enfriamiento seleccionado y el proceso posterior aplicado, con el comportamiento particular que tuvo durante la prueba y se observa que las probetas que están enfriadas al medio ambiente (32, 38, 41 y 47) independientemente del proceso posterior (laminado o recocido) tienen un buen comportamiento durante la prueba, esto debido a que este tipo de enfriamiento lento da más tiempo para que exista un acomodo homogéneo en el recubrimiento y una mayor difusión del aluminio al acero, aunque de estas probetas las que fueron también laminadas (41 y 47) presentan un mejor desarrollo durante la prueba, ya que se encuentran entre las probetas que perdieron menos peso.

Por el contrario las probetas que son enfriadas en agua (35 y 43), tuvieron una pérdida de peso mayor comparada con las probetas similares enfriadas al medio ambiente, debido a que el enfriamiento rápido hace que el material no tenga un acomodo interno el cual se propicia con el tiempo y una mayor difusión del aluminio al acero, y además que tenga más energía almacenada provocando que el material sea mas duro y frágil y por ende el recubrimiento sea menos homogéneo. Estos factores propician que el ataque al recubrimiento sea mucho mas intenso y localizado.

Si se observan estos resultados desde el proceso de laminado (41, 43 y 47) se observa que esta deformación produce un agrietamiento en la fase del intermetálico el cual puede llegar hasta la zona del recubrimiento o bien generarse en el mismo recubrimiento desde el inicio de este proceso, provocando así una mayor posibilidad de que se inicie la corrosión, en estas zonas, que aunque las fracturas y grietas existen, las probetas 41 y 47 son las que perdieron menor peso, posiblemente porque su recubrimiento se compacta y los granos se alargan. En el caso de la pieza 47 se obtuvo una pérdida de peso de 0.016 g en ocho días de exposición al ambiente salino, así podemos calcular que la pérdida en un año será de 0.073 gramos, en una pieza que pesó inicialmente 8.4176 g.

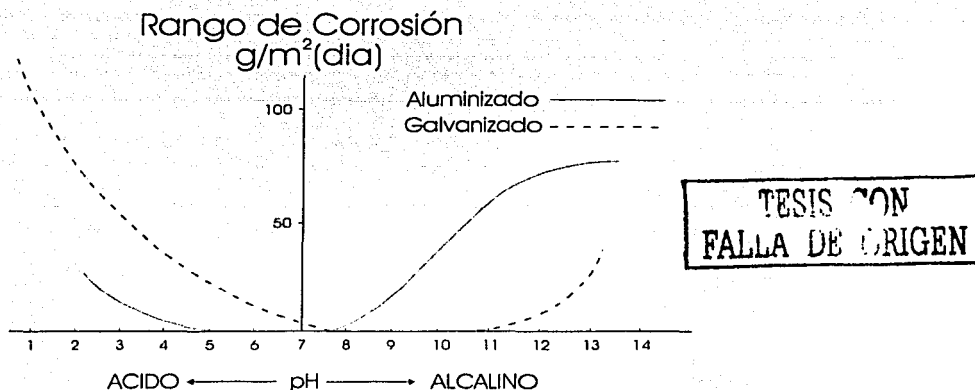
Entre las probetas que perdieron mayor peso comparativamente con las probetas obtenidas con procesos posteriores (como vimos ya en el párrafo anterior), se encuentra principalmente la probeta 43, la cual fue enfriada en agua y laminada 20%, esta probeta obtuvo un espesor del intermetálico pequeño, que aunque el recubrimiento de aluminio "puro" tuvo casi 26µm es heterogéneo a lo largo de la superficie recubierta, así que en muchas zonas la capa intermetálica se encuentra en contacto con el medio ambiente, debido a esto los compuestos Al-Fe estuvieron en contacto con el ambiente salino sin la presencia de una capa protectora de Al puro que se pasaría y detendría el proceso de corrosión, así se puede explicar la pérdida de peso de 0.0193 gramos en ocho días dando como resultado 0.88 g en un año, con una pieza de peso inicial de 8.493 g. Otro factor por el cual existe una pérdida de peso mayor en comparación de las otras probetas es por la enorme presencia de grietas y fracturas en el intermetálico provocadas por el proceso de laminación, las cuales propician la corrosión ya que en esta probeta el espesor del recubrimiento es menor que en otras probetas, como se mencionó anteriormente; de igual forma podemos decir que este inicio de fracturas pueden ser acentuadas por el proceso de enfriamiento que se utiliza después de que la probeta es aluminizada.

Por último, analizando las probetas 38 (enfriada al medio ambiente y recocida) y 41 (enfriada al medio ambiente, recocida y laminada), se encuentra que estas probetas no tienen una pérdida de peso tan radical como la probeta 32 (enfriada al medio ambiente) y la 47, si decimos que es un resultado mas objetivo y con mayores ventajas; lo antes dicho es debido a que en ambos casos las piezas después de ser enfriadas al medio ambiente recibieron un tratamiento térmico (recocido), el cual permite una mayor difusión del aluminio al acero evitando el "desprendimiento" del recubrimiento, además produce un recubrimiento con mayor capacidad de resistencia a altas temperaturas.

En seguida se plantea (basándose en un artículo presentado en el libro *COATINGS AND SURFACE TREATMENT FOR CORROSION AND WEAR RESISTANCE*. Varios. Ed. K. N. Strafford, P. K. Datta y C. G. Googan. Publicaciones Ellis Horwood limited, Birmingham U.K. 1984) de manera breve algunas características que llega a presentar el aluminizado, las ayudaran a abundar este trabajo. El acero aluminizado tiene una buena resistencia a la intemperie y a ambientes con elevadas temperaturas, manteniendo el brillo metálico en la superficie a temperaturas de 500 °C por largos periodos de tiempo. Incluso a temperaturas más altas, donde estas traen consigo la conversión de cualquier aluminio libre de la superficie en compuestos Fe-Al y soluciones sólidas del aluminio en el acero, es mucho mas resistente a la oxidación que el acero sin recubrimiento, y es posible exponerlo por

encima de los 700°C sin que exista fallas en el acero del sustrato. Además, el acero aluminizado no sufre de un crecimiento en los problemas asociados con la fragilidad intergranular, los cuales fueron reportados para el acero galvanizado(2).

El comportamiento general del acero aluminizado contra la corrosión a elevadas temperaturas es mostrado en la gráfica 4.4, en donde se observa que el acero aluminizado se comporta mejor en ambientes ácidos mientras que el acero galvanizado se comporta mejor en ambientes alcalinos.



Gráfica 4.4 Resistencia a la corrosión del acero recubierto para diferentes valores de pH

A pesar de que el aluminio es anódico para el acero y se esperaría que protegiera el acero base en forma de sacrificio, de manera similar al recubrimiento de zinc, pero en la práctica la película de óxido desarrollada en la superficie del aluminio pasiva al mismo y actúa como una barrera entre el sustrato de acero y el ambiente.

Únicamente en ambientes destructivos de la película de óxido, tales como los que contienen altas concentraciones de cloro, el aluminio será capaz de proveer protección electroquímica al acero. Cuando el sustrato de acero que fue aluminizado es expuesto, ya sea por algún borde o discontinuidad en el recubrimiento, al ambiente, puede existir la corrosión.

Existe un estudio realizado en Inland Steel Research Laboratories, considerado uno de los mas extensos estudios de resistencia a la corrosión del acero aluminizado y galvanizado, el cual midió el comportamiento corrosivo, tanto en pruebas enterradas como a la intemperie abierto, de paneles de acero aluminizado y galvanizado. Las exposiciones fueron obtenidas en ambientes industriales, semi-industriales y marino, por un periodo mayor a 5 años.

(2)- R. J. Schmitt y J. H. Rigo, Materials. Protection, 1966

Se encontró que en cualquier caso de corrosión, el comportamiento puede ser representado por la ecuación:

$$W = K t^N$$

Donde : W = peso perdido (g/m²)
 t = Tiempo de exposición (años)
 K,N = Constantes empíricamente determinadas

En la tabla 4.27 se resumen los pronósticos de pérdida de peso en 10 años, tanto para exposición enterrada, como para cielo abierto, en tres ambientes

Tabla 4.27 Predicciones para 10 años de pérdida de peso (g/m²) para paneles de acero recubiertos

PROCESO	SEMI-INDUSTRIAL		INDUSTRIAL		MARINO	
	intemperie	enterrada	intemperie	enterrada	intemperie	enterrada
Galvanizado	121.6	37.3	290.1	137.0	103.3	55.2
Aluminizado (grado 2)	8.7	9.0	10.5	11.2	11.6	17.9

Algunos puntos que deben ser remarcados son:

- Existe una mayor resistencia a la corrosión del acero aluminizado sobre el acero galvanizado, exceptuando en ambientes marinos, en donde ambos grados de corrosión son similares.
- A diferencia del acero galvanizado, el acero aluminizado se corroe en mayor grado en pruebas enterradas que en pruebas a la intemperie debido a que estas superficies mantienen la humedad por un tiempo mas largo que a la intemperie (3).

Una comparación más reciente del comportamiento contra la corrosión del acero aluminizado y galvanizado fue reportada en los Estados Unidos por la A.S.T.M., en donde se reporta: "...la mayoría de los paneles galvanizados mostraban oxidación al final del periodo, pero en contraste el desarrollo de las hojas aluminizadas fue consistentemente bueno, y sin falla reportable de degradación en el espesor, mas allá de mínimas picaduras, que no pueden ser medidas incluso después de 20 años de exposición".(4)

(3)- R. A. Legault y V. P. Pearson, Reporte: The Atmospheric Corrosion of Galvanized and Aluminised Steel. 1976
 (4)- D. E. Tonini, A.S.T.M. Spec. Tech. Publication 767, 1982

Otro estudio de exposición al ambiente obtenido en el Instituto Sueco de Corrosión., también mostró después de un periodo relativamente breve de exposición que el acero aluminizado tiene significativamente mayor resistencia a la corrosión que el acero galvanizado, excepto, en un ambiente marino.(5)

La resistencia que presenta una pieza aluminizada en un medio marino, es por mucho, mayor en comparación con un acero no recubierto, o con un acero galvanizado, enseguida se presenta una tabla, en donde se presentan los tres casos.

Tabla 4.28 Diferencia de peso en un acero: Aluminizado, galvanizado y sin recubrir.

Recubrimiento	Pérdida de peso (g/m ²)		
	8 días	1 año	10 años
Aluminizado	0.025	1.140	11.6
Galvanizado	0.226	10.311	103.3
Acero sin recubrir	11.11	506.89	5068.93

4.5 ANÁLISIS DE COSTOS

En los costos también existen diferencias, por ejemplo en España, para recubrir una placa de acero de 3 mm de grosor (aproximadamente 1/8", que es nuestro caso) y depositar una capa de 100 micras, en el caso de ser Aluminizado, el precio es de: \$5.2 (0.52 €) y el precio para ser Galvanizado es de: \$4.2 (0.52 €), en ambos casos el precio es por Kg. de acero. Por tanto si se relacionan las condiciones en que en México se venden las placas, tenemos que una placa de lámina negra (acero 1010) de 1/8 " de 1.22 x 3.05 m pesa aproximadamente 92 Kg., se tendría entonces que:

Tabla 4.29 Precios de recubrimiento Aluminizado y galvanizado.

Recubrimiento	Precio sin IVA
Aluminizada	\$478.40
Galvanizada	\$386.40

La diferencia que se presenta en ambos procesos en este país, no es muy grande (de \$92.5), por tanto podría tomarse como una buena vía la elección de el proceso de Aluminizado, por desgracia en nuestro país aun no se desarrolla este proceso de manera comercial y la idea de importar podría considerarse como una alternativa. Por otro lado el galvanizado en México tiene el mismo precio que en España, pero el espesor que se maneja aquí como mínimo es de 65 a 70 micras y como máximo llega a ser entre 140 y 160 micras, en estos últimos casos se duplica el precio, estaríamos hablando de \$772.80 + IVA.

En México una lámina de acero inoxidable 304 con las mismas características que se han mencionado, su valor es de \$21.32 + IVA por Kg. y la lámina pesa 95 Kg. Los precios de la lámina de acero inoxidable 304, el de una lámina galvanizada con las mismas

(5).- Idem Op.Cit.

características que la del acero inoxidable (excepto un poco los calibres, pero estos se especifican en la tabla 4.30), una lámina acanalada galvanizada y una lámina sin recubrimiento, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.30 Precios laminas con distintos recubrimientos.

Lámina	Precio sin IVA
Acero inoxidable 304	\$2025.40
Galvanizada (calibre 12)	\$570.00
Acanalada galvanizada (calibre 26)	\$200.40
Lámina negra	\$555.00

Los datos de la tabla anterior podrían en determinado momento ayudar a una mejor elección o comparación con una lámina aluminizada, recordando que se debe tomar en cuenta los gastos por importación que se tendrían en esta, ya que este proceso actualmente no se realiza en México de manera comercial.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Podemos iniciar diciendo que los objetivos se cumplieron ya que se hizo la caracterización y evaluación de la resistencia a la corrosión a todas las probetas (32, 35, 38, 41, 43 y 47) arrojándonos diversos resultados en cada una de las pruebas realizadas (analizados ya en el capítulo anterior). Así que en este capítulo, solo resta manifestar comentarios generales acerca de los procesos utilizados, apoyándose en los análisis de resultados.

- Como primer punto, se puede decir que un proceso de aluminizado por inmersión en caliente, con un enfriamiento rápido o en agua (piezas 35 y 43 ésta última laminada) provoca en las piezas características no deseables, como la formación de un recubrimiento poco homogéneo y un intermetálico más frágil en comparación con el obtenido mediante el enfriamiento al medio ambiente.
- Otro punto que es de suma importancia, es la relación que existe entre el tipo de enfriamiento utilizado, y las fases presentes en el intermetálico; así pues, se encontró que las piezas que son enfriadas al medio ambiente (32, 38, 41, 47) presentan principalmente la fase Fe_2Al_5 y las que son enfriadas al agua (35 y 43) presentan la fase FeAl_3 , cabe mencionar que la fase FeAl_2 se encuentra en ambos casos. Encontrándose así, que las fases presentes Fe_2Al_5 tienden a ser más duras que la fase FeAl_3 .
- Al laminar, se observaron problemas de fracturas y grietas en el intermetálico (esto es más notorio en la pieza 43, la cual es enfriada en agua), pues como se sabe, el intermetálico por naturaleza es duro y frágil y al aplicársele este proceso, se produce un mayor impacto en esta zona, generando puntos donde se inicia la corrosión.
- Dentro de las ventajas que se presentan al aplicar el proceso de laminación, es una mayor dureza en el intermetálico y un mejor acabado en el recubrimiento (piezas 43 y 47 enfriada al medio ambiente), sin embargo el recubrimiento sufre una disminución considerable en su espesor. Por tanto es importante decir, que el recubrimiento resiste moderadas operaciones de laminación (al igual que podría ser extruido o bien repujado).
- El proceso de recocido generó resultados importantes en el Aluminizado, pues gracias a éste, se produce una mayor difusión del Al hacia el Fe (38), logrando minimizar el desprendimiento del recubrimiento, además, al aplicársele un proceso de laminación posterior, éste no provoca tantos daños en el intermetálico (41) a diferencia de las piezas que no fueron recocidas inicialmente (43 y 47).

- Los análisis químicos obtenidos en cada pieza, aseveran que el proceso de Aluminizado es fiable, pues permite corroborar los rangos de las composiciones tanto del Fe y del Al, que deben tener tanto el recubrimiento, el intermetálico (sus fases) y el material base; esto se confirma con el diagrama de fase Al-Fe, por tanto se recomienda ampliamente seguir los pasos y condiciones que se proponen en este trabajo si se desea aluminizar alguna pieza por inmersión en caliente, considerando las variantes del proceso (enfriamiento, tratamiento térmico y maquinado) como parámetros para obtener características especiales como espesor, dureza y homogeneidad del recubrimiento, composición, espesor y dureza del intermetálico,
- Se encontró que las piezas recocidas como la enfriada al medio ambiente (38) y la enfriada al medio ambiente y laminada (41), presentan mayores beneficios que se traducen en un recubrimiento homogéneo y en una mayor resistencia a la corrosión.
- A través del ensayo de corrosión se comprobó que la resistencia que presenta una pieza aluminizada por inmersión en caliente en un medio marino, es mejor que la que presenta un acero no recubierto bajo las mismas condiciones y esto se observa en la tabla 5.26.
- Las predicciones obtenidas con base en los resultados de pérdida de peso y datos obtenidos de la bibliografía, colocan en un orden superior al proceso de Aluminizado, con respecto al galvanizado, sometidos a un medio marino (tabla 5.28).
- En muchas ocasiones el proceso para aluminizar resulta a primera vista, ser costoso pero conforme el tiempo pase, se verán los beneficios contra el desgaste y la corrosión, así, el ahorro será mayor, que escoger un proceso mas barato.

Con lo antes expuesto, se tiene un estudio general de las características del proceso de Aluminizado, incluso de los procesos posteriores, ya sea un tratamiento térmico o de un proceso de laminación, así como de los efectos químicos y físicos que se pueden presentar en la estructura del material; con esto y lo anteriormente mencionado, se puede seleccionar con mayor seguridad el proceso, las condiciones y los procesos posteriores que convengan para el trabajo al que la pieza será sometida.

BIBLIOGRAFÍA

1.- CIENCIA DE MATERIALES: SELECCIÓN Y DISEÑO.

Pat L. Mangonon

Prentice Hall. 1ª Edición. 2001 México.

2.- TECNOLOGÍA DE LOS METALES

A. Milashev - G.Nikolaiev- Y.Shuvalov

Ed. LIMUSA. 8ª Edición. 1994 México.

3.- SEGUNDO CURSO DE CIENCIA E INGENIERIA DE LA SUPERFICIE DE LOS MATERIALES METALICOS . Autores Varios.

Ed. CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas)

CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas)

1ª Edición. 1996 España.

4.- RECUBRIMIENTOS DE LOS METALES

Pere Molera Solá

Ed. Alfaomega . 1999 Colombia.

5.- METALURGIA GENERAL

J. Bénard , A. Michel

Ed. Hispano Europea . 1973 Barcelona España

6.- INTRODUCCIÓN A LA METALURGIA FÍSICA

Sydney H. Avner

Ed McGraw-Hill.2ª Edición. 1988 México.

7.- METALS HANDBOOK . ALUMINUM COATING OF STEEL.

Por el Comité de ASM en recubrimiento de Aluminio sobre Acero

Edit. American Society for metals. Vol. 5 9ª Edición. PAG 333-341.E.U.A. 1982

8.- COATINGS AND SURFACE TREATMENT FOR CORROSIÓN AND WEAR

RESISTANCE. Varios. Ed. K. N. Strafford, P. K. Datta y C. G. Googan. Publicaciones

Ellis Horwood limited. Birmingham U.K. 1984

9.- ALLUMINUM, ALLUMINUM ALLOYS. ASM International. USA 1994

10.- MANUAL DEL INGENIERO MECÁNICO. MARKS. Tomos I y II Ed. McGraw-Hill/Interamericana de México. México, 1995.

11.- REPORTE: THE ATMOSPHERIC CORROSION OF GALVANISED AND ALUMINISED STEEL R. A. Legault y V. P. Pearson, USA, 1976.

12.- A.S.T.M. SPECIFICATIONS .D. E. Tonini, Tech. Publication 767, USA, 1982

13.- MATERIALS. PROTECTION . R. J. Schmitt y J. H. Rigo, USA , 1966

14.- CORROSION ENGINEERING. M.G. Fontana y N.D. Greene. McGraw-Hill, Nueva York, 1976